

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA

COHORTE 2019

TEMA:

**“PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA Y REFUERZO DE FIBRA DE
VIDRIO PARA SU USO EN FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D”**

Trabajo de titulación

Previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención
Manufactura

Autor: Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez

Director: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg

Ambato – Ecuador

2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación presentado, previo a la obtención del título Magister en Mecánica Mención Manufactura. Con el tema: **“PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO PARA SU USO EN FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D”**; Elaborado por el Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez, con cédula de identidad C.I. 1803727229 Maestrante de la MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019 de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente Trabajo de Titulación es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

C.I.: 0501500771

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: **“PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO PARA SU USO EN FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D”**; le corresponde exclusivamente al Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez, Autor bajo la Dirección del Ing. Segundo Manuel Espín Lagos Mg., Director del Trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez

C.I.: 1803727229

AUTOR

Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

C.I.: 0501500771

TUTOR

DERECHOS DEL AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de Investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez

C.I.: 1803727229

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación presidido por el Ingeniero Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. Jorge Enrique López Velástegui, Mg., Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO PARA SU USO EN FILAMENTO DE IMPRESIÓN 3D”, elaborado y presentado por el Ing. Edmundo Sebastián Villegas Suárez, para optar por el Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención Manufactura; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.
Presidente del Tribunal

Ing. Jorge Enrique López Velástegui, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, Mg.
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia, en especial a mi esposa Maricela por su apoyo incondicional, de igual manera a mi hija Brittany Ariana; el amor incondicional que me brindan, forja en mi fuerza y valor para seguir progresando cada día.

A mis padres por enseñarme la perseverancia y constancia para conseguir cada uno de mis objetivos y metas planteadas, con sus valores inculcados en mí, he logrado alcanzar mis sueños.

Agradezco a Dios por darme la salud y la vida para estar con mi familia llenándoles de amor y cumpliendo cada una de nuestras metas.

A mis Docentes, amigos, compañeros con quienes he compartido momentos únicos, tanto en el trabajo como en el aula; gracias por sus conocimientos y experiencia que me ayudan cada día a ser mejor.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, a sus Autoridades, personal Administrativo y cuerpo Docente por ser los promotores de esta Maestría, de cual soy participe.

A los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por la apertura brindada a las instalaciones para desarrollar la presente investigación y la ejecución de varios de los ensayos efectuados.

Al Ingeniero Segundo Espín Subdecano de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, director de este proyecto de investigación, por su valioso apoyo en la dirección y asesoramiento en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DEL AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN EJECUTIVO	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.2. Problema.....	4
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. General	5
1.4.2. Específicos	6
1.5. Campo.....	6
1.6. Hipótesis	6
1.7. Señalamiento de variables	6
1.7.1. Variable Dependiente.....	6

1.7.2.	Variable Independiente	6
1.8.	Marco teórico.....	6
1.8.1.	Reciclaje.....	6
1.8.2.	Plástico	8
6.1.1.	Fibras.....	10
6.1.2.	Materiales compuestos.....	11
6.1.3.	Clasificación de los materiales compuestos.....	12
6.1.4.	Filamentos para impresoras 3D.....	13
6.1.5.	Extrusión	14
6.1.6.	Extrusoras.....	15
6.1.7.	Impresión 3D.....	16
CAPÍTULO II		18
METODOLOGÍA		18
2.1.	Materiales	18
2.1.1.	PET reciclado.....	18
2.1.2.	Fibra de vidrio.....	18
2.1.3.	Máquina trituradora.....	20
2.1.4.	Máquina pelletizadora de plásticos	22
2.1.5.	Molino de bolas.....	22
2.1.6.	Tamizadora.....	23
2.1.7.	Balanza.....	24
2.1.8.	Extrusora	25
2.1.9.	Calibrador pie de rey	27
2.1.10.	Impresora 3D	27
2.2.	Metodología	29

2.2.1. Nivel o tipo de investigación.....	29
2.2.2. Método	29
2.2.3. Técnicas de investigación	30
2.2.4. Instrumentos de investigación.....	30
2.2.5. Diagnóstico	30
2.2.6. Población.....	31
2.2.7. Muestra.....	31
2.2.8. Diseño de experimentos	31
2.2.9. Operacionalización de Variables.....	33
2.2.10. Técnicas utilizadas en la observación	35
2.2.11. Técnicas e instrumentos documentales	35
2.2.12. Procesamiento y Análisis	35
2.2.13. Procesamiento de la materia prima	37
2.2.14. Implementación del nuevo sistema de extrusión.....	42
CAPÍTULO III.....	52
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
3.1. Análisis y discusión de resultados.....	52
3.2.3. Resultados del cálculo del volumen de la tolva	52
3.2.4. Características del husillo	53
3.2. Fichas de recolección de datos (diámetros de filamento)	58
3.3. Verificación de la hipótesis.....	64
CAPITULO IV.....	67
PROPUESTA.....	67
4.1. Tema.....	67
4.2. Descripción	67

4.3. Objetivos	68
4.3.1. General	68
4.3.2. Objetivos específicos	68
4.4. Desarrollo	69
4.4.1. Proceso de caracterización del material	69
4.4.2. Normativa para la evaluación de parámetros de los ensayos	69
4.4.3. Elaboración del ensayo de dureza	73
4.4.4. Elaboración del ensayo de impacto por dardos	76
4.3.5. Elaboración del ensayo de tracción	79
4.4.6. Caracterización del material	82
CAPÍTULO V	85
5.1. CONCLUSIONES	85
5.2. RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tres R del reciclaje	7
Figura 2. Guías de reciclaje	7
Figura 3. El plástico	8
Figura 4. Formula química del tereftalato de polietileno	9
Figura 5. Proceso químico de fabricación del PET	9
Figura 6. Símbolo del PET	10
Figura 7. Tipos de fibras	11
Figura 8. Aplicaciones de materiales compuestos	11
Figura 9. Esquema de extrusión general	14
Figura 10. Máquina Lyman Filament Struder	15
Figura 11. Máquina Filastruder	16
Figura 12. Máquina FilaBot	16
Figura 13. Impresión 3D	17
Figura 14. Fibra de vidrio (E) en hilo	19
Figura 15. Fibra de vidrio en polvo.....	20
Figura 16. Fibra de vidrio alargada.....	20
Figura 17. Trituradora de botellas plásticas Nelmor - Modelo (G1215 M1)	21
Figura 18. Criba para tamizar plástico triturado a un tamaño de 1,5 mm	22
Figura 19. Pelletizadora Bausano.....	22
Figura 20. Molino de bolas planetario	23
Figura 21. Tamizadora Controls	23
Figura 22. Balanza de precisión	25
Figura 23. Chasis metálico	25
Figura 24. Control automático del motor	26
Figura 25. Boquilla de 2,5 mm	26
Figura 26. Filastruder Kit	27
Figura 27. Calibrador pie de rey	27
Figura 28. Impresora 3D - Prusa i4	28
Figura 29. Flujograma obtención de filamento 3D -1.....	36

Figura 30. Flujograma obtención de filamento 3D -2.....	37
Figura 31. PET triturado	38
Figura 32. Fibra de vidrio alargada – recortada longitud menor a 2 mm / Fibra de vidrio en polvo	38
Figura 33. Medidas de tamices utilizados	39
Figura 34. Obstrucción de boquilla con PET sin el proceso de pelletizado.....	40
Figura 35. Material dañado	40
Figura 36. Obstrucción entre barril y tornillo con el PET sin el proceso de pelletizado	41
Figura 37. Pellets de PET.....	41
Figura 38. Fibra de vidrio.....	42
Figura 39. Parámetros del tornillo de extrusión	43
Figura 40. Modelado del barril.....	47
Figura 41 Diseño de la tolva	47
Figura 42. Dimensiones de la tolva.....	48
Figura 43. Base para instalar de la tolva	49
Figura 44. Garganta de alimentación	50
Figura 45. Rodillos.....	50
Figura 46. Ventilador de capa 40 x 40 mm	51
Figura 47. Motor NEMA 17 Paso a paso.....	51
Figura 48. Peso de filamento.....	52
Figura 49. Tolva.....	53
Figura 50. Husillo de extrusión.....	53
Figura 51. Fuerzas y reacciones	54
Figura 52. Análisis estático.....	54
Figura 53. Análisis de desplazamientos	55
Figura 54. Deformación unitaria	55
Figura 55. Modelado de garganta de alimentación	58
Figura 56. Dardos.....	70
Figura 57. Dardo FE.....	70
Figura 58. Durómetro Shore D.....	71
Figura 59. Mediciones con durómetro Shore D	71

Figura 60. Máquina universal	72
Figura 61. Dimensiones de probeta para tracción	72
Figura 62 Aplicación del ensayo de dureza Shore D	74
Figura 63 Ensayo de impacto para probetas de PET con fibra de vidrio en polvo. ...	76
Figura 64. Probetas para el ensayo de impacto del material compuesto de 90% PET + 10% fibra de vidrio en polvo.....	77
Figura 65. Resultados del ensayo de impacto en las probetas de material compuesto de 90% PET + 10% fibra de vidrio en polvo	77
Figura 66 Ensayo de resistencia a la tracción de probetas de 90% PET con 10% fibra de vidrio en polvo.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características entre extrusoras compacta vs industrial.....	17
Tabla 2. Datos técnicos del PET	18
Tabla 3. Propiedades de la fibra de vidrio E	19
Tabla 4. Configuraciones del material compuesto.....	20
Tabla 5. Características técnicas de la trituradora Nelmor	21
Tabla 6. Tabla de tamices estándar	24
Tabla 7. Características de Impresora Prusa i4	28
Tabla 8, Recolección de datos – Diámetros obtenidos	32
Tabla 9. Variable Independiente	33
Tabla 10. Variable Dependiente.....	34
Tabla 11. Técnicas e instrumentos de observación.....	35
Tabla 12. Instrumentos documentales.....	35
Tabla 13. Porcentaje de elementos.....	39
Tabla 14. Temperaturas de extrusión del PET en Filastruder	40
Tabla 15. Longitud de trabajo del tornillo del extrusor	43
Tabla 16. Características dl tornillo de la extrusora.....	43
Tabla 17 Tipos de tolvas	48
Tabla 18. Aceros comerciales para material de tolva	49
Tabla 19. Características del motor NEMA 17	51
Tabla 20. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 50% PET + 50% Fibra de vidrio en polvo.....	58
Tabla 21. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 75% PET + 25% Fibra de vidrio en polvo.....	59
Tabla 22. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 90% PET + 10% Fibra de vidrio en polvo.....	60
Tabla 23. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 50% PET + 50% Fibra de vidrio alargada.....	61
Tabla 24. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 75%PET + 25% fibra de vidrio alargada.....	62

Tabla 25. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 90%PET + 10% fibra de vidrio alargada.....	63
Tabla 26 Verificación de la hipótesis en los filamentos tipo A conformados de PET + fibra de vidrio en polvo.....	66
Tabla 27 Verificación de la hipótesis en los filamentos tipo B conformados de PET + fibra de vidrio alargada	66
<i>Tabla 28. Geometrías de dardos.....</i>	69
Tabla 29 Cantidad y dimensiones de probetas.....	73
Tabla 30 Matriz para el análisis de variables	73
Tabla 31 características y propiedades del filamento existente en el mercado.....	83
Tabla 32. Características y propiedades del filamento obtenido por extrusión de 90% PET con 10% fibra de vidrio en polvo.....	83

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo investigativo se enfocó en determinar la mejor configuración de matriz polimérica de plástico PET reciclado triturado y como refuerzo fibra de vidrio, para la fabricación de un nuevo material compuesto polimérico destinado a la extrusión de filamento para impresión en 3D; para el análisis se determinaron varios aspectos como la factibilidad de extrusión del material compuesto, los diámetros de boquilla de la extrusora e impresora en 3D, la factibilidad y procesamiento de la materia prima como es el caso del PET reciclado triturado y posteriormente pelletizado, además de la fibra de vidrio en diferentes configuraciones y rediseño e implementación de la máquina extrusora.

Empleando estas consideraciones se analizaron los resultados del diámetro de los filamentos obtenidos en cada configuración y composición volumétrica, además se determinó la mejor opción mediante un análisis estadístico de T-student; con el resultado obtenido del análisis se determinó las propiedades mecánicas del material.

Los resultados de esta investigación presentaron que la configuración óptima con filamento para la impresión 3D es la de 90 por ciento de PET reciclado más el 10 por ciento de fibra de vidrio en polvo, y ésta es la más factible para la extrusión del filamento ya que se acoge al diámetro de la boquilla de la impresora 3D; a su vez se determinaron las propiedades mecánicas de este nuevo material.

Palabras Clave: Material compuesto, PET reciclado, Filamentos 3D, Impresión 3D, Extrusora 3D, Fibra de vidrio, Pelletizado, Triturado.

ABSTRACT

The present research work was focused on determining the best configuration of the polymeric matrix of recycled PET plastic and glass fiber reinforcement, for the manufacture of a new polymeric composite material intended for the extrusion of filament for 3D printing; For the analysis several aspects were determined such as the feasibility of extrusion of the composite material, the nozzle diameters of the extruder and 3D printer, the feasibility and processing of the raw material such as shredded recycled PET and later pelletized, in addition to the fiberglass in different configurations and redesign and implementation of the extruder machine.

Using these considerations, the results of the diameter of the filaments obtained in each configuration and volumetric composition were analyzed, and the best option was determined by means of a T-student statistical analysis; with the result obtained from the analysis, the mechanical properties of the material were determined.

The results of this research showed that the optimal configuration with filament for 3D printing is 90 percent recycled PET plus 10 percent glass fiber powder, and this is the most feasible for the extrusion of the filament since it fits the diameter of the nozzle of the 3D printer; at the same time, the mechanical properties of this new material were determined.

Keywords: Composite material, Recycled PET, 3D Filaments, 3D Printing, 3D Extruder, Fiberglass, Pelletized, Crushed.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

En la actualidad la obtención de nuevos materiales y el reciclaje de material polimérico (plástico) son los temas más tratados y citados en varios ámbitos de la industria; debido a la innovación, avance tecnológico, creación e investigaciones de nuevos compuestos y sus diversas aplicaciones. Y, por otro lado, el reciclaje de materiales plásticos que es un punto muy importante por tomar en cuenta para disminuirlo y así obtener mejoras en los aspectos ambiental, calidad del aire y protección de nuestro mundo, por ende, se debe tener presente el cuidado adecuado que se le debe dar al planeta para reducir la contaminación en nuestro hábitat y diario vivir.

Para empezar con el análisis histórico de procesos de obtención de materiales compuestos por extrusión; en un estudio realizado en Málaga por Víctor Andueza habla del diseño, construcción y programación de un extrusor multifilamento para realizar impresiones 3D en distintos colores. Para el diseño de esta máquina parten de la necesidad de realizar composiciones de color según diferentes sistemas cromáticos, para ello el sistema de extrusión de seguir varias solicitudes como pueden ser mecánicas, de temperatura y de forma [1].

En el trabajo investigativo se elaboró el diseño e implementación de un mecanismo de extrusión de filamento polimérico para impresión 3D a partir de PET reciclado a partir de botellas aplicado al ámbito industrial, dicho estudio se basa en la transformación del plástico reciclado a filamento como contribución en procesos de construcción. Para poder reciclar el material polimérico se efectúa un proceso de dos etapas; la primera corresponde a la trituración de las botellas en trozos pequeños; mientras que la segunda etapa corresponde a la extrusión del plástico triturado en filamentos de diámetro de 1,75 mm a través de una boquilla. Las aplicaciones del filamento reciclado es una contribución a la sociedad con la finalidad de obtener materiales sustentables y de menor costo para la creación de nuevos elementos con valor agregado [2].

Actualmente existen máquinas extrusoras que fabrican filamento, pero trabajan con un proceso de sobrecalentamiento en el material. Esta máquina es capaz de tratar materiales termoplásticos disminuyendo su biodegradación, en el estudio también se analizó el comportamiento por elementos finitos de la máquina diseñada, en especial parámetros como su comportamiento térmico y variables de diseño de un calefactor de calentamiento; otra fase del diseño corresponde a la programación de una aplicación computacional en lenguaje Java para permitir su fácil uso en la mayoría de los sistemas operativos existentes como índices de desempeño, a partir de los cuales se desarrollaron nuevas aplicaciones computacionales para la optimización del proceso en general para su aplicación en todo tipo de materiales poliméricos [3].

El Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (UNMdP-CONICET) implemento la fabricación del prototipo de una extrusora tipo pistón para destinada a la División Polímeros Biomédicos de INTEMA. Dicha máquina permitirá la producción de filamentos a partir de polímeros para uso médico mediante un proceso continuo en el que se adiciona material en una tolva que posibilita la producción de grandes cantidades de filamentos. La extrusora tipo pistón tienen una camisa con calefacción en donde se genera la presión necesaria para el transporte del material por una boquilla que se mantiene a la temperatura de plastificación [4].

La implementación de una máquina extrusora Open Hardware de filamento de ácido poliláctico (PLA) fue realizada para la caracterización de las propiedades del material, la investigación surgió de la necesidad local relativa al aprovechamiento de residuos plásticos mediante la tecnología (FFF). La investigación en primera instancia implicó una revisión sistemática de bibliografía realizando filtro a los hallazgos encontrados en bases de datos, mediante la RBS se seleccionó la extrusora Open Hardware para luego formular la estructura de descomposición del trabajo, dividiendo la investigación en componentes estructurales, mecánicos, eléctricos y electrónicos. Se usó porcentajes de material plástico nuevo y reciclado para observar las propiedades mecánicas y su eficiencia en procesos i3D. los resultados obtenidos evidenciaron el desarrollo del conocimiento sobre los procesos de recuperación de materiales i3D por medio de tecnologías Open Hardware. Además, se logró como resultados el reciclaje del material y los ensayos mecánicos posibilitar la producción y evaluación del material

en forma de filamento. Se imprimieron prototipos con PLA con variación del porcentaje reciclado[5].

Actualmente existe un uso masivo de plásticos que generan consecuencias negativas en el medio ambiente, sin embargo, se puede tomar medidas prácticas para reducir su consumo mediante el reciclaje. Los productos hechos con plástico se han desarrollado velozmente y en grandes magnitudes. Sumado a que los precios pueden ser inferiores a otros naturales y el perfeccionamiento de la tecnología, el uso de plástico se ha incrementado y con ello su impacto [6].

El plástico afecta a la tierra, el agua y el aire, su largo tiempo de degradación provoca múltiples daños en los ecosistemas, aunque el reciclaje es una buena opción para disminuir la contaminación por el plástico, la verdad es que ya no es una medida suficiente, definitivamente tanto el consumo como la producción de plástico se debe reducir, debido a esto es que se debe buscar opciones de aplicaciones para reutilizar los envases de plástico [7].

Dentro de los procesos tecnológicos, la manufactura aditiva como la impresión 3D es un proceso innovador que tiene aplicaciones en todas las áreas como el sector industrial, medicina, arte y construcción. La impresión en 3D emplea materiales poliméricos, de esto se deriva un problema ambiental ya que se continúa con el uso masivo de plásticos, ¿por eso, los autores de la investigación proponen el diseño de una extrusora de filamento que permitirá reciclar el plástico, es decir, que el filamento estará constituido por material reciclado [8].

Existen diversas aplicaciones que se le dan al plástico reciclado, se produce madera plástica, materiales compuestos de plástico más fibras naturales, sintéticas. Actualmente la reutilización de materiales reciclados ha dado un gran aporte a la construcción en distintos elementos y de ahí es que se tiene necesidad de eliminar el plástico que contamina el ambiente creando e innovando una tecnología adecuada para obtener nuevos productos [9].

La factibilidad de la producción de filamento para impresión 3d a partir de botellas (PET) recicladas, en el cual la propuesta educativa está orientada hacia el reciclaje y el procesamiento de botellas con el fin de obtener filamento 3D, y así por medio del

de este generar conciencia en todos los vinculados a la empresa laboral que se desarrollan, además de logra minimizar el impacto causado por éste tipo de residuos a nivel local y distrital y así poder dar paso a nuevos proyectos ecológicos demostrando la responsabilidad ambiental [10], [11].

En una investigación realizada en el 2017 Carlos Gutiérrez habla acerca de una máquina extrusora para crear filamento a partir de material plástico en la cual el objetivo tecnológico consiste en el diseño de esta máquina como alternativa para la fabricación de filamentos de impresoras 3D utilizando polipropileno obtenido mediante la trituración de tapas de botellas, esperando lograr disminuir el tiempo de elaboración, mejorar la calidad y utilizar materiales reciclado. Se realizaron cálculos para determinar las dimensiones de los componentes de la máquina extrusora como tornillo sin fin, cilindro, boquilla, tolva, potencia y número de revoluciones del motor. Posteriormente se utiliza un software especializado para diseñar la extrusora, para su diseño se consideraron problemas como la resistencia a elevadas temperaturas, corrosión y tenacidad. Se obtuvo datos de temperatura de extrusión de 170 °C, el empleo de un motor de 1 hp en condiciones de velocidad de giro de tornillo de 35 rpm; con estos parámetros se obtuvo una producción de 3,3 kg/h de filamento de 3 mm de diámetro [12].

1.2.Problema

En el país y en la ciudad se ha visto varios inconvenientes debido a la contaminación que generan los materiales plásticos, y esto conlleva a que éste genere desperdicios que no son biodegradables perjudicando a nuestro hábitat ambiental. Además de los desechos de filamentos que se generan a partir de los diversos trabajos de impresión 3D, todo esto hace que al igual que los envases produzcan demasiado daño al entorno, es ahí que nace la necesidad y la visión de eliminar estos desechos e investigar acerca de una posible solución para mitigar en algo este riesgo ambiental y utilizarlo en aplicaciones que se puedan poner en práctica para contrarrestar el incremento de estos contaminantes anteriormente mencionados, teniendo como resultado el proceso óptimo con la maquinaria adecuada para la fabricación de filamento y su utilización en la impresión 3D.

1.3.Justificación

La creación e innovación de nuevos materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de materiales naturales o sintéticos a nivel mundial se ha desarrollado en gran porcentaje; por lo que se ha percibido una gran variedad de estos en diversas aplicaciones industriales, médicas, entre otras.

La combinación de dos o más materiales permiten la formación de un material compuesto, estos materiales se complementan entre sí debido a que los componentes individuales tienen propiedades mecánicas diferentes que en conjunto forman un material único, la formación de este material abarca un proceso detallado en el que se debe encontrar la menor combinación posible entre proporciones de la matriz y el refuerzo con la finalidad de obtener las mejores características necesarias para aplicaciones industriales. Las propiedades mecánicas y físicas del nuevo material se determinan bajo distintos ensayos ya que no corresponde únicamente a una suma de las propiedades de los componentes del material, más bien, es necesario estudiarlo bajo distintas condiciones de falla.

Los materiales compuestos permiten solucionar problemas de la sociedad con las mejores propiedades mecánicas, el menor costo y con la mayor versatilidad para adaptarse a las necesidades del mercado, las propiedades que por lo general se busca mejorar son la resistencia mecánica, densidad, tenacidad, entre otras. Los nuevos materiales propuestos deben ser amigables con el ambiente, por lo que se realiza esta investigación con el fin también de mitigar la contaminación producida esencialmente de botellas plásticas.

1.4.Objetivos

1.4.1. General

Fabricar materiales compuestos con matriz polimérica y refuerzo de fibra de vidrio para su uso en filamento de impresión 3D.

1.4.2. Específicos

1. Estudiar el proceso más idóneo de la fabricación de filamento para impresión 3D a partir de un material compuesto polimérico.
2. Determinar los parámetros de funcionamiento de una máquina extrusora para fabricar filamento para impresión 3D, de material compuesto polimérico con un refuerzo de fibra sintética.
3. Obtener filamento para impresoras 3D partiendo de un material polimérico reciclado (plástico de botellas) mezclado con un material refuerzo de fibra de vidrio.
4. Caracterizar las propiedades mecánicas del material compuesto polimérico.

1.5.Campo

Reciclaje de materiales poliméricos y fabricación materiales compuestos.

1.6.Hipótesis

¿La fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas permitirá innovar su utilización en filamento de impresión 3D?

1.7.Señalamiento de variables

1.7.1. Variable Dependiente

“Obtención de material compuesto polimérico extruido para su utilización en impresión 3D”.

1.7.2. Variable Independiente

“Tecnología de fabricación de filamentos 3D”.

1.8.Marco teórico

1.8.1. Reciclaje

El plástico se creó a los años de 1859 en Gran Bretaña, donde aparece uno llamado fibra vulcanizada [13]. El reciclaje es la transformación de las formas y presentaciones habituales de los objetos de cartón, papel, lata, vidrio, algunos plásticos y residuos orgánicos, en materias primas que la industria de manufactura puede utilizar de nuevo.

El reciclar es una actividad necesaria para las personas, incluye salubridad y otras acciones, además es una buena forma de proteger el ambiente.



Figura 1. Tres R del reciclaje [14]

La manera más fácil de aprender a reciclar es aplicar la norma de las tres R: Reducir, Reutilizar y Reciclar. Reciclar se traduce en ahorro de energía, ahorro de agua potable, ahorro de materias primas, menor impacto en los ecosistemas y sus recursos naturales, ahorro de tiempo, dinero y esfuerzo [15].

Lo ideal es que el reciclaje de estos productos se convierta en un hábito y generar conciencia en las personas de nuestro entorno. Por ello, es esencial la implicación de todos para darles una segunda vida a este material, tanto en campos industriales, automotrices, entre otros.



Figura 2. Guías de reciclaje [16]

1.8.2. Plástico

Los materiales plásticos se componen de una amplia diversidad de materiales que individualmente tienen sus propias características y propiedades; estos materiales poliméricos pueden ser sintéticos o semi sintéticos que se caracterizan por ser elásticos, flexibles y de fácil moldeabilidad, en términos generales, se pueden dividir en tres categorías.



Figura 3. El plástico [16]

Termoplásticos son aquellos que al calentarlos cambian de estado sólido a líquido, una vez líquidos se pueden verter y moldear, con la disminución de la temperatura el material inyectado vuelve a endurecerse. Los materiales termoplásticos más empleados son el polietileno, polipropileno, poliestireno, polimetilmetacrilato, policloruro de vinilo, politereftelato de etileno, teflón y el nylon. [16]

Termoestables son aquellos que una vez han adquirido una forma al enfriarse y solidificarse se mantienen en ese estado, por la configuración de sus cadenas rígidas estos materiales no pueden volver a fundirse. Los termoestables más utilizados, son el caucho natural vulcanizado, la baquelita, resinas y siliconas. [16]

Los *elastómeros* tienen una gran elasticidad y capacidad de estiramiento y rebote. Todos ellos se caracterizan por su ligereza, durabilidad y amplia estabilidad ante la humedad y los productos químicos, propiedades que, si bien pueden considerarse cualidades en el ámbito de su producción y su utilización, se tornan desventajas la hora de su consideración como residuos [15].

Las botellas de plástico son recipientes ligeros que son utilizados para la venta de distintos líquidos ya sean bebidas, lácteos, entre otros. Entre una de las ventajas sobre el vidrio es que son más económicos y poseen gran versatilidad de formas [17].

El plástico PET o tereftalato de polietileno es un polímero plástico lineal que dispone un alto grado de cristalinidad y con un comportamiento termoplástico. Las características que posee son las siguientes [18]:

1. Alta resistencia y tenacidad.
2. Resistentes al desgaste.
3. Resistente a productos químicos.
4. Buenas propiedades dieléctricas.
5. Tienen una baja velocidad de cristalización.
6. Pueden encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino.

Su fórmula se muestra en la figura 4,

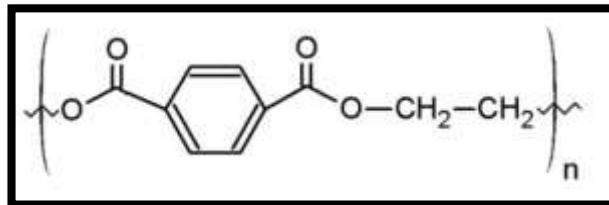


Figura 4. Fórmula química del tereftalato de polietileno [19]

El tereftalato de polietileno resulta de la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo [19].

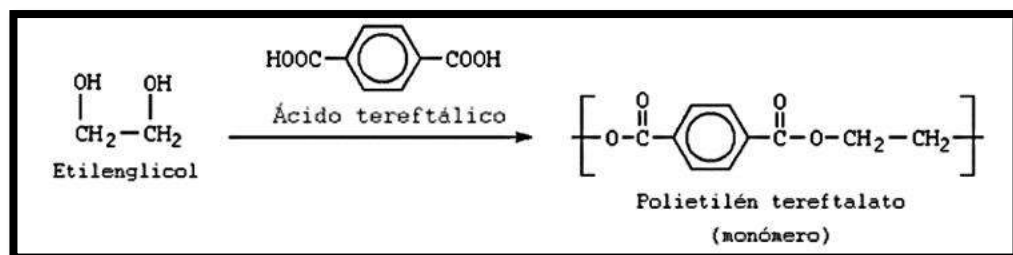


Figura 5. Proceso químico de fabricación del PET [19]

El PET o tereftalato de polietileno adquiere una temperatura de transición vítrea baja (temperatura a la cual el polímero amorfo se ablanda), dando la característica más destacable de este tipo de polímeros.

Este plástico de alta calidad se identifica con el número 1, o con las siglas PET (Figura 6), y está rodeado de 3 flechas, se lo ubica en el fondo de los envases fabricados con este material [19].



Figura 6. Símbolo del PET [19]

Entre algunas de las aplicaciones más comunes del PET se tiene: [19]

1. Envases de bebidas, jugos, vinos, bebidas alcohólicas, productos de limpieza, productos químicos y lubricantes.
2. Contenedores alimenticios, cintas de audio y video, fotografía, aplicaciones eléctricas, electrónicas, rayos X.
3. Otros usos como tubos, perfiles, marcos, paredes, construcción, piezas inyectadas.

6.1.1. Fibras

Dentro del amplia gama de fibras disponibles en el mercado (Figura 7), existen fibras artificiales que se obtienen de la transformación química de productos naturales mediante un proceso de síntesis o polimerización [20].

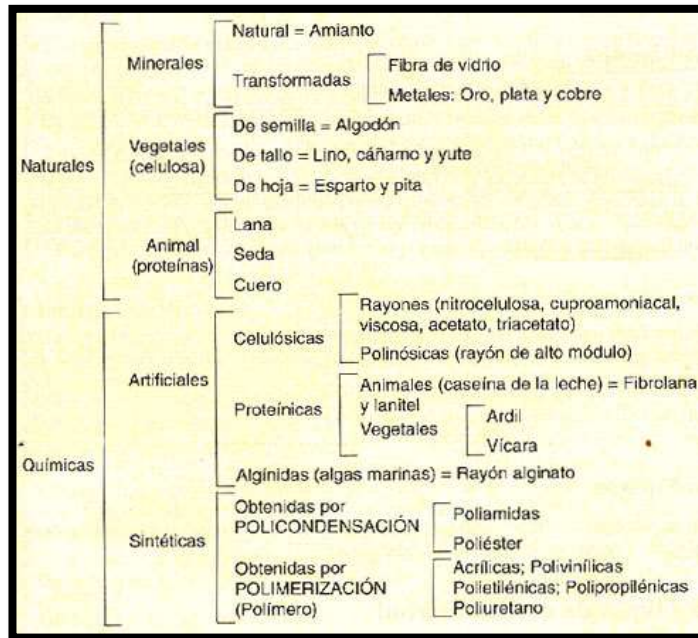


Figura 7. Tipos de fibras [20]

6.1.2. Materiales compuestos

En sí son pocos los materiales que se encuentran constituidos por un solo espécimen, ya que la mayoría de ellos son composiciones químicas de varios elementos que permiten obtener como resultado un material compuesto [1].



Figura 8. Aplicaciones de materiales compuestos [21]

Estos materiales son combinaciones de dos o más materiales; las uniones de estos materiales pueden hacerse mediante procesos químicos o mediante procesos convencionales, el material final posee mejores propiedades que cada material por sí solo. Es conveniente que los componentes del material compuesto no se disuelvan ni se fusionen completamente entre ellos, esto quiere decir que el material debe quedar

heterogéneo, como consecuencia de esto, los materiales son anisotrópicos, es decir, que las propiedades dependen de la orientación del material o de sus refuerzos [22].

La manipulación y resultados obtenidos de los materiales compuestos dependen mucho de los componentes que son utilizados en su elaboración como la manejabilidad de las fibras utilizadas, de la calidad de las resinas y el tipo de fibra utilizada, ya sea natural o sintética [1].

6.1.3. Clasificación de los materiales compuestos

Existen distintos tipos de materiales compuestos, en este caso, se detallan dos tipos:

1. En función del tipo de matriz
2. En función de la forma del refuerzo

En función del tipo de matriz, los materiales pueden ser:

- MCC Materiales compuestos de matriz metálica con alta resistencia y bajo peso
- CMC Materiales compuestos de matriz cerámica, en este tipo de materiales aumentan las propiedades mecánicas, resistencia y tenacidad, en especial en rangos de bajas temperaturas.
- PMC Materiales compuestos de matriz polimérica, estos materiales tienen buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, resistencia a agentes químicos y pueden moldearse con gran versatilidad.

En función de la forma del refuerzo, los materiales pueden ser:

- Refuerzo de partículas, estos materiales tienen una fase dispersa dura, la característica de este material es que permiten restringir el movimiento de la matriz, a su vez, soportan la aplicación de cargas.
- Refuerzos en fibras, tecnológicamente son importantes estos materiales debido a que tienen mayor resistencia a la fatiga, rigidez variación de las temperaturas y poseen baja densidad. Tanto el refuerzo como la matriz son ligeros y las propiedades mecánicas varían en función de la forma y dirección del refuerzo.
- Compuestos estructurales, estos materiales tienen gran versatilidad y se pueden formar por materiales compuestos, materiales homogéneos y también varían según la geometría del diseño.

Se clasifican los compuestos estructurales en: compuestos laminares, estructuras tipo sándwich y estructuras no-laminares.

En cuanto a los refuerzos encontramos distintos tipos, tales como: fibras de carbono, fibras de vidrio, fibras de aramida, fibras naturales [23].

6.1.4. Filamentos para impresoras 3D

Es un elemento que se usa como material de aporte para impresoras 3D, debido a que es un material con el cual se realizan diferentes aplicaciones geométricas mediante deposición del material fundido, estos materiales poseen diferentes propiedades mecánicas en función del tipo de material [24].

6.1.4.1. Filamento PLA

O poliácido láctico es sin duda alguna el material más empleado actualmente en los filamentos para impresión 3D. Es un material de origen natural su principal materia prima es el maíz y es biodegradable. Entre sus cualidades destacan el ser un material reciclable, muy estable y que resulta fácil de imprimir, la temperatura del extrusor debe estar por los 200 °C, dependiendo de impresora [24].

Como desventaja tiene menor resistencia térmica y mecánica que otros materiales de impresión 3D. Esto hace que se pueda deformar a partir de temperatura de 60 °C y que no resulte apto para realizar cortes o perforaciones [24].

6.1.4.2. Filamento ABS

Este material presenta buenas condiciones de robustez, incluso mayores que el PLA, incluso este material permite procesos mecánicos como el mecanizado, cortes, perforaciones, y altas resistencias a temperaturas. Para su impresión la cama debe estar precalentada en un rango de temperatura de 60°C a 80°C, mientras que la temperatura de extrusión es mayor que la temperatura de extrusión del PLA a unos 235 °C [24].

6.1.4.3. Filamento flexible

Estos materiales se componen de materiales elastómeros que les aportan gran elasticidad, poseen resistencia a la abrasión, gran durabilidad, propiedades que se

mantienen incluso al enfriarse; para la impresión de los filamentos en 3D no se requiere de una cama caliente [24].

6.1.4.4. Filamento de fibra de carbono

Este material se implementa como material de apoyo en filamentos PLA, ABS, PETG ya que se adicionan pequeñas partículas de fibra de carbono, esto permite un aumento de dureza y resistencia; las ventajas de estos materiales es que permiten ajustar los parámetros de impresión. Existe una gran variedad de filamentos como son PET, PETG, PETT, de nylon o Poliamida, NylonX, PC, PVA, HIPS, PP, de cera, Glow, nGen, Conductivo, PLA reforzado, entre otros [24].

6.1.5. Extrusión

Este proceso se emplea para crear objetos de sección transversal definida [25]. Los materiales poliméricos se calientan hasta que llegan a su punto de fusión mediante una bomba de fusión. Las fibras extruidas pueden enfriarse mediante varios mecanismos como es el uso de agua, o en menores diámetros se puede emplear enfriamiento con aire. La formación del filamento se dirige a un carrete que lo enrolla de manera continua para ser almacenado posteriormente [26].

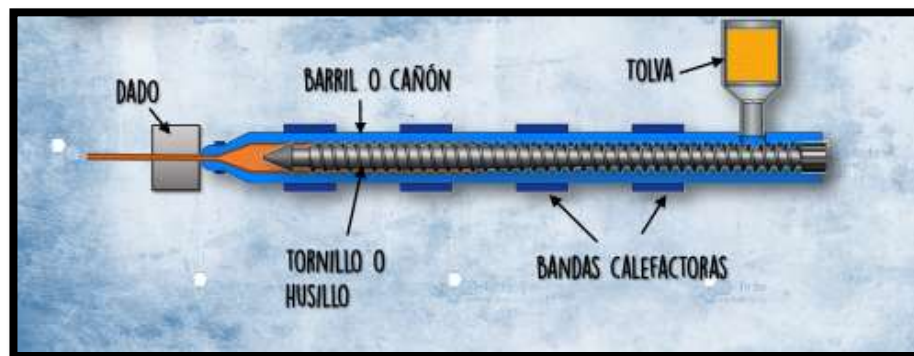


Figura 9. Esquema de extrusión general [27]

La extrusión puede ser continua (producción de una pieza indefinidamente) o semi continua (producción de muchas piezas). Este proceso puede realizarse con el material frío o caliente. [27]

La extrusión no solamente se basa en materiales de resinas plásticas, sino también en metales, polímeros, cerámicos, cemento, plastilina y productos alimenticios c

6.1.6. Extrusoras

Aunque ya existen equipos extrusores que producen filamentos para impresión 3D FDM (Modelado por deposición fundida). Las extrusoras e impresión en 3D genera un problema como los residuos que no se vuelven a utilizar debido a que cada fabricante comercializa los pellets que deben ser empleados en cada máquina extrusora. Actualmente Destacan 2 productos comerciales; FilaBot y FilaStruder, ambas siguiendo los pasos de Hugh Lyman, en papel, ambas máquinas trabajan con reciclado de impresión 3D, bajo muchas advertencias y pasos previos. [27]

Lyman Filament Struder En el año 2012, una competencia abierta al público general; la DFC (“Desktop Factory Competition”), retó a sus participantes a crear una máquina, de software y diseño libre a la comunidad, capaz de producir filamento para las impresoras 3D. Este equipo es de diseño sencillo, y todas sus piezas son prefabricadas. En Chile, el costo se eleva considerablemente, pues sus componentes, comunes y económicos en U.S.A., en la realidad nacional presentan costos elevados por la importación y exclusividad, y algunos de los componentes no pueden ser encontrados. Si bien la máquina cumple su objetivo, operarla es un oficio y conseguir buenos resultados es un arte. [27]



Figura 10. Máquina Lyman Filament Struder [28]

La máquina *Filastruder* (Figura 28), brinda la posibilidad de adquirir el kit completo para ser ensamblado completamente. Esta máquina es muy básica y el ensamblado es simple, incluso emplea accesorios básicos como cinta adhesiva.



Figura 11. Máquina Filastruder [28]

6.1.6.1. FilaBot

En esta extrusora (Figura 12), se puede regular la temperatura de extrusión y permite transformar pellets, residuos de impresión a filamentos, a pesar de que los materiales pueden ser reciclados hasta 3 veces, sigue siendo algo útil para la optimización de los materiales; otro inconveniente con este equipo es que no permite el reciclaje directo de los materiales poliméricos puesto que debe ser mezclado con el material virgen



Figura 12. Máquina FilaBot [28]

6.1.7. Impresión 3D

La manufactura aditiva permite la utilización de materiales plásticos, aleaciones metálicas, materiales de hormigón y muchos otros que pueden ser impresos en 3D, este proceso permite hacer un prototipo rápido que sirve de gran ayuda visual para la elaboración de maquetas, ensamblados, y modelos de presentación [29].



Figura 13. Impresión 3D [30]

El proceso de impresión en 3D consiste en crear los objetos por capas superpuestas de abajo hacia arriba. La manufactura aditiva va acompañada del uso de software que divide el elemento en 3D en capas finas como en el diámetro de salida del filamento. Una impresora 3D es básicamente una máquina de control numérico (CNC) de tres ejes y complementado con un extrusor que calienta y presiona el filamento para que salga en forma de hilo fino [31].

Diferencia entre extrusoras industriales y compactas

En la siguiente Tabla podemos observar las diferencias entre extrusoras existentes en el mercado, con el objetivo de establecer ventajas y desventajas de dichas máquinas.

Tabla 1. Características entre extrusoras compacta vs industrial

CARACTERISTICAS	EXTRUSORA COMPACTA	EXTRUSORA INDUSTRIAL
Consumo eléctrico	Bajo	Alto
Espacio utilizado	Bajo	Alto
Operadores	1	1
Costos de mantenimiento	Bajo	Alto
Movilidad	Fácil	Difícil
Calidad del filamento	Medio	Medio-Alto
Capacidad de manejo	Sin experiencia	Capacitación y experiencia

Fuente: El autor

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Son los medios físicos que se usaron para desarrollar el estudio experimental y el posterior análisis de datos y resultados.

2.1.1. PET reciclado

Se empleó este material como materia prima, sus propiedades físicas se presentan en la tabla 2, en donde se describe su gran desempeño, es muy útil, por lo cual se lo emplea en distintos procesos.

Tabla 2. Datos técnicos del PET [32]

DATOS TÉCNICOS DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)		
PROPIEDADES	UNIDAD	VALOR
Densidad	g/cm ³	1,34 - 1,39
Resistencia a la tensión	MPA	59 - 72
Resistencia a la compresión	MPA	76 - 128
Resistencia al impacto, izod	J/mm	0,01 - 0,04
Dureza	---	Rockwell M94 - M 101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ /°C	15,2 - 24
Resistencia al calor	° C	80 - 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 - 15750
Constante dieléctrica (60Hz)	---	3,65
Absorción de agua	%	0,02
Velocidad de combustión	Mn/min	Consumo lento
Efecto de luz solar	---	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	---	Excelente
Calidad óptica	---	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	° C	244 - 254

2.1.2. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio que se utilizó fue en forma de hilo de tipo E con características dieléctricas y para uso en refuerzos de composites, la misma (Figura 14), que presenta las siguientes características:



Figura 14. Fibra de vidrio (E) en hilo

Propiedades:

Tabla 3. Propiedades de la fibra de vidrio E

Propiedades físicas	
Densidad	2,54 – 2,60 g/cc
Propiedades mecánicas	
Sy	521 MPa
Su	1725 MPa
Elongación	4,8%
Módulo de elasticidad	72,4 GPa
Módulo de Poisson	0,2
Propiedades térmicas	
Punto de fusión	1725 °C
Punto de ablandamiento	840,6 °C

1. Resistencia mecánica mayor que el acero.
2. Buen aislante térmico incluso con poco espesor.
3. Es naturalmente incombustible y no propaga el fuego.
4. No emite humo ni productos tóxicos.
5. No es sensible a las variaciones de temperatura e higrometría.
6. Puede tener diferentes tamaños y tiene la capacidad de combinarse con muchas resinas sintéticas y ciertas matrices minerales.
7. Tiene baja conductividad térmica.

8. Tiene buena permeabilidad dieléctrica.

Tabla 4. Configuraciones del material compuesto

MATERIAL COMPUESTO	
PET+Fibra de vidrio en polvo	PET+Fibra de vidrio alargada 2 mm

Fuente: El autor



Figura 15. Fibra de vidrio en polvo



Figura 16. Fibra de vidrio alargada

2.1.3. Máquina trituradora

Para el proceso de trituración de las botellas se empleó una trituradora de tres cuchillas móviles y dos fijas, las especificaciones se las observa en la tabla 5 y la figura 17. La trituradora pertenece a la empresa ECOM de la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas, posterior a esto se realizó el tamizado de un tamaño 1,5 mm (Figura 16).

Tabla 5. Características técnicas de la trituradora Nelmor [19]

PRODUCT FEATURES
Used 12" x 15" Nelmor Granulator Model G1215M1, 20 Hp.
Fly knife, 2 Bed knife, closed rotor
3&16" Screen with bin discharge, with starter, on casters
Currently setup for 460V/3Ph/60Hz (25 Amp)
54" feed height
Approximate dimensions: 52" x 36" x 72"
Weight: 1700 lbs



Figura 17. Trituradora de botellas plásticas Nelmor - Modelo (G1215 M1) [19]

Para obtener el tamaño deseado del material se utilizó la criba de 1,5 mm (Figura 18), y así poder utilizarlo en el proceso de extrusión y obtención de filamento para impresoras 3D.



Figura 18. Criba para tamizar plástico triturado a un tamaño de 1,5 mm [19]

2.1.4. Máquina pelletizadora de plásticos

Se empleó una máquina pelletizadora (Figura 19), que trabaja con plástico reciclado de fundas; de marca Bausano modelo MD92-30 PLUS, con dos tornillos de diámetro 92 mm, potencia de 124 KW y un rendimiento de 350 kg por hora; en donde se aplicó su utilización en partículas de PET de 1,5 mm.



Figura 19. Pelletizadora Bausano

2.1.5. Molino de bolas

Para la obtención de la fibra de vidrio en polvo se empleó un molino de bolas planetario de marca DECO que consta de cuatro recipientes de acero inoxidable con alta resistencia a la corrosión, y varias esferas de acero. Esta máquina posee un sistema de

control para regular las revoluciones y el tiempo de molienda. El proceso de molienda de la fibra de vidrio se realizó con unas esferas de mármol para que el material no se estropee al friccionar acero con acero.



Figura 20. Molino de bolas planetario

2.1.6. Tamizadora

Con la finalidad de obtener partículas muy finas de la fibra se empleó un tamizadora eléctrica de marca Controls que trabaja con tamices de diámetros de entre 200 mm hasta 315 mm o de 8 a 12 pulgadas; puede soportar hasta 8 tamices de 200 mm u 8 pulgadas de diámetro o 7 tamices de 300 mm además de la base y la tapa respectiva.



Figura 21. Tamizadora Controls [34]

Los tamices que se utilizaron son los de la designación No. 10 para la fibra de vidrio de alrededor de 2 mm de longitud, en cambio para obtener el polvo del material de refuerzo se usó el tamiz No. 100.

Tabla 6. Tabla de tamices estándar [34]

Número o Tamaño del Tamiz Serie Finas	Abertura del Tamiz		203 mm. (8 pulg.) Diámetro	305 mm. (12 pulg.) Diámetro
	Estándar (mm.)	Alternativo (in.)		
1/4 pulg.	6,3 mm	0,250	E179-5000	E179-5800
No. 3-1/2	5,6 mm	0,223	E179-5010	E179-5810
No. 4	4,75 mm	0,187	E179-5020*	E179-5820
No. 5	4,00 mm	0,157	E179-5030	E179-5830
No. 6	3,35 mm	0,132	E179-5040	E179-5840
No. 7	2,80 mm	0,111	E179-5050	E179-5850
No. 8	2,36 mm	0,0937	E179-5060*	E179-5860
No. 10	2,00 mm	0,0787	E179-5070	E179-5870
No. 12	1,70 mm	0,0661	E179-5080	E179-5880
No. 14	1,40 mm	0,0555	E179-5090	E179-5890
No. 16	1,18 mm	0,0469	E179-5100*	E179-5900
No. 18	1,00 mm	0,0394	E179-5110	E179-5910
No. 20	850 μ m	0,331	E179-5120	E179-5920
No. 25	710 μ m	0,0278	E179-5130	E179-5930
No. 30	600 μ m	0,0234	E179-5140*	E179-5940
No. 35	500 μ m	0,0197	E179-5150	E179-5950
No. 40	425 μ m	0,0165	E179-5160	E179-5960
No. 45	355 μ m	0,0139	E179-5170	E179-5970
No. 50	300 μ m	0,0117	E179-5180*	E179-5980
No. 60	250 μ m	0,0098	E179-5190	E179-5990
No. 70	212 μ m	0,0083	E179-5200	E179-6000
No. 80	180 μ m	0,0070	E179-5210	E179-6010
No. 100	150 μ m	0,0059	E179-5220*	E179-6020
No. 120	125 μ m	0,0049	E179-5230	E179-6030
No. 140	106 μ m	0,0041	E179-5240	E179-6040
No. 170	90 μ m	0,0035	E179-5250	E179-6050
No. 200	75 μ m	0,0029	E179-5260*	E179-6060
No. 230	63 μ m	0,0025	E179-5270	E179-6070
No. 270	53 μ m	0,0021	E179-5280	E179-6080
No. 325	45 μ m	0,0017	E179-5290	E179-6090
No. 400	38 μ m	0,0015	E179-5300	E179-6100

2.1.7. Balanza

Para tener el porcentaje de los componentes del material compuesto se utilizó una balanza de precisión de 0,001 gramos, con la finalidad de tener valores exactos tanto de PET triturado y fibra de vidrio de las dos configuraciones en polvo y alargada [35].



Figura 22. Balanza de precisión [35]

2.1.8. Extrusora

Para el proceso de extrusión se empleó una extrusora Filastruder Kit que consta de un chasis de aleación de aluminio 6061 con CNC como se observa en la figura 23. El control del motor es avanzado con un circuito cerrado PWM, la ventaja de trabajar con este dispositivo es que al usar nuevos polímeros el control puede iniciar la velocidad lentamente y observar la temperatura actual cambiando a medida que marca los parámetros para el plástico, figura 24. El cañón es mejorado haciendo más fuerte en resistencia a la torsión y al mismo tiempo mantener una alimentación suave del pellet, lo que reduce la tendencia del cañón a sufrir daños por sobrecarga. Las boquillas pueden ser entre 1,75 y 3 mm dependiendo del uso que se le vaya a dar al filamento (Figura 25) [36].

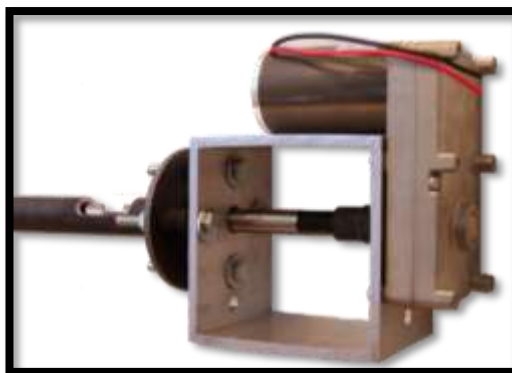


Figura 23. Chasis metálico [36]



Figura 24. Control automático del motor [36]



Figura 25. Boquilla de 2,5 mm [36]

Las tolerancias de filamentos informadas por el proveedor son las siguientes:

1. ABS: +/- 0.02 mm (otro caso de +/- 0.01)
2. PLA: +/- 0,03 mm
3. Nilón: +/- 0.02 mm
4. Policarbonato: +/- 0.04 mm
5. PET - T-glase reciclado: +/- 0,05 mm
6. Acrílico: +/- 0.05 mm
7. Polipropileno: +/- 0.07 mm

Especificaciones Filastruder Kit

1. La velocidad de extrusión típica es de 5 a 8 horas por kilogramo (2,205 libras), según el diámetro, el material y la temperatura.
2. La temperatura de extrusión está limitada por la potencia del calentador por seguridad y llega hasta los 260 °C.
3. El tamaño es de 45 x 15 x 10 cm.

4. La energía es de 110-240 VCA, 50/60Hz, 60 watts pico, 50 watts promedio, lo que da como un coste promedio de 10 centavos de dólar por kg extruido.
5. Velocidad de extrusión de 10 rpm



Figura 26. Filastruder Kit [36]

2.1.9. Calibrador pie de rey

Para obtener las medidas necesarias de los filamentos producto del proceso de extrusión se utilizó un calibrador para tener los resultados requeridos del material para ser utilizados en la impresión 3D.



Figura 27. Calibrador pie de rey

2.1.10. Impresora 3D

La impresora que se utilizó para obtener las probetas y desarrollar los respectivos ensayos es de marca Sunhokey modelo PRUSA i4 [40]. En la tabla 12, se muestran sus características.



Figura 28. Impresora 3D - Prusa i4 [40]

Tabla 7. Características de Impresora Prusa i4 [40]

Impresora 3D Prusa i4
Material de estructura: Acrílico, acero y aluminio.
Pantalla: LCD 2004
Cantidad de extrusores: 1 MK8
Diámetro de boquilla 0,4 mm
Velocidad de impresión: 100 mm/s
Tamaño de impresión (x, y, z): 190 x 190 x 210 mm
Precisión de posicionamiento de eje z: 0,02 mm
Precisión de posicionamiento de eje xy: 0,02 mm
Espesor de capa: 0,1 a 0,5 mm
Plataforma de impresión: Cama caliente (aluminio)
Máxima temperatura de cama caliente: 130 °C
Máxima temperatura de extrusor: 280 °C
Diámetro de filamento: 1,75 mm
Conectividad: USB, pantalla LCD, lector SD card
Material de impresión: ABS, PLA, HIPS, TPU, madera, nylon
Sistema operativo: Windows, Mac, Linux
Software de control: Repetier Host, Cura Engine
Formato de archivos: STL, G-code

2.2. Metodología

2.2.1. Nivel o tipo de investigación

2.2.1.1. Documental

Se elaboró una investigación de tipo documental bibliográfico debido a que se analizaron varios antecedentes, algunos de los temas que se consultaron fueron, la situación actual de las extrusoras empleadas en otras investigaciones, tipo de material con el que trabajan, ventajas, desventajas, precios y demás características que conciernen al tema; y así establecer un análisis entre los resultados obtenidos de los cuales se tomaron aquellos que sean óptimos y mejores para tener nuevas alternativas de producción con la finalidad de cumplir con el objetivo buscado que es obtener filamento para impresoras 3D.

2.2.1.2. Experimental

Otra técnica de investigación aplicada fue la experimental, debido a que permitió poner en marcha la producción una vez que se comprobó que el filamento cumple con las especificaciones necesarias para realizar impresiones 3D, entre los parámetros que se tomará en cuenta son diámetros, tolerancias, características mecánicas y físicas del material, teniendo la posibilidad de corregir los distintos errores y fallos que se generen a lo largo del presente trabajo.

2.2.2. Método

2.2.2.1. Inductivo

Se aplicó el método inductivo para controlar y observar distintas variables como por ejemplo los materiales a utilizar, temperaturas, velocidades, cantidad de material, entre otros; y así medir la influencia de estas variables en la obtención del filamento para impresión 3D. Este análisis permitió mejorar el proceso de extrusión con la capacidad de producir filamento de acuerdo con las condiciones de requerimientos, a bajo costo y con materiales reciclables.

2.2.3. Técnicas de investigación

2.2.3.1. Observación científica

Se elaboró una observación detallada del comportamiento del PET y del refuerzo sintético de fibra de vidrio frente a las condiciones de procesamiento que siguieron cada uno de estos materiales hasta la obtención del filamento en 3D. Se consideraron parámetros específicos como el diámetro del filamento obtenido por lo que es una observación muy específica para determinar la validez de los resultados.

2.2.4. Instrumentos de investigación

2.2.4.1. Fichas de recolección de datos

Para la tabulación de datos se realizó la toma de medidas de los diámetros de los filamentos resultantes en el proceso de extrusión, buscando la medida adecuada para poder llevar el producto hacia la impresión 3D teniendo en cuenta el diámetro de la boquilla donde se alimenta la impresora 3D; todas estas mediciones se registraron en las fichas de observación, en donde también se registraron los detalles visuales de cada filamento planteado.

2.2.4.2. Medición del diámetro del filamento

Para la toma de valores de los diferentes diámetros obtenidos en el proceso de extrusión, se tuvo en cuenta la medida del diámetro exterior del filamento en todas las configuraciones que se plantearon con diferentes porcentajes, con respecto a los requerimientos presentados para utilizarlos en impresoras 3D existentes en el mercado. Dichos valores se los anotó en fichas de recolección de datos realizadas por el autor. Las mediciones se efectuaron con un calibrador digital para obtener mayor precisión.

2.2.5. Diagnóstico

En la actualidad se han desarrollado varios proyectos acerca de la extrusión de materiales reciclados para la obtención de filamento, se utilizó materiales tales como plásticos reciclados en todas las configuraciones y formas; de ahí la amplia gama de material para impresoras 3D con varios materiales bases, refuerzos, niveles de temperatura, elementos aditivos para mejorar características mecánicas, aplicaciones industriales entre otros usos que se le pueda adaptar.

2.2.6. Población

En la industria de la impresión 3D y la extrusión se ha encontrado varios procesos, porcentajes de elementos, distintos tipos de extrusores para la obtención de la materia prima, la población investigativa que se enfocó el presente trabajo es el proceso de fabricar filamento para impresión 3D para aplicaciones de ingeniería. Se analizó la mezcla adecuada y apropiada para que el filamento sea de buena calidad y con costos bajos en relación con el mercado actual.

2.2.7. Muestra

El tipo de muestra que se valora en este apartado son los ensayos que se realizaron en un laboratorio, con el objetivo de caracterizar el material extruido, los mismos que fueron realizados de acuerdo a las normativas aplicables para preparación de probetas, se analizaron las distintas mezclas de componentes (plástico reciclado en pellets + fibra de vidrio en polvo), (plástico reciclado en pellets + fibra de vidrio alargada 2 mm); y así adquirir valores de propiedades y características tanto mecánicas como visuales. La muestra se determinó mediante el diseño de experimentos, de lo cual se obtiene 6 filamentos diferentes para su respectiva evaluación.

2.2.8. Diseño de experimentos

En la tabla 8, elaborada por el autor se presenta un resumen de las mediciones del diámetro del filamento obtenido para cada composición volumétrica que se planteó para la fabricación del material de impresión en 3D. Se observó que existen dos tipos de composiciones de material, el tipo A corresponde a PET + Fibra de vidrio en polvo, mientras que el tipo B corresponde a PET + Fibra de vidrio alargada de 2 mm. Para el tipo de composición A se plantearon 3 composiciones volumétricas distintas como se aprecia en la Tabla 12, al igual que para el tipo de composición B se plantearon también 3 configuraciones de porcentaje de PET y fibra distintos; de los cuales se realizaron 3 mediciones para cada composición volumétrica en los dos tipos de materiales.

Tabla 8, Recolección de datos – Diámetros obtenidos

Tipo de composición	Composición volumétrica	Identificación del número de mediciones
TIPO A PET + fibra de vidrio en polvo	50% PET 50% fibra	A1 A2 A3
	75% PET 25% fibra	A4 A5 A6
	90% PET 10% fibra	A7 A8 A9
TIPO B PET + fibra de vidrio alargada 2mm	50% PET 50% fibra	B1 B2 B3
	75% PET 25% fibra	B4 B5 B6
	90% PET 10% fibra	B7 B8 B9

Fuente: El autor

2.2.9. Operacionalización de Variables

“Tecnología de fabricación de filamentos 3D”

Tabla 9. Variable Independiente

CATEGORIAS	INDICADORES	INDICE	TECNICAS
Extrusión	Tasa de extrusión	Óptimo 700 mm/min Mínimo 500 mm/min	Observación
	Parámetros de temperatura de extrusión	Óptimo 200 °C Mínimo 185 °C	Medición
	Composición volumétrica	%Fibra de vidrio % de PET	Instrumentos y accesorios adecuados
	Revoluciones del motor	Máquina = 10 rpm	Avance y temperatura
Materiales	Diseño de elementos	Producción	Maquinado
	Selección de elementos	Tipo de filamento	Máquinas y Herramientas
	Montaje	Tipo de materiales	Utilizar software especializados Revisión de literatura

Fuente: El autor

“Obtención del material compuesto polimérico extruido para su utilización en impresión 3D”

Tabla 10. Variable Dependiente

CATEGORIA	INDICADORES	INDICE	TECNICAS
Geometría	Tipo de componentes	Filamento con fibra de vidrio en polvo.	Parámetros de temperatura de precalentamiento.
	Forma	Filamento con fibra de vidrio alargada 2 mm.	Parámetros de velocidad.
	Textura	Diámetro adecuado Liso Áspero	Selección de accesorios adecuados.
Compatibilidad de los componentes del material compuesto	Forma de material base	PET reciclado	Máquinas herramientas
	Forma de material refuerzo	Pelletizado Fibra en dos configuraciones	Herramientas manuales
	Porcentaje de componentes	Porcentajes y niveles adecuados	Equipos y accesorios de medida y pesos.

Fuente: El autor

2.2.10. Técnicas utilizadas en la observación

Tabla 11. Técnicas e instrumentos de observación

DETALLE	TÉCNICA	INSTRUMENTOS
OBSERVACIÓN	Observación científica	Cuaderno y hojas para notas Fichas de campo Documentos de cotejo Calibrador

Fuente: El autor

2.2.11. Técnicas e instrumentos documentales

Tabla 12. Instrumentos documentales

DETALLE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
DOCUMENTALES	Bibliografía, Normas, Catálogos, Publicaciones, Artículos, Estudios, Fichas y especificaciones técnicas, Tabulaciones.

Fuente: El autor

2.2.12. Procesamiento y Análisis

Para el procesamiento de la materia prima se hizo un análisis dividido en dos partes importantes, la obtención de los pellets de PET reciclado y la extrusión del filamento en 3D. Con el filamento en 3D se obtuvieron las dimensiones del filamento y las probetas para la caracterización del material con la proporción correcta.

En las figuras 29 y 30 se muestra el procedimiento que se llevó a cabo para la obtención del nuevo material y del análisis correspondiente para la selección de la combinación óptima entre PET y fibra de vidrio mediante un análisis de T-Student, así como también la caracterización de la misma.

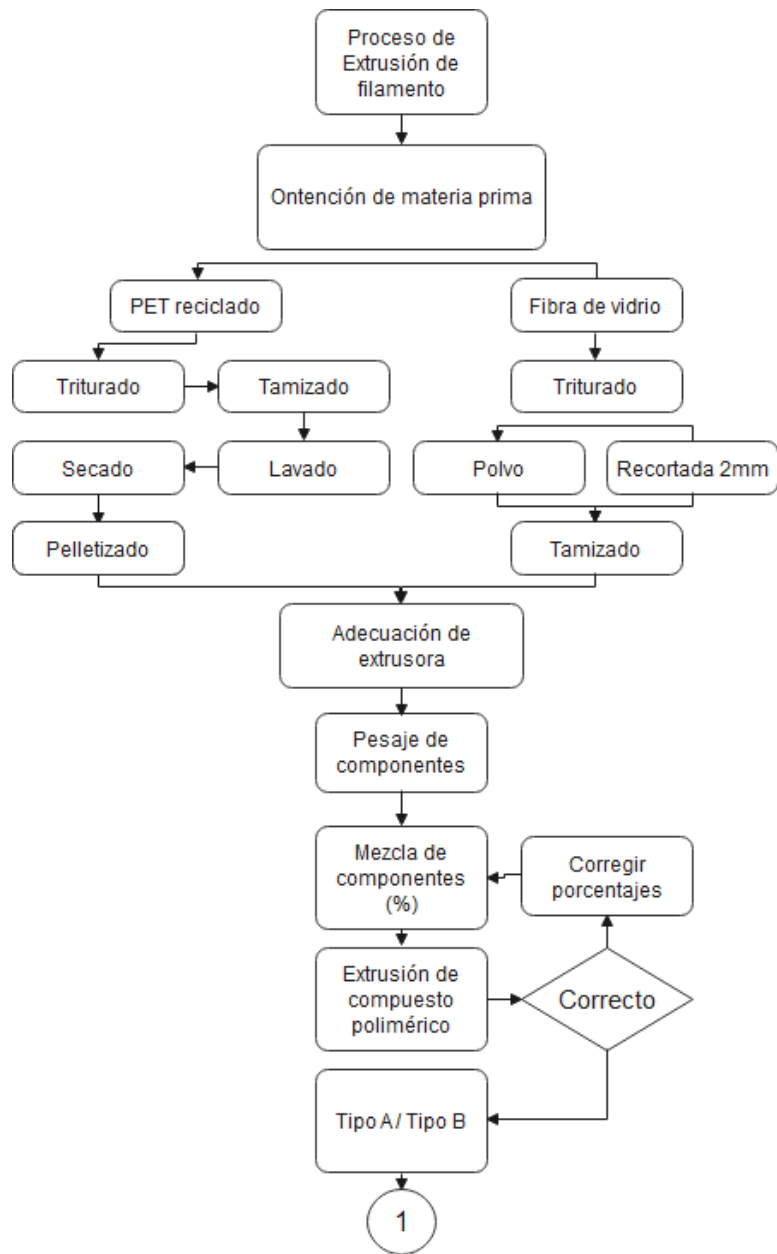


Figura 29. Flujograma obtención de filamento 3D -1

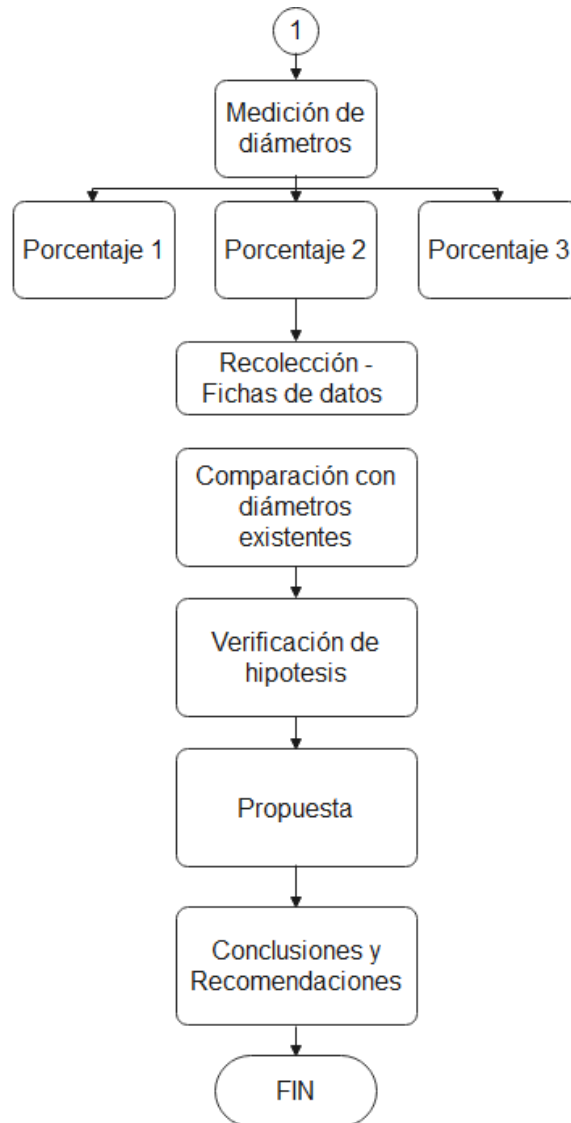


Figura 30. Flujoograma obtención de filamento 3D -2

2.2.13. Procesamiento de la materia prima

El PET reciclado se lo obtuvo a partir de botellas plásticas recolectadas por la empresa en proyectos de “RECICLAJE PARA TODOS” sin tapas y sin argollas, por medio de trituración en una máquina Nelmor perteneciente a la empresa ECON de la ciudad de Santo Domingo. Se utilizó cribas de 1,5, 6, 8, 15 mm; el PET utilizado en el presente proyecto es el que se consiguió de la criba de 1,5 mm por medio del tamizado respectivo, luego se procedió a realizar el lavado del PET en varios recipientes con agua limpia retirando todos los sedimentos existentes. Luego se lo llevó a unas

bandejas de lata grandes para secarlas, cada bandeja contenía las diferentes medidas de PET triturado.



Figura 31. PET triturado

Por otro lado, la fibra de vidrio se la adquirió por medio de proveedores de este producto que se contactaron en el país; es en forma de hilachas de 15 metros de longitud de la cual se la procesó en longitudes de 20 cm con varias porciones de fibra; de las cuales se obtuvo 1.8 kilogramos de fibra en polvo y 2.3 kilogramos de fibra alargada en medidas de entre 0,5 a 2 milímetros de longitud por medio de tamizado. La obtención de la fibra en polvo se hizo mediante el molino de bolas en donde se emplearon bolas de mármol hasta obtener partículas del material como se muestra en la figura 32.



Figura 32. Fibra de vidrio alargada – recortada longitud menor a 2 mm / Fibra de vidrio en polvo

Luego de obtener fibra de vidrio limpia y con las configuraciones deseadas como material de refuerzo se utilizó los tamices Número 200 para el polvo y Número 10 para

la fibra recortada en longitudes de 2 mm, para la posterior mezcla con el material PET en forma de pellet.

Número o Tamaño del Tamiz	Abertura del Tamiz		203 mm. (8 pulg.) Diámetro	305 mm. (12 pulg.) Diámetro
	Estandar (mm.)	Alternativa (in.)		
<i>Serie Finas</i>				
1/4 pulg.	6,3 mm	0,250	EI79-5000	EI79-5800
No. 3-1/2	5,6 mm	0,223	EI79-5010	EI79-5810
No. 4	4,75 mm	0,187	EI79-5020*	EI79-5820
No. 5	4,00 mm	0,157	EI79-5030	EI79-5830
No. 6	3,35 mm	0,132	EI79-5040	EI79-5840
No. 7	2,80 mm	0,111	EI79-5050	EI79-5850
No. 8	2,36 mm	0,0937	EI79-5060*	EI79-5860
No. 10	2,00 mm	0,0787	EI79-5070	EI79-5870
No. 12	1,75 mm	0,0688	EI79-5080	EI79-5880
No. 14	1,40 mm	0,0555	EI79-5090	EI79-5890
No. 16	1,18 mm	0,0469	EI79-5100*	EI79-5900
No. 18	1,00 mm	0,0394	EI79-5110	EI79-5910
No. 20	850 μ m	0,331	EI79-5120	EI79-5920
No. 25	710 μ m	0,0278	EI79-5130	EI79-5930
No. 30	600 μ m	0,0234	EI79-5140*	EI79-5940
No. 35	500 μ m	0,0197	EI79-5150	EI79-5950
No. 40	425 μ m	0,0165	EI79-5160	EI79-5960
No. 45	355 μ m	0,0139	EI79-5170	EI79-5970
No. 50	300 μ m	0,0117	EI79-5180*	EI79-5980
No. 60	250 μ m	0,0098	EI79-5190	EI79-5990
No. 70	212 μ m	0,0083	EI79-5200	EI79-6000
No. 80	180 μ m	0,0070	EI79-5210	EI79-6010
No. 100	150 μ m	0,0059	EI79-5220*	EI79-6020
No. 120	125 μ m	0,0049	EI79-5230	EI79-6030
No. 140	106 μ m	0,0041	EI79-5240	EI79-6040
No. 170	90 μ m	0,0035	EI79-5250	EI79-6050
No. 200	75 μ m	0,0029	EI79-5260*	EI79-6060
No. 230	63 μ m	0,0025	EI79-5270	EI79-6070

Figura 33. Medidas de tamices utilizados [34]

Por medio de la utilización de una balanza de precisión de 0,001 y distintos recipientes se tomó los diferentes pesos y porcentajes tanto del PET reciclado triturado y el material refuerzo fibra de vidrio en dos configuraciones en polvo y alargada de 2 mm.

Tabla 13. Porcentaje de elementos

PORCENTAJES DE ELEMENTOS					
Fibras alargadas			Polvo de fibra de vidrio		
50% PET	75% PET	90% PET	50% PET	75% PET	90% PET
50% fibra	25% fibra	10% fibra	50% fibra	25% fibra	10% fibra

Fuente: El autor

Con las configuraciones y porcentajes de la tabla 13, se realizó la respectiva mezcla y se lo llevó a la extrusora; tomando en cuenta las respectivas temperaturas de precalentamiento y de extrusión descritas en la tabla 14, Cabe comentar que surgieron

varios inconvenientes debido a la materia prima PET que se usó; el material resultó demasiado duro y no se fundió implicando defectos como obstrucciones en la boquilla extrusora, atascamientos entre el barril (cilindro) y el tornillo como se observa en las figuras siguientes. Es por esas razones que se decidió pelletizar el PET plástico para poder extruirlo con buenos resultados.

Tabla 14. Temperaturas de extrusión del PET en Filastruder [41]

TEMPERATURAS DEL TORNILLO PARA EXTRUSIÓN	
Zona trasera	20°C
Zona media	165 °C
Zona frontal	185 °C
Boquilla	185 °C
Tiempo de enfriamiento	6 segundos



Figura 34. Obstrucción de boquilla con PET sin el proceso de pelletizado



Figura 35. Material dañado



Figura 36. Obstrucción entre barril y tornillo con el PET sin el proceso de pelletizado

Es por esta razón que se realizó la pelletización del PET plástico, este trabajo se lo efectuó en una maquina pelletizadora en la ciudad de Ambato, Santa Rosa; obteniendo el material plástico adecuado para realizar la extrusión del nuevo material compuesto con sus respectivos porcentajes.

Posterior a ello al mezclar estos elementos con el pellet y la fibra de vidrio el material se volvió más fácil de extruir.



Figura 37. Pellets de PET



Figura 38. Fibra de vidrio

Las mezclas se las realizó desde 0,20 kg como el 50% de cada material, de ese valor se fue disminuyendo los distintos porcentajes mostrados en la *Tabla 13*.

2.2.14. Implementación del nuevo sistema de extrusión

Para obtener un filamento adecuado para utilizarlo en la impresora 3D se tuvo que implementar un sistema de extrusión y así obtener mejores resultados en la producción del filamento.

Al ya haber adquirido la extrusora Filastruder y no tener la posibilidad de extruir de una manera eficiente, se tuvo que realizar el cambio de cilindro porta tornillo de extrusión, debido a que no tiene una holgura adecuada para poder extruir el material compuesto utilizado. Por lo que según Savgorodny [37] recomienda multiplicar el diámetro del tornillo (D_T) por una constante de entre 0,02 a 0,03, en este caso se tuvo que utilizar la constante de 0,03 debido a que mientras más fricción haya entre el material y las paredes del cilindro y menor en las superficies del tornillo el material será impulsado con mayor efectividad.

La holgura se calcula mediante la ecuación:

$$\lambda = (0,03)D_T \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

$$\lambda = \text{Holgura del cilindro}$$

$$DT = \text{Diámetro total del husillo}$$

Longitud de trabajo

La ecuación viene establecida por el valor que va desde 0,6 a 0,9 por la longitud total del tornillo.

Tabla 15. Longitud de trabajo del tornillo del extrusor [37]

LONGITUD DE TRABAJO DEL TORNILLO	
Diámetro pequeño	Diámetro grande
0,6	0,9

El tornillo que se presenta en la figura 38, que se usó para el proceso de extrusión será el mismo que tiene la extrusora, con las siguientes características:

Tabla 16. Características dl tornillo de la extrusora

CARACTERISTICAS DEL TORNILLO	
Profundidad del canal	0,005 m
Paso	28 mm
Ángulo de hélice	28°
Longitud de fusión	186,5 mm
Longitud de trabajo	193,5 mm
Número de filetes	14
Revoluciones del tornillo	10 rpm
Cantidad de material procesado	2758,62 cm ³

Fuente: El autor

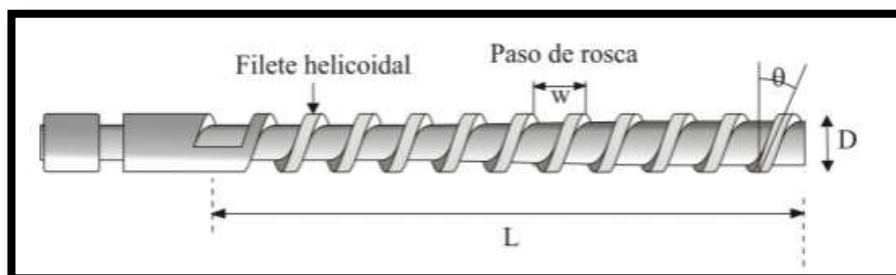


Figura 39. Parámetros del tornillo de extrusión [37]

Presión máxima que ocurre dentro de la extrusora

Para obtener el valor de la presión máxima que se ejerce en el proceso de extrusión se debe aplicar la ecuación:

$$P_{max} = \frac{6\pi \cdot DT \cdot l \cdot N \cdot \mu}{H^2 \cdot \text{tg}\theta} \quad \text{Ec (2)}$$

Dónde:

DT = diámetro total del tornillo

l = longitud de trabajo del tornillo

N = número de revoluciones del tornillo

μ = viscosidad efectiva del PET

H = profundidad del canal del tornillo

θ = ángulo de hélice del tornillo

Potencia del tornillo

Viene dado por la ecuación:

$$PF = QT * \Delta P \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

PF = Potencia en base al flujo (W)

$$QT = \text{Flujo total} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

ΔP = Variación de presión (Pa)

Para lo cual se construyó dos rodillos que se indican en la figura 44, con una ranura con el diámetro del filamento (1,75 a 2 mm) medida específica para la boquilla de ingreso de material de la impresora 3D, además de un ventilador que se expone en la figura 46, al inicio de estos rodillos. Luego un motor paso a paso como el que se indica en la figura 47, en el carrete del filamento para que lo hale y se vaya enrollando.

Torque en base a la Potencia Real

El torque es la fuerza necesaria que requiere el motor para ser aplicada al tornillo, viene dada por la ecuación:

$$T = \frac{P_R}{N} \quad \text{Ec. (4)}$$

Potencia del motor

Debido a que se toma en cuenta la extrusión de PET reciclado en forma de pellets se considera utilizar una velocidad máxima de 15 revoluciones por minuto con el objetivo de obtener potencias acordes a los motores existentes en el mercado actual.

$$P_{mot} = \frac{N \cdot \pi \cdot D_T^3}{fp^2} \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

fp = Factor de proporcionalidad

Consideraciones para diseño del tornillo

Como se mencionó anteriormente en tornillo de la extrusora que se va a utilizar es el mismo, considerando los distintos parámetros a tomar en cuenta que se lo analizará con un software especializado. En donde se tendrá datos de material, coeficiente de fricción, cálculo de fuerzas y reacciones, fuerza de compresión, momento de giro, momento de inercia, radio de inercia, esbeltez, fuerza axial, tensión tangencial, tensión normal, cálculo de la flecha de flexión del tornillo, muñón, entre otros.

Parámetros del barril

Los datos que se tiene diámetro exterior (De), diámetro interior (Di) y espesor (ε).

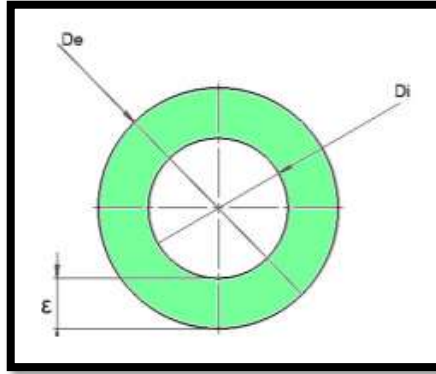


Figura 40. Parámetros del barril

$$Di = DT + \lambda \quad \text{Ec. (6)}$$

Espesor del barril

Se parte de análisis anteriores, basado en las presiones que existen en el sistema de extruido.

$$\epsilon_B = r_i \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{max}}{\sigma_t - 2P_{max}}} \right) \quad \text{Ec. (7)}$$

ϵ_B = Espesor del barril (m)

r_i = radio interno del barril (m)

P_{max} = presión interna del barril (MPa)

σ_t = máximo de fluencia del material (cilindro) (MPa)



Figura 40. Modelado del barril

Diseño de la tolva

Para diseñar la tolva a utilizar se debe tener en cuenta que la forma debe ser siempre cónica, y de forma circular o rectangular dependiendo la geometría necesaria como se presenta en la tabla 17, y de esta forma se tendrá una mejor alimentación hacia el tornillo de extrusión.



Figura 41 Diseño de la tolva

Tolvas según su forma y aplicación

Tabla 17. Tipos de tolvas [37]

PARAMETROS	CIRCULAR	RECTANGULAR	TORNILLO CRAMMER
Construcción	5	3	1
Bajo costo	5	3	2
Coefficiente de fricción	4	3	5
Flujo	3	2	5
Volumen	4	5	3
Vibraciones	5	5	1
Precisión de dosificación	3	2	5
Total	29	23	22

Fuente: El autor

La tolva recomendable para un flujo constante debe ser de forma circular, además teniendo presente que se la debe diseñar con una alimentación de material para al menos un tiempo de dos horas de trabajo [37].

$$Vt = \frac{m}{\delta} \quad \text{Ec. (8)}$$

m = masa del filamento producido en tres horas

δ = densidad PET

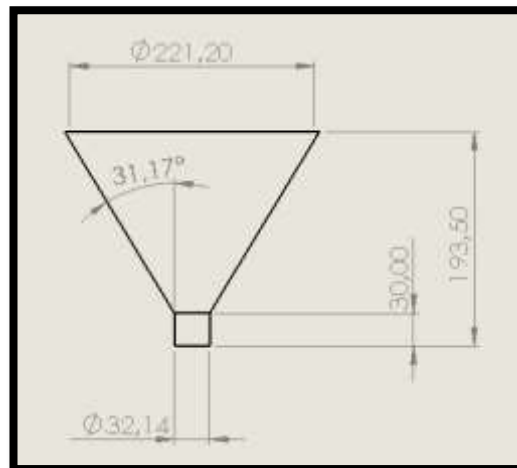


Figura 42. Dimensiones de la tolva

Selección del material de la tolva

Tabla 18. Aceros comerciales para material de tolva [37]

PROPIEDADES	AISI 1010	AISI 201	AISI 1038	ASTM A36
Bajo costo	2	1	3	5
Resistencia al desgaste	3	5	4	2
Dureza	3	5	1	2
Resistencia a la corrosión	4	5	3	1
Tenacidad	3	1	4	3
Maquinabilidad	3	1	3	5
Total	16	18	18	18

Se debe seleccionar un material adecuado ya que, al tener parámetros de no soportar altas temperaturas, ni grandes esfuerzos o a la corrosión; debe ser uno compatible con todas las propiedades necesarias para el fin requerido.

Para obtener las medidas de la tolva en diferentes diámetros se tuvo que rediseñar la máquina extrusora, teniendo en cuenta la alimentación de la materia prima PET y fibra de vidrio; la adecuación fue la implementación de la tolva de abastecimiento, la misma que se la fabricó de un forma circular para tener un mejor flujo constante con respecto a la aplicación que se va a realizar, el material a fabricar es un ASTM A36 por cumplir con las necesidades de diseño y por ser un material que se lo encuentra con más frecuencia en el mercado local y nacional.

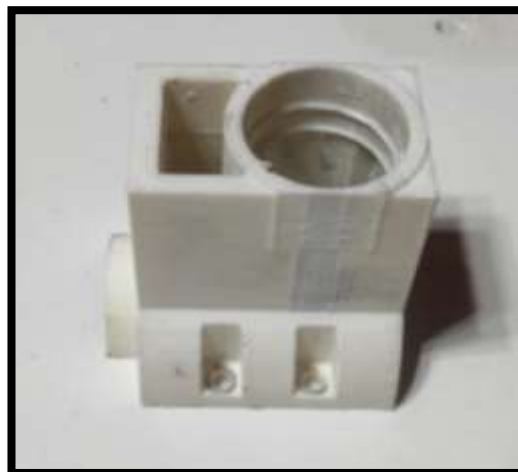


Figura 43. Base para instalar de la tolva

Garganta de alimentación

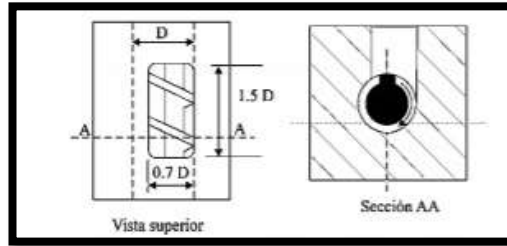


Figura 44. Garganta de alimentación [37]

Es la sección por donde el material ingresara al barril, suele tener una longitud de entre 0,9m a 1,5 veces el diámetro interior del cilindro, de esta forma se garantiza que le material no se obstruya en el proceso realizado.

Los demás parámetros como la boquilla de extrusión, el motor, el sistema eléctrico, el control de temperatura, niquelinas, termocuplas, ventilación serán las mismas que posee la maquina base adquirida.

Para el sistema de extrusión de filamento se diseñó en relación con máquinas industriales existentes en el mercado internacional. Estas máquinas aún no se las puede tener en el país para trabajos de impresoras 3D; por lo que el filamento solo se lo puede adquirir por medio de importadores directos con empresas fabricantes del material 3D.

Se construyó dos rodillos para tener la forma circular del filamento, debido a que presentaba varias imperfecciones e la superficie.



Figura 45. Rodillos

El ventilador que se utilizó es de capa 40 x40 mm, debido a que es pequeño con la finalidad de enfriar el plástico para que se solidifique al pasar por las ranuras de los

rodillos. Pero se debe tener muy en cuenta no utilizarlo en un alto rendimiento ya que puede ocurrir el fenómeno de *cracking*.



Figura 46. Ventilador de capa 40 x 40 mm [38]

El motor que va instalado en el carrete es un NEMA 17 paso a paso 3.2 kg/cm.

Tabla 19. Características del motor NEMA 17 [39]

CARACTERÍSTICAS
Tamaño: 42,3 x 48 mm (NEMA 17)
Peso: 350 gramos (13 oz)
Diámetro de eje: 5 mm
Longitud del eje: 25 mm
Pasos por vuelta: 200 (1,8°/paso)
Corriente: 1,2 Amperios por bobinado
Tensión: 4 V
Resistencia: 3,3 Ohm por bobina
Torque: 3,2 kg/cm (44 oz-in)
Inductancia: 2,8 mH por bobina



Figura 47. Motor NEMA 17 Paso a paso [39]

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

Para saber cuál es el proceso más idóneo en cuanto a la fabricación del filamento 3D y su aplicación en la impresión 3D y obtener un material compuesto adecuado para dicho fin, se recolectó información de varios antecedentes con respecto a la extrusión de materiales compuestos y poliméricos. En este apartado se analizó el tipo de material utilizado como materia prima, los procesos o tratamientos realizados en ellos para un mejor rendimiento, el porcentaje adecuado de elementos que constituyen el material polimérico, los dos tipos de materiales fabricados, la geometría del filamento (diámetro) y el acabado superficial del producto obtenido; para ver si cumple o no con los requerimientos planteados en este proyecto.

3.2.3. Resultados del cálculo del volumen de la tolva

Se diseñó la tolva para un valor de masa de 0,4 kg (mezcla de los dos componentes en un proceso) con un tiempo de producción de 7 horas totales.



Figura 48. Peso de filamento

$$V_T = \frac{m}{\delta}$$

$$V_T = \frac{4000 \text{ g}}{1,45 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_T = 2758,62 \text{ cm}^3$$

Tomando un valor redondeado de 2760 cm^3 , se tiene una tolva de 2,76 litros de capacidad.

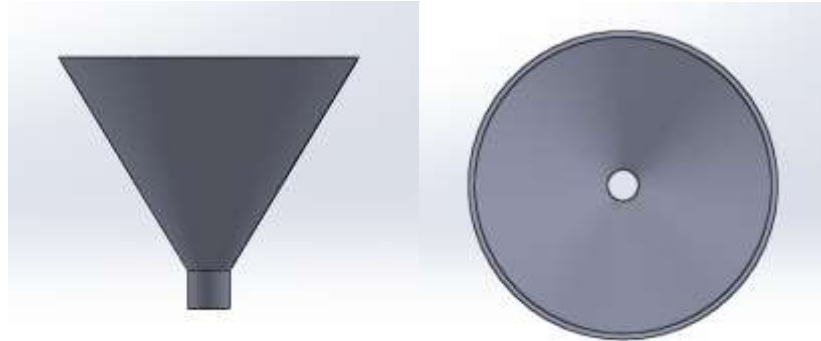


Figura 49. Tolva

3.2.4. Características del husillo

Diseño en SolidWorks

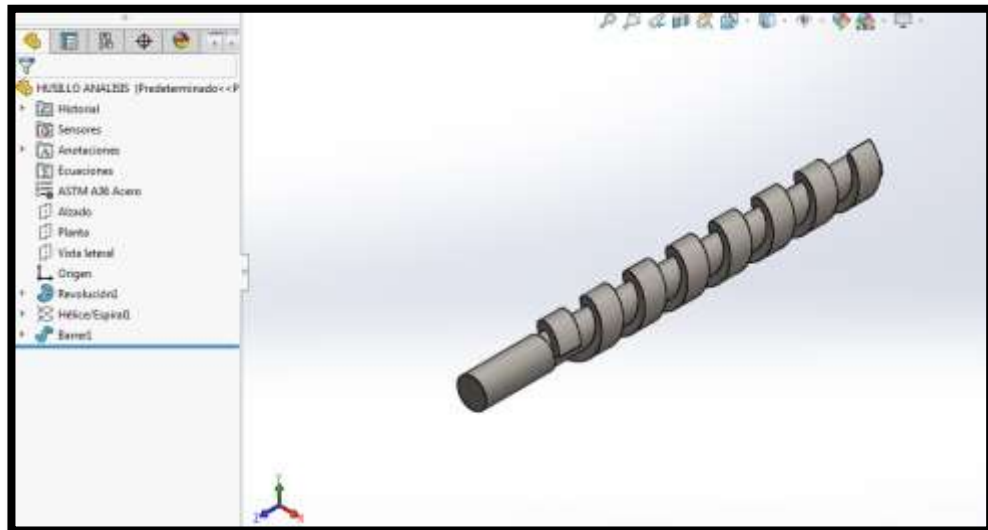


Figura 50. Husillo de extrusión

En la figura 50, se muestra el modelo del tornillo en ASTM A36.

Aplicación de cargas

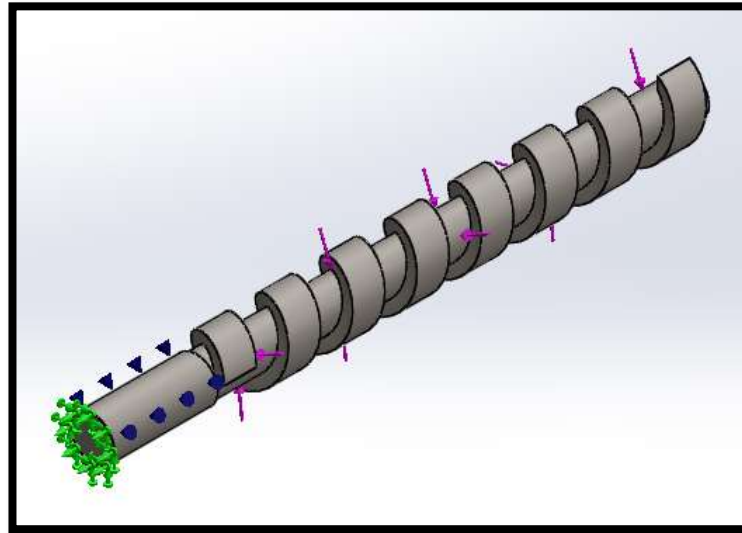


Figura 51. Fuerzas y reacciones

Análisis estático de Tensiones

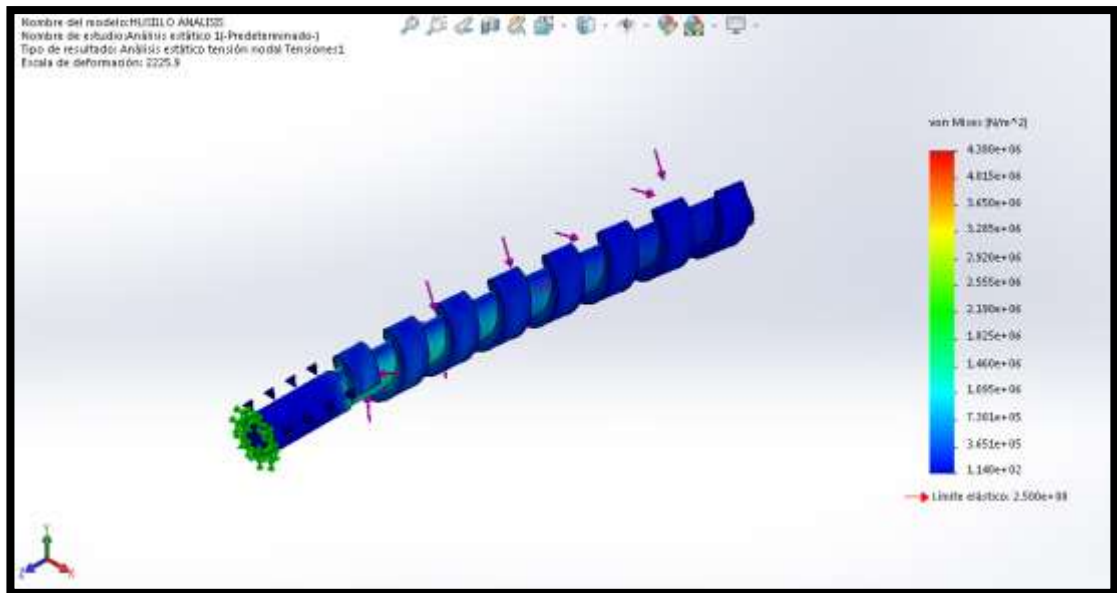


Figura 52. Análisis estático

En el análisis estático se obtuvieron buenos resultados puesto que la zona más crítica se encuentra en color verde y corresponde a un valor de 1,46 MPa un valor muy inferior al límite elástico; en la figura 52, se observa la distribución del esfuerzo en todo el elemento.

Desplazamiento estático

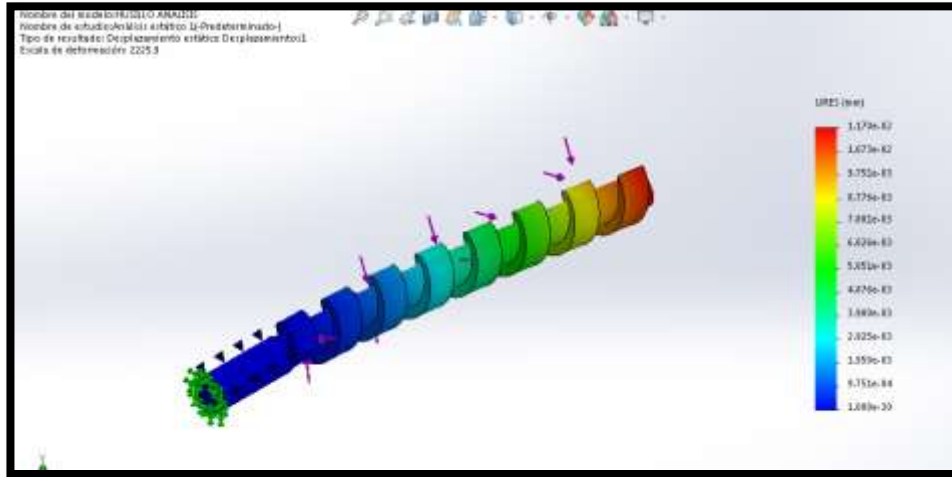


Figura 53. Análisis de desplazamientos

También se efectuó un análisis de desplazamiento elástico el cual se presenta en la figura 53, en donde se observa que el mayor desplazamiento se ubica en el extremo del tornillo y corresponde a un valor de 0,017 mm; este valor también es muy ínfimo por lo que se puede determinar que el tornillo se mantendrá estable frente a la aplicación de las cargas.

Deformación unitaria

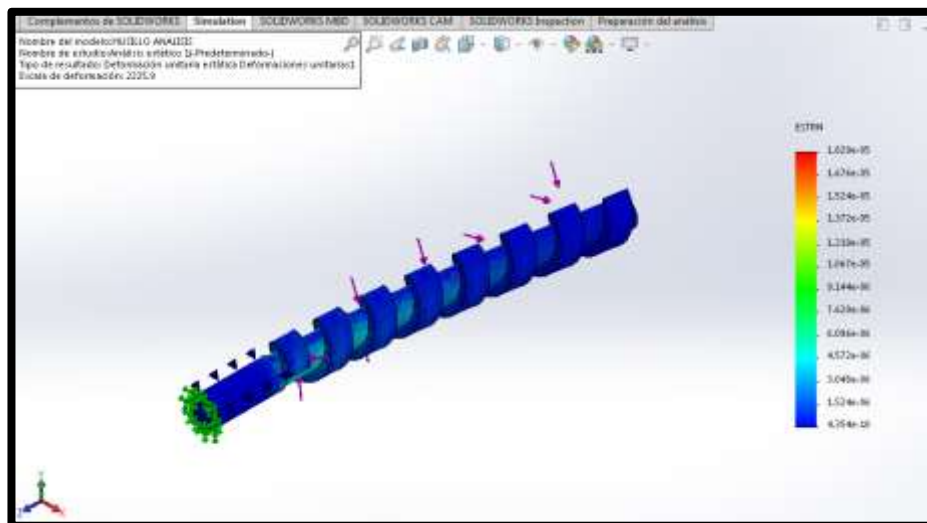


Figura 54. Deformación unitaria

En el programa Solidworks también se verificó la deformación unitaria en el tornillo; el valor más crítico se encuentra en el color cyan y corresponde a 4,57 MPa como se observa en la figura 54.

Holgura del barril y husillo

$$\lambda = (0,03)D_T$$

$$\lambda = (0,03)(17mm)$$

$$\lambda = 0,51mm$$

Longitud de trabajo

$$L_t = 0,9(L_h)$$

$$L_t = 0,9(215 mm)$$

$$L_t = 193,5 mm$$

Presión máxima

$$P_{max} = \frac{6\pi \cdot (0,017) \cdot (0,1935mm) \cdot (10rpm) \cdot (700)}{(0,005mm)^2 \cdot tg(28^\circ)}$$

$$P_{max} = 32,652 Mpa$$

Potencia en base al flujo

De los datos de la extrusora se tiene:

$$Q_T = 8,55 \times 10^{-3} m^3/s$$

$$\Delta P = 23,07 Mpa$$

$$PF = Q_T * \Delta P$$

$$PF = (8,55 \times 10^{-3})(23070000)$$

$$PF = 197,33 W$$

Torque

$$T = \frac{P_R}{N}$$

$$T = \frac{205}{10}$$

$$T = 20,5N.m$$

$$PR = 1,04 (PF)$$

$$PR = 205 W$$

Diseño del barril

$$Di = DT + \lambda$$

$$Di = 17mm + 0,51 mm$$

$$Di = 17,51 mm$$

Espesor del barril

$$\varepsilon_B = 8,755 \left(1 - \sqrt{\frac{2(32,65)}{325 - 2(32,65)}} \right)$$

$$\varepsilon_B = (8,755)(0,4986)$$

$$\varepsilon_B = 0,00436 m$$

$$\varepsilon_B = 4,36 mm$$

Garganta del barril

$$D = 26,23 mm$$

$$X = 0,7D = (0,7) * (26,23mm) = 18,361 mm$$

$$Y = 1,5D = (1,5) * (26,23 mm) = 39,34 mm$$



Figura 55. Modelado de garganta de alimentación

En la figura 55 se muestra el resultado del modelamiento en 3D de la garganta de alimentación con las dimensiones calculadas.

3.2. Fichas de recolección de datos (diámetros de filamento)

En las siguientes tablas, se recopiló la información de las mediciones del diámetro de los filamentos obtenidos con cada una de las combinaciones del material compuesto con el uso de la extrusora adaptada.

FILAMENTO TIPO A: 50% PET + 50% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO

Tabla 20. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 50% PET + 50% Fibra de vidrio en polvo

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO A
CODIFICACIÓN:	A1
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	50% PET + 50% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO
TASA DE EXTRUSIÓN:	520 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	7 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA A1 (mm)	2,45
MEDIDA A2 (mm)	2,41
MEDIDA A3 (mm)	2,38
Promedio:	2,41
Fotografía:	



Fuente: El autor

FILAMENTO TIPO A: 75% PET + 25% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO


Tabla 21. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 75% PET + 25% Fibra de vidrio en polvo

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO A
CODIFICACIÓN:	A2
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	75% PET + 25% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO
TASA DE EXTRUSIÓN:	596 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	8.5 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA A4 (mm)	2,18
MEDIDA A5 (mm)	2,24
MEDIDA A6 (mm)	2,12
Promedio:	2,18
Fotografía:	

Fuente: El autor

FILAMENTO TIPO A: 90% PET + 10% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO

Tabla 22. Ficha de diámetros TIPO A Composición volumétrica 90% PET + 10% Fibra de vidrio en polvo

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO A
CODIFICACIÓN:	A3
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	90% PET + 10% FIBRA DE VIDRIO EN POLVO
TASA DE EXTRUSIÓN:	650 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	9,8 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA A7 (mm)	1,3
MEDIDA A8 (mm)	1,61
MEDIDA A9 (mm)	1,54
Promedio:	1,48
Fotografía:	
	

Fuente: El autor

FILAMENTO TIPO B: 50% PET + 50% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm

Tabla 23. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 50% PET + 50% Fibra de vidrio alargada

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO B
CODIFICACIÓN:	B1
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	50% PET + 50% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm
TASA DE EXTRUSIÓN:	490 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	6 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA B1 (mm)	2,78
MEDIDA B2 (mm)	2,87
MEDIDA B3 (mm)	2,91
Promedio:	2,85
Fotografía:	
	

Fuente: El autor

FILAMENTO TIPO B: 75% PET + 25% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm

Tabla 24. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 75%PET + 25%fibra de vidrio alargada

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO B
CODIFICACIÓN:	B3
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	75% PET + 25% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm
TASA DE EXTRUSIÓN:	590 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	8,5 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA B4 (mm)	2,05
MEDIDA B5 (mm)	2,11
MEDIDA B6 (mm)	2,18
Promedio:	2,11
Fotografía:	
	

Fuente: El autor

FILAMENTO TIPO B: 90% PET + 10% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm

Tabla 25. Ficha de diámetros TIPO B Composición volumétrica 90%PET + 10% fibra de vidrio alargada

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS (DIÁMETRO DE FILAMENTO)	
FECHA:	20/05/2021
ELABORADO POR:	Sebastián Villegas
REVISADO POR:	Ing. Segundo Espín L.
TIPO DE FILAMENTO:	TIPO B
CODIFICACIÓN:	B3
COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA:	90% PET + 10% FIBRA DE VIDRIO ALARGADA 2 mm
TASA DE EXTRUSIÓN:	590 mm/min
TEMPERATURA:	185 °C
RPM DEL MOTOR:	8,5 rpm
DIÁMETROS:	
MEDIDA B7 (mm)	1,61
MEDIDA B8 (mm)	1,74
MEDIDA B9 (mm)	1,68
Promedio:	1,68
Fotografía:	
	

Fuente: El autor

3.3. Verificación de la hipótesis

3.3.1. Hipótesis

¿La fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas permitirá innovar su utilización en filamento de impresión 3D?

3.3.2. Hipótesis nula H_0

La fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas no se pueden emplear como filamentos para impresión 3D.

$$H_0 = \phi \text{ del filamento} > \phi \text{ de la boquilla de impresión en 3D}$$

3.3.3. Hipótesis alterna H_a

La fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas sí se pueden emplear como filamentos para impresión 3D.

$$H_a = \phi \text{ del filamento} < \phi \text{ de la boquilla de impresión en 3D}$$

El diámetro de la boquilla de impresión en 3D es de 1,75 mm.

Nivel de confianza

Se establece el nivel de confianza del 95% para este análisis; es decir:

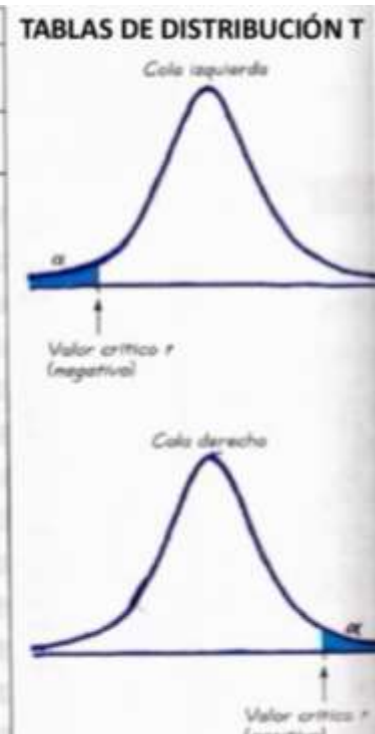
$$\alpha = 0,05$$

Valor de T crítico

Los grados de libertad se calculan empleando el número de muestra n menos 1 ($n-1$). En este caso corresponde al valor de 2, debido a que se efectuará un análisis para cada una de las configuraciones del material compuesto propuestas y en cada una se hicieron 3 mediciones, por lo que $(3-1) = 2$ grados de libertad; a su vez, se empleará la tabla de t-student de cola izquierda para la zona de rechazo de H_0 .

De la siguiente tabla, se obtiene un valor de t (crítico) de -2,92 aplicable para todos los casos de configuraciones de materiales propuestos.

TABLA A-3 Distribución t: Valores críticos t					
Grados de libertad	Área en una cola				
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
Grados de libertad	Área en dos colas				
	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20
1	63.657	31.821	12.706	5.314	3.078
2	9.925	6.965	4.303	3.182	1.886
3	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638
4	4.779	3.747	2.776	2.132	1.533
5	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476
6	3.707	3.143	2.447	1.943	1.440
7	3.499	2.998	2.365	1.895	1.415
8	3.355	2.896	2.306	1.860	1.397
9	3.250	2.821	2.262	1.833	1.383
10	3.169	2.764	2.228	1.812	1.372
11	3.106	2.718	2.201	1.796	1.363
12	3.055	2.681	2.179	1.782	1.356
13	3.012	2.650	2.160	1.771	1.350
14	2.977	2.624	2.145	1.761	1.345
15	2.947	2.602	2.131	1.753	1.341
16	2.921	2.583	2.120	1.746	1.337
17	2.898	2.567	2.110	1.740	1.333
18	2.878	2.552	2.101	1.734	1.330
19	2.861	2.539	2.093	1.729	1.328
20	2.845	2.528	2.086	1.725	1.325
21	2.831	2.518	2.080	1.721	1.323
22	2.819	2.508	2.074	1.717	1.321
23	2.807	2.500	2.069	1.714	1.319
24	2.797	2.492	2.064	1.711	1.318
25	2.787	2.485	2.060	1.708	1.316



Fuente: Triola, M. (2004)

Valor de T experimental

En el caso de muestras pequeñas se aplica el cálculo del valor de t mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$t_{exp} = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{x} : promedio de las mediciones

μ : diámetro de la boquilla

s: desviación típica de la muestra

n: número de las mediciones

El resumen de los valores calculados se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 26 Verificación de la hipótesis en los filamentos tipo A conformados de PET + fibra de vidrio en polvo

50% PET + 50% Fibra de vidrio en polvo	75% PET + 25% Fibra de vidrio en polvo	90% PET + 10% Fibra de vidrio en polvo	
MEDIDA A1 (mm) 2,45	MEDIDA A4 (mm) 2,18	MEDIDA A7 (mm) 1,3	<p>Cola izquierda</p> <p>Valor crítico t (negativo)</p> <p>-2,92</p>
MEDIDA A2 (mm) 2,41	MEDIDA A5 (mm) 2,24	MEDIDA A8 (mm) 1,61	
MEDIDA A3 (mm) 2,38	MEDIDA A6 (mm) 2,12	MEDIDA A9 (mm) 1,54	
Promedio (mm) 2,413	Promedio: 2,18	Promedio: 1,483	
Desviación típica 0,029	Desviación típica 0,049	Desviación típica 0,133	
t experimental 39,59	t experimental 15,19	t experimental -3,48	
t crítico -2,92	t crítico -2,92	t crítico -2,92	
Conclusión	Conclusión	Conclusión	
Se acepta Ho	Se acepta Ho	Se rechaza Ho	

Fuente: El autor

Tabla 27 Verificación de la hipótesis en los filamentos tipo B conformados de PET + fibra de vidrio alargada

50% PET + 50% Fibra de vidrio alargada	75%PET + 25% fibra de vidrio alargada	90%PET + 10% fibra de vidrio alargada	
MEDIDA B1 (mm) 2,78	MEDIDA B4 (mm) 2,05	MEDIDA B7 (mm) 1,61	<p>Cola izquierda</p> <p>Valor crítico t (negativo)</p> <p>-2,92</p>
MEDIDA B2 (mm) 2,87	MEDIDA B5 (mm) 2,11	MEDIDA B8 (mm) 1,74	
MEDIDA B3 (mm) 2,91	MEDIDA B6 (mm) 2,18	MEDIDA B9 (mm) 1,68	
Promedio (mm) 2,853	Promedio (mm) 2,113	Promedio (mm) 1,677	
Desviación típica 0,054	Desviación típica 0,053	Desviación típica 0,053	
t experimental 35,38	t experimental 11,86	t experimental -2,39	
t crítico -2,92	t crítico -2,92	t crítico -2,92	
Conclusión	Conclusión	Conclusión	
Se acepta Ho	Se acepta Ho	Se acepta Ho	

Fuente: El autor

En la verificación de la hipótesis se indica que para el caso del filamento tipo A conformado por 90% de PET + 10% de fibra de vidrio en polvo se rechaza la hipótesis nula que indica que la fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas no se pueden emplear como filamentos para impresión 3D; y se acepta la hipótesis alterna que indica que la fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas sí se pueden emplear como filamentos para impresión 3D.

En la verificación de la hipótesis para las demás configuraciones de material compuesto planteadas se acepta la hipótesis nula que indica que la fabricación de nuevos materiales con componentes poliméricos y fibras sintéticas no se pueden emplear como filamentos para impresión 3D debido a que los diámetros de los filamentos no cumplen con los parámetros establecidos.

CAPITULO IV

PROPUESTA

4.1. Tema

Caracterización del material compuesto de matriz polimérica de 90% de PET reciclado y refuerzo de 10% de fibra de vidrio en polvo para su uso en filamento de impresión 3D

4.2. Descripción

En el proceso de extrusión de los filamentos de material compuesto de fibra de vidrio con material reciclado de botellas plásticas se observaron inconsistencias que influyen de manera considerable al proceso de extrusión, el material plástico triturado es muy duro para la máquina extrusora, por lo que se tuvo que pelletizar el plástico y así se volvió más suave. Por otro lado, la fibra de vidrio en tamaños grandes al momento de salir por la boquilla de la extrusora es de 3mm de diámetro se obstruía y se quedaba tapada sin posibilitar la salida del material.

Debido a estos problemas que se presentaron se tomó la decisión de procesar la fibra de vidrio en forma de polvo y alargada en tamaños no mayores a 2 mm.

Para suprimir esta dificultad se consideró una máquina industrial extrusora de mayor dimensión que puede facilitar el proceso de extrusión de filamentos de material compuesto de fibra de vidrio y plástico reciclado. Sin embargo, la adecuación de esta máquina para obtener los filamentos con las dimensiones requeridas es demasiado alto, debido a que a la máquina se le debe añadir un variador de frecuencia de 5Hp para controlar la velocidad de giro del tornillo extrusor, adecuar un sistema de enfriamiento mediante una tina de agua caliente a temperatura controlada, para lo cual se debería añadir un sistema de resistencias térmicas con un controlador de temperatura que permitan controlar la temperatura del agua de la tina. Además, se debe añadir un carrete de velocidad controlada, el cual enrollará el filamento del material compuesto. Este sistema de enfriamiento y carrete recolector junto con el variador de frecuencia permitirá controlar el diámetro del filamento, ya que la boquilla del extrusor posee un diámetro de 5mm con la cual la extrusora no presenta problemas de obstrucciones de

la fibra de vidrio. Por lo tanto, al controlar la velocidad del carrete recolector y la temperatura de la tina de agua, el filamento de material compuesto se alargará reduciendo su diámetro al diámetro deseado. Este proceso sería inevitable debido a que las impresoras 3D están diseñadas para un diámetro de filamento entre 1,75mm. Se considera este diámetro como el diámetro inicial de cabezal de entrada de la impresora 3D, esto debido a que el diámetro de la boquilla de la impresora es de 0,6mm, pudiendo variar, sin embargo, a menor diámetro de boquilla el acabado final de las piezas impresas será de mejor calidad. Debido a que el filamento utilizado lleva material compuesto no se puede utilizar diámetros muy finos porque la fibra obstruiría el paso ocasionando así obstrucciones en la boquilla.

Sin embargo, se debe considerar otros aspectos como: al momento que la impresora 3D termina un proceso de impresión, el filamento de fibra de vidrio puede ocasionar que la boquilla de la impresora se tape ya que la fibra de vidrio no se derrite del mismo modo que el material reciclado. Además, que puede influir en el acabado de las piezas cuando los filamentos de fibra queden unidos entre el objeto impreso y el material del filamento aun dentro de la boquilla de la impresora 3D.

Para evitar los inconvenientes ocasionados por los filamentos de fibra de vidrio se considera la utilización de fibra molida en forma de polvo y alargada, la cual posee longitudes máximas de 2mm, evitando de esta manera el tapar la boquilla del extrusor. En la investigación ejecutada se obtuvo que la mejor configuración se presenta empleando fibra de vidrio en polvo, por lo que la propuesta se enfoca únicamente en esta composición.

4.3. Objetivos

4.3.1. General

Caracterizar el material compuesto de matriz polimérica de 90% de PET reciclado y refuerzo de 10% de fibra de vidrio en polvo para su uso en filamento de impresión 3D

4.3.2. Objetivos específicos

1. Definir la normativa necesaria para evaluar las propiedades del nuevo material propuesto como filamento de impresión 3D.

2. Realizar ensayos basados en normativa vigente de materiales para obtener las propiedades físicas del nuevo material.
3. Detallar las propiedades físicas y mecánicas del material obtenidas mediante la evaluación mediante ensayos normados.

4.4. Desarrollo

4.4.1. Proceso de caracterización del material

Para realizar los ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas del material es necesario adoptar la normativa que establece los parámetros de realización de los ensayos para garantizar la confiabilidad de los resultados.

4.4.2. Normativa para la evaluación de parámetros de los ensayos

Norma ASTM D5628 -10

Para realizar este ensayo se emplea la máquina de caída de dardos como se expone en la figura 56, entre los dardos que se usa son de las geometrías FA, FB, FC, FD y FE descritas en la tabla 28, en la cual las probetas se ajustan al dardo FE que tiene un peso de 0,232 kg que fue verificado en una balanza como está en la figura 57, con medidas de probetas de 58 x 58 mm con alturas de prueba 200, 300, 500, 700 y 1000 mm; dando como resultado la energía media de fallo requerida para agrietar o romper probetas planas de plástico rígidas bajo varias condiciones específicas de impacto de un dardo en caída libre (tup) basado en como mínimo un número de 5 muestras para tener un amplio rango de mediciones.

Tabla 28. Geometrías de dardos

Geometría	Diámetro de la Probeta mm	Probeta Cuadrada mm
FA	89	89
FB	51	51
FC	140	140
FD	89	89
FE	58	58

Fuente: El autor



Figura 56. Dardos



Figura 57. Dardo FE

Procedimiento de ensayo

Se ubica la probeta en la base y con dos pernos mediante ajuste neumático se presiona a la misma, posterior a esto se coloca el dardo de la designación elegida por normativa hasta varias alturas dependiendo de la configuración del material de la probeta. Esto se realiza para las muestras que se han elegido rigiéndose en la norma aplicada. Si es necesario se puede aplicar más peso adjunto al dardo si fuere el caso, por si no ocurra fallo en los especímenes ensayados.

Norma ISO 868

El ensayo de dureza Shore D con el instrumento de medición de la figura 58, para materiales de caucho o plásticos duros se fundamenta en utilizar un durómetro portátil

para escalas Shore D, la normativa define que se debe ensayar especímenes no menores a 3 unidades para tener un rango aceptable de resultados.



Figura 58. Durómetro Shore D



Figura 59. Mediciones con durómetro Shore D

Procedimiento

Para tener datos en la medición de dureza se toma el equipo portátil y se configura para unidades Shore D, se lo coloca sobre la superficie del material, probeta a analizar y se presiona hasta que la base del durómetro quede a tope con la superficie ensayada, se toma el valor y así se procede para tomar 5 muestras. Luego de tener 5 resultados se realiza un promedio del valor obtenido y éste sería el valor final de dureza.

Norma ASTM D 638

La máquina universal expuesta en la figura 60, es la que se utiliza para ensayar probetas de tracción, en la cual por normativa se debe ensayar mínimo 3 muestras de ensayo con un espesor no menor a 3,5 mm. Las probetas se las elabora respecto a la normativa que se detalla en la figura 61.



Figura 60. Máquina universal

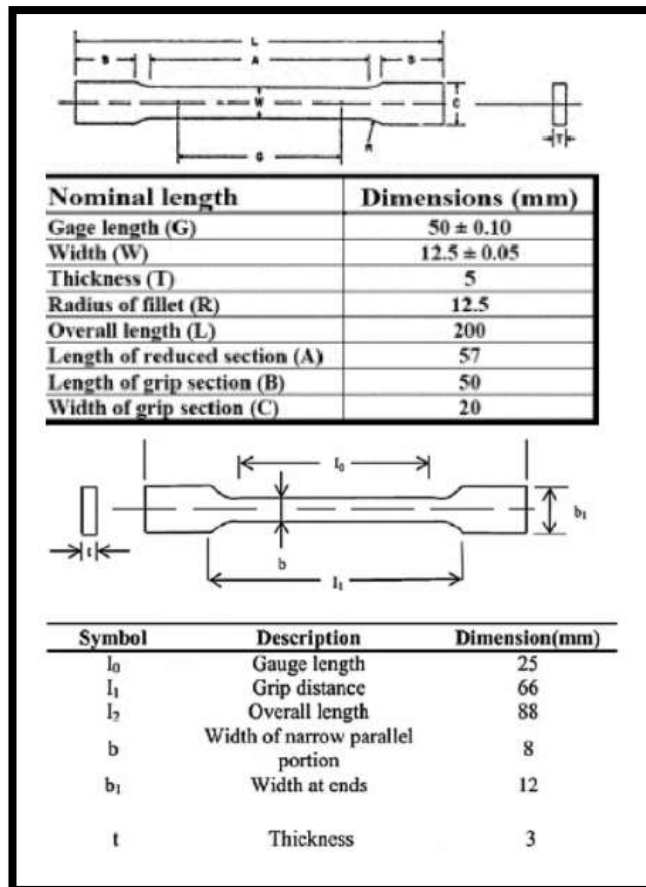


Figura 61. Dimensiones de probeta para tracción

Procedimiento

Se elabora las probetas de acuerdo con la normativa con las especificaciones y características requeridas, se ubica las muestras en las muelas de la máquina teniendo en cuenta la distancia de trabajo, se introduce los datos de longitud, ancho, espesor, peso y distancia de trabajo en el software especializado. Luego se inicia el proceso de tracción, en el software arroja como resultado la gráfica de fluencia y ruptura (diagrama esfuerzo vs. deformación), los datos obtenidos son la carga de resistencia ultima y rotura en KN y el esfuerzo de la resistencia ultima y rotura en MPA.

Tabla 29 Cantidad y dimensiones de probetas

Tipo de ensayo	Normativa	Número de muestras de acuerdo con la normativa	Número de muestras recomendadas
Impacto por dardos	ASTM D5628-10	Mínimo 5 probetas de 58 * 58mm, H/e = 3,5 mm	5 probetas de 58 * 58mm
Dureza de Shore D	NTE INEN-ISO 868	Mínimo 3 probetas D = 16mm y H/e = 3.5 mm	3 probetas D = 16mm y H/e = 3,5 mm
Tracción	ASTM D638	Mínimo 3 probetas / L = 165 mm, H = 18 mm, e = 4mm	3 probetas / L = 165 mm, H = 18 mm, e = 4mm

Fuente: El autor

Tabla 30 Matriz para el análisis de variables

FACTOR 1	FACTOR 2	Plástico reciclado en pellet más fibra de vidrio en polvo
Ensayos	Impacto	5
	Tracción	3
	Dureza	6

Fuente: El autor

4.4.3. Elaboración del ensayo de dureza

Para los ensayos de dureza se utilizaron 3 probetas por cada tipo de composición, de acuerdo con la medida indicada en la normativa NTE INEN-ISO 868, para lo cual se realizó 2 ensayos por cada probeta obteniendo así 6 resultados de la composición propuesta de 90% de PET con 10% de fibra de vidrio en polvo.

La numeración de las probetas se lo realizo de la siguiente manera: la primera letra indica es la P referente a probeta, la segunda letra indica el tipo de ensayo D de dureza, I de impacto y T de tracción, el tercer número indica el número de probeta y por último la cuarta letra indica el tipo de composición, siendo A para la composición de PET con fibra de vidrio en polvo.



Figura 62 Aplicación del ensayo de dureza Shore D



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA




CENTRO DE TRANSFERENCIAS Y TECNOLOGÍAS

ENSAYO DUREZA

DATOS INFORMATIVOS

Tipo de estudio:	De laboratorio	Norma:	INEN ISO 868
Identificación del componente de estudio:	Impresión 3D, Material filamento extruido de 90% PET reciclado con refuerzo de 10% fibra de vidrio en polvo		
Solicitado por:	Edmundo Sebastián Villegas Suárez	Fecha:	12/05/2021
Centro de Estudio y Análisis:	Laboratorio de Metalografía - FICM		

PARÁMETROS

Equipo:	Durómetro para Metales		
	Temperatura Ambiente:	Dureza:	Iluminación:
	17.80 ° C	SHORE D Ensayo en gomas y plásticos duros	Luz Natural

MATERIAL POR ENSAYAR:



RESULTADOS:

PET RECICLADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN POLVO



Numero de medición	DUREZA SHORE D
1	86,5
2	85,0
3	85,5
4	85,5
5	86,0
6	84,5
PROMEDIO	85,50

4.4.4. Elaboración del ensayo de impacto por dardos

Para el ensayo de impacto por dardos se realizó 5 probetas, de las cuales se obtuvo 1 resultado. Las dimensiones de las probetas fueron tomadas en base a la normativa ASTM D5628-10.



Figura 63 Ensayo de impacto para probetas de PET con fibra de vidrio en polvo.



Figura 64. Probetas para el ensayo de impacto del material compuesto de 90% PET + 10% fibra de vidrio en polvo






P-I-01-A		P-I-04-A	
P-I-02-A		P-I-05-A	
P-I-03-A			

Figura 65. Resultados del ensayo de impacto en las probetas de material compuesto de 90% PET + 10% fibra de vidrio en polvo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CENTRO DE TRANSFERENCIAS Y TECNOLOGÍAS



FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS INFORMATIVOS:

Fecha:	11/05/2021	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales		Campus Huachi
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto		
Realizado por:	Egdo. Cristian Sánchez	Revisado por:	Ing. Byron López
Tipo de material:	Impresión 3D, Material filamento de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo		Orden: 70

PARÁMETROS DE ENSAYO

Tipo de Medición:	Energía Media de Impacto (J)	Norma:	ASTM D5628-10
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm	No. de probetas:	5



CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
P-I-01-A	58,15	58,21	4,00	0,232	-	200	0,0455	No falla
P-I-02-A	58,64	58,05	4,00	0,232	-	300	0,0683	No falla

P-I-03-A	58,32	58,10	4,00	0,232	-	500	0,1138	Falla
P-I-04-A	58,14	58,18	4,00	0,232	-	700	0,1593	Falla
P-I-05-A	58,11	58,03	4,00	0,232	-	1000	0,2276	Falla

4.3.5. Elaboración del ensayo de tracción



Figura 66 Ensayo de resistencia a la tracción de probetas de 90% PET con 10% fibra de vidrio en polvo.



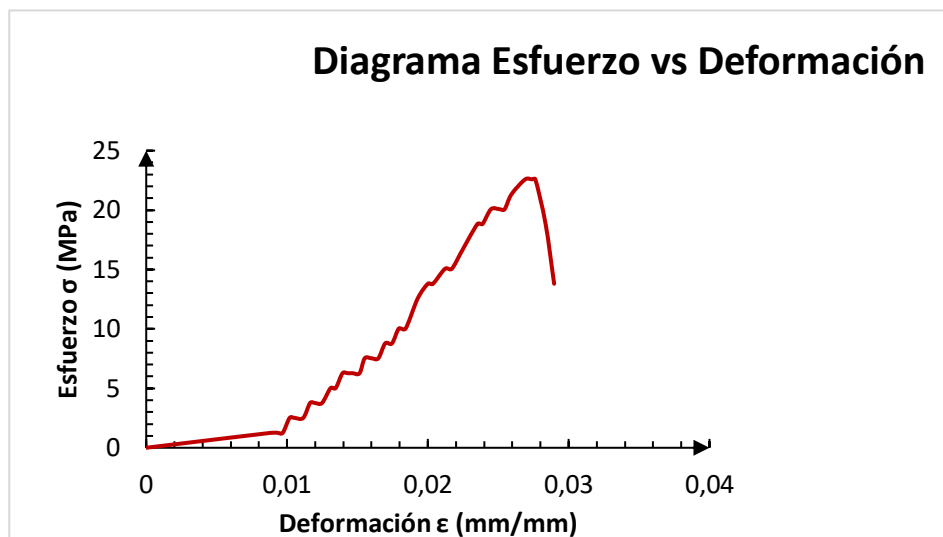
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnológico para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresión 3D.		
SOLICITA:	Sebastián Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M1	DESCRIPCIÓN:	Impresión 3D, filamento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0125kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta plástica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	50 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,0 mm
CARGA MAXIMA:	1,22 kN	AREA PROBETA:	72 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,22 kN	22,58 MPA

ROTURA:	0,74 kN	13,79 MPA
---------	---------	-----------



UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍAS



CTT FICM
 CENTRO DE TRANSFERENCIA DE
 TECNOLOGÍAS
 Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

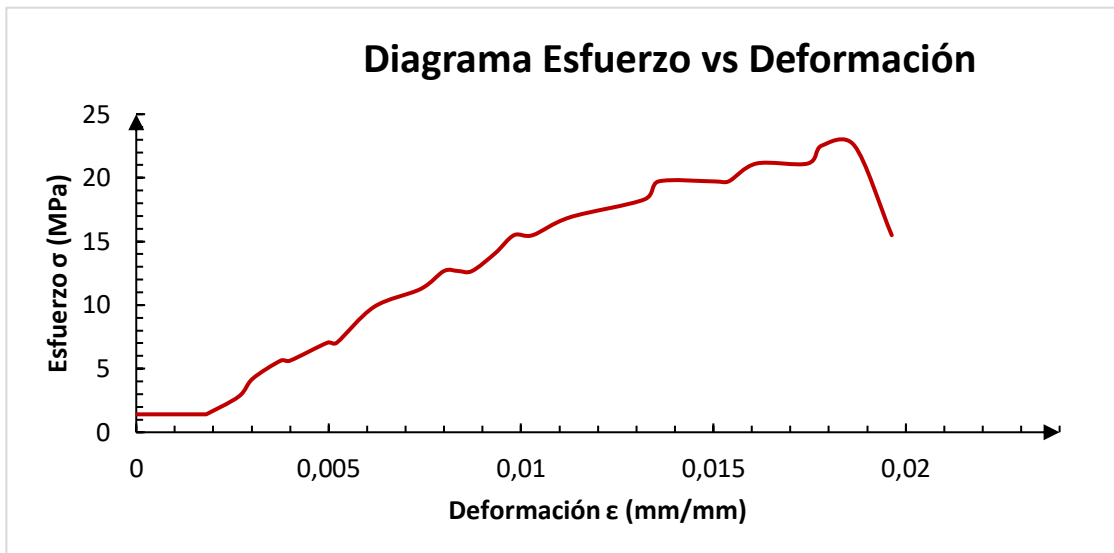
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnológico para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresión 3D.		
SOLICITA:	Sebastián Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M2	DESCRIPCIÓN:	Impresión 3D, filamento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0138 kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta plástica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD MORDAZAS: ENTRE	55 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,1 mm
CARGA MAXIMA:	1,08 kN	AREA PROBETA:	73,8 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,08 kN	22,53 MPA
ROTURA:	0,74 kN	15,49 MPA



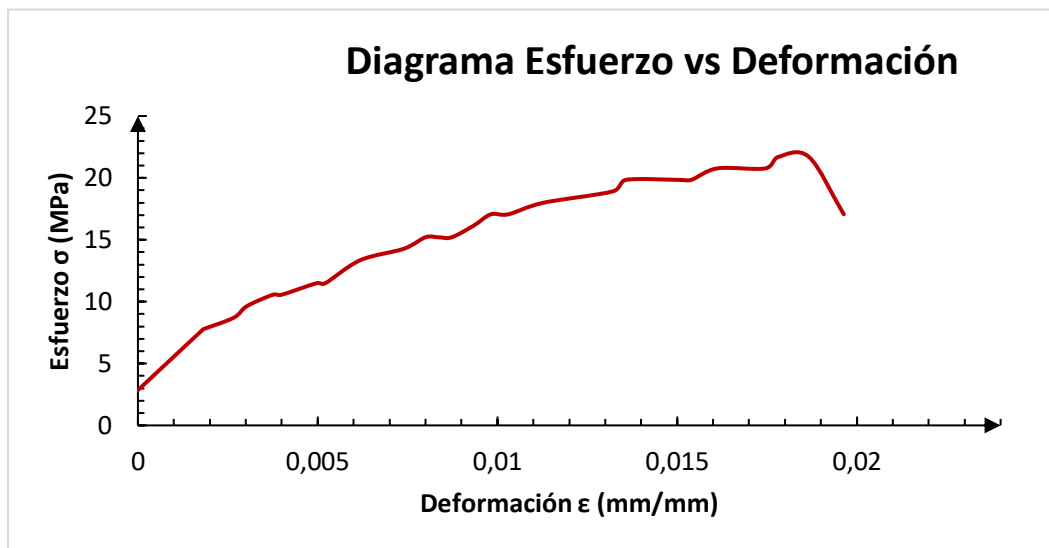
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnológico para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresión 3D.		
SOLICITA:	Sebastián Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M3	DESCRIPCIÓN:	Impresión 3D, filamento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0115 kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta plástica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD MORDAZAS: ENTRE	53 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,1 mm
CARGA MAXIMA:	1,58 kN	AREA PROBETA:	73,0 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,58 kN	21,69 MPA
ROTURA:	1,24 kN	17,06 MPA

4.4.6. Caracterización del material

Comparación con productos existentes en el mercado

Tabla 31 características y propiedades del filamento existente en el mercado.

3D Printer Filaments	Physical Properties									Special Properties
3D Printer Filaments	Ext. Temp.(°C)	Bed Temp.(°C)	Adhesion	Opacity	Solvent	Moisture	Strength	Flexibility	Durability	
ABS	220-230	80-110	Kapton	50-100%	Acetone	Low				strong, ductile
PLA	180-200	60-80	Blue Tape	50-100%	Ethyl Acetate	Low				Biodegradable
Polycarbonate	220-310	100-110	Glue Stick	50%	Dimethyl	Low				strong & very resistant
Nylon	240-260	60-80	PVA	75%	Xylenol	High				strong, durable, flexible
HIPS	210-230	110	Kapton	100%	Limonene	Low				Supporting Material
Carbon Fiber	195-220	45-55	Blue tape	100%	Ethyl Acetate	Low				Reinforced with Standard Filaments
Wood	200-230	90-110	Blue Tape	100%	Ethyl Acetate	Low				Wood Finish
Metal	190-230	Not required	Blue Tape	50-100%	No	Low				Metal Finish
Luminious	210-240	30-50	Blue Tape	75%	No	Low				Glow in the Dark
Conductive	225-260	90-100	Kapton	100%	Acetone	Low				Conductive

Tabla 32. Características y propiedades del filamento obtenido por extrusión de 90% PET con 10% fibra de vidrio en polvo.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,45
Esfuerzo en el punto de fluencia	MPa	22,27
Resistencia al impacto	kJ/m ²	0,068
Dureza Shore D	Shore D	85,50
Temperatura máxima de servicio.	°C	160

Fuente: El autor

El nuevo material propuesto compuesto de PET con fibra de vidrio en polvo tiene una densidad de 1,45 g/cm³ mediante los ensayos de tracción realizados se obtuvo un esfuerzo de fluencia de 15,44 MPa, mientras que la resistencia al impacto obtenida por

ensayos normados corresponde a $0,068 \text{ kJ/m}^2$ la dureza shore D tiene un valor de 85,50 y una temperatura máxima de servicio de $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Las características del nuevo material presentan características similares a filamentos de impresión 3D existentes en el mercado, por lo que sería factible usar el material propuesto en este proceso de manufactura industrial.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES

Para la fabricación del filamento para impresión en 3D se analizaron varias opciones de procesamiento de la materia prima, se determinó que el PET reciclado debe ser pelletizado para poder facilitar el proceso de extrusión, así como el procesamiento de la fibra de vidrio que fue recortada en tramos de 2 mm y procesada en polvo; finalmente se determinó que la fibra de vidrio en polvo rinde mejores resultados para la creación del filamento.

Los parámetros de funcionamiento de la extrusora se basan en la adaptación que se hizo para modificar su funcionamiento para la inclusión de la fibra de vidrio, se adaptó la tolva que actualmente tiene una capacidad de 2,76 litros, el tornillo que de igual manera fue modificado funciona a una presión de 32 MPa y con un torque de 20,5 N.m; la temperatura de extrusión es de 160 °C.

Se plantearon varias opciones de la materia prima para la creación del filamento empleando fibra de vidrio de 2 mm de longitud y fibra de vidrio en polvo con diferentes composiciones de mezcla; se determinó que la configuración óptima es de 90% de PET reciclado con 10% de fibra de vidrio en polvo debido a que bajo esas condiciones cumple con los parámetros requeridos para la extrusión como es el diámetro de 1,75 mm.

Las propiedades mecánicas del material propuesto son factibles para la creación de elementos impresos en 3D, la temperatura de procesamiento es de 160°C, 1,45 g/cm³ de densidad; esfuerzo de fluencia de 15,44 MPa, resistencia al impacto de 0,068 kJ/m² y dureza shore D de 85,50.

Para la creación de fibra de vidrio en polvo se requiere emplear un molino con bolas de mármol para evitar el daño del material.

5.2. RECOMENDACIONES

Para la creación de fibra de vidrio en polvo se requiere emplear un molino con bolas de mármol para evitar el daño del material.

Es necesario realizar una correcta configuración del extrusor en base a las temperaturas, además de un ajuste en las revoluciones del motor para obtener resultados confiables y aceptables del filamento óptimo para la impresión 3D.

Para obtener una producción masiva se debe adecuar una máquina extrusora industrial con todas las adaptaciones necesarias con los accesorios respectivos, como un canal de agua para el enfriamiento, un carrete para halar y enrollar el filamento con la finalidad de obtener el diámetro necesario dependiendo de la velocidad de dicho carrete, control automático de temperaturas con varias niquelinas para tener un calentamiento en la mayor parte del cañón extrusor.

En base a la presente investigación se debería analizar la aplicación del material compuesto resultante en la industria.

Se debe realizar estudios y análisis de factibilidad económica para la implementación de maquinaria productora de filamentos para impresión 3D dentro la ciudad y del país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. A. García and J. Manuel Gómez De Gabriel, *EXTRUSIÓN MULTIFILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D EN COLOR*. 2014.
- [2] “(No Title).” <http://red.uao.edu.co:8080/bitstream/10614/11024/5/T08590.pdf> (accessed Jul. 04, 2020).
- [3] S. De Chile, “Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D,” Universidad de Chile, 2015. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/135054>.
- [4] “Extrusora de filamentos poliméricos.” <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/384> (accessed Jul. 04, 2020).
- [5] O. F. L. Luna, W. L. A. Maldonado, and C. A. F. Arias, “Implementación de máquina extrusora Open Hardware de filamento de ácido poliláctico (PLA) para el reciclaje de residuos plásticos de impresión 3D,” *[2019-LISBOA] Congr. Int. Tecnol. Cienc. y Soc.*, Sep. 2018, Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://conferences.eagora.org/index.php/tecnoysoc/tech2019/paper/view/6883>.
- [6] “Plástico en el mundo: la invasión ya ha comenzado.” <https://nikkenlatam.com/enews/noticia/?id=4844> (accessed Jul. 04, 2020).
- [7] “CÓMO AFECTA EL PLÁSTICO AL MEDIO AMBIENTE.” <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/como-afecta-el-plastico/> (accessed Jul. 04, 2020).
- [8] “(No Title).” [https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/40932/3560902038562UTF SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/40932/3560902038562UTF%20SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed Jul. 18, 2020).
- [9] “La moda incorpora plástico PET reciclado para confeccionar ropa.” <https://www.lavanguardia.com/natural/20150224/54427561102/plastico-pet-reciclado-confeccionar-ropa.html> (accessed Nov. 17, 2019).
- [10] “Estudio de factibilidad de la producción de filamento para la impresión 3D, a partir de botellas (PET) recicladas en Uniempresarial.” <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/23893> (accessed Jul. 18, 2020).

- [11] G. Santiago and P. León, “Study of feasibility for the production of filament for 3D printing from PET bottles recycled in Uniempresarial,” 2019. Accessed: Jul. 18, 2020. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/23893>.
- [12] F. DE Mecánica and L. Enrique Vargas Ayala, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO ‘DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA PARA CREAR EL FILAMENTO DE LA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIAL PLÁSTICO’ CARLOS ANDRÉS GUTIÉRREZ PAREDES,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Nov. 2017. Accessed: Jul. 18, 2020. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7922>.
- [13] “Reciclado de Plásticos ¿Cómo se Reciclan?” <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/21178/Reciclado-de-Plasticos-Como-se-Reciclan> (accessed Jul. 04, 2020).
- [14] “Reducir, reutilizar y reciclar: descubre las claves de un mundo más sostenible | Ingredientes que Suman.” <https://blog.oxfamintermon.org/reducir-reutilizar-reciclar-descubre-las-claves-de-un-mundo-mas-sostenible/> (accessed May 27, 2021).
- [15] “El reciclaje del plástico - Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje.” <https://www.recytrans.com/blog/el-reciclaje-del-plastico/> (accessed Jul. 04, 2020).
- [16] “El reciclaje del plástico - Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje.” <https://www.recytrans.com/blog/el-reciclaje-del-plastico/> (accessed May 27, 2021).
- [17] “Tipos de plásticos :: PlasticsEurope.” <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/large-family> (accessed May 27, 2021).
- [18] “¿Qué es el PET?” <https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4> (accessed May 27, 2021).
- [19] “MAESTRÍA EN MECÁNICA TEMA: Trabajo de Titulación Autor: Director: Ing . Willan Pablo Castillo Herrera . Ing . Juan Gilberto Paredes Salinas , Mg Ambato- Ecuador,” no. Cohorte, 2017.

- [20] “Fibras artificiales y fibras sintéticas | Indumentariaymoda.com en Latinoamérica.”
<https://diseniodeindumentaria2.wordpress.com/2008/04/29/fibras-artificiales-y-fibras-sinteticas/> (accessed May 27, 2021).
- [21] “Materiales Compuestos.”
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html> (accessed May 27, 2021).
- [22] “Materiales Compuestos | Naval Composites.”
<https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos> (accessed Jul. 18, 2020).
- [23] “Tipos de materiales compuestos.” <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/> (accessed Jul. 05, 2020).
- [24] “▷ Tipos de filamento para impresoras 3D | Impresora D3D.”
<http://impresorad3d.com/filamento-para-impresoras-3d-tipos/> (accessed Jul. 04, 2020).
- [25] “Extrusión - procesos de fabricacion.”
<https://sites.google.com/site/procesosdefabricacion33/extrusion> (accessed Jul. 04, 2020).
- [26] “Extrusión, Filamento | Mexico.”
<https://www.entecpolymers.com.mx/products/processing-methods/extrusion-filament> (accessed Jul. 05, 2020).
- [27] “Procesos de Extrusión.” <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-extrusion/> (accessed May 27, 2021).
- [28] “(No Title).”
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/135054/Diseno-de-una-extrusora-para-filamento-de-impresion-3D.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed Jul. 09, 2020).
- [29] “¿Qué es la impresión 3D? | Tecnología de impresión 3D | Autodesk.”
<https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing> (accessed Jul. 05, 2020).
- [30] “¿Qué es la impresión 3D? | Tecnología de impresión 3D | Autodesk.”
<https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing> (accessed May 27,

- 2021).
- [31] “Qué es la Impresión 3D - 3D Newworld.” <https://3dnewworld.com/que-es-la-impresion-3d/> (accessed Jul. 05, 2020).
- [32] “PET | Tecnología de los Plásticos.” <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html> (accessed May 27, 2021).
- [33] “Fibra de vidrio: Propiedades y usos ¡Lo que necesitas saber! | Motorex.” <http://www.motorex.com.pe/blog/propiedades-usos-fibra-vidrio/> (accessed May 27, 2021).
- [34] “Gradación-Tamices.” Accessed: May 27, 2021. [Online]. Available: www.ele.com/es.
- [35] “Balanza de precisión 100g/0.001g, serie 5063 - Material de Laboratorio.” <https://www.auxilab.es/es/productos-laboratorio/balanza-de-precision-100g-0-001g-serie-5063/> (accessed May 30, 2021).
- [36] “Kit Filastruder.” <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=323882043> (accessed May 27, 2021).
- [37] “(2) (PDF) Kupdf.com transformacion de plasticos vk savgorodny | Mohammed Madani - Academia.edu.” https://www.academia.edu/35550381/Kupdf_com_transformacion_de_plasticos_vk_savgorodny (accessed May 28, 2021).
- [38] “El ventilador de capa en impresión 3D - Bitfab.” <https://bitfab.io/es/blog/ventilador-de-capas/> (accessed May 27, 2021).
- [39] “Motor paso a paso NEMA 17 / 3.2Kg/cm Pololu 1200 | BricoGeek.com.” <https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html> (accessed May 27, 2021).
- [40] “Prusa I4 – Sunhokey – Impresoras 3d.” <http://americanprinter3d.com/index.php/producto/impresora-3d-modelo-2/> (accessed May 27, 2021).
- [41] “Propiedades térmicas y mecánicas del PET reciclado y sus mezclas.” <https://www.plastico.com/temas/Propiedades-termicas-y-mecanicas-del-PET-reciclado-y-sus-mezclas+3056093> (accessed May 31, 2021).

ANEXOS

ENSAYOS REALIZADOS



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA
MECÁNICA

RESISTENCIA DE IMPACTO SEGÚN ASTM D 5628-10

MAYO DE 2021

AMBATO-ECUADOR



INFORME TÉCNICO

CTT-FICM-2021

Objetivo

- Establecer y mantener un método para evaluar la energía media de impacto en polímeros.

Alcance

Determinación de energía necesaria para el fallo de polímeros por impacto de dardo según las especificaciones señaladas en la norma ASTM D 5628-10.

ANTECEDENTES:

Con fecha 27 de abril de 2021, el Ingeniero Edmundo Sebastián Villegas Suárez egresado de la Maestría de Mecánica Mención Manufactura de la Universidad Técnica de Ambato; domiciliado en la ciudad de Ambato, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, realizar ensayos de laboratorio para medir la energía media de impacto en muestras de material polimérico.

Se reciben 12 probetas, en dos grupos de probetas bajo las designaciones:

P-I-A-01

P-I-A-02

P-I-A-03

P-I-A-04

P-I-A-05

P-I-B-01

P-I-B-02

P-I-B-03

P-I-B-04

P-I-B-05

Probetas para ensayo de Impacto en Material PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio fabricado por proceso de extrusión de filamento y posterior impresión 3D de las probetas; se realizó un ensayo piloto de dos probetas por cada grupo para comprobar la factibilidad de que las probetas puedan ser ensayadas. Posterior a ello se ensayó un total de 8 probetas, todas presentan superficies lisas.



PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO FIBRA DE VIDRIO EL PÓLVO



PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO FIBRA DE VIDRIO CORTADA (2mm)



PROCESO GENERAL:

- Determinación de número de especímenes para cada muestra.
- Mantener hermetizadas las muestras hasta el ensayo y marcarlas para su identificación.
- Preparación de la máquina de ensayos para la geometría preestablecida (FA, FB, FC, FD, FE) en este caso para el tipo FE dadas las dimensiones de la probeta.

Geometría	Diámetro de la Probeta mm	Probeta Cuadrada mm
FA	89	89
FB	51	51
FC	140	140
FD	89	89
FE	58	58



- Medición y registro del espesor de cada muestra, el cual se muestra en los resultados del ensayo.
- Realizar la prueba de impacto con probetas de calibración, fuera de los grupos mostrados anteriormente y localizamos el rango de falla del material.
- Se colocan las mordazas utilizando una fuerza que permita la inmovilidad de la probeta al momento del impacto.



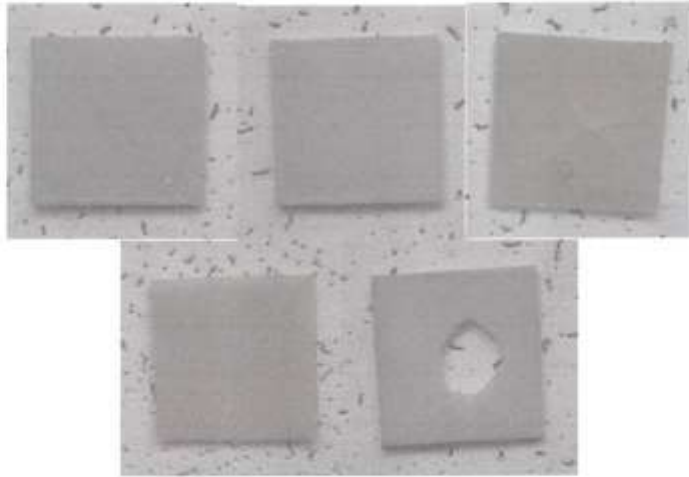


- Colocar la masa a la altura preestablecida, según el método de prueba seleccionado.



- Se libera el dardo asegurándonos que golpee justo en el centro de la muestra, impidiendo cualquier rebote del dardo.
- Retirar la muestra y revisar si ha fallado o no. Considerando que una falla es cualquier grieta o ruptura generado por el impacto el cual pueda ser distinguido por el ojo humano bajo luz normal en condiciones normales.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
Centro de Transferencia y Tecnología								
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
DATOS INFORMATIVOS:								
Fecha:	11/05/2021			Ciudad:	Ambato			
Lugar:	Laboratorios de Materiales				Campus Huachi			
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto							
Realizado por:	Egdo. Cristian Sánchez			Revisado por:	Ing. Byron López			
Tipo de material:	Impresión 3D, Material filamento de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo					Orden: 70		
PARAMETROS DE ENSAYO								
Tipo de Medición:	Energía Media de Impacto (J)			Norma:	ASTM D5628-10			
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm			No. de probetas:	5			
								
CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
P-I-01-A	58,15	58,21	4,00	0,232	-	200	0,0455	No falla
P-I-02-A	58,64	58,05	4,00	0,232	-	300	0,0683	No falla
P-I-03-A	58,32	58,10	4,00	0,232	-	500	0,1138	Falla
P-I-04-A	58,14	58,18	4,00	0,232	-	700	0,1593	Falla
P-I-05-A	58,11	58,03	4,00	0,232	-	1000	0,2276	Falla



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
Centro de Transferencia y Tecnología			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	11/05/2021	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales	Campus Huachi	
Equipo:	Maquina tipo caída de masas de Impacto		
Realizado por:	Egdo. Cristian Sánchez	Revisado por:	Ing. Byron López
Tipo de material:	Impresión 3D, Material filamento de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio	Orden: 70	
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de Medición:	Energía Media de Impacto (J)	Norma:	ASTM D5628-10
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm	No. de probetas:	5
			

CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
P-I-01-B	58,12	58,25	4,00	0,232	-	200	0,0455	No falla
P-I-02-B	58,03	58,26	4,00	0,232	-	400	0,0910	No falla
P-I-03-B	58,29	58,35	4,00	0,232	-	600	0,1366	Falla
P-I-04-B	58,33	58,18	4,00	0,232	-	800	0,1820	Falla
P-I-05-B	58,27	58,51	4,00	0,232	-	1000	0,2276	Falla



Conclusiones

- Las probetas P-I-A, tienen una energía de fallo de 0,1138 J.
- Las probetas P-I-B, tienen una energía de fallo de 0,1366 J.
- Todas las probetas se las ensayó con el método de prueba E, con el dardo de 0,223 Kg según lo especificado por la normativa ASTM D5628-10.



Ing. Byron López
TÉCNICO DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



Egdo. Christian Sánchez L.
AUXILIAR DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA

ENSAYO DE DUREZA EN POLÍMEROS SEGÚN ISO 868

MAYO DE 2021

AMBATO – ECUADOR




UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
Laboratorio – Ingeniería Mecánica

ENSAYO DUREZA

DATOS INFORMATIVOS

Tipo de estudio:	De laboratorio	Norma:	INEN ISO 868
Identificación del componente de estudio:	Impresión 3D, Material filamento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo		
Solicitado por:	Edmundo Sebastián Villegas Suárez	Fecha:	12/05/2021
Centro de Estudio y Análisis:	Laboratorio de Metalografía - FICM		

PARÁMETROS

Equipo:	Durómetro para Metales		
	Temperatura Ambiente:	Dureza:	Iluminación:
	17.80 ° C	SHORE D Ensayo en gomas y plásticos duros	Luz Natural

MATERIAL POR ENSAYAR:



RESULTADOS:

PET RECICLADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN POLVO



Numero de medición	DUREZA SHORE D
1	86,5
2	85,0
3	85,5
4	85,5
5	86,0
6	84,5
PROMEDIO	85,50



PET RECICLADO CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO EN POLVO



Numero de medición	DUREZA SHORE D
1	91,5
2	90,0
3	90,5
4	91,0
5	92,5
6	90,5
PROMEDIO	91,00





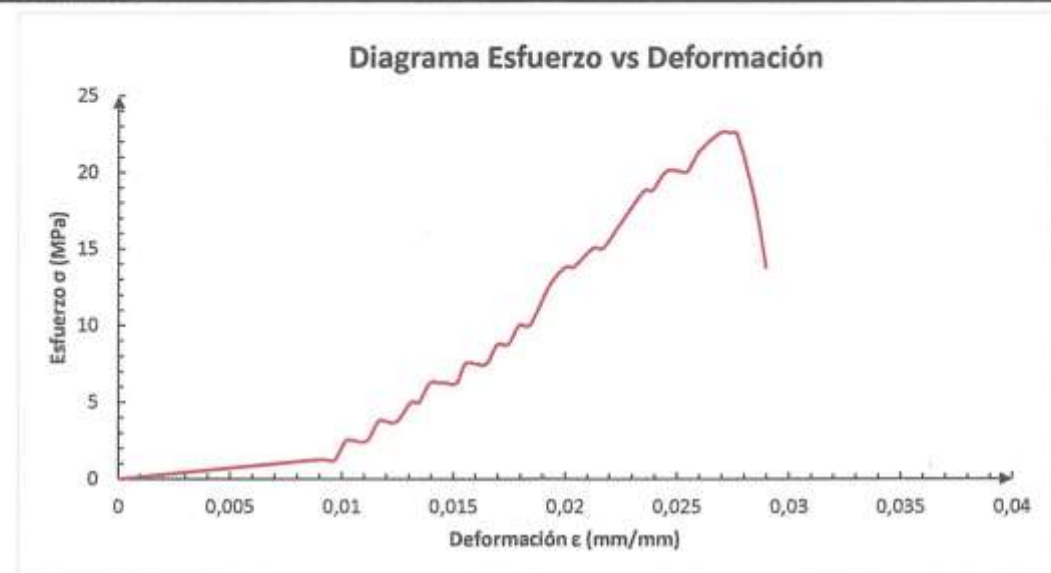
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnologico para la fabricacion de materiales compuestos con matriz polimerica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresión 3D.		
SOLICITA:	Sebastian Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M1	DESCRIPCIÓN:	impresión 3D, material extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0125kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta Plastica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	50 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,0 mm
CARGA MAXIMA:	1,22 kN	AREA PROBETA:	72 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,22 kN	22,58 MPA
ROTURA:	0,74 kN	13,79 MPA


Ing. Byron Lopez
TÉCNICO DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA


Ing. Freddy Plimbo
AUXILIAR DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA



ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnologico para la fabricacion de materiales compuestos con matriz polimerica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresion 3D.		
SOLICITA:	Sebastian Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M2	DESCRIPCIÓN:	Impresión 3D, miamiento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0138 kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta Plastica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	55 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,1 mm
CARGA MAXIMA:	1,08 kN	AREA PROBETA:	73,8 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,08 kN	22,53 MPA
ROTURA:	0,74 kN	15,49 MPA


 Ing. Byron Lopez
 TÉCNICO DE LABORATORIO
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA, A.


 Ing. Freddy Pimbo
 AUXILIAR DE LABORATORIO
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA



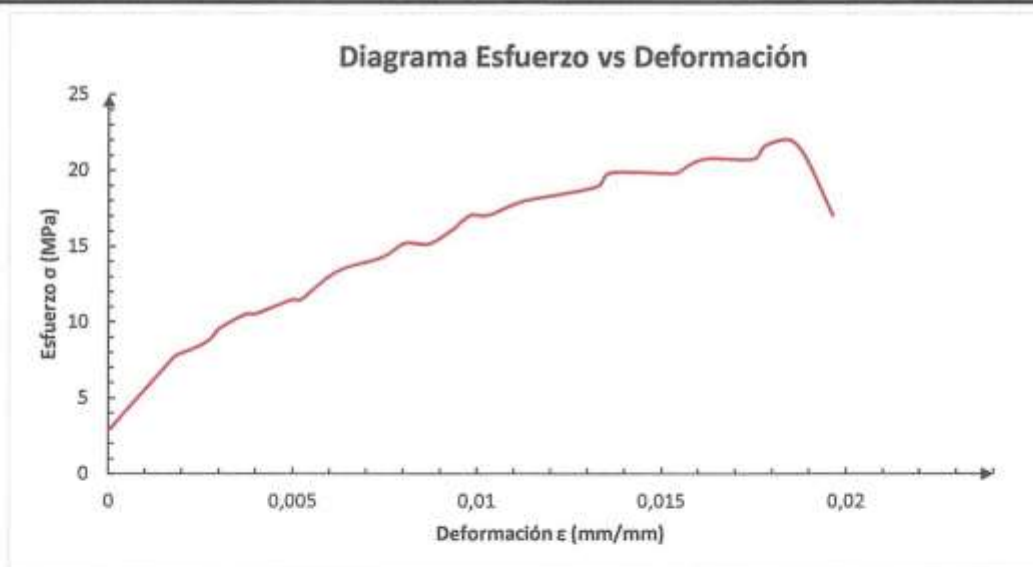
ENSAYO A TRACCIÓN NORMA ASTM D638

OBRA O PROYECTO:	Proceso tecnologico para la fabricacion de materiales compuestos con matriz polimerica reforzados con fibra de vidrio para uso en filamento de impresion 3D.		
SOLICITA:	Sebastian Villegas Suarez	ORDEN DE TRABAJO:	-
UBICACIÓN:	Ambato	FECHA DE EXPEDICIÓN:	14/5/2021
ID MUESTRA:	M3	DESCRIPCIÓN:	Impresión 3D, filamento extruido de PET reciclado con refuerzo de fibra de vidrio en polvo

ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

INSTRUMENTO:	MAQUINA UNIVERSAL CONTROLS CAPACIDAD 2000 KN		
PESO PROBETA:	0,0115 kg	ANCHO PROBETA:	18 mm
ESPECIFICACION DE MATERIAL:	Probeta Plastica	LONGITUD PROBETA:	165 mm
TIPO O GRADO:	-	LONGITUD ENTRE MORDAZAS:	53 mm
TEMPERATURA DEL AMBIENTE:	17 °C	ESPESOR:	4,1 mm
CARGA MAXIMA:	1,58 kN	AREA PROBETA:	73,0 mm ²

RESULTADOS:



RESUMEN

DESCRIPCIÓN	CARGA	ESFUERZO
LIMITE DE PROPORCIONALIDAD:	-	-
PUNTO DE FLUENCIA:	-	-
RESISTENCIA ULTIMA:	1,58 kN	21,69 MPA
ROTURA:	1,24 kN	17,06 MPA


Ing. Byron Lopez
TÉCNICO DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
U.T.A.




Ing. Eddy Pimbo
AUXILIAR DE LABORATORIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
U.T.A.



NORMAS



Designation: D5628 – 10

Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)¹

This standard is issued under the fixed designation D5628; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

Scope²

This test method covers the determination of the threshold of impact-failure energy required to crack or break rigid plastic specimens under various specified conditions of impact of a free-falling dart (tup), based on testing many specimens.

The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific hazard statements are given in Section 8.

1—This test method and ISO 6603-1 are technically equivalent when the test conditions and specimen geometry required for dry ICE and the Bruceton Staircase method of calculation are used.

Referenced Documents

ASTM Standards:²

- D18 Practice for Conditioning Plastics for Testing
- D83 Terminology Relating to Plastics
- D600 Terminology for Abbreviated Terms Relating to Plastics
- D709 Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method
- D444 Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoelastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight)
- D763 Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors

This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics, the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved July 1, 2010. Published July 2010. Originally approved 4. Last revision edition approved in 2007 as D5628 - 07. DOI: 10.1520/D5628-10.

For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

D6779 Classification System for Polyamide Molding and Extrusion Materials (PA)

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standards:³

ISO 291 Standard Atmospheres for Conditioning and Testing

ISO 6603-1 Plastics—Determination of Multiaxial Impact Behavior of Rigid Plastics—Part 1: Falling Dart Method

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of plastic terms used in this test method, see Terminologies D883 and D1600.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *failure (of test specimen)*—the presence of any crack or split, created by the impact of the falling tup, that can be seen by the naked eye under normal laboratory lighting conditions.

3.2.2 *mean-failure energy (mean-impact resistance)*—the energy required to produce 50 % failures, equal to the product of the constant drop height and the mean-failure mass, or, to the product of the constant mass and the mean-failure height.

3.2.3 *mean-failure height (impact-failure height)*—the height at which a standard mass, when dropped on test specimens, will cause 50 % failures.

Note 2—Cracks usually start at the surface opposite the one that is struck. Occasionally incipient cracking in glass-reinforced products, for example, is difficult to differentiate from the reinforcing fibers. In such cases, a penetrating dye can confirm the onset of crack formation.

3.2.4 *mean-failure mass (impact-failure mass)*—the mass of the dart (tup) that, when dropped on the test specimens from a standard height, will cause 50 % failures.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

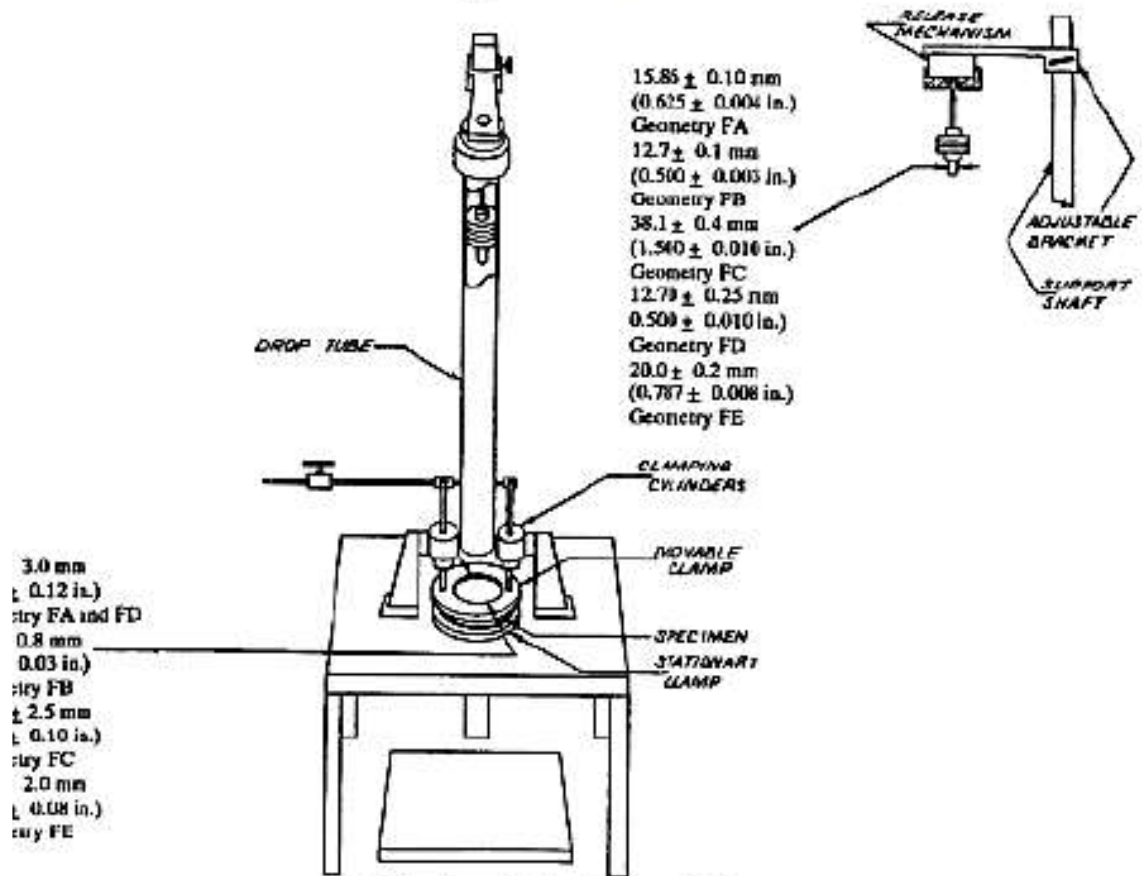


FIG. 2 One Type of Falling Mass Impact Tester

Specimen Clamp—For flat specimens, a two-piece specimen clamp similar to that shown in Fig. 3 is needed. For Geometries FA and FD, the inside diameter should be 76.0 ± 3.0 mm (3.00 ± 0.12 in.). For Geometry FB, the inside diameter should be 38.1 ± 0.80 mm (1.5 ± 0.03 in.). For Geometry FC, the inside diameter should be $127.0 \pm 2.50 \pm 0.10$ in.). For Geometry FE an annular specimen similar to that shown in Fig. 4 is required. The inside diameter should be 40 ± 2 mm (1.57 ± 0.08 in.) (see Table 1). For Geometries FA, FB, FC, and FD, the inside edge of the specimen supporting surface of the lower clamp should be chamfered slightly; a radius of 0.8 mm (0.03 in.) has been found satisfactory. For Geometry FE this radius should be 1 mm (0.04 in.).

1.1 Contoured specimens shall be firmly held in a jig so that the point of impact will be the same for each specimen.

Tap Support, capable of supporting a 13.5-kg (30-lb) mass with a release mechanism and a centering device to provide uniform, reproducible drops.

3—Reproducible drops are ensured through the use of a tube or guide through which the tap falls. In this event, care should be exercised so that the friction that develops will not reduce the velocity of the tap head.

7.1.3 Positioning Device—Means shall be provided for positioning the specimen so that the distance from the impinging surface of the tup head to the test specimen is as specified.

7.2 Tap:

7.2.1 The tap used in Geometry FA shall have a 15.86 ± 0.10 -mm (0.625 ± 0.004 -in.) diameter hemispherical head of tool steel hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to that surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(a) and Table 1).

7.2.2 The tap used in Geometry FB shall be made of tool steel hardened to 54 HRC or harder. The head shall have a diameter of 12.7 ± 0.1 mm (0.500 ± 0.003 in.) with a conical (50° included angle) configuration such that the conical surface is tangent to the hemispherical nose. A 6.4-mm (0.25-in.) diameter shaft is satisfactory (see Fig. 1(b) and Table 1).

7.2.3 The tap used for Geometry FC shall be made of tool steel hardened to 54 HRC or harder. The hemispherical head shall have a diameter of 38.1 ± 0.4 mm (1.5 ± 0.015 in.). A steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to that surface.

ASTM D5628 - 10

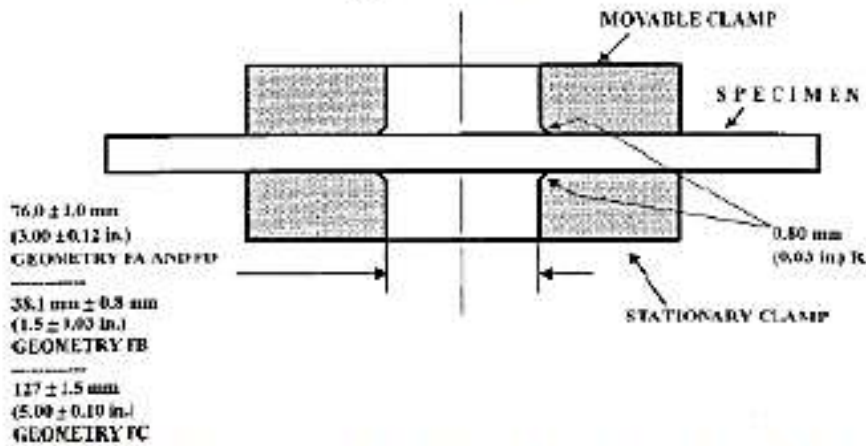


FIG. 3 Support Plate/Specimen/Clamp Configuration for Geometries FA, FB, FC, and FD

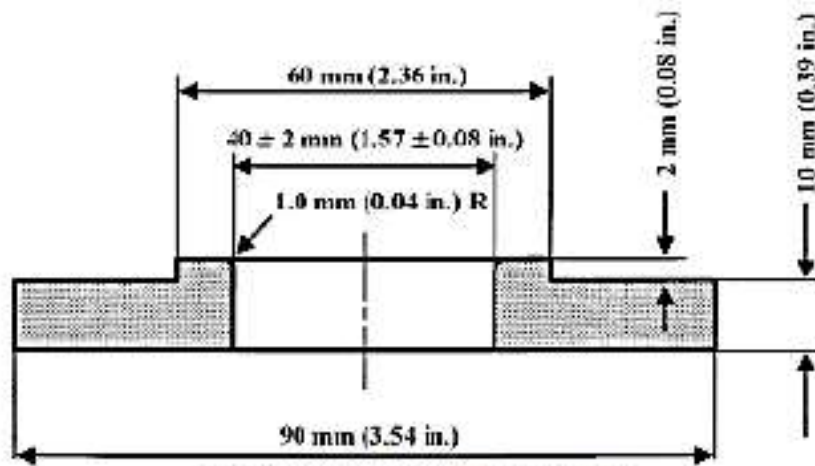


FIG. 4 Test-Specimen Support for Geometry FE

TABLE 1 Top and Support Ring Dimensions

Y	Dimensions, mm (in.)	
	Top Diameter	Inside Diameter Support Ring
	15.86 ± 0.10 (0.625 ± 0.004)	76.0 ± 3.0 (3.00 ± 0.12)
	12.7 ± 0.1 (0.500 ± 0.003)	38.1 ± 0.8 (1.5 ± 0.03)
	38.1 ± 0.4 (1.5 ± 0.010)	127.0 ± 2.5 (5.00 ± 0.10)
	12.70 ± 0.25 (0.500 ± 0.010)	76.0 ± 3.0 (3.00 ± 0.12)
	20.0 ± 0.2 (0.787 ± 0.008)	40.0 ± 2.0 (1.57 ± 0.08)

to that surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass (see Fig. 1(c) and

the top used in Geometry FE shall have a 12.70 ± 0.500 ± 0.010-in.) diameter hemispherical head of hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 8

mm (0.31 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to the surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(d) and Table 1).

7.2.5 The top used in Geometry FE shall have a 20.0 ± 0.2-mm (0.787 ± 0.008-in.) diameter hemispherical head of tool steel hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to the surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(e) and Table 1).

7.2.6 The top head shall be free of nicks, scratches, or other surface irregularities.

7.3 *Masses*—Cylindrical steel masses are required that have a center hole into which the top shaft will fit. A variety of masses are needed if different materials or thicknesses are to be

and record thickness for one specimen when it has justly demonstrated that the thickness does not vary an 5 %.

Choose a specimen at random from the sample. Impact or position the specimen. The same surface or location be the target each time (see 6.2). When clamping the specimen, the force should be sufficient to prevent motion of the impacted portion of the specimen when the tup strikes. Unless otherwise specified, initially position the tup 0.008 m (26.0 ± 0.3 in.) from the surface of the specimen.

Adjust the total mass of the tup or the height of the tup, so that the amount expected to cause half the specimens to fail.

If failures cannot be produced with the maximum available drop height, the drop height can be increased. The test temperature could be (a) use of an ice-water mixture, or (b) by air-conditioned to provide one of the temperatures given in 3.3 of Test Method D5628. Conversely, if the unloaded tup causes failures when 0 m, the drop height can be decreased. A moderate change in drop height will not usually affect the mean-failure energy appreciably.

Remove the tup. Be sure that it hits the center of the specimen. If the tup bounces, catch it to prevent multiple impacts to the specimen's surface (see 8.1.2).

Remove the specimen and examine it to determine whether it has failed. Permanent deformation alone is not a failure, but note the extent of such deformation (see 8.1.2). For some polymers, for example, glass-polyester, incipient cracking is difficult to determine with the naked eye. Exposure of the stressed surface to a dye, such as gentian violet, confirms the onset of failure. As a result of the wide range of failure types with different materials, the definition of failure in this test method, the material specification, or a definition agreed upon by the supplier and user, shall take precedence over the definition stated in 3.2.1.

When the first specimen fails, remove one increment of mass or drop height while keeping the drop height constant, or increase the drop height while keeping the mass constant (see 6.2). If the first specimen does not fail, add one increment of mass to the tup or increase the drop height one increment, as specified in 6.2, and test the second specimen.

In this manner, select the impact height or mass for the test from the results observed with the specimen just tested. Test each specimen only once.

For the best results, the mass or height increment used in the test should be approximately equivalent to s , the estimated standard deviation of the test for that sample. An increment of 0.5 to 2 times s is satisfactory (see section 13.4).

An increment of 10 % of the estimated mean-failure mass or height has been found to be acceptable in most instances.

Prepare a running plot of the data, as shown in Appendix X1. Use the symbol, such as X , to indicate a failure and a circle, such as O , to indicate a non-failure at each impact height level.

For any specimen that gives a break behavior that is an outlier, the conditions of that impact shall be

examined. The specimen shall be discarded only if a unique cause for the anomaly can be found, such as an internal flaw visible in the broken specimen. Note that break behavior can vary widely within a set of specimens. Data from specimens that show atypical behavior shall not be discarded simply on the basis of such behavior.

13. Calculation

13.1 Mean-Failure Mass—If a constant-height procedure was used, calculate the mean-failure mass from the test data obtained, as follows:

$$w = w_0 + d_w(A/N \pm 0.5) \quad (1)$$

13.2 Mean-Failure Height—If a constant-mass procedure was used, calculate the mean-failure height from the test data obtained, as follows:

$$h = h_0 + d_h(A/N \pm 0.5) \quad (2)$$

where:

- w = mean-failure mass, kg,
- h = mean-failure height, mm,
- d_w = increment of tup weight, kg,
- d_h = increment of tup height, mm,
- N = total number of failures or non-failures, whichever is smaller. For ease of rotation, call whichever are used "failures",
- w_0 = smallest mass at which an event occurred, kg
- h_0 = lowest height at which an event occurred, mm (or in.).

- $A = \sum_{i=0}^k i n_i$
- $i = 0, 1, 2, \dots, k$ (counting index, starts at h_0 or w_0),
- n_i = number of events that occurred at h_i or w_i ,
- $w_i = w_0 + i d_w$, and
- $h_i = h_0 + i d_h$.

In calculating w or h , the negative sign is used when the events are failures. The positive sign is used when the events are non-failures. Refer to the example in Appendix X1.

13.3 Mean-Failure Energy—Compute the mean-failure energy as follows: $MFE = hwf$

where:

- MFE = mean-failure energy, J,
 - h = mean-failure height or constant height as applicable, mm
 - w = mean-failure mass or constant mass as applicable, kg, and
 - f = factor for conversion to joules.
- Use $f = 9.80665 \times 10^{-3}$ if $h = \text{mm}$ and $w = \text{kg}$.

13.4 Estimated Standard Deviation of the Sample—If desired for record purposes, the estimated standard deviation of the sample for either variable mass or variable height can be calculated as follows:

$$s_w = 1.62d_w[B/N - (A/N)^2] + 0.047d_w \quad (3)$$

$$s_h = 1.62d_h[B/N - (A/N)^2] + 0.047d_h \quad (4)$$

where:

- s_w = estimated standard deviation, mass, kg
- s_h = estimated standard deviation, height, mm, and

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
868

Third edition
2003-03-01

**Plastics and ebonite — Determination of
indentation hardness by means of a
durometer (Shore hardness)**

*Plastiques et ébonite — Détermination de la dureté par pénétration au
moyen d'un duromètre (dureté Shore)*



Reference number
ISO 868:2003(E)

© ISO 2003

PDF disclaimer

This PDF file may contain embedded typefaces. In accordance with Adobe's licensing policy, this file may be printed or viewed but shall not be edited unless the typefaces which are embedded are licensed to and installed on the computer performing the editing. In downloading this file, parties accept therein the responsibility of not infringing Adobe's licensing policy. The ISO Central Secretariat accepts no liability in this area.

Adobe is a trademark of Adobe Systems Incorporated.

Details of the software products used to create this PDF file can be found in the General Info relative to the file; the PDF-creation parameters were optimized for printing. Every care has been taken to ensure that the file is suitable for use by ISO member bodies. In the unlikely event that a problem relating to it is found, please inform the Central Secretariat at the address given below.

© ISO 2003

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either ISO at the address below or ISO's member body in the country of the requester.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.ch
Web www.iso.ch

Printed in Switzerland

Contents	Page
1 Scope	1
2 Normative reference	1
3 Principle	1
4 Apparatus	1
5 Test specimens	4
6 Calibration	4
7 Conditioning and testing atmospheres	4
8 Procedure	5
9 Test report	5

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

International Standards are drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 3.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. ISO shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard ISO 868 was prepared by Technical Committee ISO/TC 61, *Plastics*, Subcommittee SC 2, *Mechanical properties*.

This third edition cancels and replaces the second edition (ISO 868:1985), which has been technically revised.

Plastics and ebonite — Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)

1 Scope

1.1 This International Standard specifies a method for the determination of the indentation hardness of plastics and ebonite by means of durometers of two types: type A is used for softer materials and type D for harder materials (see the Note to 8.2). The method permits measurement either of the initial indentation or of the indentation after a specified period of time, or both.

NOTE The durometers and the methods specified in this international Standard are referred to as type A Shore and type D Shore durometers and durometer methods, respectively.

1.2 This method is an empirical method intended primarily for control purposes. No simple relationship exists between indentation hardness determined by this method and any fundamental property of the material tested. For specification purposes, it is recommended that ISO 48, *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of hardness (hardness between 10 IRHD and 100 IRHD)*, be used for the softer materials.

2 Normative reference

The following normative document contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, this publication do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent edition of the normative document indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of ISO and IEC maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 291:1997, *Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing*

3 Principle

A specified indenter is forced into the test material under specified conditions and the depth of penetration measured.

The indentation hardness is inversely related to the penetration and is dependent on the modulus of elasticity and the viscoelastic properties of the material. The shape of the indenter, the force applied to it and the duration of its application influence the results obtained so that there may be no simple relationship between the results obtained with one type of durometer and those obtained with either another type of durometer or another instrument for measuring hardness.

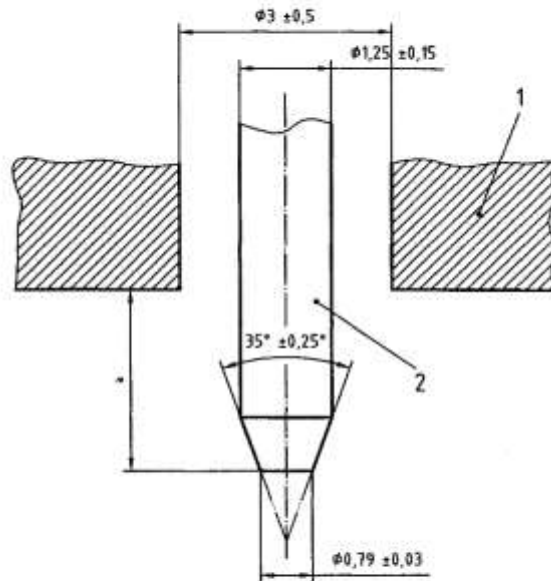
4 Apparatus

Use either a type A or type D Shore durometer consisting of the following components:

4.1 Presser foot, with a hole of diameter $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ centred at least 6 mm from any edge of the foot.

4.2 Indenter, formed from a hardened steel rod of diameter $1,25 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$ to the shape and dimensions shown in Figure 1 for type A durometers and Figure 2 for type D durometers.

Dimensions in millimetres



Key

- 1 presser foot
- 2 indenter

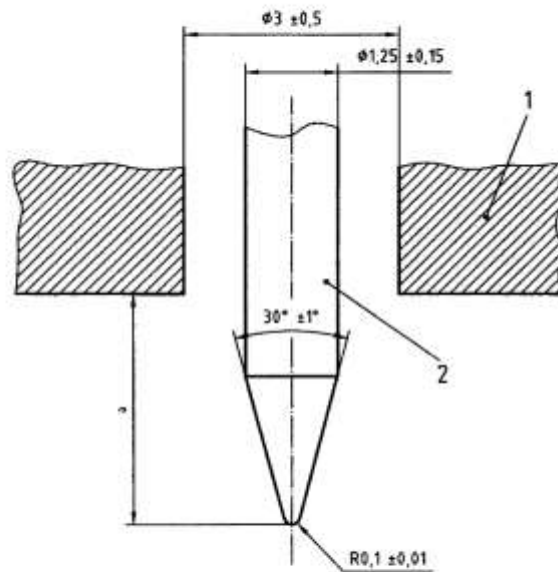
▪ full protrusion: 2,5 mm ± 0,04 mm

Figure 1 — Indenter for type A durometer

4.3 Indicating device, for reading the extent of protrusion of the point of the indenter beyond the face of the presser foot; this may be read directly in terms of units ranging from 0 for the full protrusion of 2,50 mm ± 0,04 mm to 100 for nil protrusion obtained by placing the pressure foot and indenter in firm contact with a flat piece of glass.

NOTE The device may include means for indicating the initial indentation obtained when the indenter is applied under load, to provide a maximum reading for use as an instantaneous reading if required (see 8.1).

Dimensions in millimetres

**Key**

- 1 presser foot
2 indenter

^a full protrusion: 2,5 mm ± 0,04 mm

Figure 2 — Indenter for type D durometer

4.4 Calibrated spring, for applying force to the indenter in accordance with one of the following equations:

$$F = 550 + 75H_A \quad (1)$$

where

F is the applied force, in millinewtons;

H_A is the hardness reading on the type A durometer

or

$$F = 445H_D \quad (2)$$

where

F is the applied force, in millinewtons;

H_D is the hardness reading on the type D durometer.

5 Test specimens

5.1 The thickness of the test specimen shall be at least 4 mm. A test specimen may be composed of thinner layers to obtain the necessary thickness, but determinations made on such test specimens may not agree with those made on one-piece test specimens because the surfaces between the plies may not be in complete contact.

5.2 The dimensions of the test specimen shall be sufficient to permit measurements at least 9 mm away from any edge, unless it is known that identical results are obtained when measurements are made at a lesser distance from an edge. The surface of the test specimen shall be flat over an area sufficient to permit the presser foot to be in contact with the test specimen over an area having a radius of at least 6 mm from the indenter point. Satisfactory durometer hardness determinations cannot be made on rounded, uneven or rough surfaces.

6 Calibration

The spring (4.4) of the durometer is calibrated by supporting the durometer in a vertical position and resting the point of the indenter (4.2) on a small metal spacer at the centre of one pan of a balance, as shown in Figure 3, in order to prevent interference between the presser foot (4.1) and the pan. The spacer has a small cylindrical stem of height approximately 2,5 mm and diameter approximately 1,25 mm, and is slightly cupped on top to accommodate the indenter point. The mass of the spacer is balanced by a weight on the opposite pan of the balance. Weights are added to the opposite pan to balance the force on the indenter at various scale readings. The measured force shall be equal to the force calculated by either equation (1) to within ± 75 mN or equation (2) to within ± 445 mN.

Instruments specifically designed for calibration of durometers may be used. Balances or instruments used for calibration shall be capable of measuring or applying a force on the point of the indenter to within 3,9 mN for the type A durometer and to within 19,6 mN for the type D durometer.

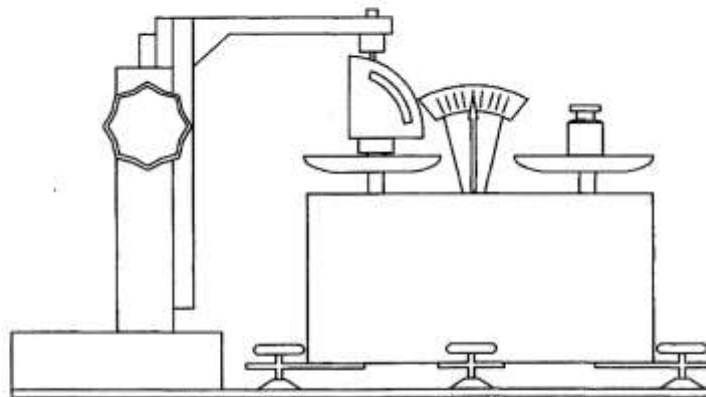


Figure 3 — Apparatus for calibration of durometer spring

7 Conditioning and testing atmospheres

7.1 For materials whose hardness is not dependent on the relative humidity, the durometer and test specimens shall be conditioned at the temperature of test (see 7.2) for at least 1 h before testing. For materials whose hardness is dependent on the relative humidity, the test specimens shall be conditioned in accordance with ISO 291, or in accordance with the relevant material specification.

When a durometer is moved from a location below room temperature to a location with a higher temperature, it shall be placed in a suitable desiccator or airtight container immediately upon removal and allowed to remain there until the temperature of the durometer is above the dew point of the air in the new environment.

7.2 Tests shall be carried out in one of the standard atmospheres specified in ISO 291, unless otherwise stated in the relevant material specification.

8 Procedure

8.1 Place the test specimen on a hard, horizontal, plane surface. Hold the durometer in a vertical position with the point of the indenter (4.2) at least 9 mm from any edge of the test specimen. Apply the presser foot (4.1) to the test specimen as rapidly as possible, without shock, keeping the foot parallel to the surface of the test specimen. Apply just sufficient pressure to obtain firm contact between presser foot and test specimen.

NOTE Better reproducibility may be obtained by using either a durometer stand or a weight centred on the axis of the indenter, or both, to apply the presser foot to the test specimen. Recommended masses are 1 kg for the type A durometer and 5 kg for the type D durometer.

Read the scale of the indicating device (4.3) after $15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$. If an instantaneous reading is specified, read the scale within 1 s after the presser foot is in firm contact with the test specimen, unless the durometer has a maximum indicator, in which case the maximum reading shall be taken.

8.2 Make five measurements of hardness at different positions on the test specimen at least 6 mm apart and determine the mean value.

NOTE It is recommended that measurements be made with the type D durometer when values above 90 are obtained with the type A durometer and that measurements be made with the type A durometer when values less than 20 are obtained with the type D durometer.

9 Test report

The test report shall include the following particulars:

- a) a reference to this International Standard;
- b) all details necessary for complete identification of the material tested;
- c) a description of the test specimen, including its thickness and, in the case of a composite test specimen, the number of layers;
- d) the temperature of test, and the relative humidity when the hardness of the material is dependent on the humidity;
- e) the type of durometer used (A or D);
- f) if known and if required, the time which elapsed between preparation of the test specimen and measurement of hardness;
- g) the individual values of the indentation hardness and the time-interval after which each reading was taken;

NOTE Readings may be reported in the form Shore hardness A/15/45, where A is the type of durometer, 15 is the time, in seconds, between bringing the pressure foot in firm contact with the test specimen and taking the reading, and 45 is the reading. Similarly, Shore hardness D/1:60 indicates a reading of 60 on the type D durometer obtained either within 1 s or from a maximum indication.

- h) the average value of the indentation hardness;
- i) details of any operations not specified in this International Standard, as well as details of any incidents likely to have influenced the results.



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method can be used for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) must be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This test method and ISO 527-1 are technically equivalent.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D 229 and Test Method D 651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20 -GPa ($>3.0 \times 10^5$ -psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D 3039/D 3039M.

1.4 Test data obtained by this test method are relevant and appropriate for use in engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved November 10, 2002. Published January 2003. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2002 as D 638 – 02.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation²
- D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials⁵
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet⁶
- D 883 Terminology Relating to Plastics⁴
- D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials⁴
- D 3039/D 3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials⁶
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁷
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁷
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁸
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁹
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer⁹
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁹
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁵ Discontinued; see 1994 Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Determine the Precision of a Test Method¹⁰

2 ISO Standard:

ISO 527-1 Determination of Tensile Properties¹¹

Terminology

1 Definitions—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883 and Annex A2.

Significance and Use

1 This test method is designed to produce tensile property data for the control and specification of plastic materials. These data are also useful for qualitative characterization and for research and development. For many materials, there may be a need for a modification that requires the use of this test method, but with the necessary procedural modifications that take precedence when they conflict with the specification. Therefore, it is advisable to refer to the material specification before using this test method. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

2 Tensile properties may vary with specimen preparation with speed and environment of testing. Consequently, when precise comparative results are desired, these factors must be carefully controlled.

2.1 It is realized that a material cannot be tested without knowing the method of preparation of that material. Hence, when comparative tests of materials per se are desired, the test care must be exercised to ensure that all samples are prepared in exactly the same way, unless the test is to include the effects of sample preparation. Similarly, for referee purposes or comparisons within any given series of specimens, care must be taken to secure the maximum degree of uniformity in details of preparation, treatment, and handling.

3 Tensile properties may provide useful data for plastics engineering design purposes. However, because of the high degree of sensitivity exhibited by many plastics to rate of straining and environmental conditions, data obtained by this test method cannot be considered valid for applications involving load-time scales or environments widely different from those of this test method. In cases of such dissimilarity, no reliable estimation of the limit of usefulness can be made for most plastics. This sensitivity to rate of straining and environmental conditions necessitates testing over a broad load-time scale (including impact and creep) and range of environmental conditions if the tensile properties are to suffice for engineering design purposes.

NOTE 5—Since the existence of a true elastic limit in plastics (as in many other organic materials and in many metals) is debatable, the practice of applying the term "elastic modulus" in its quoted, generally accepted definition to describe the "stiffness" or "rigidity" of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are highly dependent on such factors as rate of application of stress, temperature, previous history of specimen, etc. However, stress-strain curves for plastics, determined as described in this test method, do not always show a linear region at low stresses, and a straight line tangent to this portion of the curve permits calculation of an elastic

modulus of the usually defined type. Such a constant is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and similar factors are realized.

4.4 Poisson's Ratio—When uniaxial tensile force is applied to a solid, the solid stretches in the direction of the applied force (axially), but it also contracts in both dimensions lateral to the applied force. If the solid is homogeneous and isotropic, and the material remains elastic under the action of the applied force, the lateral strain bears a constant relationship to the axial strain. This constant, called Poisson's ratio, is defined as the negative ratio of the transverse (negative) to axial strain under uniaxial stress.

4.4.1 Poisson's ratio is used for the design of structures in which all dimensional changes resulting from the application of force need to be taken into account and in the application of the generalized theory of elasticity to structural analysis.

NOTE 6—The accuracy of the determination of Poisson's ratio is usually limited by the accuracy of the transverse strain measurements because the percentage errors in these measurements are usually greater than in the axial strain measurements. Since a ratio rather than an absolute quantity is measured, it is only necessary to know accurately the relative value of the calibration factors of the extensometers. Also, in general, the value of the applied loads need not be known accurately.

5. Apparatus

5.1 Testing Machine—A testing machine of the constant-rate-of-crosshead-movement type and comprising essentially the following:

5.1.1 Fixed Member—A fixed or essentially stationary member carrying one grip.

5.1.2 Movable Member—A movable member carrying a second grip.

5.1.3 Grips—Grips for holding the test specimen between the fixed member and the movable member of the testing machine can be either the fixed or self-aligning type.

5.1.3.1 Fixed grips are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through the center line of the grip assembly.

5.1.3.2 Self-aligning grips are attached to the fixed and movable members of the testing machine in such a manner that they will move freely into alignment as soon as any load is applied so that the long axis of the test specimen will coincide with the direction of the applied pull through the center line of the grip assembly. The specimens should be aligned as perfectly as possible with the direction of pull so that no rotary motion that may induce slippage will occur in the grips; there is a limit to the amount of misalignment self-aligning grips will accommodate.

5.1.3.3 The test specimen shall be held in such a way that slippage relative to the grips is prevented insofar as possible. Grip surfaces that are deeply scored or serrated with a pattern similar to those of a coarse single-cut file, serrations about 2.4 mm (0.09 in.) apart and about 1.6 mm (0.06 in.) deep, have been found satisfactory for most thermoplastics. Finer serrations have been found to be more satisfactory for harder plastics, such as the thermosetting materials. The serrations

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02.

¹¹ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Fl., New York, NY 10036.

id be kept clean and sharp. Breaking in the grips may r at times, even when deep serrations or abraded specimen ces are used; other techniques must be used in these cases. r techniques that have been found useful, particularly with th-faced grips, are abrading that portion of the surface of pecimen that will be in the grips, and interposing thin s of abrasive cloth, abrasive paper, or plastic, or rubber- d fabric, commonly called hospital sheeting, between the men and the grip surface. No. 80 double-sided abrasive r has been found effective in many cases. An open-mesh e, in which the threads are coated with abrasive, has also e effective. Reducing the cross-sectional area of the speci- may also be effective. The use of special types of grips is times necessary to eliminate slippage and breakage in the l.

1.4 Drive Mechanism—A drive mechanism for imparting e movable member a uniform, controlled velocity with ect to the stationary member, with this velocity to be lated as specified in Section 8.

1.5 Load Indicator—A suitable load-indicating mecha- i capable of showing the total tensile load carried by the specimen when held by the grips. This mechanism shall be ntially free of inertia lag at the specified rate of testing and l indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the cated value, or better. The accuracy of the testing machine l be verified in accordance with Practices E 4.

NOTE 7—Experience has shown that many testing machines now in use capable of maintaining accuracy for as long as the periods between ction recommended in Practices E 4. Hence, it is recommended that machine be studied individually and verified as often as may be d necessary. It frequently will be necessary to perform this function l.

1.6 The fixed member, movable member, drive mecha- n, and grips shall be constructed of such materials and in proportions that the total elastic longitudinal strain of the em constituted by these parts does not exceed 1 % of the l longitudinal strain between the two gage marks on the test imen at any time during the test and at any load up to the d capacity of the machine.

1.7 Crosshead Extension Indicator—A suitable extension icating mechanism capable of showing the amount of nge in the separation of the grips, that is, crosshead vement. This mechanism shall be essentially free of inertial t at the specified rate of testing and shall indicate the sshed movement with an accuracy of $\pm 10\%$ of the icated value.

1.2 Extension Indicator (extensometer)—A suitable instru- nt shall be used for determining the distance between two ignated points within the gage length of the test specimen s specimen is stretched. For referee purposes, the extensome- r must be set at the full gage length of the specimen, as own in Fig. 1. It is desirable, but not essential, that this trument automatically record this distance, or any change in s as a function of the load on the test specimen or of the ped time from the start of the test, or both. If only the latter btained, load-time data must also be taken. This instrument ll be essentially free of inertia at the specified speed of

testing. Extensometers shall be classified and their calibration periodically verified in accordance with Practice E 83.

5.2.1 Modulus-of-Elasticity Measurements—For modulus-of-elasticity measurements, an extensometer with a maximum strain error of 0.0002 mm/mm (in./in.) that automatically and continuously records shall be used. An extensometer classified by Practice E 83 as fulfilling the requirements of a B-2 classification within the range of use for modulus measurements meets this requirement.

5.2.2 Low-Extension Measurements—For elongation-at-yield and low-extension measurements (nominally 20 % or less), the same above extensometer, attenuated to 20 % extension, may be used. In any case, the extensometer system must meet at least Class C (Practice E 83) requirements, which include a fixed strain error of 0.001 strain or $\pm 1.0\%$ of the indicated strain, whichever is greater.

5.2.3 High-Extension Measurements—For making measurements at elongations greater than 20 %, measuring techniques with error no greater than $\pm 10\%$ of the measured value are acceptable.

5.2.4 Poisson's Ratio—Bi-axial extensometer or axial and transverse extensometers capable of recording axial strain and transverse strain simultaneously. The extensometers shall be capable of measuring the change in strains with an accuracy of 1 % of the relevant value or better.

NOTE 8—Strain gages can be used as an alternative method to measure axial and transverse strain; however, proper techniques for mounting strain gages are crucial to obtaining accurate data. Consult strain gage suppliers for instruction and training in these special techniques.

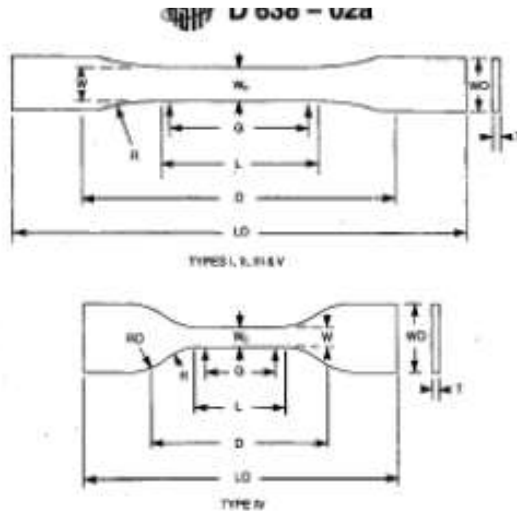
5.3 Micrometers—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: (1) a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), (2) a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter, and (3) a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.0002 in.) over the entire foot area. Flatness of the foot and anvil shall conform to Test Method D 5947.

5.3.1 An optional instrument equipped with a circular contact foot 15.88 ± 0.08 mm (0.625 ± 0.003 in.) in diameter is recommended for thickness measuring of process samples or larger specimens at least 15.88 mm in minimum width.

6. Test Specimens

6.1 Sheet, Plate, and Molded Plastics:

6.1.1 Rigid and Semirigid Plastics—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type I specimen is the preferred specimen and shall be used where sufficient material having a thickness of 7 mm (0.28 in.) or less is available. The Type II specimen may be used when a material does not break in the narrow section with the preferred Type I specimen. The Type V specimen shall be used where only limited material having a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less is available for evaluation, or where a large number of



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
h of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^{G,H}$	
h of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^{G,H}$	
2h overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
2h overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
gth overall, min ^{F,I}	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	83.5 (2.5)	no max (no max)	
g length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25 (\pm 0.010)^{G,H}$	
l length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13 (\pm 0.006)$
distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	$\pm 5 (\pm 0.2)$	
radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	$\pm 1 (\pm 0.04)^{G,H}$	
corner radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1 (\pm 0.04)$

Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are cut from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets the ends of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die Method D 412.

Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

3.18 ± 0.03 mm (0.125 ± 0.001 in.),

9.53 ± 0.08 mm (0.375 ± 0.003 in.),

7.62 ± 0.02 mm (0.300 ± 0.001 in.), and

2.7 ± 0.08 mm (0.500 ± 0.003 in.).

Other tolerances are those in the table.

For reporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1038. The width at the center W , shall be $+0.00$ mm, -0.10 mm ($+0.000$ in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in width center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) may be allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

fillet widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.

fillet lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

fillet marks or initial extensometer span.

When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if used uniformly once chosen.

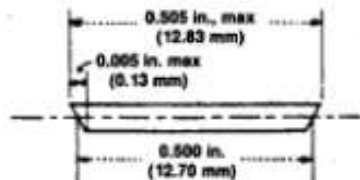


FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

specimens are to be exposed in a limited space (thermal and environmental stability tests, etc.). The Type IV specimen

should be used when direct comparisons are required between materials in different rigidity cases (that is, nonrigid and

nitrigid). The Type III specimen must be used for all materials with a thickness of greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.2 *Nonrigid Plastics*—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type IV specimen shall be used for testing nonrigid plastics with a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.3 *Reinforced Composites*—The test specimen for reinforced composites, including highly orthotropic laminates, all conform to the dimensions of the Type I specimen shown in Fig. 1.

6.1.4 *Preparation*—Test specimens shall be prepared by machining operations, or die cutting, from materials in sheet, plate, slab, or similar form. Materials thicker than 14 mm (0.55 in.) must be machined to 14 mm (0.55 in.) for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.

Note 9—Test results have shown that for some materials such as glass cloth, SMC, and BMC laminates, other specimen types should be considered to ensure breakage within the gage length of the specimen, as indicated by 7.3.

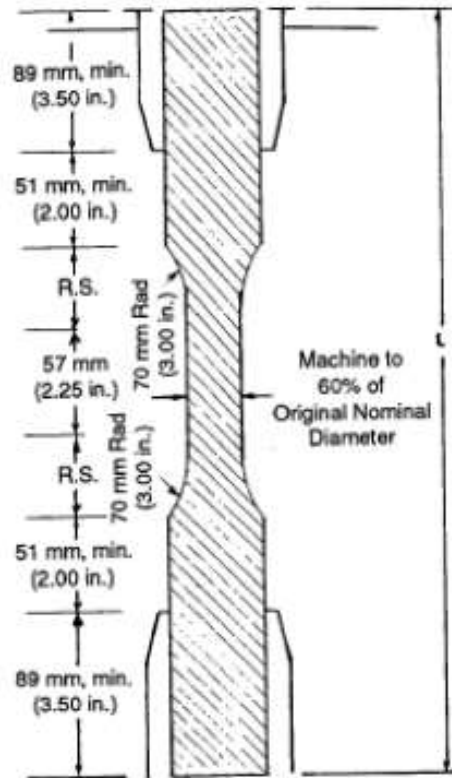
Note 10—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in fitting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower tensile properties, unless testing of specimens in a direction other than parallel with the reinforcement constitutes a variable being studied.

Note 11—Specimens prepared by injection molding may have different tensile properties than specimens prepared by machining or die-cutting because of the orientation induced. This effect may be more pronounced in specimens with narrow sections.

6.2 *Rigid Tubes*—The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, *L*, shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60% of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm (1 in.) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods*—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, *L*, shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60% of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with fine abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes



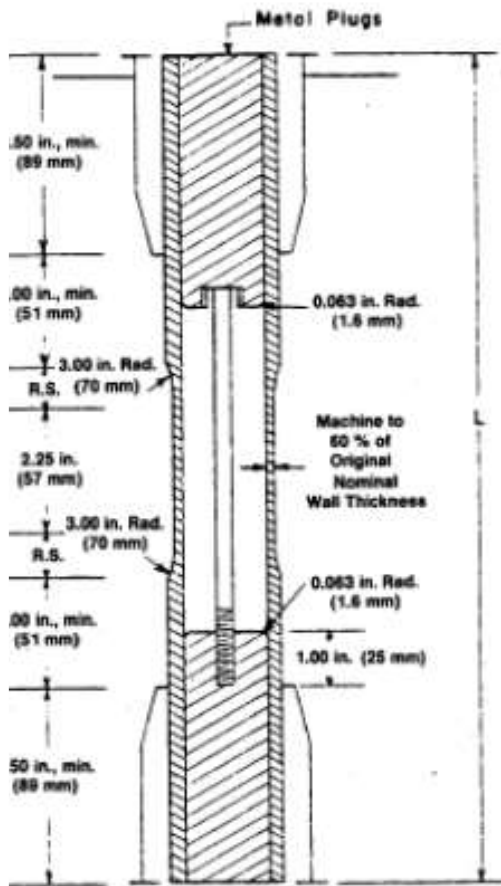
DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, <i>L</i> , of Specimen to Be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^a
mm (in.)			
3.2 (¼)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
4.7 (¼)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
6.4 (¼)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
9.5 (¾)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
12.7 (½)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
15.9 (¾)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
19.0 (¾)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
22.2 (¾)	51.5 (2.019)	389 (15.27)	400 (15.75)
25.4 (1)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)
31.8 (1¼)	60.9 (2.398)	398 (15.66)	419 (16.5)
38.1 (1½)	66.4 (2.615)	403 (15.87)	419 (16.5)
42.5 (1¾)	71.4 (2.812)	408 (16.06)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.993)	412 (16.24)	432 (17)

^a For other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws ^a
			mm (in.)
1/16	13.9 (0.547)	350 (13.80)	381 (15)
1/8	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
3/16	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
1/4	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
5/16	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
3/8	33.9 (1.333)	370 (14.56)	381 (15)
7/16	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
1/2	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9/16	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
5/8	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
3/4	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)

other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be id by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard emits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each is maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

If it is necessary to place gage marks on the specimen, shall be done with a wax crayon or India ink that will not the material being tested. Gage marks shall not be hed, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 Test ten specimens, five normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension "L"), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

NOTE 12—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

8.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within 1/2 to 5-min testing time.

8.3 Modulus determinations may be made at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^a

Classification ^b	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^c Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
		5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
	IV	500 (20) ± 10 %	15
		1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
		50 (2) ± 10 %	1
Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %	10
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^a Select the lowest speed that produces rupture in 1/2 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^b See Terminology D 683 for definitions.

^c The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

4 Poisson's ratio determinations shall be made at the same die selected for modulus determinations.

Conditioning

1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 3.6^\circ\text{F}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1.8^\circ\text{F}$ and $\pm 2\%$ relative humidity.

2 *Test Conditions*—Conduct the tests at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

Procedure

0.1 Measure the width and thickness of rigid flat specimens (Fig. 1) with a suitable micrometer to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at several points along their narrow sections. Measure the thickness of nonrigid specimens (produced by a Type IV die) in the same manner with the required dial micrometer. Take the width of this specimen as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section. Measure the diameter of rod specimens, and the inside and outside diameters of tube specimens, to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at a minimum of two points 90° apart; make these measurements along the groove for specimens so constructed. Measure the diameter of plugs in testing tube specimens, as shown in Fig. 2.

TABLE 2 Modulus, 10^6 psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S_r	S_M	I_r	I_M
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.248	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
6-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.814
6-reinforced polyester	1.39	0.0694	0.266	0.253	0.753

0.2 Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the specimen and the grips with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. The distance between the ends of the gripping surfaces, when using flat specimens, shall be as indicated in Fig. 1. On tube and rod specimens, the location for the grips shall be as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

0.3 Attach the extension indicator. When modulus is being determined, a Class B-2 or better extensometer is required (see Note 1).

NOTE 13—Modulus of materials is determined from the slope of the linear portion of the stress-strain curve. For most plastics, this linear portion is very small, occurs very rapidly, and must be recorded automatically. The change in jaw separation is never to be used for calculating modulus or elongation.

10.3.1 Poisson's Ratio Determination:

10.3.1.1 When Poisson's ratio is determined, the speed of testing and the load range at which it is determined shall be the same as those used for modulus of elasticity.

10.3.1.2 Attach the transverse strain measuring device. The transverse strain measuring device must continuously measure the strain simultaneously with the axial strain measuring device.

TABLE 3 Tensile Stress at Yield, 10^3 psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_M	I_r	I_M
Polypropylene	3.63	0.022	0.161	0.062	0.456
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.058	0.227	0.164	0.642
Acrylic	10.4	0.067	0.317	0.190	0.897

TABLE 4 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_M	I_r	I_M
Cellulose acetate butyrate	3.65	0.27	0.62	0.76	1.75
Acrylic	4.89	0.21	0.55	0.59	1.56
Polypropylene	8.79	0.45	5.86	1.27	16.5

10.3.1.3 Make simultaneous measurements of load and strain and record the data. The precision of the value of Poisson's ratio will depend on the number of data points of axial and transverse strain taken.

10.4 Set the speed of testing at the proper rate as required in Section 8, and start the machine.

10.5 Record the load-extension curve of the specimen.

10.6 Record the load and extension at the yield point (if one exists) and the load and extension at the moment of rupture.

NOTE 14—If it is desired to measure both modulus and failure properties (yield or break, or both), it may be necessary, in the case of highly extensible materials, to run two independent tests. The high magnification extensometer normally used to determine properties up to the yield point may not be suitable for tests involving high extensibility. If allowed to remain attached to the specimen, the extensometer could be permanently damaged. A broad-range incremental extensometer or hand-rule technique may be needed when such materials are taken to rupture.

11. Calculation

11.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1, unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

11.2 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load in newtons (or pounds-force) by the original minimum cross-sectional area of the specimen in square metres (or square inches). Express the result in pascals (or pounds-force per square inch) and report it to three significant figures as tensile strength at yield or tensile strength at break, whichever term is applicable. When a nominal yield or break load less than the maximum is present and applicable, it may be desirable also to calculate, in a similar manner, the corresponding tensile stress at yield or tensile stress at break and report it to three significant figures (see Note A2.8).

Elongation values are valid and are reported in cases of uniformity of deformation within the specimen gage length is present. Elongation values are quantitatively relevant for engineering design. When non-uniform deformation (such as necking) occurs within the specimen gage length, nominal strain values are reported. Nominal strain values are of qualitative utility only.

shall be calculated whenever possible. However, for materials where no proportionality is evident, the secant value shall be calculated. Draw the tangent as directed in A1.3 and Fig. A1.2, and mark off the designated strain from the yield point where the tangent line goes through zero stress. The stress to be used in the calculation is then determined by dividing the load-extension curve by the original average cross-sectional area of

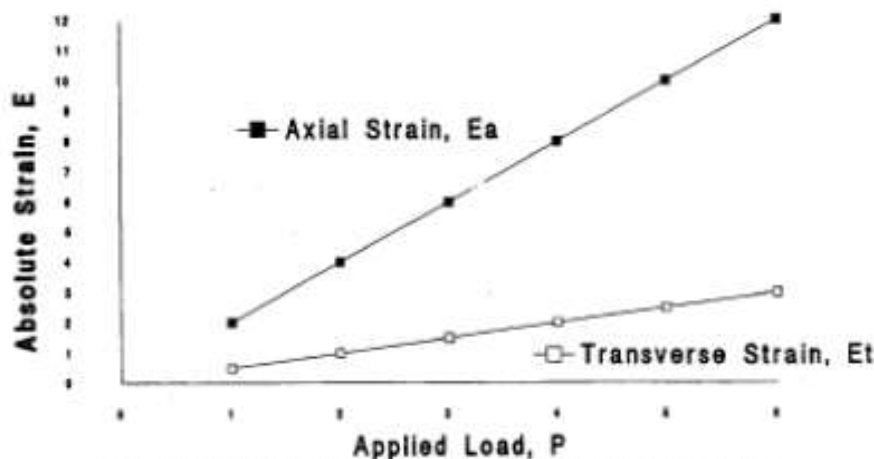


FIG. 4 Plot of Strains Versus Load for Determination of Poisson's Ratio

3.1 Percent Elongation—Percent elongation is the change in gage length relative to the original specimen gage length, expressed as a percent. Percent elongation is calculated using the apparatus described in 5.2.

3.1.1 Percent Elongation at Yield—Calculate the percent elongation at yield by reading the extension (change in gage length) at the yield point. Divide that extension by the original length and multiply by 100.

3.1.2 Percent Elongation at Break—Calculate the percent elongation at break by reading the extension (change in length) at the point of specimen rupture. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

3.2 Nominal Strain—Nominal strain is the change in grip separation relative to the original grip separation expressed as a percent. Nominal strain is calculated using the apparatus described in 5.1.7.

3.2.1 Nominal strain at break—Calculate the nominal strain at break by reading the extension (change in grip separation) at the point of rupture. Divide that extension by the original grip separation and multiply by 100.

4 Modulus of Elasticity—Calculate the modulus of elasticity by extending the initial linear portion of the load-extension curve and dividing the difference in stress corresponding to any segment of section on this straight line by the corresponding difference in strain. All elastic modulus values shall be computed using the average initial cross-sectional area of test specimens in the calculations. The result shall be expressed in pascals (pounds-force per square inch) and rounded to three significant figures.

5 Secant Modulus—At a designated strain, this shall be calculated by dividing the corresponding stress (nominal) by the designated strain. Elastic modulus values are preferable and

the specimen.

11.6 Poisson's Ratio—The axial strain, ϵ_a , indicated by the axial extensometer, and the transverse strain, ϵ_t , indicated by the transverse extensometers, are plotted against the applied load, P , as shown in Fig. 4. A straight line is drawn through each set of points, and the slopes, $d\epsilon_a/dP$ and $d\epsilon_t/dP$, of these lines are determined. Poisson's ratio, μ , is then calculated as follows:

$$\mu = -(d\epsilon_t/dP)/(d\epsilon_a/dP) \quad (1)$$

where:

$d\epsilon_t$ = change in transverse strain,
 $d\epsilon_a$ = change in axial strain, and
 dP = change in applied load;

or

$$\mu = -(d\epsilon_t)/(d\epsilon_a) \quad (2)$$

11.6.1 The errors that may be introduced by drawing a straight line through the points can be reduced by applying the method of least squares.

11.7 For each series of tests, calculate the arithmetic mean of all values obtained and report it as the "average value" for the particular property in question.

11.8 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n-1)} \quad (3)$$

where:

s = estimated standard deviation,
 X = value of single observation,

= number of observations, and
 = arithmetic mean of the set of observations.
 9 See Annex A1 for information on toe compensation.

TABLE 5 Tensile Strength at Break, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials^a

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
polyethylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.180	0.164	0.509
	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
reinforced nylon	23.6	0.277	0.698	0.784	1.98

Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical uses of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 6 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^a

	Mean	S _r	S _R	I _r	I _R
reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
	13.2	2.05	5.65	5.80	10.3
cellulose acetate butyrate	14.1	1.67	6.62	5.29	16.7
polyethylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical uses of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 7 Tensile Yield Strength, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S _r	S _R	r	R
LDPE	20	1544	52.4	64.0	146.6	179.3
	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.9	279.7
	20	1791	49.2	75.8	137.9	212.3
HDPE	20	2900	55.5	87.9	155.4	246.1
	20	1730	63.9	96.0	178.9	266.7
MDPE	2	4101	196.1	371.9	549.1	1041.3
	2	3523	175.9	478.0	492.4	1336.5

Report

Report the following information:

1. Complete identification of the material tested, including, source, manufacturer's code numbers, form, principal uses, previous history, etc.,
2. Method of preparing test specimens,
3. Type of test specimen and dimensions,
4. Conditioning procedure used,
5. Atmospheric conditions in test room,
6. Number of specimens tested,
7. Speed of testing,
8. Classification of extensometers used. A description of the measuring technique and calculations employed instead of a minimum Class-C extensometer system,

12.1.9 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,

12.1.10 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,

12.1.11 Percent elongation at yield, or break, or nominal strain at break, or all three, as applicable, average value, and standard deviation,

12.1.12 Modulus of elasticity, average value, and standard deviation,

12.1.13 Date of test, and

12.1.14 Revision date of Test Method D 638.

13. Precision and Bias¹²

13.1 *Precision*—Tables 2-6 are based on a round-robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

TABLE 8 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S _r	S _R	r	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	8.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.38	2.86	6.67
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.97
LLDPE	20	16.6	1.59	3.30	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.88	3.56	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.55	7.25
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.63	1.23	2.75	3.45	7.71

TABLE 9 Tensile Break Strength, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S _r	S _R	r	R
LDPE	20	1592	52.3	74.9	146.4	209.7
LDPE	20	1750	66.6	102.9	186.4	288.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	355.8	613.3
LLDPE	20	2840	78.6	143.5	220.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	96.96	131.6
LLDPE	20	2660	119.1	166.3	333.6	465.6

13.1.1 Tables 7-10 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.1.2 In Tables 2-10, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

¹² Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1125 for the 1984 round robin and RR:D20-1170 for the 1988 round robin.

E 10 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
	Average	S_w	S_R	I	R
20	567	31.5	59.5	88.2	156.6
20	589	61.5	89.2	172.3	248.7
20	890	25.7	113.8	71.9	318.7
20	64.4	8.68	11.7	18.7	32.6
20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
20	782	41.6	96.7	116.6	270.8

- 13.1.1 S_w is the within-laboratory standard deviation of elongation; $I_w = 2.83 S_w$. (See 13.1.2.3 for application of I_w .)
- 13.1.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of elongation; $I_R = 2.83 S_R$. (See 13.1.2.4 for application of I_R .)
- 13.1.3 **Repeatability**—In comparing two test results for one material, obtained by the same operator using the equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_w value at material and condition.
- 13.1.4 **Reproducibility**—In comparing two test results for one material, obtained by different operators using differ-

- ent equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)
- 13.1.2.5 Any judgment in accordance with 13.1.2.3 and 13.1.2.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.
- 13.1.2.6 Other formulations may give somewhat different results.
- 13.1.2.7 For further information on the methodology used in this section, see Practice E 691.
- 13.1.2.8 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.
- 13.2 **Bias**—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

14. Keywords

14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; tensile properties; tensile strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a region, AC, that does not represent a property of the

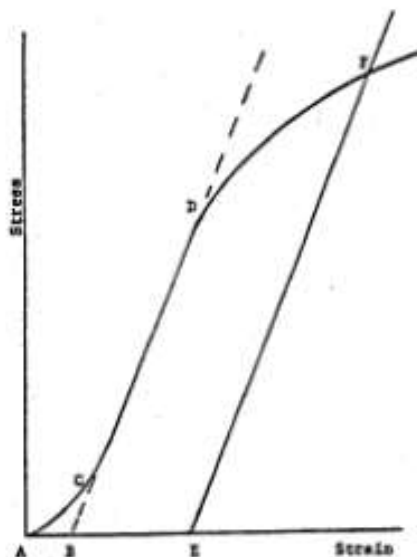
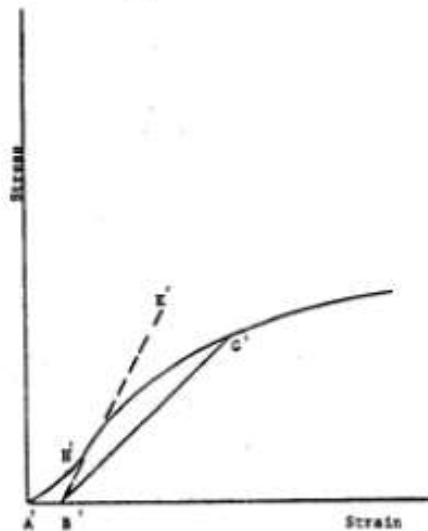


FIG. A1.1 Material with Hookean Region

material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H'). This is extended to intersect the strain axis at Point B', the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line B' G'). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 elastic limit—the greatest stress which a material is able of sustaining without any permanent strain remaining in complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

NOTE A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, intricacy of loading, the scale to which the stress-strain diagram is read, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 elongation—the increase in length produced in the original length of the test specimen by a tensile load. It is expressed in units of length, usually inches (millimetres). (Also known as *extension*.)

NOTE A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is present. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of limited utility after attainment of yield point. This is due to inability to ensure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 gage length—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 modulus of elasticity—the ratio of stress (nominal) to responding strain below the proportional limit of a material, is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch). (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*).

NOTE A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit

in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of stressing, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 necking—the localized reduction in cross section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 offset yield strength—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1):

On the strain axis lay off *OM* equal to the specified offset. Draw *OA* tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain curve.

Through *M* draw a line *MN* parallel to *OA* and locate the intersection of *MN* with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection *r* is the "offset yield strength." The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. Example: 0.1 % offset yield strength = ... MPa (psi), or yield strength at 0.1 % offset ... MPa (psi).

A2.7 percent elongation—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 percent elongation at break and yield:

A2.8.1 percent elongation at break—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

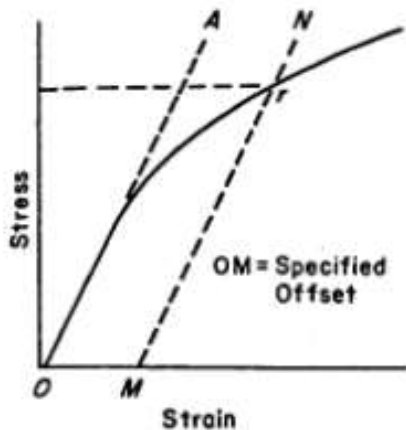


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

8.2 *percent elongation at yield*—the percent elongation moment the yield point (A2.21) is attained in the test specimen.

9 *percent reduction of area (nominal)*—the difference in the original cross-sectional area measured at the point where the specimen fractures after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

10 *percent reduction of area (true)*—the difference in the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage length prevailing at the moment of rupture, expressed as a percent of the original area.

11 *proportional limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

12 *rate of loading*—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually newtons (pounds-force) per minute. The initial rate of loading can be calculated from the initial slope of the stress versus time diagram.

13 *rate of straining*—the change in tensile strain per unit time. It is expressed either as strain per unit time, usually per cent per minute (inches per inch) per minute, or percent elongation per unit time, usually percent elongation per minute. The initial rate of straining can be calculated from the initial slope of the tensile strain versus time diagram.

A2.5—The initial rate of straining is synonymous with the rate of crosshead movement divided by the initial distance between crossheads of a machine with constant rate of crosshead movement and when the specimen has a uniform original cross section, does not "neck down," and does not slip in the jaws.

14 *rate of stressing (nominal)*—the change in tensile stress (nominal) per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually megapascals (pounds-force per

square inch) per minute. The initial rate of stressing can be calculated from the initial slope of the tensile stress (nominal) versus time diagram.

NOTE A2.6—The initial rate of stressing as determined in this manner has only limited physical significance. It does, however, roughly describe the average rate at which the initial stress (nominal) carried by the test specimen is applied. It is affected by the elasticity and flow characteristics of the materials being tested. At the yield point, the rate of stressing (true) may continue to have a positive value if the cross-sectional area is decreasing.

A2.15 *secant modulus*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain at any specified point on the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch), and reported together with the specified stress or strain.

NOTE A2.7—This measurement is usually employed in place of modulus of elasticity in the case of materials whose stress-strain diagram does not demonstrate proportionality of stress to strain.

A2.16 *strain*—the ratio of the elongation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length. It is expressed as a dimensionless ratio.

A2.16.1 *nominal strain at break*—the strain at the moment of rupture relative to the original grip separation.

A2.17 *tensile strength (nominal)*—the maximum tensile stress (nominal) sustained by the specimen during a tension test. When the maximum stress occurs at the yield point (A2.21), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

A2.18 *tensile stress (nominal)*—the tensile load per unit area of minimum original cross section, within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.8—The expression of tensile properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used in practice. In the case of materials exhibiting high extensibility or necking, or both (A2.15), nominal stress calculations may not be meaningful beyond the yield point (A2.21) due to the extensive reduction in cross-sectional area that ensues. Under some circumstances it may be desirable to express the tensile properties per unit of minimum prevailing cross section. These properties are called true tensile properties (that is, true tensile stress, etc.).

A2.19 *tensile stress-strain curve*—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.20 *true strain* (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_T :

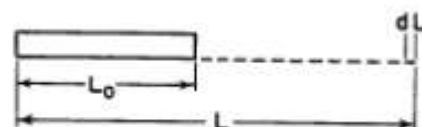


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

$$\epsilon_T = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L/L_0 \quad (A2.1)$$

ΔL :
 = increment of elongation when the distance between the gage marks is L_0
 = original distance between gage marks, and
 = distance between gage marks at any time.

2.21 *yield point*—the first point on the stress-strain curve at which an increase in strain occurs without an increase in stress (Fig. A2.2).

σ_T : A2.9—Only materials whose stress-strain curves exhibit a point of zero slope may be considered as having a yield point.
 σ_T : A2.10—Some materials exhibit a distinct “break” or discontinuity in the stress-strain curve in the elastic region. This break is not a yield point by definition. However, this point may prove useful for material characterization in some cases.

2.22 *yield strength*—the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. Unless otherwise specified, this stress will be the stress at the yield point and when expressed in relation to tensile strength shall be designated either tensile strength at yield or tensile stress at yield as required in A2.17 (Fig. A2.3).
offset yield strength.

2.23 *Symbols*—The following symbols may be used for the above terms:

Symbol	Term
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_0	Original distance between gage marks
L_u	Distance between gage marks at moment of rupture
ΔL	Increment of distance between gage marks = elongation
A	Minimum cross-sectional area at any time
A_0	Original cross-sectional area
ΔA	Increment of cross-sectional area
A_u	Cross-sectional area at point of rupture measured after breaking specimen
A_T	Cross-sectional area at point of rupture, measured at the moment of rupture
t	Time
Δt	Increment of time
σ	Tensile stress
$\Delta \sigma$	Increment of stress
σ_T	True tensile stress
σ_U	Tensile strength at break (nominal)
σ_{UT}	Tensile strength at break (true)
ϵ	Strain
$\Delta \epsilon$	Increment of strain
ϵ_U	Total strain, at break
ϵ_T	True strain
%E	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity

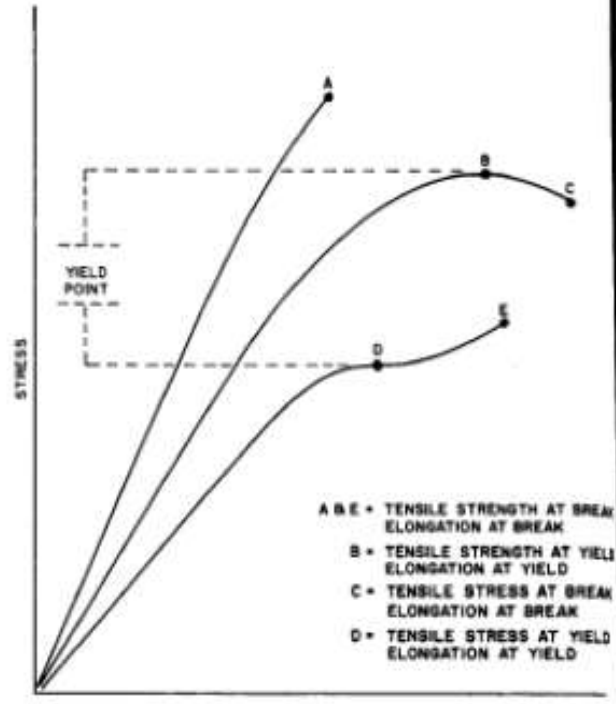


FIG. A2.3 Tensile Designations

A2.24 Relations between these various terms may be defined as follows:

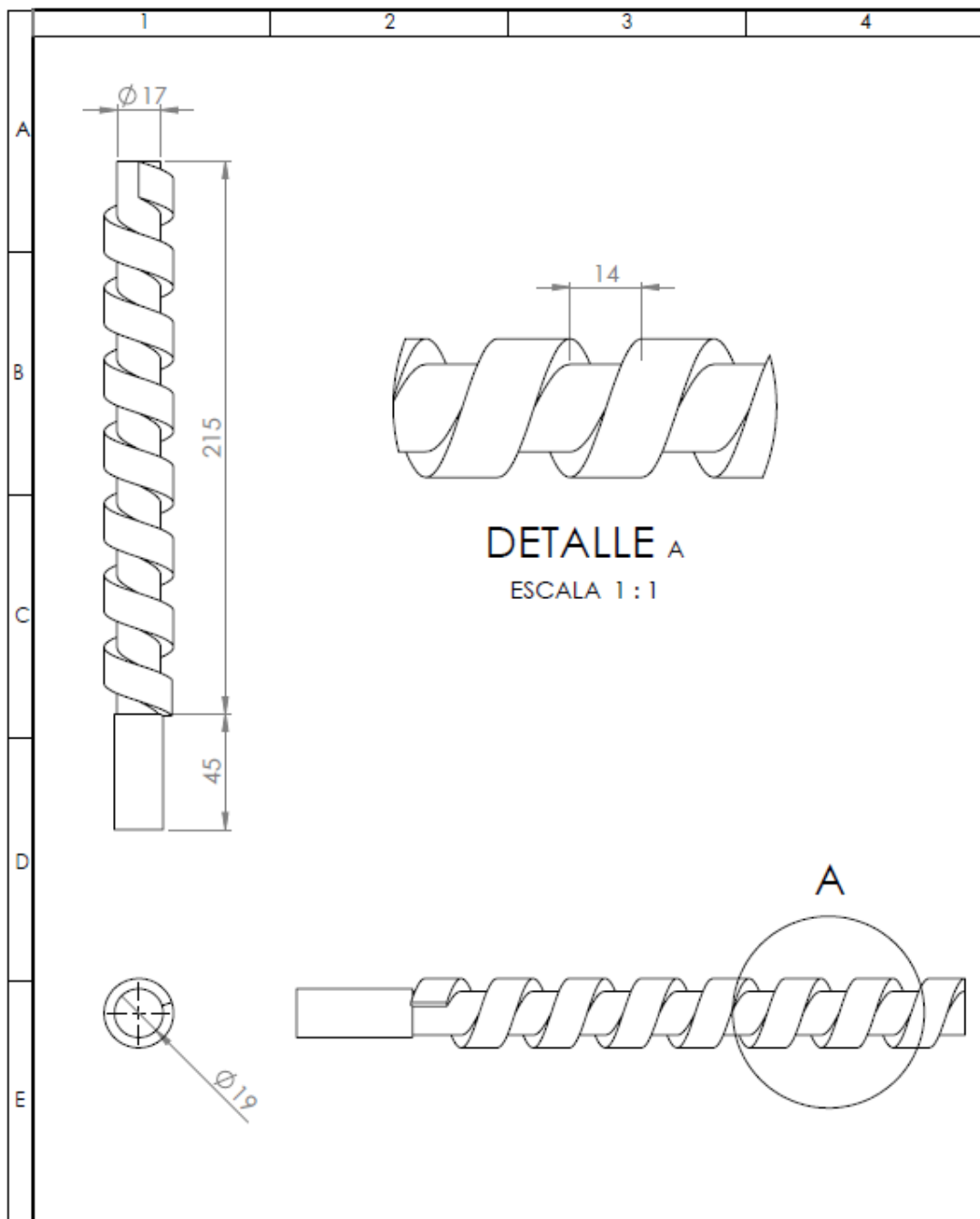
$$\begin{aligned} \sigma &= W/A_0 \\ \sigma_T &= W/A \\ \sigma_U &= W/A_0 \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \Delta L/L_0 = (L - L_0)/L_0 \\ \epsilon_U &= (L_u - L_0)/L_0 \\ \epsilon_T &= \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L/L_0 \\ \%E &= [(L - L_0)/L_0] \times 100 = \epsilon \times 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Percent reduction of area (nominal)} &= [(A_0 - A_u)/A_0] \times 100 \\ \text{Percent reduction of area (true)} &= [(A_0 - A_T)/A_0] \times 100 \\ \text{Rate of loading} &= \Delta W/\Delta t \\ \text{Rate of stressing (nominal)} &= \Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W)/A_0/\Delta t \\ \text{Rate of straining} &= \Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_0)/\Delta t \end{aligned}$$

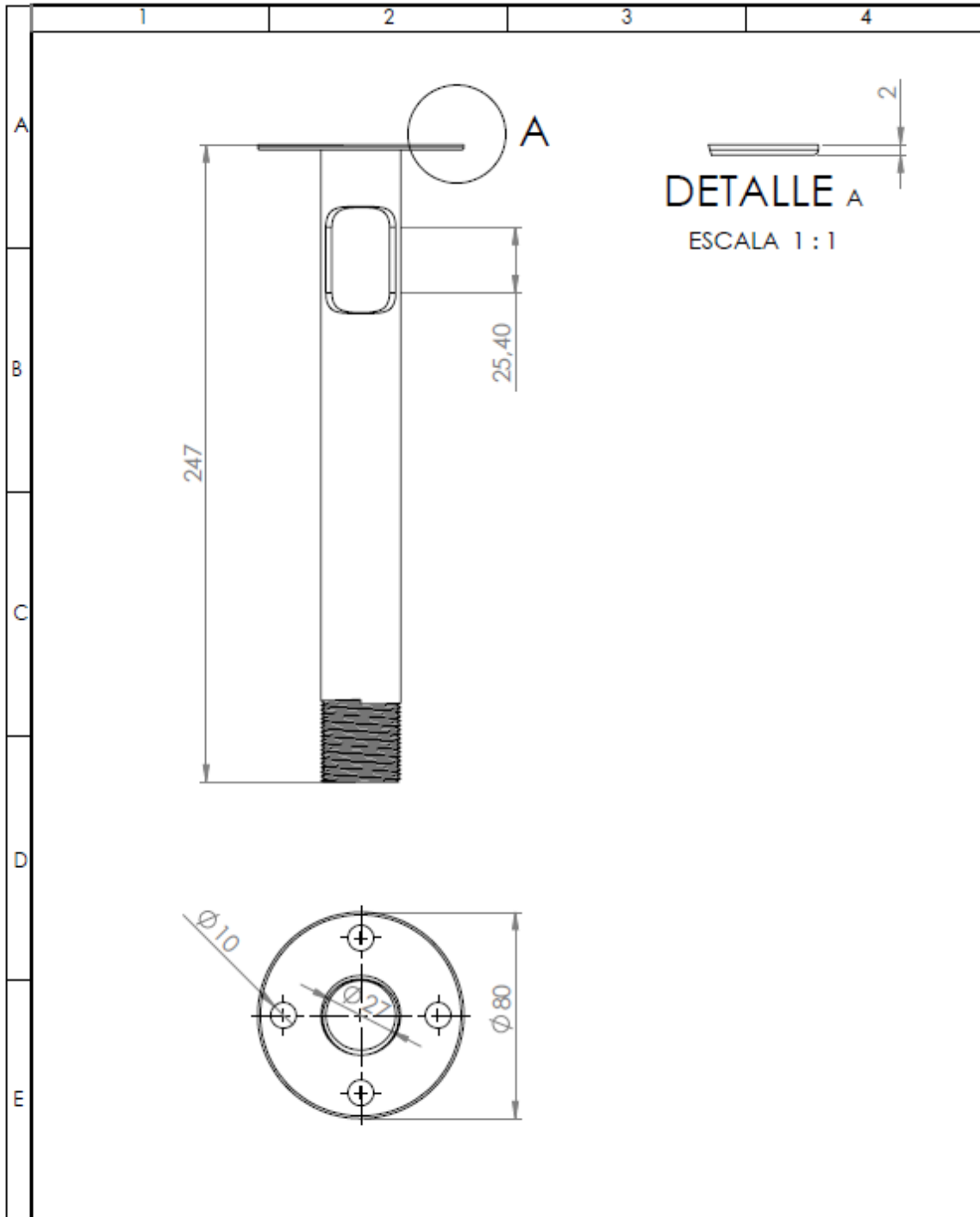
For the case where the volume of the test specimen does not change during the test, the following three relations hold:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma(1 + \epsilon) = \sigma U/L_0 \quad (A2.2) \\ \sigma_{UT} &= \sigma_U(1 + \epsilon_U) = \sigma_U L_u/L_0 \\ A &= A_0/(1 + \epsilon) \end{aligned}$$

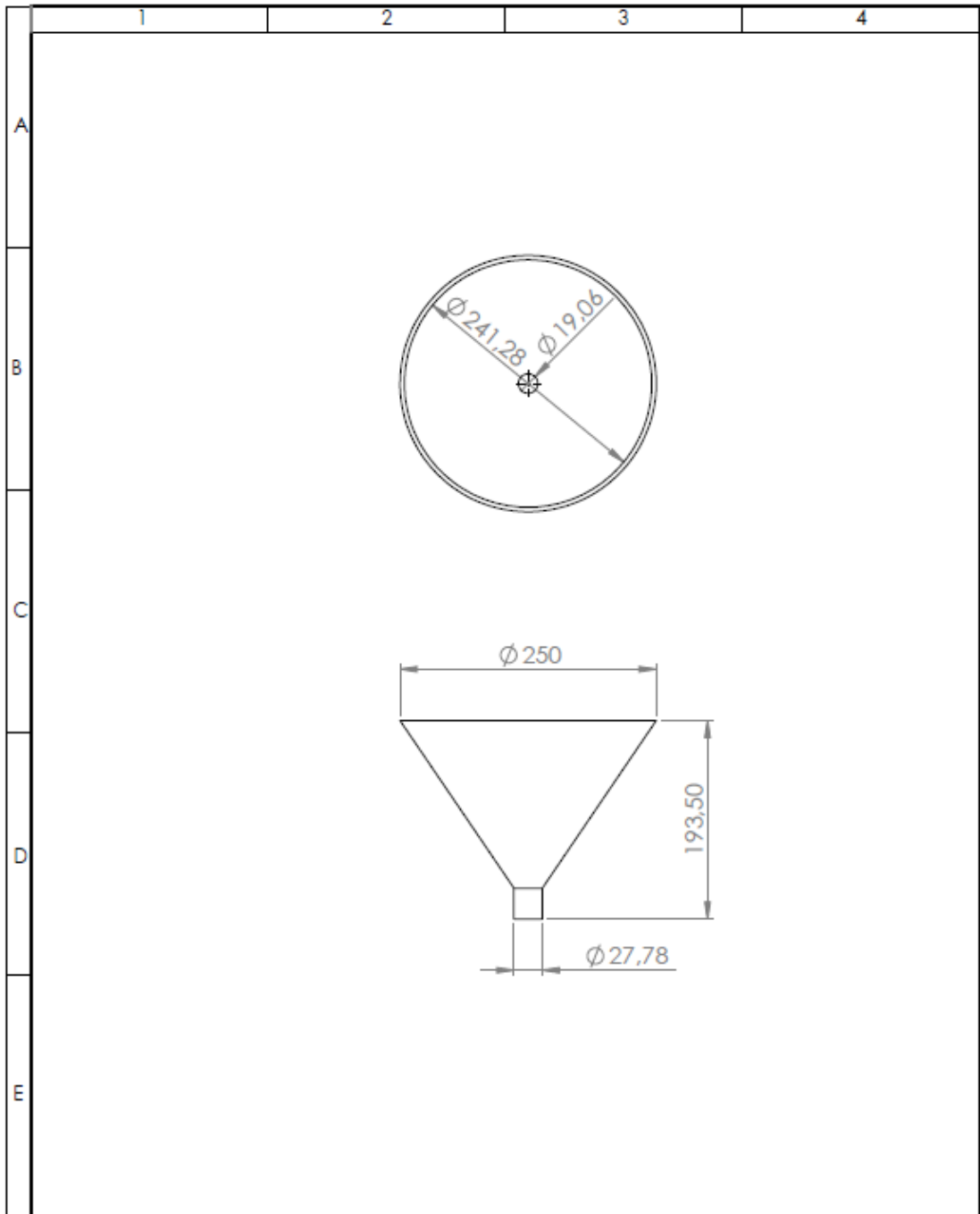
PLANOS



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±1	350 gr	ASTM A36	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJO: 1/6/2021	Ing. VILLEGAS S.	HUSILLO SIN FIN	1:2
				REVISO: 1/6/2021	Ing. ESPIN S.		
				APPROB: 1/6/2021	Ing. ESPIN S.		
				U.T.A.		N.º DE LAMINA	REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 1 DE 3	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:			



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±1	800 gr	ASTM A36	
				FECHA:	NOMBRE:	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJO: 1/6/2021	Ing. VILLEGAS S.	TUBO GUIA	1:2
				REVISO: 1/6/2021	Ing. ESPIN S.		
				APROBO: 1/6/2021	Ing. ESPIN S.		
				U.T.A.		N.º DE LAMINA:	REGISTRO:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 2 DE 3	
EDICIÓN:	MODIFICACION:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:			



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				± 1	220 gr	TOL GALVANIZADO	
					FECHA	NOMBRE	TITULO:
				DIBUJO:	7/6/2021	Ing. VILLEGAS S.	TOLVA
				REVISO:	7/6/2021	Ing. ESPIN S.	
				APROBO:	7/6/2021	Ing. ESPIN S.	
				U.T.A.		N.º DE LAMINA	ESCALA:
				INGENIERIA MECANICA		HOJA 3 DE 3	1:2
MODIFICACION:		FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCION:		REGISTRO:	