

RAE

- 1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO
- 2. TÍTULO:** Caracterización de las Propiedades Mecánicas de Probetas Fabricadas bajo la Técnica de Modelado por Deposición Fundida.
- 3. AUTORES:** Andrés Felipe Ibarra Hernández, Carlos Alberto Cruel Restrepo y David Ricardo Díaz Castaño
- 4. LUGAR:** Bogotá, D.C
- 5. FECHA:** Septiembre de 2018
- 6. PALABRAS CLAVE:** Manufactura Aditiva, Ácido Poliláctico (PLA), Acronitrilo butadieno estireno (ABS), Termoplástico, Esfuerzo Máximo de Tensión, Modulo de Young, Punto Transición
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es caracterizar las propiedades mecánicas de probetas fabricadas bajo la técnica de modelado por deposición fundida. En este proyecto se realizó la caracterización de propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, esfuerzo máximo a tensión y punto de transición de probetas fabricadas en los materiales PLA y ABS empleando la técnica de modelado por deposición fundida en configuraciones $[0^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$, $[90^\circ/90^\circ]$, $[45^\circ/45^\circ]$ y $[45^\circ/-45^\circ]$ para cada material. Este proyecto se realizó bajo los lineamientos establecidos por la norma ASTM D3039 del año 2002 tanto para la correcta realización de los ensayos a tensión como para el correspondiente análisis de resultados garantizando la fiabilidad de los mismos.
- 8. LÍNEAS DE INVESTIGACION:** Línea de Investigación de la USB: Materiales y Estructuras. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Materiales Anisotrópicos.
- 9. METODOLOGÍA:** La metodología se desarrolla mediante un enfoque cualitativo y cuantitativo; presentando las características principales de los materiales y la interpretación de los resultados comparativos de estos respectivamente.
- 10. CONCLUSIONES:** A partir de las pruebas realizadas y de la conformación y acabado de las probetas obtenidas durante el desarrollo del proyecto, se pudo determinar que la mejor temperatura de extrusión en la impresora FlashForge Creator Pro del material PLA del fabricante Prusa Research es de 220°C y para ABS de 250°C . La temperatura de la cama que mejor se acomoda al proceso de impresión de la referencia utilizada de material PLA, fue de 70°C permitiendo la correcta adherencia de la primera capa de material y para ABS es de 110°C . Hacer uso de un protocolo de control de calidad para la selección de especímenes aptos, reduce en gran medida la probabilidad de fallas prematuras y resultados erróneos debidos a defectos de impresión durante los ensayos destructivos de tensión. La implementación de tabs en los ensayos de tensión fue necesaria ya que las mordazas transmiten una carga que puede inducir a rupturas prematuras e indeseadas de los especímenes. El material PLA presentó mejores características que el material ABS en relación al esfuerzo máximo de tensión soportado antes de la ruptura. La orientación que presentó una mayor deformación después de alcanzar el esfuerzo máximo de tensión corresponde al conjunto de probetas de $[0^\circ/0^\circ]$ en el material termoplástico ABS. El material que presenta el mayor esfuerzo máximo a tensión es el PLA con orientación $[0^\circ/0^\circ]$ obteniendo un valor de 53,519 MPa. El material que presenta el mayor módulo de Young es el PLA con orientación $[0^\circ/90^\circ]$ obteniendo un valor de 2,215 GPa.

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
PROBETAS FABRICADAS BAJO LA TÉCNICA DE MODELADO
POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

Andrés Felipe Ibarra Hernández

Carlos Alberto Cruel Restrepo

David Ricardo Díaz Castaño

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C.

2018

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
PROBETAS FABRICADAS BAJO LA TÉCNICA DE MODELADO
POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

Andrés Felipe Ibarra Hernández

Carlos Alberto Cruel Restrepo

David Ricardo Díaz Castaño

Director: Daniel Agudelo Noreña MSc.

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C.

2018

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de investigación y su desarrollo al público ingenieril colombiano, a quienes se incentiva seguir con la generación de conocimiento para nuestro país; de igual manera, se dirige a nuestra alma mater y sus ingenieros en formación, a los cuales se les adjudica el uso del conocimiento entregado para la profundización en este campo de investigación. Así mismo, se dedica a nuestros padres y tutores, correspondiendo a su esfuerzo y apoyo en el desarrollo de nuestra profesión.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración en el desarrollo de este trabajo a nuestro tutor Daniel Agudelo Noreña, por su guía y apoyo intelectual incondicional. Así mismo, se agradece a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por proveer maquinaria de laboratorio indispensable para el desarrollo del proyecto; al igual que la colaboración intelectual y física dada por el semillero de investigación “*SIMAT*” y su grupo de trabajo conformado por: Los ingenieros Miguel Montoya y Camilo Hernández y los ingenieros en formación Valentina Virgüez, Felipe Ballen, Nicolás Jara y Juan Pedraza.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Planteamiento del problema.....	3
2.1.	Antecedentes.....	3
2.2.	Descripción y formulación del problema.....	11
2.3.	Objetivos.....	13
2.4.	Alcances y limitaciones.....	14
3.	Marco teórico y conceptual.....	17
3.1.	Manufactura aditiva “AM”.....	17
3.2.	Modelado por deposición fundida (FDM).....	18
3.3.	ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno).....	19
3.4.	PLA (Ácido poliláctico).....	21
3.5.	Caracterización de materiales mediante ensayos destructivos.....	22
3.6.	Norma ASTM D3039 M.....	22
3.7.	Intervalo de confianza para muestras pequeñas con dispersión estándar no conocida (Método de Student).....	23
3.8.	Impresora 3D FlashForge Creator Pro.....	25
3.9.	Máquina universal de ensayos.....	28
3.10.	Cámara termográfica.....	29
3.11.	Micrómetro.....	31
3.12.	Báscula digital.....	32
4.	Metodología.....	33
5.	Desarrollo de ingeniería.....	37
5.1.	Procesos de pre-impresión.....	37
5.1.1.	Diseño de la Probeta.....	37
5.1.2.	Orientación de la impresión.....	38
5.1.3.	Características de pre-impresión.....	40
5.1.4.	Condiciones ambientales del laboratorio y de almacenamiento del material.....	41
5.2.	Proceso de modelado por deposición fundida para PLA.....	42
5.2.1.	Material utilizado en el proceso de FDM para PLA.....	42
5.2.2.	Instalación del material en la máquina de impresión y adecuación de la máquina.....	43
5.2.3.	Proceso de pruebas en impresiones de PLA.....	44
5.2.4.	Parámetros de impresión seleccionados.....	46
5.2.5.	Protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para PLA.....	47
5.2.6.	Impresión de probetas.....	47
5.2.7.	Control de calidad.....	49
5.3.	Proceso de modelado por deposición fundida para ABS.....	55
5.3.1.	Material utilizado en el proceso de FDM para ABS.....	55
5.3.2.	Instalación del material en la máquina de impresión.....	56
5.3.3.	Proceso de pruebas en impresiones de ABS.....	56
5.3.4.	Implementación de cama magnética de impresión.....	57
5.3.5.	Parámetros de impresión seleccionados.....	59

5.3.6.	Protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para ABS.	59
5.3.7.	Impresión de probetas.	60
5.3.8.	Control de calidad.	61
5.4.	Pruebas mecánicas de tensión.	61
5.4.1.	Procedimientos previos a la prueba mecánica de tensión.	61
5.4.2.	Cálculo de parámetros mecánicos a partir de las pruebas de tensión.	68
6.	Presentación y análisis de resultados.	76
6.1.	Probetas fabricadas en PLA.	76
6.1.1.	PLA [0°/0°].	77
6.1.2.	PLA [45°/45°].	81
6.1.3.	PLA [90°/90°].	85
6.1.4.	PLA [0°/90°].	89
6.1.5.	PLA [45°/-45°].	93
6.2.	Probetas fabricadas en ABS.	97
6.2.1.	ABS [0°/0°].	98
6.2.2.	ABS [45°/45°].	102
6.2.3.	ABS [90°/90°].	106
6.2.4.	ABS [0°/90°].	110
6.2.5.	ABS [45°/-45°].	114
6.3.	Comparación de métodos para calcular el módulo de Young.	118
6.4.	Esfuerzo máximo de tensión y Modulo de Young.	119
6.5.	Punto de transición.	122
6.6.	Modo de Falla.	123
7.	Conclusiones.	124
8.	Recomendaciones.	127
9.	Bibliografía.	130

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas del ABS.....	20
Tabla 2. Propiedades mecánicas del PLA.....	21
Tabla 3. Especificaciones de la impresora Creator Pro.	27
Tabla 4. Especificaciones técnicas máquina de ensayos universal Shimadzu AGS-10Knxd.....	28
Tabla 5. Requerimientos geométricos del espécimen para prueba de tensión.....	37
Tabla 6. Características mecánicas del PLA.....	43
Tabla 7. Parámetros de impresión seleccionados para material PLA.	46
Tabla 8. Propiedades mecánicas del ABS.....	55
Tabla 9. Parámetros de impresión para ABS.	59
Tabla 10. Características mecánicas de la madera balsa.....	63
Tabla 11. Parametros de calculo para el I.C.	74
Tabla 12. Características mecánicas de cada probeta de PLA [0°/0°].....	79
Tabla 13. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [0°/0°].....	79
Tabla 14. Características mecánicas de cada probeta de PLA [45°/45°].....	82
Tabla 15. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [45°/45°].....	83
Tabla 16 Características mecánicas de cada probeta de PLA [90°/90°].....	87
Tabla 17. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [90°/90°].....	87
Tabla 18. Características mecánicas de cada probeta de PLA [0°/90°].....	90
Tabla 19. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [0°/90°].....	91
Tabla 20. Características mecánicas de cada probeta de PLA [45°/-45°].	95
Tabla 21 Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [45°/-45°].	95
Tabla 22. Características mecánicas de cada probeta de ABS [0°/0°]	99
Tabla 23. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [0°/0°].....	100
Tabla 24. Características mecánicas de cada probeta de ABS [45°/45°].	103
Tabla 25. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [45°/45°].....	104
Tabla 26. Características mecánicas de cada probeta de ABS[90°/90°].....	108
Tabla 27. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [90°/90°].....	108
Tabla 28. Características mecánicas de cada probeta de ABS [0°/90°].	111
Tabla 29. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [0°/90°].....	112
Tabla 30. Características mecánicas de cada probeta de ABS [45°/-45°].....	116
Tabla 31. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [45°/-45°].	116
Tabla 32. Comparación de metodos de calculo para el módulo de elasticidad	119

Lista de figuras

Figura 1. Esfuerzos correspondientes a diferentes orientaciones de impresión del ABS...	4
Figura 2. Datos obtenidos del esfuerzo máximo de tensión.	6
Figura 3 Esfuerzo último de probetas a diferentes ángulos de impresión.	7
Figura 4. Comparación esfuerzo último de probetas FDM con diferente ángulo de impresión.....	8
Figura 5. Comparación del módulo de elasticidad entre datos experimentales vs datos CLT de ABS y PLA.....	10
Figura 6. Mecanismos de fallas en probetas sometidas a ensayo de tensión: a) ángulo 0° con punto de fluencia, b) ángulo 30° con ruptura.	11
Figura 7. Tabla t-Student.	25
Figura 8. Impresora 3D FlashForge Creator Pro.	26
Figura 9. Cámara Termográfica FLIR.	30
Figura 10. Micrómetro.	31
Figura 11. Báscula digital.	32
Figura 12. Metodología de investigación.....	36
Figura 13. Vistas y dimensiones del espécimen.	38
Figura 14. Orientaciones de cada probeta.....	40
Figura 15. Caja de almacenamiento de carretes de material y probetas.	42
Figura 16. Carrete PLA “PRUSA”.	43
Figura 17. Imagen térmica de la plataforma de impresión,	44
Figura 18. Set de 10 probetas [0°/90°].....	48
Figura 19. Lote probetas [0°/90°].	48
Figura 20. Lotes de impresión PLA no dimensionado.	48
Figura 21. Curvatura de las esquinas.	51
Figura 22. Error de pandeo en la probeta.....	52
Figura 23. Dimensionamiento de probetas usando micrómetro.	53
Figura 24. Zonas de medición de longitud.....	53
Figura 25. Carrete de ABS.....	55
Figura 26. Cama magnética, lado inferior y superior.	57
Figura 27. Proceso de desmolde de la probeta sobre la cama magnética.	58
Figura 28. Imagen térmica de la plataforma de impresión para ABS,.....	58
Figura 29. Set de impresión ABS orientación [0°/0°].	60
Figura 30. Lotes de impresión ABS.....	60
Figura 31. Gráfica esfuerzo vs deformación ABS.....	62
Figura 32. Gráfica esfuerzo vs deformación PLA.	63
Figura 33. Dimensiones de Tabs y ubicación en la probeta.	64
Figura 34. 5 lotes de PLA con tabs instalados.....	65
Figura 35. Lotes de ABS con tabs instalados.	65
Figura 36. Disposición inicial de la prueba mecánica a tensión para Pla.	66
Figura 37. Códigos específicos según tipo de falla del espécimen.....	67

Figura 38. Curvas generales de esfuerzo-deformación a tensión de la probeta PLA[0°/0°]-1.....	71
Figura 39. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/0°].	78
Figura 40. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/0°] probetas seleccionadas.....	80
Figura 41 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [0°/0°].....	81
Figura 42. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/45°].	82
Figura 43. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/45°] probetas seleccionadas.	84
Figura 44 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [45°/45°]. .	85
Figura 45 Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [90°/90°].	86
Figura 46. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [90°/90°] probetas seleccionadas.	88
Figura 47 Comportamiento zona elástica de probetas. PLA [90°/ 90°].	89
Figura 48 Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/90°].	90
Figura 49. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/90°] probetas seleccionadas...	92
Figura 50 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [0°/90°]. ...	93
Figura 51. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/-45°].	94
Figura 52. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/-45°] probetas seleccionadas.	96
Figura 53 Comportamiento zona elástica de probetas de PLA [45°/-45°].	97
Figura 54. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/0°].	99
Figura 55. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/0°] probetas seleccionadas. .	101
Figura 56 Comportamiento zona elástica de probetas de ABS [0°/0°].	101
Figura 57. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/45°].	103
Figura 58. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/45°] probetas seleccionadas.	105
Figura 59 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS [45°/45°].	106
Figura 60. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS[90°/90°].	107
Figura 61. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [90°/90°] probetas seleccionadas.	109
Figura 62. Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS[90°/90°].	110
Figura 63. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/90°].	111
Figura 64. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/90°] probetas seleccionadas.	113
Figura 65 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS [0°/90°]. .	114
Figura 66. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/-45°].	115
Figura 67. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/-45°] probetas seleccionadas.	117
Figura 68 Comportamiento zona elástica de probetas de ABS [45°/-45°].	118
Figura 69. Comparación de esfuerzo máximo de tensión de los materiales PLA y ABS.	120
Figura 70. Comparación de Modulo de elasticidad de los materiales PLA y AB	121
Figura 71. Punto de Transición mediante aproximación lineal para la probeta PLA [0°/0°]-1.....	122

Lista de anexos

- Anexo 0. Norma ASTM D 3039 2002.
- Anexo 1. Tabla de dimensionamiento en impresiones de probetas fabricadas en PLA por medio de FDM.
- Anexo 2. Tabla de dimensionamiento en impresiones de probetas fabricadas en ABS por medio de FDM.
- Anexo 3. Tabla de seguimiento en impresiones de probetas fabricadas en PLA por medio de FDM.
- Anexo 4. Protocolo de Impresión a Través de FDM y Control de Calidad Para PLA.
- Anexo 5. Tabla de seguimiento en impresiones de probetas fabricadas en ABS por medio de FDM.
- Anexo 6. Protocolo de Impresión a Través de FDM y Control de Calidad Para ABS.
- Anexo 7. Tabla de cálculos estadísticos para intervalo de confianza con base al esfuerzo máximo de tensión de cada espécimen.
- Anexo 8. Aproximación grafica del punto de transición
- Anexo 9. Modos de falla probetas, material PLA.
- Anexo 10. Modos de falla probetas, material ABS.
- Anexo 11. Protocolo para pruebas mecánicas de tensión bajo la normativa ASTM D 3039 usando probetas fabricadas con los materiales PLA y ABS a través de FDM.

Nomenclatura

Nomenclatura	Significado
AM	Manufactura aditiva
FDM	Modelado por deposición fundida
PLA	Ácido poliláctico
ABS	Acronitrilo butadeino estireno
ASTM	Sociedad Americana para pruebas y materiales
STL	Lenguaje triangular estándar
CNC	Control numérico computarizado
CLT	teoría clásica de laminado
CAD	Diseño asistido por computador
Pa	Pascal
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
Ksi	Kilo libra por pulgada cuadrada
ISO	Organización internacional para la estandarización
°C	Grado Celsius
mm	Milímetro
m	metro
s	Segundos
PVA	Acetato de polivinilo
HIPS	Poliestireno de alto impacto
Kg	Kilogramo
°	Grado
ρ_R	Densidad real
ρ_T	Densidad teórica
σ_i	Esfuerzo
P_i	Fuerza aplicada a la probeta en su eje longitudinal
A	Área de la sección transversal que resiste la carga durante el ensayo de tracción
A	Área sección transversal de la probeta
w	Ancho de la probeta
h	Espesor de la probeta o altura de la sección transversal
F^{tu}	Esfuerzo máximo de tensión
P_{max}	Carga máxima antes de la falla
Y	Esfuerzo axial aplicado
X	Deformación correspondiente
\bar{Y}	Promedio valores carga máxima antes de la falla
\bar{X}	Promedio valores deformación correspondiente
K	Número de pares de datos X, Y
$I.C$	Intervalo de confianza

Nomenclatura	Significado
x	Promedio simple
s_{u-1}	Desviación estándar
\bar{x}	Promedio simple
t	Coficiente de <i>Student</i>
α	Nivel de significación
dt	Grados de libertad
n	Numero de muestras
X_i	Valor de la propiedad
CV	Coficiente de variación en porcentaje

1. Introducción.

En la actualidad existe una gran variedad de materiales y técnicas de manufactura. La industria de los materiales sigue en constante crecimiento, lo que permite el desarrollo de nuevos y mejores materiales y técnicas de manufactura más precisas y que reducen el tiempo de fabricación de partes y componentes. La posibilidad de encontrar nuevos materiales y establecer sus métodos de manufactura, impulsa el desarrollo de este proyecto de investigación, el cual consiste en determinar las características mecánicas de dos materiales termoplásticos y establecer su proceso de manufactura.

El crecimiento tecnológico ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas de manufactura como lo es la manufactura aditiva o AM por sus siglas en inglés “*Additive Manufacturing*”, en la que se fabrican objetos a partir de la deposición de material capa por capa. El modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés “*Fused Deposition Modeling*” es un tipo de manufactura aditiva generalmente conocida como impresión 3D, la cual utiliza un material termoplástico fundido para la modelación de objetos (Cicala, et al., 2017).

El reciente auge de la técnica de modelado por deposición fundida y de los nuevos materiales termoplásticos utilizados en esta, impulsa a su estudio, el de sus materiales y posibles combinaciones de estos con otros materiales; por ello, los materiales termoplásticos y el método de modelado por deposición fundida se convierten en objeto de estudio para este proyecto, siendo el ácido poliláctico o PLA por sus siglas en inglés “*Poly Lactic acid*” y Acrilonitrilo butadieno estireno o ABS por sus siglas en inglés

“*Acrylonitrile butadiene styrene*”, los materiales termoplásticos analizados, debido a que son los materiales más populares entre los usuarios de este tipo de tecnología en la actualidad.

El estudio de las propiedades mecánicas de materiales en ingeniería se rige bajo ciertas normas que estandarizan tanto las características del estudio, como los procedimientos por los cuales se desarrolla. Para el estudio y caracterización de las propiedades mecánicas de materiales existen diversas normas ya establecidas, como lo son las normas ASTM o por sus siglas en inglés “*American Society of Testing Materials*”, las cuales serán utilizadas para el desarrollo de este proyecto. Sin embargo, en la actualidad no existen normas estandarizadas para el estudio y caracterización de materiales termoplásticos fabricados a través de FDM, por lo tanto, no se cuenta con procedimientos estándar de manufactura para pruebas mecánicas; por ello se plantea en este proyecto la formulación de un protocolo de manufactura con el fin de estudiar un material termoplástico a través de un proceso estandarizado.

2. Planteamiento del problema.

En este apartado se evidencia la descripción y formulación del problema del proyecto, antecedentes o revisión del estado del arte, los objetivos del proyecto y sus alcances y limitaciones.

2.1. Antecedentes.

En esta sección se presentan los antecedentes relevantes para el proyecto de investigación, de los cuales se han tomado parámetros como punto de partida para ciertos procedimientos de desarrollo de este proyecto.

Análisis de las propiedades de tensión compresión y flexión del ABS P430 impreso en 3D basada en la orientación de impresión usando el modelado por deposición fundida.

Esta investigación fue realizada por en el año 2016 por R. Hernandez y tuvo como objetivo examinar los efectos de la impresión 3D implementando diferentes orientaciones en las propiedades mecánicas del ABS P430 bajo la normativa ASTM D638 Realizar la impresión de las probetas a diferentes ángulos según la norma ASTM D638.

En primer lugar, se realizó el modelado de la probeta a partir de un programa de diseño asistido por computador con dimensiones acordes a la norma ASTM D638. Para cada una de estas pruebas se imprimieron a través de la técnica de modelado por deposición fundida con la impresora uPrint SE Plus en ángulos de 0°, 45°, 90° y 45°/-45°, posteriormente se llevaron a cabo los ensayos destructivos en la máquina MTS 810

empleando mínimo cinco probetas para cada configuración y por último se realizó el análisis de resultados para cada uno de los ensayos destructivos.

Con base al análisis de resultados se obtuvieron los módulos de elasticidad y los esfuerzos últimos para cada configuración del ángulo de trama y para cada una de las respectivas pruebas realizadas (Figura 1), estos resultados fueron consignados en una tabla con una desviación estándar y representados en un gráfico, para el caso de estudio en el ensayo de tensión los valores mayores se obtuvieron de la probeta a 90° con respecto al eje Z con un módulo de elasticidad de 737 MPa mientras que el esfuerzo máximo lo obtuvo a la probeta de 90° en el eje XY con un valor de 10,8 Mpa (R. Hernandez, 2016).

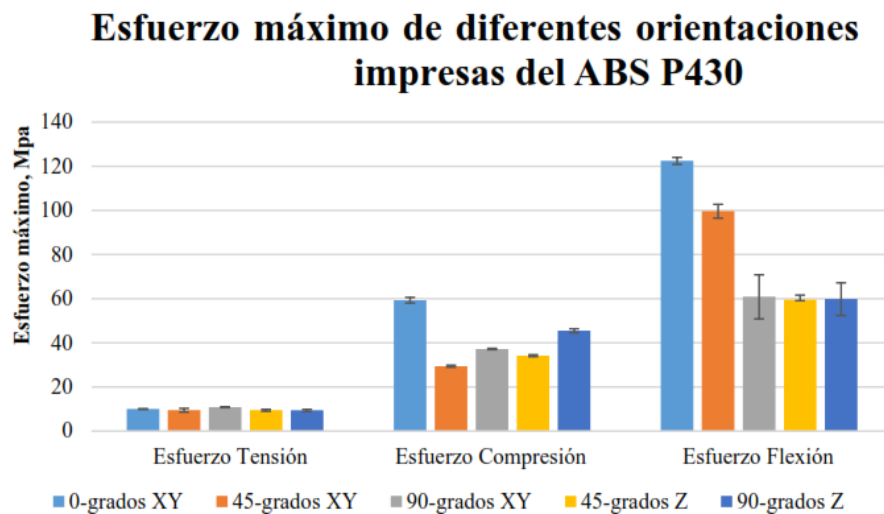


Figura 1. Esfuerzos correspondientes a diferentes orientaciones de impresión del ABS.

Fuente: (R. Hernandez, 2016).

Diseño de una aproximación experimental para optimizar las propiedades de tensión y flexión de piezas de modelado por deposición fundida

Se optimizó la eficiencia mecánica en términos de propiedades mecánicas y tiempos de manufactura y costos de acuerdo con los requisitos del producto. Con la finalidad de realizar el modelo a través de la técnica de modelado por deposición fundida se configuran los diferentes parámetros de impresión mediante el programa Marketbot Replicator 2 empleando el material PLA, una vez impresa la pieza se realizó el ensayo destructivo con la máquina Zwick Roell Z010 obteniendo datos para el análisis del esfuerzo último y del módulo de Young e igualmente se recopilaron los datos de tiempo de manufactura y eficiencia de material. El valor más alto obtenido de esfuerzo último corresponde a 66.96 MPa y un módulo de Young de 1349.9 MPa (Griffiths, Howarth, Rowbotham, & Ress, 2016).

Los gráficos de los principales resultados muestran que el relleno y el número de marcos son los parámetros más importantes (Figura 2). Esto es confirmado por los diagramas, los cuales indican que el relleno es el factor más significativo, seguido por el número de marcos y luego una combinación de los dos mientras que la altura de capa no es un parámetro significativo que influya en los resultados de ensayo de tensión (R. Hernandez, 2016).

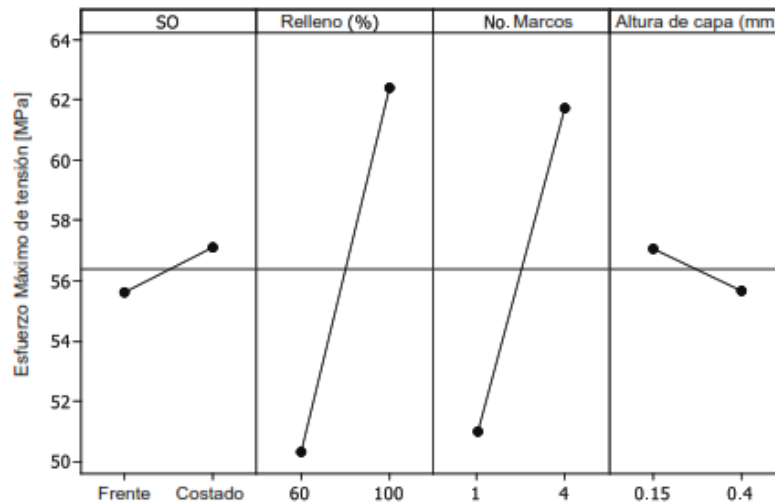


Figura 2. Datos obtenidos del esfuerzo máximo de tensión.

Fuente: (R. Hernandez, 2016)

Propiedades anisotropías del material ABS de prototipo rápido.

Se realizó la comparación entre el ABS P400 fabricado por moldeo por inyección con el ABS P400 manufacturado bajo la técnica de moldeo por deposición fundida empleando ensayos destructivos de tensión y compresión bajo la norma ASTM D3039. El modelo fue realizado por medio de un programa de diseño asistido por computador CAD y posteriormente exportado a FDM Quikslice en formato STL. Una vez se tiene el modelo en el programa de prototipado rápido se realiza la impresión de la pieza de ABS P400 en la maquina FDM 1650 a 0° , 45° - 45° , 0° - 90° , y 90° una vez establecidos los parámetros de impresión. La geometría diseñada se realizó bajo la norma ASTM D638, sin embargo, se obtuvieron problemas de impresión y falla prematura debido a la curvatura de la geometría por lo que se adoptó la norma ASTM D3039. Por otra parte, se realizó el moldeo por inyección en la CNC con base en la geometría establecida por la norma (Ahn-Sung, 2002).

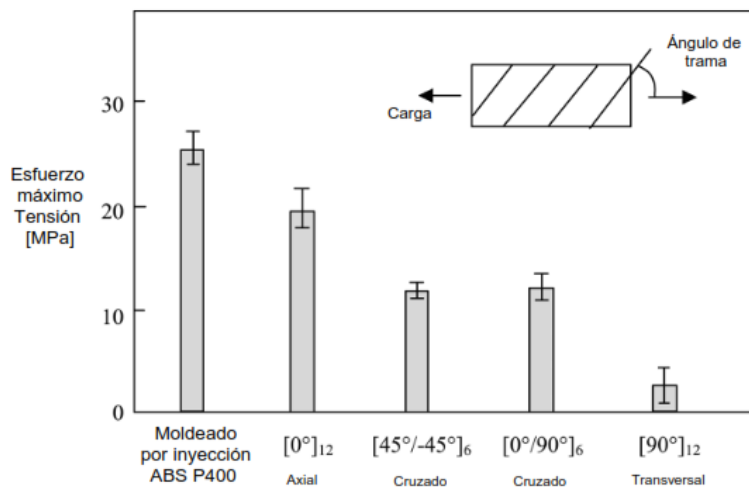


Figura 3 Esfuerzo último de probetas a diferentes ángulos de impresión.

Fuente: (Ahn-Sung, 2002)

Los ensayos destructivos de tensión establecieron que la probeta impresa con una orientación uniforme de la trama de 0° , obtuvo el valor más alto de esfuerzo de tensión con respecto a la técnica de deposición fundida (Figura 3), sin embargo, la probeta manufacturada por medio de la técnica de moldeado por inyección obtuvo el valor más alto de la totalidad de especímenes empleados. Por otra parte, se pudo concluir que al eliminar los poros internos (air gap) de la probeta, aporta una estructura más densa y por lo tanto incrementa las propiedades del esfuerzo de tensión para todos los ángulos de trama impresos (Ahn-Sung, 2002).

Modelo anisotrópico de falla de tensión de las piezas de prototipado rápido-modelado por deposición fundida (FDM).

Esta investigación se centró en analizar la influencia del ángulo de trama manteniendo el air gap constante en piezas de prototipado rápido, empleando la técnica de modelado por

deposición fundida en material ABS para posteriormente aplicar pruebas destructivas de tensión.

En primer lugar, se llevó a cabo el diseño de la probeta en un programa de diseño asistido por computador. Posteriormente, se exportó el archivo al programa FDM Quickslice para imprimir la probeta bajo la normativa ASTM D3039. Esta investigación partió de datos encontrados en otra investigación en la cual se realizaba una comparación entre manufactura aditiva y moldeado por inyección. Con la finalidad de aplicar el modelo de falla se aplicó la teoría de laminado clásico asumiendo un estado de esfuerzo plano, despreciando esfuerzos y simplificando la deformación, además del criterio de falla de Tsai-Wu y se codificó en un programa computacional con la finalidad de predecir la falla (Ahn-Sung, 2002).

Se concluyó que el modelo anisotrópico de falla para materiales manufacturados por medio de la técnica de modelado por deposición fundida planteado pudo predecir razonablemente la falla al ser expuesto a una carga de tensión en función del ángulo de trama (Figura 4).

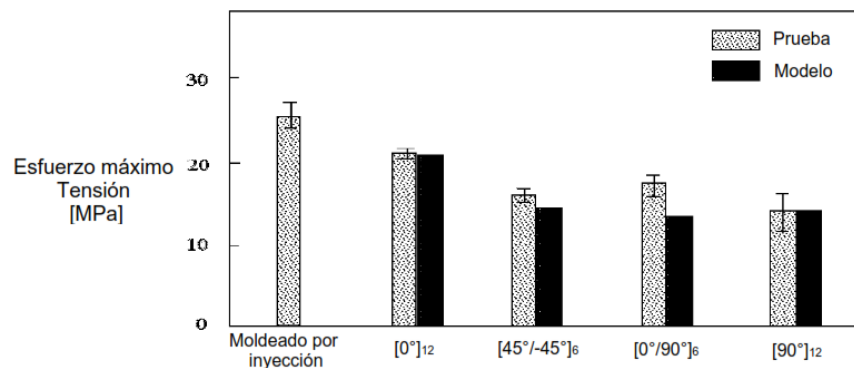


Figura 4. Comparación esfuerzo último de probetas FDM con diferente ángulo de impresión.

Fuente: (Ahn-Sung, 2002)

Propiedades mecánicas ortotrópicas de piezas de modelado por deposición fundida.

El objetivo principal de esta investigación fue describir el comportamiento mecánico de piezas fabricadas por medio de la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) mediante la teoría clásica de laminado (CLT). La geometría de las probetas fue diseñada bajo la normativa ASTM D638 en el software CAD y la impresión de estas en los ángulos de trama de 0° , 90° y 45° se realizó en la maquina RepRap Prusa i3 una vez se ajustaron los distintos parámetros de impresión tanto para PLA como para ABS en el software Slic3r.

La máquina empleada para la realización de las pruebas mecánicas fue la Instron 3343 para ABS mientras que para PLA se empleó la maquina MTS Alliance RT/30 ya que este material sufre ruptura a mayores cargas. La relación de Poisson fue medida por medio de galgas extensiométricas y un sistema HBM Quantum X 840 para la adquisición de datos, por otra parte; el módulo cortante fue hallado con base en la norma ASTM 3518-94 y el módulo de Young se determinó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM 638-10 (Casavola, cazzato, & Moramarco, 2015).

En conclusión, se demostró que el modelo de la teoría clásica de laminado tiene una alta capacidad de predecir el módulo elástico del ABS y PLA fabricados por FDM (Figura 5). Así mismo, existen errores entre lo experimental y las pruebas tal como se encuentra en la literatura con un error entre del 4,7% a 6,6%.

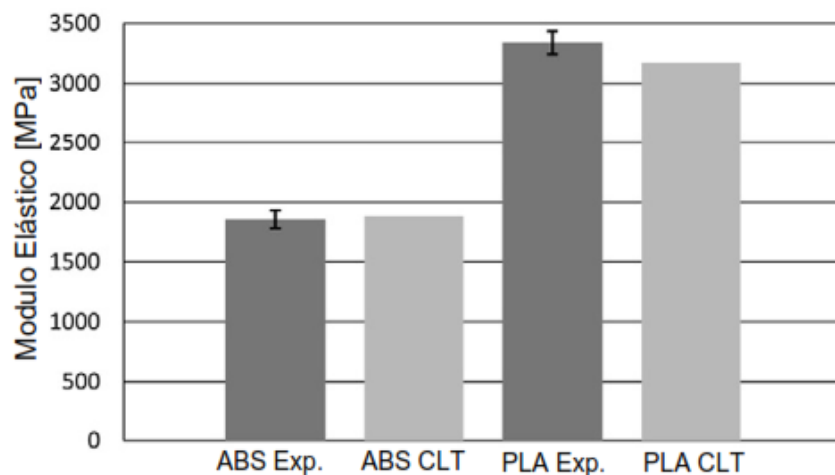


Figura 5. Comparación del módulo de elasticidad entre datos experimentales vs datos CLT de ABS y PLA.

Fuente: (Casavola, cazzato, & Moramarco, 2015)

Esfuerzo máximo de las piezas de ABS producidas por la técnica de modelado por deposición fundida: un problema de orientación crítica.

Se presentan resultados de tensión y flexión realizados en probetas impresas a distintos ángulos de trama de ABS a través de la técnica FDM. Las probetas fueron impresas en la maquina BST 1200, las geometrías se diseñaron con base en las normas PN-EN ISO 527 (tensión), PN-EN ISO 178 (flexión) y PN-EN 10045-1 (impacto). Los ángulos de trama fueron 15°, 30°, y 45° para cada prueba respectivamente, con un total de cinco probetas impresas por ángulo de trama. Los ensayos de tensión y flexión fueron llevados a cabo en la máquina de ensayos destructivos Zwick Roell Z020 mientras que para el ensayo de impacto se empleó el martillo de impacto Charpy (Górski, Wichniarek, Kuczko, & Zawadzki, 2015).

Se concluyó a partir de los análisis de resultados de los ensayos destructivos que la unión entre las capas del material influye en que disminuya considerablemente el esfuerzo máximo en comparación con la técnica de moldeado por inyección (Figura 6). Por otra

parte, el volumen de error existente por el proceso de FDM incluso si se reduce la unión inter-capas impide que la estructura sea monolítica y por lo tanto este espaciamiento disminuye el área efectiva en comparación al proceso de inyección, incrementando el esfuerzo de tensión máximo soportado. Por último, se determinó que los ángulos críticos de ruptura por capas disjuntas se encuentran entre 5° y 30° mientras que en un ángulo de 0° la falla ocurre por falla de hilo en el punto de fluencia. (Górski, Wichniarek, Kuczko, & Zawadzki, 2015).

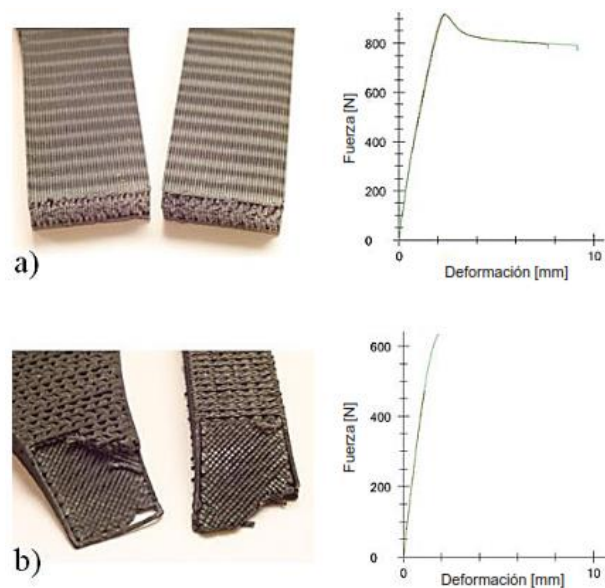


Figura 6. Mecanismos de fallas en probetas sometidas a ensayo de tensión: a) ángulo 0° con punto de fluencia, b) ángulo 30° con ruptura.

Fuente: (Górski, Wichniarek, Kuczko, & Zawadzki, 2015).

2.2. Descripción y formulación del problema.

En la actualidad, los procedimientos utilizados bajo la técnica de modelado por deposición fundida (impresión 3D) están teniendo auge con el uso de nuevos materiales.

Este tipo de experimentos ha venido progresando constantemente logrando resultados satisfactorios, a pesar de que ha sido limitado por las características mecánicas de las máquinas y las características del material, enfocado no solo en las propiedades sino también en el proceso de fundición de este. Es importante empezar a estandarizar los parámetros utilizados durante la impresión 3D, puesto que pueden llegar a tener ventajas importantes en la fabricación de piezas dentro del sector aeronáutico, simplificando los métodos de manufactura y disminuyendo el desperdicio de material en comparación con las técnicas tradicionales.

Dentro de los materiales más utilizados actualmente por el método de impresión 3D, se encuentra el PLA y el ABS, los cuales han sido trabajados constantemente por varias personas y empresas, pero existe una falta de conocimiento de las propiedades mecánicas de estos materiales termoplásticos en la industria actual. Los diferentes métodos de impresión que pueden llegar a ser usados pueden variar las características del material, la temperatura y el sentido de impresión, por lo tanto, se ha generado la necesidad de estandarizar las propiedades mecánicas de estos materiales respecto a un protocolo de impresión específico.

Hoy en día, los materiales termoplásticos que se comportan de manera anisotrópica no tienen normativa y protocolos estandarizados para la fabricación de piezas utilizando estos materiales y la caracterización de sus propiedades mecánicas. Por esta razón, se hizo un estudio con estos para establecer un protocolo adecuado con las temperaturas que ofrecen el mejor acabado y conformado de la impresión, la configuración de trama más

adecuada asignando un relleno sólido del 100% y las propiedades mecánicas de cada uno para futuros usos en la industria aeronáutica.

En la Universidad se están implementando estudios con respecto a estos materiales que están teniendo auge en la actualidad, que permita nuevas alternativas en el uso de diferentes materiales que ofrezcan mejores características mecánicas específicamente en el sector Aeronáutico, ya que estos pueden llegar a brindar ganancia en diferentes aspectos estructurales con respecto a materiales utilizados actualmente, y pueden llegar a ser un complemento de núcleo de un material compuesto. Gracias a esta investigación se busca implementar un protocolo del uso específico de los materiales termoplásticos PLA y ABS, diseñados a través de FEM que ofrezca las características mecánicas a tensión más eficientes. Respecto a lo anterior surge la siguiente pregunta problema: ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en materiales termoplásticos PLA y ABS a través de la técnica de modelado por deposición fundida y caracterizadas a partir de pruebas destructivas a tensión?

2.3. Objetivos.

En este inciso se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.

Objetivo General.

Caracterizar las propiedades mecánicas de materiales termoplásticos a partir de probetas fabricadas por medio de la técnica de modelado por deposición fundida.

Objetivos específicos.

- Establecer un protocolo de manufactura y control de calidad para la fabricación de probetas elaboradas en los materiales termoplásticos PLA y ABS a través de técnicas de modelado por deposición fundida.
- Obtener las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en los materiales PLA y ABS por medio de la técnica de modelado por deposición fundida.
- Obtener el análisis comparativo entre las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas de PLA y ABS.

2.4. Alcances y limitaciones.

En este apartado se enuncian todos los alcances y limitaciones propuestos para el proyecto, los cuales delimitan el desarrollo de este. Tanto alcances como limitaciones se verán reflejados en los procedimientos del desarrollo de ingeniería y metodología del proyecto.

Alcances del proyecto.

- a. Se usarán las configuraciones de $(45^\circ/-45)$, $(0^\circ/90^\circ]$, $(0^\circ/0^\circ]$ y $(90^\circ/90^\circ]$ para la impresión de probetas de material termoplástico.
- b. Se hará uso de los materiales termoplásticos PLA y ABS para la caracterización de propiedades mecánicas y el desarrollo de protocolos de manufactura y control de calidad.
- c. Se realizará un protocolo de control de manufactura y calidad para probetas de dos tipos de materiales.

- d. Las pruebas mecánicas destructivas se realizarán bajo las normas ASTM aplicables a materiales termoplásticos fabricados a partir de extrusión o inyección, debido a que no existen tales normativas aplicadas a materiales fabricados a partir de FDM.

Limitaciones del proyecto.

- a. No se hará uso de normas estandarizadas específicas para la caracterización de propiedades mecánicas de probetas fabricadas por medio del método de modelado por deposición fundida, debido a la no existencia actual de estas.
- b. Se caracterizarán las propiedades de los materiales ofrecidos por un solo proveedor del mercado.
- c. Se hará uso únicamente de los materiales ABS y PLA como los termoplásticos a caracterizar.
- d. Las probetas construidas en material termoplástico se realizarán en las configuraciones de impresión descritas en el desarrollo de este documento.
- e. Se hará uso únicamente de la máquina de impresión 3D disponible en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá descrita en el documento.
- f. La metodología, procedimientos, protocolos y resultados presentados serán replicables únicamente si se hace uso de los mismos materiales, maquinaria y procedimientos establecidos en este documento.
- g. Se usará únicamente la máquina universal de ensayos para pruebas mecánicas destructivas descrita en el desarrollo de este proyecto.

- h. No se realizarán análisis computacionales de elementos finitos para ninguna de las probetas.
- i. De las probetas fabricadas se determinarán únicamente las siguientes propiedades mecánicas: Esfuerzo máximo de tensión, Deformación máxima bajo una carga de tensión, Modulo de elasticidad o modulo de Young y Punto de transición. Todas estas propiedades se calcularán a través de los resultados de pruebas destructivas de tensión en la máquina univerzal de ensayos.
- i. No se realizarán procedimientos ni análisis matemáticos para determinar teóricamente las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.
- j. Todas las probetas construidas se analizarán únicamente de manera experimental.
- k. Se obtendrán únicamente las propiedades mecánicas descritas en el desarrollo de este documento para cada una de las probetas.
- l. Durante la fabricación de las probetas, el porcentaje de relleno del material, la velocidad de impresión y la temperatura del extrusor y de la cama de impresión, serán características constantes.
- m. Se usará solo una referencia de material y un solo proveedor para los materiales termoplásticos a utilizar.
- n. Se manejarán únicamente como variables en el proyecto el material termoplástico a emplear, los ángulos del filamento de impresión de las probetas, y la altura de las capas de las probetas.

3. Marco teórico y conceptual.

En esta sección se dará a conocer la teoría sobre la cual se desarrolla este proyecto, al igual que las referencias y características de los elementos, maquinaria y normativa utilizados para la investigación realizada.

3.1. Manufactura aditiva “AM”.

Este término es aludido a la impresión 3D y a lo que antiguamente se denominaba como prototipado rápido, es ampliamente usado por las industrias para referirse a una pieza que es manufacturada en poco tiempo antes de ser comercializada. El primer sistema de manufactura aditiva un aparato de estereolitografía se lanzó en 1987 por 3D Systems en los Estados Unidos (3D Systems, 2018).

Así mismo, empleando esta técnica se pueden fabricar prototipos de un diseño conceptual a partir de un programa de diseño asistido por computador con la finalidad de verificar el desarrollo de este antes de continuar con el proceso de diseño preliminar y detallado, validando tolerancias geométricas e integración con otros componentes, disminuyendo así, costos y tiempo durante el desarrollo de las piezas. Por otra parte, el término de prototipado rápido hace referencia a la manufactura por adición de capas de material, sin embargo, el comité internacional de la ASTM decidió modificar el término a manufactura aditiva (Amazing, 2018).

El principio de funcionamiento de la manufactura aditiva, el cual se implementó para el desarrollo del proyecto, consiste en primer lugar en el modelado de una pieza o

componente en un programa de diseño asistido por computador, en este caso CATIA V5R21. Luego, se debe utilizar un software especializado en la creación de códigos interpretados por máquinas de impresión 3D, en este caso se utilizó el software Replicator G, ya que es de licencia libre, permite configurar los parámetros de impresión y es compatible con la impresora 3D FlashForge Creator Pro disponible en la Universidad. Finalmente, se debe configurar la impresora a través del código generado para obtener los componentes diseñados.

La manufactura aditiva funciona bajo la adición de capas sucesivas de material, hasta lograr el volumen diseñado. La calidad y las propiedades mecánicas de la pieza dependen directamente de los parámetros de impresión definidos por el usuario. Esta técnica generalmente se emplea para fabricar productos relativamente simples con la finalidad de visualizar el modelo antes de su producción en serie, puesto que su fabricación es rápida. Este tipo de técnicas reducen costos, tiempo de fabricación, y la facilidad de manufactura de piezas relativamente simples como lo son las probetas empleadas en esta investigación debido a que no se requiere un proceso de manufactura en múltiples estaciones para lograr el producto final (Relaño, 2013).

3.2. Modelado por deposición fundida (FDM).

Es una de las técnicas de manufactura aditiva basada en la extrusión de un material, los materiales más empleados en estos procesos son PLA y ABS. Un material se encuentra dentro de la categoría de aditivo cuando va disperso en la matriz polimérica sin afectar con ello la estructura molecular. Por otra parte, la altura de capa configurada al momento

de la impresión, define la rugosidad y el acabado superficial de una pieza, así mismo la diferencia de temperaturas entre el extrusor y el ambiente genera una contracción y solidificación del material desfavoreciendo la unión entre capas y aumentando las tensiones internas en el material (3D HUBS, 2018).

Los componentes de la máquina de FDM en el caso de la FlashForge Creator Pro son una cámara de precalentamiento donde el material termoplástico es llevado a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión. El material es dirigido a un extrusor ubicado en un cabezal móvil que deposita el material de forma controlada en cada capa siguiendo una trayectoria preestablecida. Cada capa que construye la sección transversal y al disminuir su temperatura se endurece y se une a la capa anterior, al mismo tiempo la cama cambia su altura con la finalidad de seguir con la construcción del sólido añadiendo capas de material sucesivas. Las dimensiones del sólido influyen tanto el control de flujo de material como la altura de capa. Los movimientos de esta máquina comprenden los ejes X, Y, y Z, en función del modelo, adicionando capas en la sección transversal hasta completar el patrón de impresión requerido.

3.3. ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno).

La estructura química del ABS está compuesta en primer lugar por acrilonitrilo, el cual proporciona propiedades de rigidez, dureza y resistencia a fundirse, en segundo lugar, el butadieno tiene como características la ductilidad, resistencia al impacto y a la fundición y por último el estireno aporta propiedades como dureza y rigidez. El ABS es un material termoplástico el cual al ser expuesto a aumentos o disminución de temperatura por

encima de los 100°C y por debajo de los 0°C respectivamente mantiene sus dimensiones y propiedades mecánicas, este material tiene múltiples aplicaciones en campos tales como electrónica, aeronáutica, transporte y maquinaria (Balderas, 2001).

La humedad afecta la ductilidad del ABS durante su procesamiento, pero no sus propiedades químicas, por tal motivo se expone a un secado previo y a un proceso de control de humedad con la finalidad de evitar la formación de vacancias. Durante el proceso de deposición fundida de material, el ABS reduce sus propiedades mecánicas en términos de esfuerzo y deformación máxima en comparación al material ABS sin ser extruido debido a que durante este procedimiento se alinean las cadenas moleculares creándose una anisotropía y un alargamiento del material (Vargas Henríques, 2004).

Uno de los aspectos claves característicos del ABS es su resistencia al calor y a los impactos. Fue originado a partir de la necesidad de la mejora de propiedades del poliestireno de alto impacto aumentando la cantidad de butadieno, sin embargo, al aumentar este elemento en grandes proporciones disminuye la resistencia a tensión y disminuye la magnitud de la temperatura de deformación, (Devesa, López, Samper, & Parres, 2008). Las propiedades Mecánicas del ABS antes de un proceso de FDM se referencian en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del ABS.

Fuente: (Devesa, López, Samper, & Parres, 2008)

Propiedad Mecánica	Magnitud	Método ISO
Módulo de tensión	2140 MPa	ISO 527-2
Esfuerzo tensión	43,0 MPa	ISO 527-2/50
Deformación tensión	2,7 %	ISO 527-2/50
Relación de Poisson	0,33	ISO 527-2
Dureza	76(ShoreD)	Durómetro

3.4. PLA (Ácido poliláctico).

Es un polímero sintético biodegradable obtenido a través de la glucosa del maíz, este material no es estable en condiciones de humedad elevada. El PLA se emplea en manufactura aditiva puesto que se pueden obtener objetos detallados, además es altamente estable a temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea entre los 55°C y los 175°C, así mismo es un elemento denominado como elemento fotodegradable por lo que se tienen que emplear procesos de aislamiento o protección con respecto a este fenómeno (Nudelman, 2004).

El PLA comparte características o propiedades mecánicas similares al PET, es un termoplástico rígido el cual puede ser semicristal o totalmente amorfo, siendo un material rígido y frágil resistente al rayado y al desgaste. Durante el proceso de manufactura aditiva, no es necesario asignar una temperatura alta a la cama de impresión, sin embargo, el *warping* se hace presente después del proceso de manufactura aditiva, y en comparación con el ABS se pueden obtener piezas con un mejor acabado superficial. Es más difícil de manipular debido a rápida tasa de enfriamiento y solidificación, dentro de sus propiedades mecánicas presenta un nivel alto de dureza y resistencia a los impactos, pero en menor proporción en comparación al ABS, (Bravo, 2017). Las propiedades mecánicas del PLA antes del proceso de FDM se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del PLA.

Fuente: (NatureWorks, 2017)

Propiedad Mecánica	Magnitud	Método ASTM
Resistencia a la tensión	60 MPa	D882
Resistencia a la tracción (ruptura)	53 MPa	D882
Módulo de tensión	3,6 MPa	D882
Elongación en tensión %	6	D882

Propiedad Mecánica	Magnitud	Método ASTM
Relación de Poisson	0,38	D882
Dureza	83(ShoreD)	Durómetro

3.5. Caracterización de materiales mediante ensayos destructivos.

Los ensayos destructivos se realizan con la finalidad de conocer las propiedades mecánicas de una probeta como muestra de un material a ensayar; para el caso de este proyecto el tipo de ensayos destructivos a implementar es netamente de tipo mecánico el cual permite determinar las propiedades de un material bajo efectos de una carga axial de tensión.

Algunas pruebas realizadas durante estos ensayos mecánicos son pruebas de tracción, compresión, torsión e impacto, cada una de estas tiene que ser llevada a cabo bajo la normatividad establecida para el tipo de material con la finalidad de obtener datos precisos y fiables. En este caso, el tipo de ensayo destructivo que se ejecutó para el desarrollo del proyecto fue el ensayo de tensión aplicado para materiales anisotrópicos implementado la normativa ASTM D 3039 especial para este tipo de materiales. Algunas de las propiedades mecánicas que se pueden analizar a partir de los resultados obtenidos son: módulo de elasticidad, esfuerzo último de ruptura, carga máxima del material, esfuerzo máximo de tensión, esfuerzo y carga de falla segura del material (Universidad del trabajo del Uruguay, 2016).

3.6. Norma ASTM D3039 M.

Esta normativa corresponde al ensayo o prueba destructiva de tensión la cual es presentada en el Anexo 0. Consiste en la elaboración de probetas rectangulares, realizadas a partir del material a caracterizar y posteriormente posicionadas entre las

mordazas de una máquina de ensayos universales, la velocidad de la máquina corresponde a 2mm/s y se le aplica una carga constante con la finalidad de determinar la resistencia del material al estar expuesto a una carga antes de la ruptura obteniendo propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, relación esfuerzo-deformación, deformación última, entre otras. La cantidad mínima de probetas para el desarrollo del ensayo destructivo es de 5 acorde a la normativa, entre mayor número de probetas empleadas se disminuye el error en el resultado (ASTM International, 2002).

3.7. Intervalo de confianza para muestras pequeñas con dispersión estándar no conocida (Método de Student).

La aplicación de métodos estadísticos para la selección y análisis de muestras es fundamental para saber la veracidad de los datos tomados y de cada uno de los análisis y cálculos posteriores al muestreo.

Ya que al realizar cálculos estadísticos como el promedio simple del esfuerzo máximo a tensión obtenido de un grupo de 10 muestras, como se aplica para el caso de esta investigación, el valor del promedio simple obtenido no es del todo un resultado certero, debido a que el comportamiento mecánico de cada prueba de tensión puede llegar a ser diferente y algunos de los valores de esfuerzo máximo de tensión (entre otros) podrían ser considerablemente diferentes con respecto a los demás, afectando de manera negativa los cálculos estadísticos y proporcionando valores de promedio simple no confiables del todo, y altos valores de dispersión estándar y coeficiente de variación en porcentaje. Por este motivo, es necesario aplicar a los datos obtenidos a partir de un muestreo, un

intervalo de confianza (I.C), cuyo cálculo se obtiene por medio de la selección de un nivel de significación, representado por la letra griega minúscula “ α ”, el cual se refiere al porcentaje de error que el investigador está dispuesto a aceptar en su investigación y lo propone de acuerdo al tipo de muestreo realizado y la confianza cualitativa de los resultados obtenidos. Se sugiere usar un valor del 5% para muestras pequeñas experimentales (Sounderpandian, 2008). Teniendo el nivel de significación “ α ”, es posible calcular el nivel o porcentaje de confianza el cual es igual a $1-\alpha$ y representa el porcentaje o región donde se encuentran los valores validos del I.C.

El intervalo de confianza, el cual define un rango de valores en torno al promedio simple, está en función del coeficiente “ t ” de Student, el cual es tomado a partir de la tabla de t-Student (Figura 7). El coeficiente t depende de dos valores, el primero es el porcentaje de varianza seleccionado y el segundo corresponde a los grados de libertad “df” valor que es igual al número de muestras a tratar menos uno ($df = n-1$) y representa teóricamente el número de muestras o variables de una sumatoria que podrán variar su valor sin cambie el valor del resultado de dicha sumatoria, siendo el número de probetas testeadas de cada lote, el número de muestras para esta investigación (Sounderpandian, 2008).

TABLE 6-1 Values and Probabilities of t Distributions

Degrees of Freedom	$t_{0.100}$	$t_{0.050}$	$t_{0.025}$	$t_{0.010}$	$t_{0.005}$
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

Figura 7. Tabla t-Student.

Fuente: (Sounderpandian, 2008).

3.8. Impresora 3D FlashForge Creator Pro.

Esta impresora es de tipo modelado por deposición fundida especialmente diseñada para operar con materiales termoplásticos PLA y ABS. Cuenta con dos extrusores y una

plataforma cuyas temperaturas pueden ser controladas por medio de una pantalla de control tipo led y un tablero de botones. Tiene un marco metálico, una placa base en aleación de aluminio de 6.3mm y una cubierta de acrílico encargado de sellar la misma y proteger las impresiones de ABS. En su interior cuenta con un sistema de nivelación para la plataforma de tres puntos, y una serie de varillas guías de alta resistencia y rodamientos lineales para lograr la ejecución del movimiento programado en los ejes según las características de impresión (FlashForge corp, 2017). La impresora se muestra en la Figura 8 y sus especificaciones técnicas en la Tabla 3.

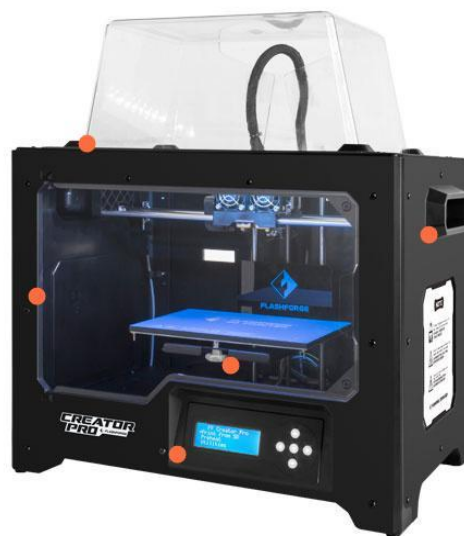


Figura 8. Impresora 3D FlashForge Creator Pro.

Fuente: (FlashForge corp, 2017)

Tabla 3. Especificaciones de la impresora Creator Pro.

Fuente: (FlashForge corp, 2017)

ESPECIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA
Tipo de impresora	FDM
Materiales de impresión compatibles	ABS, PLA, PVA, HIPS
Diámetro boquilla del extrusor	0,4 mm
Número de extrusores	2
Peso	21 kg
Capacidad de almacenamiento	Tarjeta SD de 4 GB
Conectividad	Tarjeta SD, USB
Tamaño máximo de impresión	225x145x150 mm
Diámetro del filamento	1,75 mm
Espesor de capa	0,1-0,3 mm
Tipo de archivo de entrada	STL, Gcode
Compatibilidad	Windows, Mac OS X, Linux
Software	Código abierto (Replicator G)
Dimensiones generales	320x467x381 mm
Material de la cubierta	Acrílico
Tubos guía de filamento	2
Porta carretes	2
Velocidad de impresión	40 a 100 mm/s

Las características de impresión tales como temperatura de extrusión y de la plataforma, posicionamiento en la plataforma, patrón y porcentaje de relleno, velocidad de impresión, altura de capa y configuración del material de soporte, son controladas por medio de un software, generalmente sugerido por el fabricante de la impresora. El programa sugerido por el fabricante de la impresora 3D FlashForge Creator Pro, es el denominado “*Replicator G*” encargado de convertir cualquier modelo en formato “.stl” en un formato “*Gcode*” el cual se exporta a una memoria SD que se inserta en la máquina. Desde el panel de control se puede seleccionar el archivo a imprimir, así como modificar las temperaturas de la cama o del extrusor, elegir el extrusor y ejecutar una rutina de precalentamiento previo a la impresión del modelo.

3.9. Máquina universal de ensayos.

Con la finalidad de realizar la caracterización de los materiales termoplásticos ABS y PLA por medio del ensayo destructivo de tensión bajo la normativa ASTM D3039, se hizo uso de la máquina de ensayos universales Shimadzu modelo AGS-10kNXD, las características de la maquina se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas máquina de ensayos universal Shimadzu AGS-10Knxd.

Fuente (Corporation, 2015)

Modelo		AGS-10kNXD
Capacidad de carga máxima		10 KN
Método de carga		Método de control directo de alta precisión de la constante de deformación a través de la transmisión de tornillo sin retroceso
Calibración	Calibración automática de la fuerza de prueba: seleccione tracción, compresión o tracción y compresión	
Cabezal	Rango de velocidad	0,001 a 1000 mm / min (sin pasos)
	Velocidad máxima de retorno	1500 mm/min
Fuerza de prueba permitida		Cargar la capacidad de la celda en todo el rango de velocidad
Ancho de prueba efectivo		425 mm
Detección de posición	Método de medición	Codificador óptico
	Método de visualización	Display digital
	Precisión posicional	$\pm 0,1$ % valor indicado ó $\pm 0,01$, lo que sea más grande
Velocidad de muestreo		1000 Hz max.

Funciones estándar	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura automática de los valores característicos de la celda de carga • Visualización de la fuerza de prueba, pantalla de esfuerzo, pantalla de carrera, pantalla de posición • Fuerza de prueba automática / control de esfuerzo (Autotuning) • Control automático de deformación (Autotuning) • Puesta a cero automáticas de la fuerza de prueba • Auto calibración de la fuerza de prueba • Detección de ruptura, retorno automático
Accesorios	Célula de carga (con cable CAL), cable de alimentación (2,5 m), barra giratoria, abrazaderas de cable, manual de instrucciones
Dimensiones	Ancho 653× profundidad 520× Altura 1603mm
Peso	85Kg
Requerimientos de fuente de poder	Una fase 100/120/220/240 V AC (tipo de conmutación) 50/60 Hz 1.2 kVA
Ambiente operacional	Temperatura: 5 ° C a 40 ° C; Humedad: 20% a 80% (sin condensación) Vibraciones del suelo: frecuencia 10 Hz máx., Amplitud 5 μm máx.

3.10. Cámara termográfica

Esta herramienta permite la medición de la radiación calorífica de un cuerpo sin necesidad de entrar en contacto directo con la fuente emisora, identificando los puntos calientes. Las cámaras termográficas son ampliamente utilizadas en la actualidad en la industria y es empleada principalmente para reparación y mantenimiento en lugares donde los sensores comunes serían afectados por temperaturas muy elevadas. En cuanto al proceso de manufactura aditiva, la temperatura de la cama, como la temperatura del extrusor y de la cámara son parámetros muy importantes, por lo que esta herramienta

permite corroborar la distribución de temperaturas en el interior de la máquina de impresión. Una identificación más detallada en cuanto al campo de visión dependerá principalmente de la resolución de la cámara termográfica al aumentar su campo espectral electromagnético y de la pantalla o monitor en la cual se visualiza la imagen. Además, permiten analizar imágenes con emisión de energía infrarroja al transformar la imagen infrarroja en radiométrica a través de un sensor térmico denominado microbolómetro permitiendo la lectura de valores térmicos para cualquier material con una temperatura superior al cero absoluto, esto está relacionado con la máxima emisividad perteneciente a la del cuerpo negro y que es igual a uno, por lo tanto, los valores de emisividad se encuentran entre cero y uno, así mismos materiales cuyos valores de emisividad son mínimos producen una reflexión del infrarrojo afectando la precisión de la medición (Figura 9) (Lidia Yaneth Neita Duarte, 2011).



Figura 9. Cámara Termográfica FLIR.

Fuente: Autores.

3.11. Micrómetro.

Es un instrumento de medición conocido también con el nombre de calibrador de Palmer, se implementó durante el presente proyecto para realizar el proceso de dimensionamiento de las probetas impresas con la finalidad de garantizar el cumplimiento de la geometría definida por la normativa ASTM D3039 para ensayos de tensión, esta herramienta determina con alta precisión por medio de un husillo micrométrico las dimensiones del espécimen objeto de estudio. La medición realizada por el micrómetro se encuentra en el orden de centésimas de milímetros y de milésimas de milímetros, la medición se realizó mediante la unión de una punta fija que determina el cero con un tronillo micrométrico el cual tiene un paso de 0,5 mm, al mismo tiempo se desplaza el tambor con una escala de nonios sobre el cilindro graduado el cual tiene una escala fija para medir el espesor y el ancho de cada una de las probetas cuyas dimensiones están consignadas en el Anexo 1 y el Anexo 2 del presente documento. Según la tecnología de fabricación los micrómetros se pueden dividir en micrómetros mecánicos o micrómetros digitales. Durante la investigación en curso, se utilizó uno del primer tipo (Figura 10).



Figura 10. Micrómetro.

Fuente: Autores.

3.12. Báscula digital.

Dispositivo que permite realizar la medición de la masa de un cuerpo, es decir la cantidad de materia que existe en dicho cuerpo independientemente a la forma geométrica del mismo (Electrónica básica, 2014). Una vez impresa la probeta y realizado el respectivo dimensionamiento geométrico se procedió a realizar el pesaje de cada uno de los especímenes con la finalidad de garantizar que el proceso de deposición fundida por capas depositara la misma cantidad de material para cada probeta según su configuración de impresión. La medición se realiza en primer lugar posicionando la báscula sobre una superficie plana, en segundo lugar, se debe llevar a ceros mediante calibración ya sea automática o manual y por último se posiciona la probeta sobre la superficie de pesaje. Existen diferentes tipos de básculas pero entre las más comunes se encuentran la mecánica y la electrónica, por una parte la báscula mecánica depende exclusivamente de la constante elástica de un resorte y del concepto de la fuerza de gravedad para determinar la masa, en cambio en las básculas digitales funcionan a partir de señales electrónicas en función del peso las cuales se digitalizan, se decodifican y son mostradas en una pantalla, este tipo de báscula fue el usado para la medición de la masa para la totalidad de los diferentes especímenes a caracterizar (Figura 11).



Figura 11. Báscula digital.

Fuente: Autores.

4. Metodología.

La metodología se desarrolla mediante un enfoque cualitativo y cuantitativo; presentando las características principales de los materiales y la interpretación de los resultados comparativos de estos respectivamente. Inicialmente se realiza una recopilación de antecedentes, reuniendo las características principales de los procedimientos utilizados y los resultados obtenidos en diferentes estudios sobre el método de impresión por deposición fundida (FDM). Luego se desarrolla un protocolo inicial de impresión para cada uno de los materiales.

A partir de los protocolos de impresión adecuados para cada uno de los materiales, se fabrican probetas de PLA y ABS por medio del método de FDM, con dimensiones de 250x20x2 mm de acuerdo con la norma ASTM D3039. Se establecieron cinco configuraciones en las cuales el material se deposita a diferentes ángulos en cada una de las capas de la probeta, emulando la apariencia de un laminado fabricado en materiales compuestos unidireccionales y bidimensionales. Las configuraciones son simétricas con respecto a la capa ubicada en el centro y tienen las siguientes configuraciones: $[0^\circ/0^\circ]$; $[90^\circ/90^\circ]$; $[45^\circ/-45^\circ]$; $[0^\circ/90^\circ]$; $[45^\circ/45^\circ]$.

El proceso de fabricación de una pieza aborda diferentes etapas, las cuales influyen directamente en el acabado final de la pieza y en las propiedades mecánicas de la misma, estas etapas son las siguientes:

Diseño asistido por computador.

Se debe realizar la geometría a fabricar empleando un programa de diseño asistido por computador como lo es CATIA V5R21, cuyo sólido tridimensional es una aproximación de la pieza final impresa.

Conversión del archivo.

Una vez diseñado el sólido 3D en el programa CAD se procede a guardar el archivo en formato STL ya que este es el formato que generalmente es compatible la mayoría de los programas de configuración de las máquinas de manufactura aditiva.

Configuración de la impresión.

El archivo con el código de instrucciones permite visualizar el sólido en el software de la máquina de manufactura aditiva, además permite modificar los diferentes parámetros de impresión de la máquina, los cuales tienen una influencia directa en las características de acabado y conformado de la pieza.

Manufactura.

El proceso de manufactura aditiva no requiere de la supervisión constante del usuario durante el proceso de impresión ya que es automático una vez se haya configurado correctamente la impresora a través del código G.

Remoción y post procesamiento.

Al finalizar el proceso de AM, la máquina automáticamente disminuye la temperatura de trabajo y por lo tanto la temperatura de la pieza. Posteriormente, es posible retirar la pieza sin riesgo alguno de quemadura o deformación de esta. Adicionalmente, se puede realizar un tratamiento adicional superficial a la pieza de ser necesario.

Finalizando el proceso de FDM los especímenes son evaluados por medio de un protocolo de inspección visual, con el fin de determinar si cumple o no con los parámetros establecidos de control de calidad. Posteriormente, las probetas se clasifican según su orientación para el proceso de pruebas destructivas, el cual mediante un protocolo de ensayos mecánicos a tensión somete a las probetas a una carga constante hasta el punto de ruptura, con el fin de obtener los datos de Carga en función de la deformación. Mediante un estudio de intervalo de confianza se discretizan las muestras que son aptas, con el fin de obtener las propiedades mecánicas de tensión, tanto para el PLA como ABS. Teniendo los resultados se logra llevar a cabo una comparación entre los dos materiales, teniendo en cuenta el sentido de impresión. El esquema representativo de la metodología planteada para el desarrollo de este proyecto se presenta a continuación en la Figura 12.

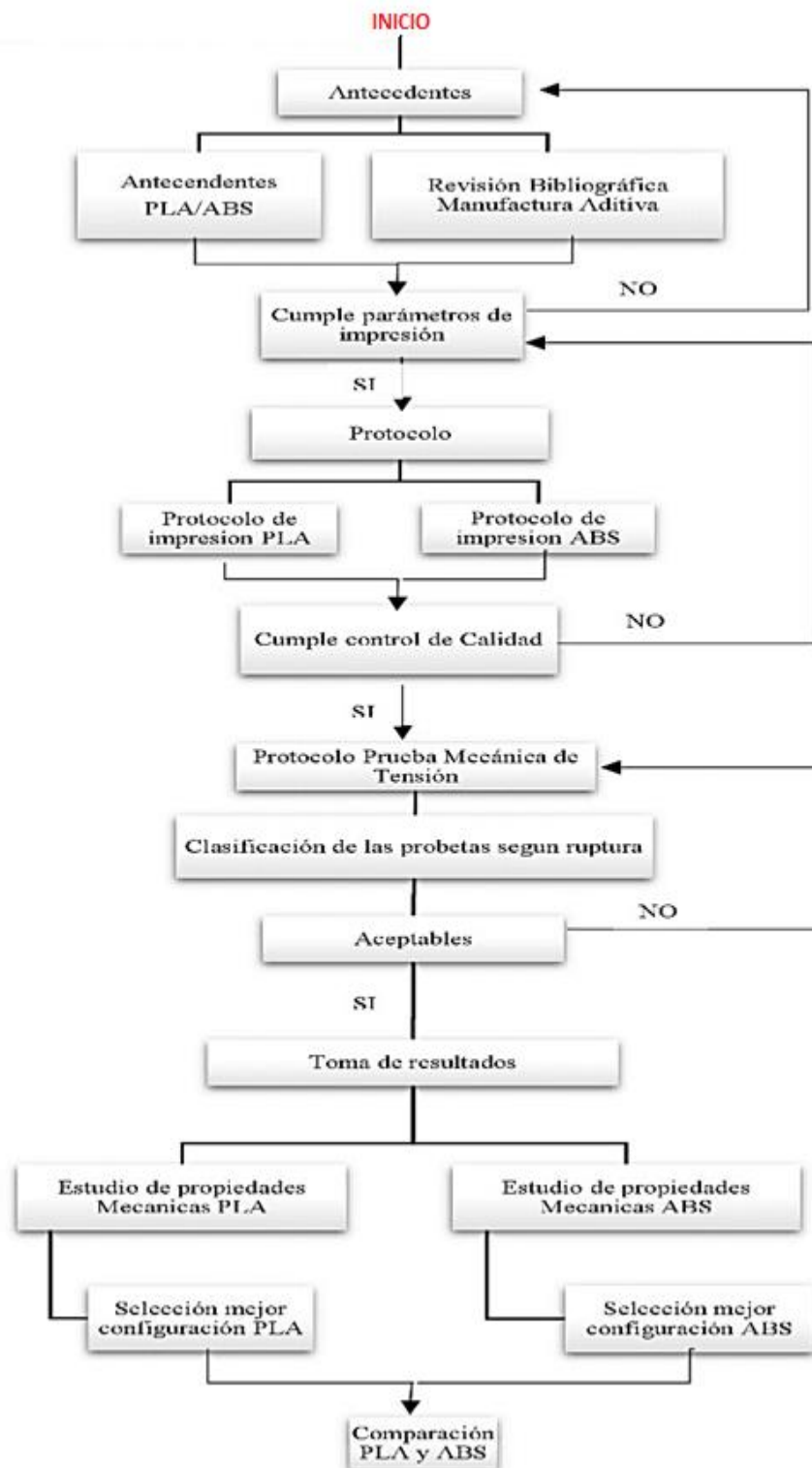


Figura 12. Metodología de investigación.

Fuente: Autores.

5. Desarrollo de ingeniería.

En este capítulo se presentará cada uno de los procedimientos efectuados para el desarrollo de este proyecto de investigación para de esta manera dar a cumplimiento a la metodología planteada.

5.1. Procesos de preimpresión.

5.1.1. Diseño de la Probeta.

El diseño del espécimen se realiza en el software de diseño asistido por computadora CATIA V5 bajo la norma ASTM D3039, la cual se enfoca en que el ancho y el espesor de la probeta aseguren la falla o ruptura dentro de la sección de prueba, como se indica en su numeral 8.2.2.1. Es importante que cada una de las probetas esté dentro de las dimensiones mínimas requeridas establecidas en la Tabla 5. Además, en la Figura 13 se muestran las dimensiones seleccionadas para el espécimen. Estas dimensiones se acordaron, con el fin de dar uso máximo de la disponibilidad de espacio proporcionado por la plataforma de trabajo de la máquina de impresión 3D utilizada (ASTM International, 2002).

Tabla 5. Requerimientos geométricos del espécimen para prueba de tensión.

Fuente: (ASTM International, 2002).

Parámetro	Requerimiento
Requerimientos de la probeta:	
Forma	Sección transversal constante y rectangular
Longitud mínima	Mordazas + 2 veces ancho + longitud de galga
Ancho del espécimen	Como se requiera
Tolerancia del ancho del espécimen	±1% del ancho
Espesor del espécimen	Como se necesite

Parámetro	Requerimiento
Tolerancia del espesor del espécimen	$\pm 4\%$ del espesor
Planicidad del espécimen	Plano con ligera pasión manual
Requerimiento del tab (si es usado):	
Material del tab	Como se requiera
Orientación de la fibra (Tabs en material compuesto)	Como se requiera
Espesor del tab	Como se requiera
Variación del espesor entre tabs	$\pm 1\%$ del espesor del tab
Ángulo del bisel del tab	5° a 90°, inclusivo
Escalón del tab hacia el espécimen	Liviano sin dañar el espécimen

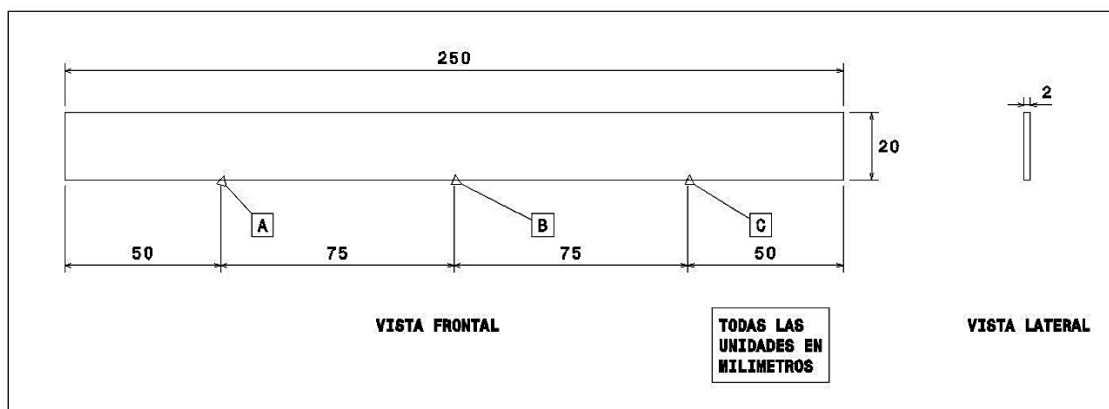


Figura 13. Vistas y dimensiones del espécimen.

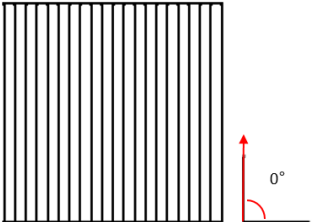
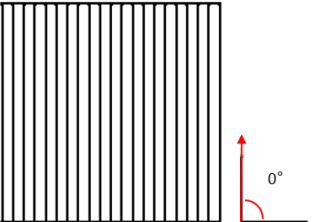
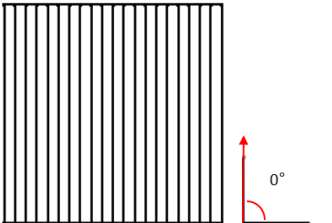
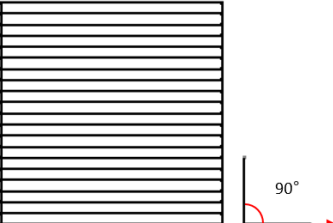
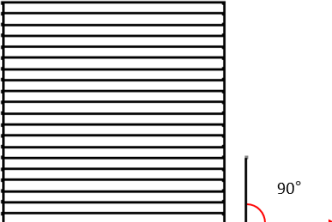
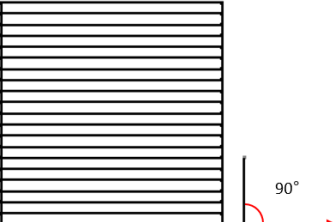
Fuente: Autores, CATIA V5.

5.1.2. Orientación de la impresión.

Para el correcto estudio y caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos PLA y ABS, se propuso realizar las pruebas mecánicas destructivas a cinco configuraciones distintas de impresión, ya que al igual que en un material compuesto, el ángulo en el cual están orientados los filamentos con respecto al eje

longitudinal de la probeta en cada una de sus capas, afectará considerablemente las propiedades mecánicas del material (Forster, 2015).

Las orientaciones angulares de los filamentos seleccionadas para el estudio de las características mecánicas de los materiales termoplásticos en cuestión son: $[0^\circ/0^\circ]$; $[90^\circ/90^\circ]$; $[45^\circ/-45^\circ]$; $[0^\circ/90^\circ]$; $[45^\circ/45^\circ]$, dando cumplimiento a la limitación del literal “d” del numeral 2.4 planteada para este proyecto (Figura 14). Estas configuraciones angulares estarán distribuidas consecutivamente en las capas pares e impares de los especímenes, de tal manera que en la configuración angular $[0^\circ, 90^\circ]$, la dirección de impresión correspondiente a 0° se realizará en la capa número 1 o primera capa impar y el ángulo 90° se realizará en la capa número 2 o primera capa par, consecutivamente se intercalan las orientaciones hasta completar la totalidad de la geometría.

Especímen	Primera capa	Segunda capa
Tipo $[0^\circ/0^\circ]$		
Tipo $[0^\circ/90^\circ]$		
Tipo $[90^\circ/90^\circ]$		

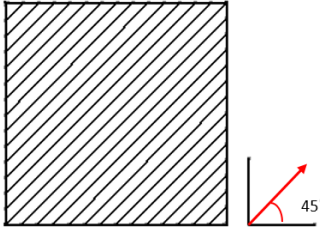
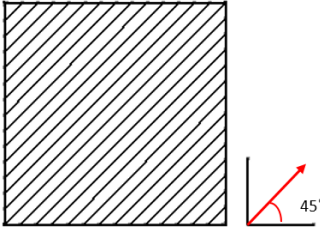
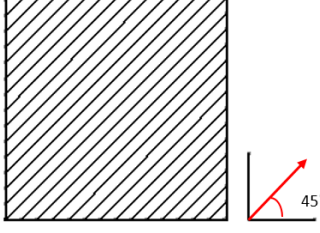
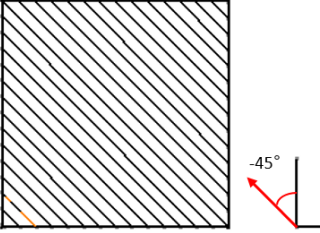
Espécimen	Primera capa	Segunda capa
Tipo [45°/45°]		
Tipo [45°/-45°]		

Figura 14. Orientaciones de cada probeta.

Fuente: Autores.

5.1.3. Características de pre-impresión.

Ya que las características mecánicas de un material termoplástico sometido a un proceso de FDM, dependen de los parámetros de impresión utilizados como la orientación de los filamentos, porcentaje de relleno y número de capas, es necesario la estandarización de cada uno de estos parámetros con el fin de asegurar la una impresión adecuada y uniforme en todos los especímenes. Tanto para las probetas de PLA como ABS se definió un relleno del 100% con el fin de asegurar que el espécimen sea totalmente sólido y no presente sentido de impresión variable ni desorganizado, al igual que asegurar la mayor cohesión entre los filamentos. Adicionalmente, se definió como siete (7) el número de capas impresas para asegurar el espesor definido de 2 mm a la probeta, y siendo un número impar de capas se tendrá uniformidad en la orientación de los ángulos de impresión, donde el ángulo correspondiente a la primera capa será el mismo correspondiente a la última capa. La configuración de relleno de cada una de las probetas,

la organización y sentido de impresión de cada una de estas, el número de capas, entre otros parámetros de impresión, fueron configurados a través del software Replicator G.

5.1.4. Condiciones ambientales del laboratorio y de almacenamiento del material.

Ya que la máquina de impresión 3D mantiene constantes los parámetros ambientales del entorno de impresión, como la temperatura y humedad relativa gracias a su cámara cerrada, no es necesario el control de temperatura y humedad relativa en el laboratorio donde se encuentra la máquina de impresión. Sin embargo, se procuró aislar las probetas del ambiente del laboratorio, una vez los especímenes fueran retirados de la máquina.

Para esto se adecuó un recipiente para evitar la incidencia directa de rayos de sol sobre las probetas. En su interior se incluyó material absorbente de humedad (gel de sílice). Sin embargo, no es necesario mantener el material utilizado durante las impresiones de PLA y ABS en condiciones constantes de temperatura y humedad relativa baja, ya que durante la impresión es sometido a un proceso de fundición con grandes cambios de temperatura. No obstante, los carretes que contienen el material usado para la impresión, ya sea PLA o ABS, fueron almacenados en condiciones de temperatura constante, humedad relativa baja y aislados de la luz solar junto con las probetas fabricadas, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Caja de almacenamiento de carretes de material y probetas.

Fuente: Autores.

5.2. Proceso de modelado por deposición fundida para PLA.

5.2.1. Material utilizado en el proceso de FDM para PLA.

Para el proceso de modelado por deposición fundida haciendo uso del material termoplástico PLA, se utilizó el filamento proporcionado por la compañía “PRUSA RESEARCH” de la referencia “FLM-PLA-175-GRN” la cual corresponde al carrete de un kilogramo de material termoplástico PLA color verde (Figura 16). Todas las probetas correspondientes a PLA se imprimieron haciendo uso de la referencia de material mencionada (PRUSA RESEARCH, 2018). Las características mecánicas del material, determinadas por el fabricante, se aprecian en la Tabla 6.



Figura 16. Carrete PLA “PRUSA”.

Fuente: (PRUSA RESEARCH, 2018)

Tabla 6. Características mecánicas del PLA.

Fuente: (NatureWorks LLC, 2017)

Propiedades de la capa	Ingeo 4043D	Método ASTM
Densidad	1,24 g/cc	D1505
Esfuerzo de tensión	Min 110,316 MPa	D882
	Max 144,789 MPa	D882
Módulo de tensión	Min 3,309 GPa	D882
	Max 3,861 GPa	D882

5.2.2. Instalación del material en la máquina de impresión y adecuación de la máquina.

El acople del material a la impresora se realizó acorde al manual de operación suministrado por el fabricante de la máquina (FlashForge corp, 2017). Es de importancia evitar la cristalización en el extremo del filamento del material para evitar errores de impresión como deposición incompleta del filamento o calcinación de este, en aquellos casos en donde se presentó cristalización, bastó con cortar una sección del filamento para realizar la impresión.

Con el fin de asegurar una buena impresión fue necesario realizar un proceso de precalentamiento de la impresora durante un periodo de tiempo de 15 a 20 minutos, este tiempo fue establecido a partir de un proceso de experimentación durante el cual se incrementaban los periodos de tiempo para el precalentamiento con el fin de que el extrusor y la cama dispongan de una temperatura de impresión estable y uniforme para evitar errores de impresión en el material. Se tomó una imagen térmica de la plataforma de impresión una vez transcurridos 20 minutos de precalentamiento, haciendo uso de la cámara termográfica “FLIR T335” con el fin de constatar la uniformidad de temperatura sobre la superficie de impresión como se puede apreciar en la Figura 17.

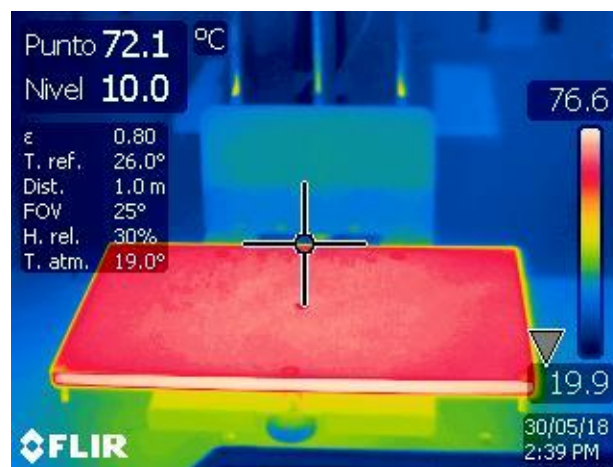


Figura 17. Imagen térmica de la plataforma de impresión,

Fuente: Autores.

5.2.3. Proceso de pruebas en impresiones de PLA.

A partir de los parámetros de impresión recomendados por el fabricante del material y los utilizados en proyectos afines referenciados como antecedentes en este documento, en los cuales se encontraron rangos de 210°C a 230°C de temperatura para el extrusor y 60°C a

80°C de temperatura para la cama, se iniciaron pruebas de impresión con el material PLA de geometrías que se asemejan a las dimensiones de la probeta requerida. En estas pruebas, se variaron los parámetros de temperatura de extrusión, temperatura de cama, velocidad de alimentación y velocidad de recorrido del extrusor, con el fin de encontrar la mejor configuración posible de impresión para el tipo de pieza utilizada en este proyecto, buscando obtener una buena adherencia entre capas e hilos, uniformidad de impresión, un adecuado porcentaje de relleno y buena conformación geométrica de la pieza, además de evitar errores de impresión como acumulación de material, deformación de la pieza, material quemado, entre otros.

Se tomaron las velocidades de impresión correspondientes a la velocidad de alimentación y velocidad de recorrido, a partir de los valores que por defecto contiene la impresora en su configuración, los cuales son de 40 mm/s para la velocidad de alimentación y 50 mm/s la velocidad de recorrido del extrusor. Una vez fueron definidos los parámetros de iniciales de impresión, se procedió a realizar las pruebas respectivas. Después de 22 pruebas, se determinaron los valores más apropiados de impresión, los resultados, observaciones y parámetros de impresión se pueden apreciar en el Anexo 3 (Caso 1 a 22). Como se puede apreciar en dicho anexo, la variación de temperaturas y velocidades de impresión genera distintos efectos sobre el proceso de FDM. Se logró identificar que el uso de temperaturas de extrusión por arriba del rango recomendado (210°C a 230°C) genera esparcimiento del material e incluso calcinación de este. En contra parte, el uso de bajas temperaturas de extrusión produce separación de la pieza con la plataforma de impresión e incluso no permite la adherencia de capas e hilos. De igual manera, la

variación excesiva de velocidades de impresión producirá efectos negativos en la impresión; en cuanto se aumente la velocidad de alimentación se podrá generar acumulación de material en el extrusor, lo cual es perjudicial para la máquina y la pieza, de otra manera, si la velocidad de alimentación disminuye por debajo del valor recomendado, puede existir delaminación en la probeta por falta de material. Se encontró que el cambio de la velocidad de recorrido del extrusor produce los mismos efectos que la variación de la velocidad de alimentación.

5.2.4. Parámetros de impresión seleccionados.

Como resultado del proceso de pruebas, se establecieron como parámetros de impresión definitivos para usar en los especímenes aptos para pruebas de mecánicas de tensión según norma ASTM los valores incluidos en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de impresión seleccionados para material PLA.

Fuente: Autores.

Parámetro	Valor
Temperatura de la cama	70°C
Temperatura del extrusor	220°C
Velocidad de alimentación	40mm/s
Velocidad de recorrido	50mm/s

Se definió que una temperatura para la cama de 70°C es la ideal a partir de las pruebas de impresión realizadas cuyas características y comentarios se encuentran consignados en el Anexo 3, con la cual no se presenta separación de la probeta respecto a la cama y permite que las capas e hilos depositados mantengan una temperatura ideal para la unión de la siguiente capa o hilo. De igual manera, la temperatura de extrusión definida como 220°C

permite una adherencia ideal del hilo depositado sin sobrecalentar el material además de permitir un tiempo apropiado de enfriamiento; las velocidades de impresión se mantuvieron iguales a las velocidades estándar proporcionadas por el software de impresión, las cuales evitan espaciamiento o acumulación del material.

5.2.5. Protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para PLA.

Una vez establecidos los procedimientos y parámetros de manufactura de probetas en PLA por medio de FDM, se desarrolló un protocolo de impresión y control de calidad para la impresión de las probetas, dando cumplimiento al primer objetivo específico planteado para este trabajo. El protocolo se realizó con el objetivo de permitir al lector replicar con exactitud los procedimientos de impresión y control de calidad de este proyecto, con el fin de permitir el futuro desarrollo de conocimiento en este campo de investigación partiendo de los resultados obtenidos en este proyecto. El protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para PLA se muestra en el Anexo 4.

5.2.6. Impresión de probetas.

De un total de 91 piezas impresas en PLA se enumeran las 50 probetas aptas para pruebas mecánicas de tensión comentadas con “Buen conformado” (Caso 23 a 91) en el Anexo 3. Después de este proceso se obtuvieron 10 probetas para cada configuración propuesta. En las Figura 18 y Figura 19 se muestra el conjunto o lote de impresión correspondiente al caso [0°/90°] y en la Figura 20 se muestran 3 de los 5 lotes de impresión.

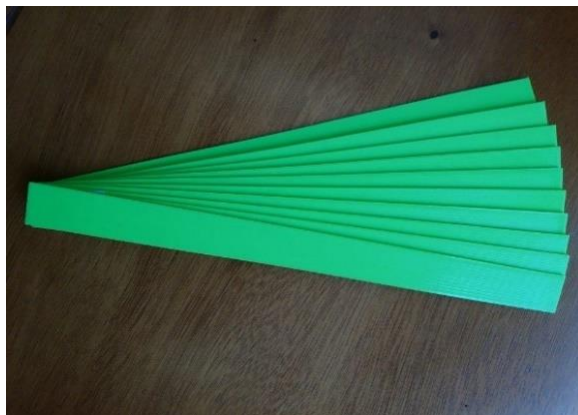


Figura 18. Set de 10 probetas $[0^\circ/90^\circ]$.

Fuente: Autores.

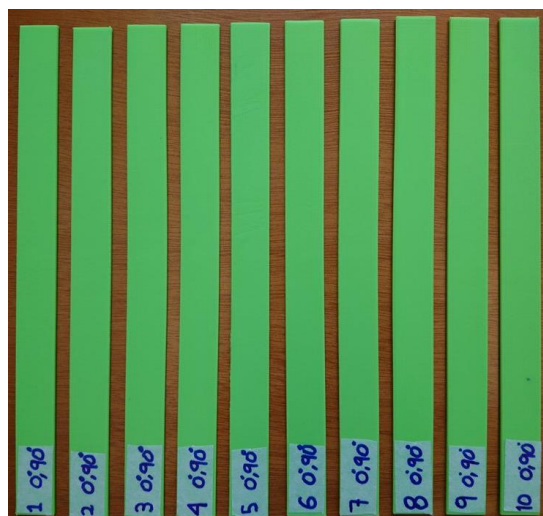


Figura 19. Lote probetas $[0^\circ/90^\circ]$.

Fuente: Autores.

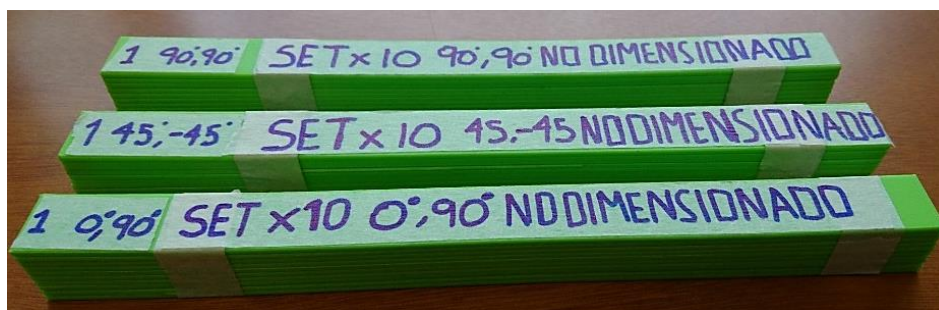


Figura 20. Lotes de impresión PLA no dimensionado.

Fuente: Autores.

5.2.7. Control de calidad.

Se desarrolló un proceso de control de calidad de tres fases, inspección visual, dimensionamiento y almacenamiento de los especímenes, descritas a continuación:

a) Inspección visual.

Durante y después de la impresión de la probeta, cumplido el tiempo de enfriamiento y la extracción de la cama según lo estipulado en el protocolo de impresión, se procedió con la inspección visual de cada probeta con la finalidad de aprobar si es apta o no y si cuenta con irregularidades en la superficie, todo esto para determinar si será utilizada en el ensayo destructivo de tensión, ya que una probeta con condiciones de impresión no apropiadas podría arrojar datos erróneos afectando el correcto análisis de la curva esfuerzo-deformación y de la investigación misma. Por tal motivo, se tuvieron en cuenta algunos de los problemas de impresión más relevantes con respecto al acabado de las probetas causales de rechazo de una probeta en la inspección visual durante y después de la impresión se enuncian a continuación (Simplify3D, 2014):

No se extruye al inicio: antes de iniciar la impresión se pueden presentar problemas donde la impresora no inicia debido a que el extrusor no realiza la deposición del material. Esto puede ocurrir en el caso de que el material se pudo haber cristalizado antes de iniciar la impresión, lo que produce un atasco. Otra de las causas puede ser la incorrecta calibración de la cama, por lo que la boquilla del extrusor se encuentre muy cerca a la cama (Simplify3D, 2014).

Impresión no se adhiere a la cama: es importante que la primera capa presente una adecuada adherencia a la cama, debido a que puede generar problemas durante el proceso

de impresión. Una de las causas de esta falla es la calibración de la cama ya que, si no está correctamente nivelada, el material no se adhiere correctamente sobre esta. Otra de las causas muy importante, es la temperatura adecuada y constante que debe tener la cama, ya que, si esta es muy baja, la adherencia del material va a ser nula. Es muy importante también tener en cuenta la velocidad de recorrido no sean demasiado alta, debido a la posibilidad de no adherencia del termoplástico a la cama de impresión al ser extruido (Simplify3D, 2014).

Separación de capas o “*Splitting*”: Durante el proceso de impresión existe la posibilidad de que una de las fibras extruidas del material no se adhiera correctamente sobre las fibras previamente impresas o con las fibras adyacentes. Una de las causas principales es el valor de la altura de capa. Por otro lado, la temperatura de impresión puede estar demasiado baja, lo que impide que la adherencia sea la correcta. Otro problema considerable para la inspección visual es el arrastre de material por parte del extrusor, el cual se evidencia con grumos o discontinuidad de filamentos con respecto a la impresión (Simplify3D, 2014).

Brechas entre el relleno y el contorno: Al inicio de impresión de cada capa se puede apreciar que inicia realizando un contorno y un “*loop*” para la adherencia de cada uno de los hilos. En ocasiones esta unión entre los hilos y los contornos deja brechas o agujeros, esto se debe a que la impresión está demasiado rápida, lo cual conlleva a que el material no tenga el tiempo suficiente para la unión adecuada (Simplify3D, 2014).

Esquinas encrespadas o “*Curling*”: si se encuentran problemas de encrespado, esto indica problemas de elevada temperatura. Generalmente la causa principal es que el

material se extruye a una elevada temperatura y si este no se enfría en el tiempo adecuado, puede deformarse durante el proceso de impresión como se muestra en la Figura 21 (Simplify3D, 2014).

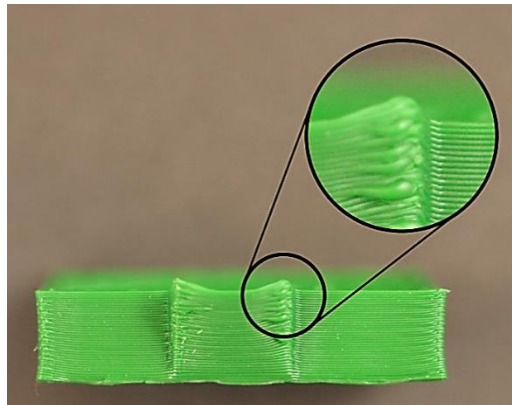


Figura 21. Curvatura de las esquinas.

Fuente: (Simplify3D, 2014)

Contracción térmica o pandeo: Las probetas que experimentan contracción térmica tienen como característica más relevante el levantamiento de los extremos de la probeta durante y al finalizar el proceso de impresión, como resultado de esto el proceso de FDM se ve alterado produciendo piezas con variación geométrica distinta a la diseñada, acabados deficientes y por lo tanto la probeta no es apta para la realización de la prueba de tensión. Este error se evidencia en la Figura 22. Este tipo de problema generalmente ocurre cuando se imprimen piezas de gran longitud, con materiales que requieren alta temperatura como el ABS (Simplify3D, 2014).



Figura 22. Error de pandeo en la probeta.

Fuente: Autores.

Sobrecalentamiento del material: La probeta resultante del proceso de impresión presenta en su superficie quemaduras debido a las altas temperaturas tanto en la cama como la temperatura del extrusor. Se evidencia el sobrecalentamiento con material excesivamente rígido y presencia de material calcinado.

b) Dimensionamiento.

El dimensionamiento de cada una de las probetas fabricadas por medio de FDM es realizado con dos elementos de medición, por medio de los cuales se puede dar una medida exacta de la magnitud del ancho, largo y espesor, y así verificar que los parámetros de impresión y que los requisitos geométricos para la realización del ensayo destructivo de tensión puedan realizarse satisfactoriamente acorde a los requisitos de la normativa ASTM D3039.

Micrómetro: Este instrumento de medición fue empleado tanto para el control de la longitud y el espesor como el ancho de los especímenes impresos en PLA y ABS, para dos de las dimensiones (ancho y espesor) se realizaron tres tomas en tres secciones diferentes de cada probeta como lo sugiere la norma ASTM D 3039 las cuales corresponden a los puntos “A”, “B” y “C” encontrados en la Figura 13 y posteriormente se calculó el promedio de cada una, el cual es empleado como dato relevante para la

realización del ensayo de tensión con la finalidad de obtener unos resultados fiables (Figura 23).

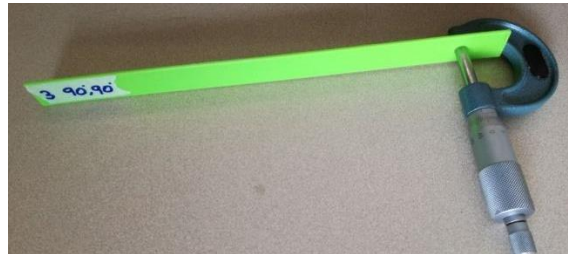


Figura 23. Dimensionamiento de probetas usando micrómetro.

Fuente: Autores

Calibrador con vernier: Este instrumento de medición se empleó para la verificación de la longitud de la probeta, se realizaron tres mediciones en tres zonas del espécimen, para posteriormente obtener un promedio cuyo valor se tiene en cuenta tanto para corroborar la geometría impresa como para realizar el respectivo ensayo destructivo de tensión y obtener un correcto análisis de la curva esfuerzo deformación. Las zonas de medición de la longitud para cada una de las probetas se observan en la Figura 24.



Figura 24. Zonas de medición de longitud.

Fuente: Autores

Báscula digital: Por medio de esta herramienta de medición se obtuvo el valor correspondiente a la masa de los especímenes, permitiendo una comparación entre las

demás impresiones del mismo lote, asegurando que para cada una de estas se implementó un mismo porcentaje de relleno correspondiente al 100%.

Intervalo de confianza: Para garantizar modos de falla aceptables, el dimensionamiento de cada una de las probetas impresas y la aprobación de las mismas para ser caracterizadas en el ensayo de tensión fue realizado bajo la normativa ASTM D3039, la cual establece una serie de recomendaciones geométricas estandarizadas definidas a través de una serie de pruebas ejecutadas por diferentes laboratorios a distintos materiales en cuanto a espesores y anchos para los especímenes a caracterizar dentro de la normativa, estas dimensiones se pueden observar en la Tabla 5. Este intervalo de confianza hace referencia a que valores ligeramente mayores y menores pueden ser esperados conforme a un parámetro establecido en este caso el ancho de la probeta con un porcentaje de error $\pm 1\%$ y por otra parte, un error de $\pm 4\%$ para el espesor del espécimen; el dimensionamiento y los errores porcentuales de los mismos en cuanto a las dimensiones del espécimen dentro del intervalo de confianza definido por la normativa ASTM D3039 aplicado para PLA se pueden observar tabulados en el Anexo 1 (ASTM International, 2002).

c) Almacenamiento de los especímenes.

Posteriormente a la identificación y dimensionamiento de cada probeta, se realiza el proceso de almacenamiento de estas. Este procedimiento consiste en la agrupación de las probetas por set y su almacenamiento en un recipiente utilizando gel de sílice cuyas propiedades permiten que el recipiente se conserve en condiciones de baja humedad relativa como lo sugiere la norma ASTM D 3039.

5.3. Proceso de modelado por deposición fundida para ABS.

5.3.1. Material utilizado en el proceso de FDM para ABS.

En este caso el material que se usó para el proceso de FDM usando ABS, fue el filamento proporcionado por la compañía “PRUSA RESEARCH” con la referencia “FLM-EBS-175-CPR”, la cual corresponde al carrete de un kilogramo de material termoplástico ABS color bronce, el cual se muestra en la Figura 25. Todas las probetas correspondientes a ABS se imprimieron haciendo uso de la referencia de material mencionada (PRUSA RESEARCH, 2018). La tabla de características mecánicas del material determinadas por el fabricante se puede apreciar en la Tabla 8.



Figura 25. Carrete de ABS.

Fuente: (PRUSA RESEARCH, 2018)

Tabla 8. Propiedades mecánicas del ABS.

Fuente: (NatureWorks LLC, 2017)

Propiedades de la capa	Ingeo 4043D	Método ISO
Densidad	1,05 g/cc	ISO 1183/B
Módulo de tensión	2140 MPa	ISO 527-2
Esfuerzo de tensión	43,0 MPa	ISO 527-2/50

5.3.2. Instalación del material en la máquina de impresión.

El proceso de instalación del material ABS en la máquina de impresión utilizada fue el mismo descrito para el material PLA, al igual que el proceso de precalentamiento de la máquina, sin embargo, con las temperaturas correspondientes para el material ABS.

5.3.3. Proceso de pruebas en impresiones de ABS.

Se replicó el procedimiento de pruebas en impresiones para el material PLA, variando las temperaturas y velocidades de impresión, sin embargo, manejando rangos en la temperatura del extrusor de 230°C a 250°C y para la temperatura de la plataforma de trabajo de 90°C a 110°C. Estos rangos son recomendados por el fabricante del material utilizado y por los antecedentes relacionados a este proyecto. Por otra parte, las velocidades de impresión se mantuvieron constantes a las propuestas por defecto del software de impresión utilizado 40 mm/s para la velocidad de alimentación y 50 mm/s para la velocidad de recorrido del extrusor.

Los efectos producidos sobre el material ABS impreso con las variaciones de temperatura, tanto de la cama como del extrusor, fueron proporcionales a los efectos encontrados en el material PLA impreso. De igual manera, la variación de las velocidades de alimentación y de recorrido del extrusor induce el mismo efecto encontrado en el material PLA impreso.

La determinación de valores apropiados de impresión se logró después de 57 pruebas distintas cuyos resultados, observaciones y parámetros de impresión se pueden apreciar en el Anexo 5 (Caso 1 al 57).

5.3.4. Implementación de cama magnética de impresión.

Una vez completada la impresión de una pieza fabricada en ABS, se presentaba una complicación con respecto a la extracción de la probeta de la máquina, ya que el proceso de enfriamiento supone una alta adhesión de la pieza impresa a la plataforma de trabajo, por lo cual el proceso de despegue y extracción de la pieza llegó a ser complejo, necesitando herramientas delgadas y con filo, lo cual provoca el deterioro parcial o total de la cama de trabajo o de la probeta, haciéndola inservible para una prueba de tensión bajo la norma ASTM D3039. Por tal motivo, se implementó un sistema de extracción magnética a la máquina de impresión, el cual se compone de dos láminas magnéticas delgadas, una de ellas instalada de manera fija en la plataforma de trabajo y la otra instalada de manera fija en la cama de impresión. La cama magnética se muestra en la Figura 26.

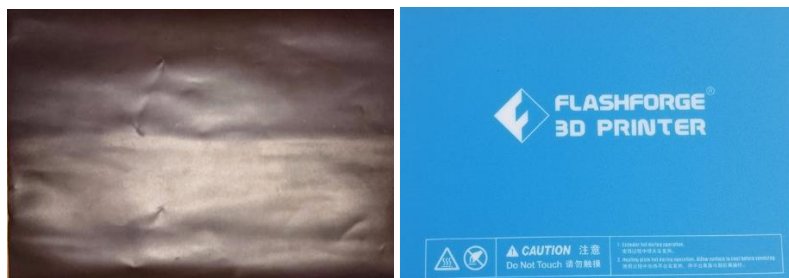


Figura 26. Cama magnética, lado inferior y superior.

Fuente: Autores.

Haciendo uso de la cama magnética flexible, se erradica la necesidad de usar cualquier tipo de herramienta que pueda afectar la integridad de la pieza impresa al momento de la extracción de la pieza recién fabricada, ya que el procedimiento consiste en arquear la

cama magnética después del tiempo de enfriamiento para la separación de la pieza como se puede apreciar en la Figura 27.



Figura 27. Proceso de desmolde de la probeta sobre la cama magnética.

Fuente: Autores.

Por otra parte, la variación en la temperatura de la cama por la implementación de las láminas magnéticas no es relevante. Se tomó una fotografía térmica de la cama magnética instalada en la maquina con una temperatura de impresión para ABS, la cual constató una temperatura apta y uniforme de 110 °C para la impresión de piezas en ABS como se muestra en la Figura 28.

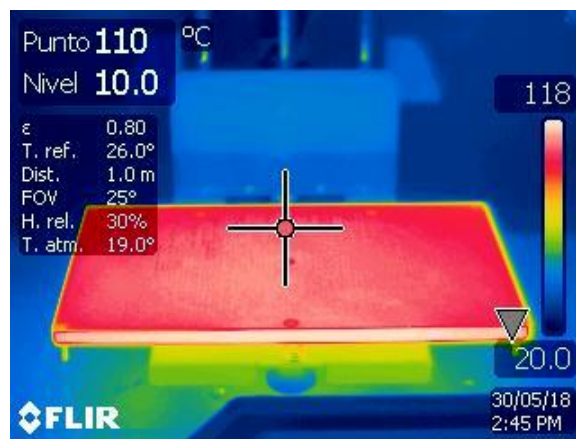


Figura 28. Imagen térmica de la plataforma de impresión para ABS,

Fuente: Autores.

5.3.5. Parámetros de impresión seleccionados.

Como resultado del proceso de pruebas, el cual fue realizado de igual manera al proceso de pruebas para piezas impresas en el material PLA, se establecieron como parámetros de impresión definitivos para usar en los especímenes aptos para pruebas de mecánicas de tensión según norma ASTM los valores mencionados en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de impresión para ABS.

Fuente: Autores.

Parámetro	Valor
Temperatura de la cama	110°C
Temperatura del extrusor	250°C
Velocidad de alimentación	40 mm/s
Velocidad de recorrido	50 mm/s

Con el fin de asegurar buena adherencia entre capas e hilos durante toda la impresión y evitar problemas de esparcimiento o acumulación del material, se definió una temperatura de cama de 110°C, una temperatura de extrusión de 250°C, una velocidad de alimentación de 40 mm/s y una velocidad de recorrido del extrusor de 50 mm/s.

5.3.6. Protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para ABS.

Al igual que para los procesos planteados en impresiones de piezas en material PLA, se desarrolló un protocolo de impresión y control de calidad para la impresión de probetas en ABS, cumpliendo con la totalidad del primer objetivo específico planteado para este trabajo de investigación. El protocolo de impresión a través de FDM y control de calidad para ABS se muestra en el Anexo 6 del presente documento.

5.3.7. Impresión de probetas.

50 probetas fueron impresas en el material ABS, 10 para cada una de las configuraciones angulares propuestas, de estos casos de impresión se pueden apreciar sus características de impresión junto con un comentario de “Buen conformado” (Caso 57 a 108) de un total de 108 piezas impresas en ABS en el Anexo 5. En la Figura 29 se muestra el lote de impresión correspondiente al caso de $[0^\circ/0^\circ]$ y en la Figura 30 se muestran 4 de los 5 lotes de impresión.

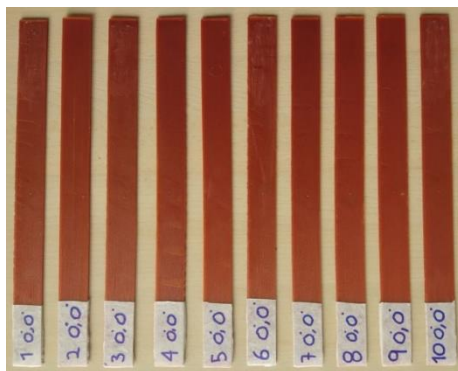


Figura 29. Set de impresión ABS orientación $[0^\circ/0^\circ]$.

Fuente: Autores.



Figura 30. Lotes de impresión ABS.

Fuente: Autores.

5.3.8. Control de calidad.

Se desarrolló un proceso de control de calidad posterior al proceso de impresión de tres fases: inspección visual, dimensionamiento y almacenamiento de los especímenes. Cada una de estas fases se ejecutó de igual manera al procedimiento descrito para las probetas de PLA.

Al igual que el procedimiento para dimensionamiento de los especímenes de PLA, se calculó el porcentaje de error para las medidas promedio de ancho y espesor de cada probeta fabricada en ABS, siendo $\pm 4\%$ y $\pm 1\%$ los rangos en porcentaje de error permitidos para el espesor y ancho respectivamente por la norma ASTM seleccionada (ASTM International, 2002). En el Anexo 2 se incluye una tabla con las medidas tomadas, promedios y porcentaje de error de cada una de las 50 probetas fabricadas e identificadas como aptas para pruebas mecánicas de tensión.

5.4. Pruebas mecánicas de tensión.

En este apartado se expondrá cada uno de los métodos, procedimientos, cálculos e implementos utilizados durante el desarrollo de las pruebas mecánicas de tensión según normativa ASTM D3039.

5.4.1. Procedimientos previos a la prueba mecánica de tensión.

Implementación de lengüetas o “*tabs*”.

Se decidió aplicar la recomendación de la norma ASTM D 3039 en el uso de lengüetas o “*tabs*” para materiales frágiles en cada uno de los especímenes con el fin de prevenir la falla por mordazas o “*gripping*”, ya que tanto el material PLA como el material ABS son materiales de comportamiento frágil frente a cargas de tensión pura representándose

gráficamente en la Figura 31 y la Figura 32 correspondientes a la curva esfuerzo vs deformación obtenida en estudios anteriores (Velasco Peña, Rrodriguez Suarez, & Restrepo Ardila, 2016), ya que la zona plástica de cada material es considerablemente reducida con respecto a su zona elástica, característica de un material frágil (Relaño, 2013). La falla “*gripping*” es producida por el exceso de presión aplicada en las mordazas o deformación de la probeta por las mismas (ASTM International, 2002).

Las lengüetas o “*tabs*” fueron fabricados con láminas de madera balsa, ya que las vetas de esta madera orientadas a 45° con respecto a la dirección de la fuerza de tensión de la prueba, ayudarán a prevenir deslizamiento de las mordazas una vez instalada la probeta en la máquina para la prueba de tensión (ASTM International, 2002). Por otra parte, la presión ejercida por las mordazas no será lo suficientemente grande como para requerir utilizar un material de mayor dureza o resistencia como lo es la fibra de vidrio. Además, la norma ASTM D3039 permite al usuario definir el material en el cual se fabricarán los tabs (ASTM International, 2002).

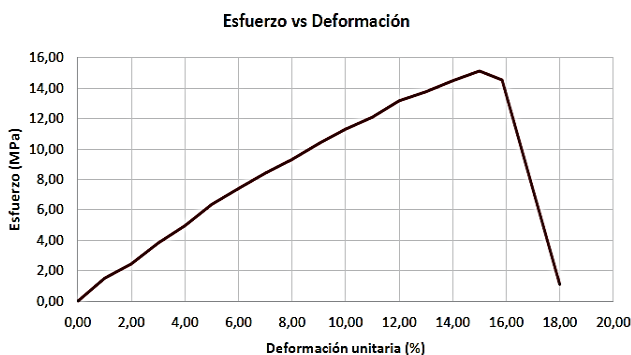


Figura 31. Gráfica esfuerzo vs deformación ABS.

Fuente: (Velasco Peña, Rrodriguez Suarez, & Restrepo Ardila, 2016).

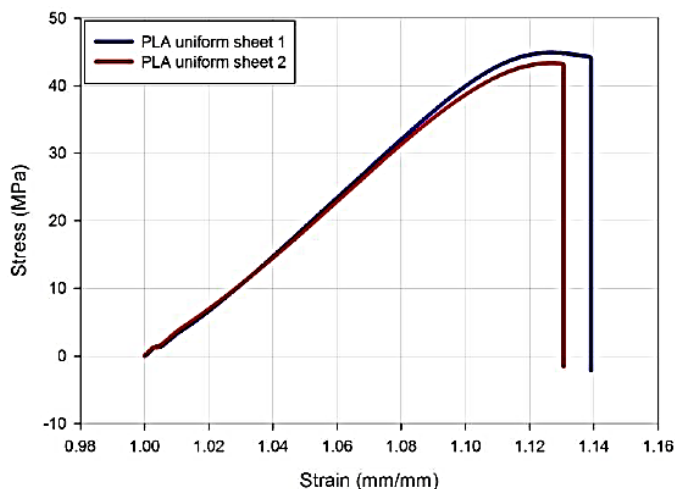


Figura 32. Gráfica esfuerzo vs deformación PLA.

Fuente: (Cardenas & Stewart, 2015).

La ficha técnica de la lámina de madera balsa utilizada para la elaboración de los tabs se referencia en la Tabla 10.

Tabla 10. Características mecánicas de la madera balsa.

Fuente: (Centro de informacion para la formacion profesional, 2018)

Característica	Valor
Resistencia a la flexión	190 (kg/cm ²)
Resistencia a la compresión	100 (kg/cm ²)
Resistencia a la tracción	26 (kg/cm ²)
Módulo de elasticidad	26800 (kg/cm ²)
Densidad	150 (kg/m ³)
Dureza	0,2 (Chaláis-Meudon)

La geometría de los tabs fue seleccionada bajo el requerimiento establecido por la norma ASTM D3039 a partir de los parámetros mínimos para tabs de la Tabla 5 del presente documento (ASTM International, 2002). El ancho del tab se definió igual al ancho de la probeta con el fin de no generar presiones sobre el espécimen a lo largo del tab, en caso de que esté fuera de menor ancho. El largo del tab se definió como 50 mm teniendo en

cuenta el área de contacto de las mordazas de la máquina universal de ensayos utilizada. El espesor se definió según los calibres de lámina disponibles comercialmente, teniendo en cuenta que el espesor fuera lo suficiente para no generar agrietamiento en el tab. El valor del espesor se definió como 1,5 mm, las dimensiones de los tabs diseñados se logran apreciar en la Figura 33.

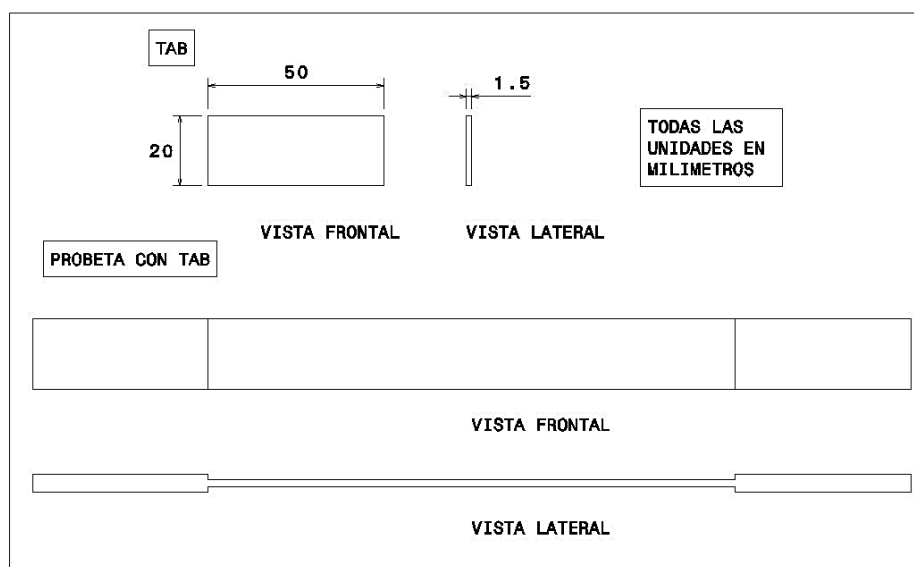


Figura 33. Dimensiones de Tabs y ubicación en la probeta.

Fuente: Autores.

La instalación de los tabs sobre las probetas fue realizada utilizando “Copolímero de estírol-acrilato” a base de agua como pegamento, el cual es comúnmente usado para adherir maderas, plásticos y algunos metales. El pegamento después de aplicado se dejó en proceso de secado por periodo de tiempo mínimo de 12 horas para asegurar a adherencia y correcto secado. Este pegamento fue seleccionado por su comportamiento no elastomérico frente a aplicación de cargas. En la Figura 34 y Figura 35 se muestran los lotes de PLA y ABS con tabs instalados.



Figura 34. 5 lotes de PLA con tabs instalados.

Fuente: Autores.

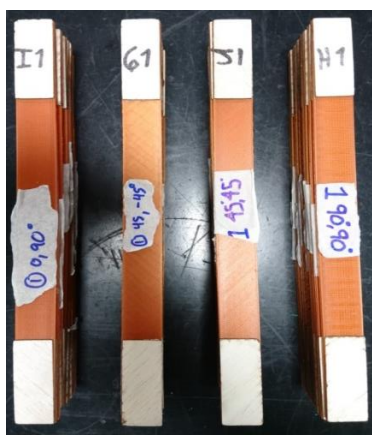


Figura 35. Lotes de ABS con tabs instalados.

Fuente: Autores.

Configuración de la máquina.

Previamente a la instalación de la probeta fue necesario establecer algunos parámetros de configuración. Previo al montaje de la probeta, fue importante configurar cada uno de los parámetros esenciales para el funcionamiento correcto de la máquina Shimadzu AGS-10KMXD. Se asignaron los valores de ancho, espesor y longitud de prueba como datos de entrada requeridos por el software de la máquina universal de ensayos. Debido al rango de error que se pueden presentar en las probetas, se debió ingresar los valores promedios tomados en el Anexo 1 y el Anexo 2 para cada una de las probetas de PLA y

ABS respectivamente. Una vez configurado el montaje de la máquina, se procede a establecer una velocidad de 2 mm/min para la aplicación de la carga axial, la cual es la velocidad estándar propuesta por la norma para pruebas de tensión ASTM D3039, descrita en su numeral 11.3.2 (ASTM International, 2002). Es importante tener en cuenta que las mordazas fueron alineadas correctamente con el espécimen como se muestra en la Figura 36. El cierre de las mordazas se realizó de igual manera en ambas mordazas. Una vez se hace el primer contacto entre las mordazas y el espécimen, se dio apriete a las mordazas con dos vueltas a la rosca de apriete; este procedimiento se realizó de igual manera para cada uno de los extremos de las probetas con el fin de garantizar la misma presión de apriete para el espécimen. Para la prueba mecánica no se realizó una precarga ya que el error por pandeo de la probeta no es relevante para el análisis de las gráficas esfuerzo vs deformación. Una vez montada la probeta en la máquina, y el software configurado para empezar la prueba de tensión como se muestra en la Figura 36, se procedió a realizar la prueba. De igual manera se realizó este procedimiento para cada una de las probetas a evaluar.

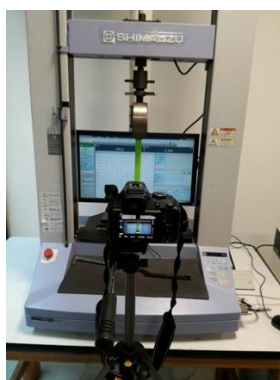


Figura 36. Disposición inicial de la prueba mecánica a tensión para Pla.

Fuente: Autores

Toma de resultados.

Al finalizar la prueba mecánica, el software de la máquina provee los datos de carga aplicada vs desplazamiento como un tabulado de puntos en formato .text, al igual que la gráfica respectiva de la fuerza vs el desplazamiento.

De acuerdo con el numeral 11.9 de la norma ASTM usada, se debe realizar un registro de la localización y tipo de falla del espécimen. Para esto se debe escoger la falla correspondiente acorde a la Figura 37, realizando una selección de los tipos de fallas asignados dentro de la norma usando la codificación presentada (ASTM International, 2002).

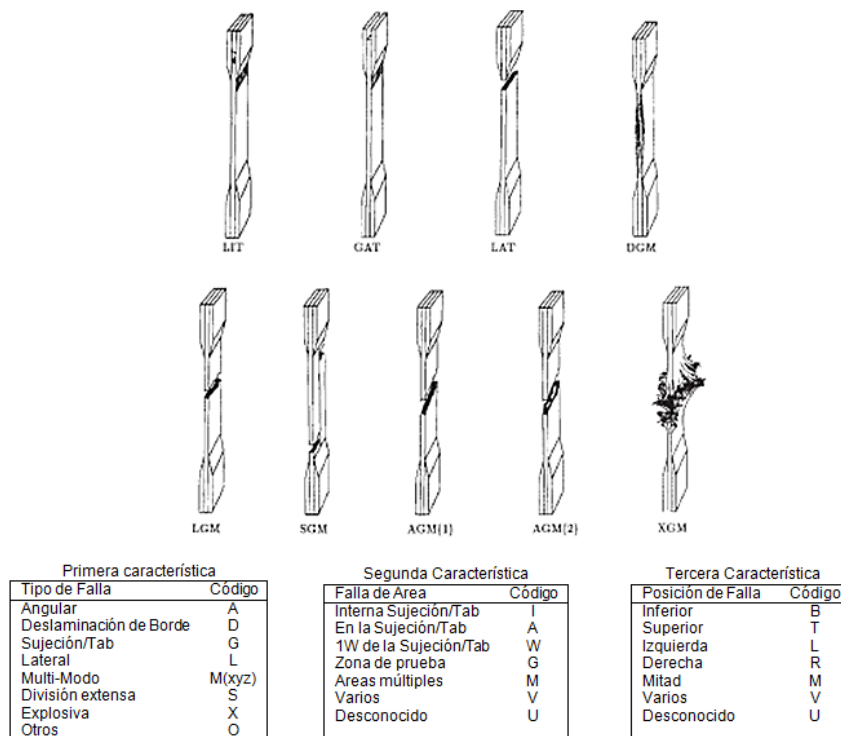


Figura 37. Códigos específicos según tipo de falla del espécimen.

Fuente: (ASTM International, 2002).

Al terminar cada prueba, se debe realizar una inspección visual de acuerdo con el numeral 11.10 para determinar el tipo de falla significativa dentro de un grupo asignado de probetas de acuerdo con la orientación de las fibras y verificar los factores que pudieron perjudicar los datos, como lo pueden ser la existencia de poros, el tipo de agarre o la alineación del espécimen (ASTM International, 2002).

A partir de los datos obtenidos de la gráfica de esfuerzo vs deformación, se pueden desarrollar los cálculos necesarios para determinar las propiedades mecánicas a tensión de cada material bajo diferentes configuraciones.

5.4.2. Cálculo de parámetros mecánicos a partir de las pruebas de tensión.

A continuación, se describe cada una de las propiedades mecánicas calculadas a partir de la norma ASTM D3039, las cuales dan cumplimiento a las limitaciones propuestas para esta investigación.

Esfuerzo de tensión “*tensile stress*”.

Para calcular el esfuerzo de tensión se hace uso de la ecuación (1), la cual se toma del numeral 12.1 de la norma ASTM D3039, donde la probeta es sometida a una fuerza normal de tensión, la cual se aplica en el sentido perpendicular al área transversal de la probeta hasta el punto en el cual se produce la ruptura. A diferencia del esfuerzo máximo de tensión, se realiza el cálculo de este parámetro para cada carga de tensión registrada por la máquina universal de ensayos, con lo cual se obtiene la gráfica de esfuerzo vs deformación. El cálculo del área transversal se realiza por medio de la ecuación (2).

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (1)$$

$$A = w * h \quad (2)$$

Dónde:

P_i = Fuerza aplicada a la probeta en su eje longitudinal.

A = Área de la sección transversal que resiste la carga durante el ensayo de tracción.

w = Ancho de la probeta.

h = Espesor de la probeta o altura de la sección transversal.

Esfuerzo máximo de Tensión “*tensile strength*”.

Se refiere al esfuerzo de tensión generado a partir de la aplicación de una carga máxima en sentido perpendicular al área transversal original de la probeta como se muestra en la ecuación (3), donde F^{tu} corresponde al esfuerzo último a tensión en MPa. Este valor corresponde al punto más alto de la curva esfuerzo-deformación y hace referencia a la capacidad de resistir una carga externa sin la existencia de ruptura, en materiales frágiles este esfuerzo se encuentra al final de la zona elástica.

$$F^{tu} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

Donde,

P_{max} = La carga máxima antes de la falla.

A = Área transversal de la probeta calculada a partir de los promedios de ancho y espesor especificados en el numeral 5.2.7 literal “b”.

Módulo de elasticidad o Módulo de Young.

La norma ASTM D3039 sugiere al usuario calcular el módulo de elasticidad por medio del método que prefiera como la ley de Hooke, haciendo la idealización de la curva a una línea recta y obtener su pendiente. Todo procedimiento usado deberá ser evaluado y reportado por el usuario, al igual que el rango de esfuerzos usados para el método y los resultados de tres figuras significativas obtenidas de la curva esfuerzo con respecto a la deformación. Es importante tener en cuenta que la norma recomienda hacer uso de transductores para obtener el valor del módulo de elasticidad o Young. (ASTM Internacional, 1997). Por otra parte, la norma ASTM E111 propone en su numeral 9.2 lo siguiente: el módulo de Young puede ser calculado de forma numérica con los datos de esfuerzo y deformación; Se puede reducir el error producido por la idealización de una línea recta de la curva obtenida experimentalmente haciendo uso del método de mínimos cuadrados, con el fin obtener el valor del módulo de elasticidad (ASTM Internacional, 1997). La representación de módulo de Young por medio del ajuste de mínimos cuadrado se presenta en la ecuación (4). Este método será implementado en este proyecto:

$$E = \frac{(\sum(XY) - K(\bar{X}\bar{Y}))}{\sum X^2 - K\bar{X}^2} \quad (4)$$

Donde

Y = Esfuerzo axial aplicado.

X = Deformación correspondiente.

$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{K}$ = Promedio de los valores de Y .

$\bar{X} = \frac{\sum X}{K}$ = Promedio de los valores de X .

K = Número de pares de datos X, Y.

Deformación de transición y esfuerzo de transición “transition strain & stress”.

De acuerdo con el numeral 12.5 de la norma ASTM D3039, es necesario reportar el valor de la deformación de transición. Este valor se obtuvo idealizando una línea recta de la curva representativa de la zona elástica e idealizando una línea recta de la curva representativa de la zona plástica. En el punto donde se intersecan ambas rectas idealizadas, se traslada el valor de la deformación unitaria a la curva que representa la relación esfuerzo-deformación del material. Los valores correspondientes en los ejes X y Y sobre la curva, serán la deformación unitaria de transición y el esfuerzo de transición, respectivamente. El esfuerzo de transición deberá ser reportado con al menos tres cifras significativas para cada una de las probetas. La Figura 38 muestra un ejemplo representativo.

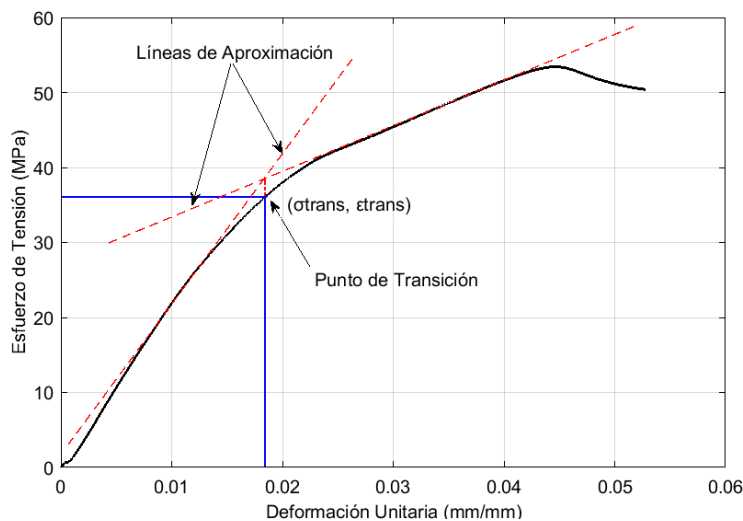


Figura 38. Curvas generales de esfuerzo-deformación a tensión de la probeta PLA[0°/0°]-1.

Fuente:Autores

Estadísticas.

Debido a la cantidad de muestras tomadas en las pruebas a tensión para cada uno de los lotes impresos en material ABS y PLA, se implementó un intervalo de confianza con el fin de descartar los valores obtenidos que se encuentren por fuera de este. Los datos aptos y que se encuentran dentro del intervalo de confianza, fueron utilizados para calcular el promedio de cada una de las propiedades mecánicas obtenidas en cada prueba. De esta manera, se evita incluir valores que puedan afectar negativamente los valores calculados ya que se encuentran fuera de la tendencia central encontrada, permitiendo de esta manera obtener unos resultados promedio confiables. Se utilizó el valor del esfuerzo máximo de tensión para realizar este proceso.

Para calcular el intervalo de confianza se implementó la ecuación (5), la cual incluye los valores de dispersión estándar, promedio simple, número de muestras y el coeficiente “*t*” correspondiente a la dispersión de “*student*” (Sounderpandian, 2008).

$$I.C = x \pm s_{u-1} * \frac{t}{n-1} \quad (5)$$

Dónde:

I.C = Intervalo de confianza.

x = Promedio simple.

s_{u-1} = Desviación estándar.

t = Coeficiente de *Student*.

n = Número de muestras.

Para realizar este procedimiento fue necesario seleccionar un nivel de significación “ α ”, sabiendo que los valores de esta variable para un proceso de muestreo experimental se manejan en torno al 5% y es decisión del investigador modificar este valor dependiendo de la confianza cualitativa del muestreo obtenido (Sounderpandian, 2008). Para este caso, se elige un valor de nivel de significación del 2% correspondiente a un porcentaje de confianza del 98% ya que, a partir del desarrollo de un protocolo de impresión y control de calidad para asegurar un estado apto de las probetas para la realización de pruebas mecánicas de tensión, se asegura reducir el error de los promedios calculados de cada parámetro mecánico calculado en esta investigación. Para el cálculo del intervalo de confianza fue necesario encontrar el valor del coeficiente “ t ” el cual se tomó de la tabla 3 “*Critical Values of the t Distribution*” (Sounderpandian, 2008, pág. 759). Calculando el valor de los grados de libertad “ df ” para cada lote de muestras y sabiendo el valor del porcentaje de confianza del 98%. En la Tabla 11 se logran apreciar los valores de número de muestras, grados de libertad y coeficiente “ t ” para cada configuración de impresión, siendo el número de muestras el número de probetas que se rompieron mediante pruebas de tensión adecuadamente para cada configuración, es decir de las 10 probetas propuestas para pruebas de tensión de cada configuración, el número de especímenes testeados sin que sufrieran deslizamiento de las mordazas.

Tabla 11. Parametros de calculo para el I.C.

Configuración	Número de muestras "n"	Grados de libertad "df"	Coficiente de Student "t"
PLA[0°/0°]	7	6	3,143
PLA[45°/45°]	10	9	2,821
PLA[90°/90°]	10	9	2,821
PLA[0°/90°]	9	8	2,896
PLA[45°/-45°]	10	9	2,821
ABS[0°/0°]	7	6	3,143
ABS[45°/-45°]	9	8	2,896
ABS[90°/90°]	10	9	2,821
ABS[0°/90°]	10	9	2,821
ABS[45°/45°]	10	9	2,821

El cálculo del promedio simple y la desviación estándar se realizan por medio de la ecuación (6) y ecuación (7) respectivamente. Los valores respectivos para las estadísticas requeridas en el intervalo de confianza realizado a partir de los valores de esfuerzo máximo de tensión para cada lote y material se muestran en el Anexo 7, allí se muestran los límites inferiores y superiores del esfuerzo máximo de tensión para cada una de las configuraciones de impresión y cada tipo de material, adicionalmente se encuentra subrayado en color rojo cada una de las probetas que han sido descartadas para el análisis de sus características mecánicas ya que no se encuentran dentro del rango del intervalo de confianza calculado por medio de la ecuación (5) con los límites inferiores y superiores mostrados en el Anexo 7.

Una vez definidos los especímenes a trabajar por medio del proceso de descarte realizado a partir del intervalo de confianza, se procede a calcular las estadísticas requeridas como lo especifica el numeral 12.6 de la norma ASTM D3039: promedio simple, ecuación (6), desviación estándar, ecuación (7), y el coeficiente de variación

en porcentaje, ecuación (8), para cada una de las propiedades determinadas en las pruebas (Esfuerzo de tensión máximo, Módulo de elasticidad y punto de transición) (ASTM International, 2002).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

$$s_{u-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$CV = 100 * s_{n-1} / \bar{x} \quad (8)$$

Donde:

\bar{x} = Promedio simple

s_{u-1} = Desviación estándar simple

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

n = Número de especímenes

X_i = Valor de la propiedad

6. Presentación y análisis de resultados.

En este capítulo se presentará cada uno de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto de investigación. A continuación, se describirán los resultados encontrados para cada una de las configuraciones seleccionadas y para cada material.

6.1. Probetas fabricadas en PLA.

A continuación, se presenta el análisis y comparación del comportamiento de las probetas fabricadas en PLA con respecto a la deformación unitaria, con la finalidad de cumplir con los objetivos específicos 2 y 3 del presente proyecto. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los resultados registrados después de someter a prueba cada uno de los especímenes con diferentes orientaciones de impresión en material PLA. Durante el análisis, se descartaron probetas con base al intervalo de confianza, el cual fue calculado con el promedio simple y la desviación estándar del esfuerzo máximo a tensión de la totalidad de las probetas, aplicando un grado de confianza del 98% de certeza consignado en el Anexo 7.

En el análisis de las gráficas que presentan el esfuerzo de tensión en función de la deformación unitaria de cada uno de los lotes, se describe el comportamiento elástico y plástico del material, además se especifican los valores de deformación unitaria máxima para cada uno de los casos. Adicionalmente, el punto de transición se obtiene de acuerdo con el procedimiento gráfico mostrado en la Figura 38 y en el Anexo 8 se muestra

gráficamente el valor del esfuerzo y de la deformación de transición para cada una de las probetas sometidas a prueba.

6.1.1. PLA [0°/0°].

De esta configuración, se sometieron a pruebas de tensión 10 especímenes. De estos, los números PLA[0°/0°]-5, PLA[0°/0°]-6 y PLA[0°/0°]-7 se descartaron para el análisis ya que presentaron falla estructural debido a deslizamiento en las mordazas, aún con la presencia de tabs. Es de recordar que la norma ASTM D3039 exige al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados obtenidos como válidos, cumpliendo así con este requisito. En la Figura 39 se presenta la variación del esfuerzo a tensión en relación con la deformación unitaria de las probetas que no fueron descartadas. Más allá de este valor del esfuerzo, las probetas tienden a presentar un comportamiento plástico y heterogéneo. Los puntos de ruptura en cada una de las probetas presentan variaciones en términos de la magnitud del esfuerzo máximo soportado y de la deformación unitaria de la probeta. La Tabla 12 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición para cada una de las probetas que cumplieron satisfactoriamente la prueba. Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las características mencionadas.

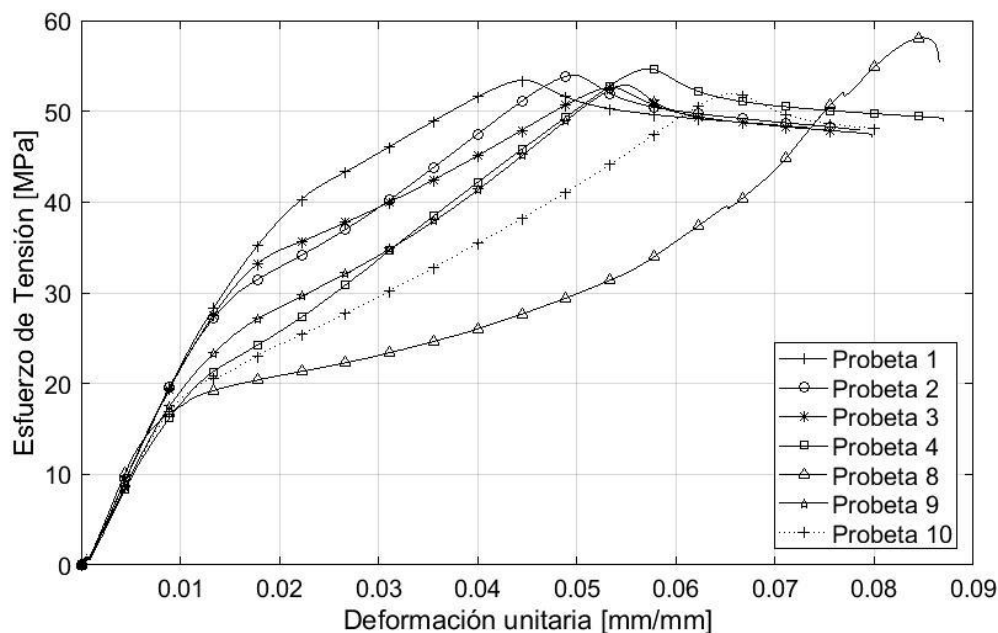


Figura 39. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/0°].

Otra característica importante es el comportamiento en la zona plástica, debido a que no presenta una tendencia de comportamiento uniforme como si lo presentó la zona elástica; este comportamiento puede presentar debido a distintos factores, entre ellos errores imperceptibles de la fabricación de los especímenes, como lo es poros internos en el material, grietas internas e incluso separación de hilos o capas medias, estos errores no son perceptibles bajo el control de calidad propuesto en este proyecto. En la Figura 39 se puede apreciar que, en el punto de ruptura, la deformación de las probetas sujetas al estudio, presentan valores dispersos y diferentes entre sí. Cabe destacar que la deformación unitaria máxima para todas las probetas obtuvo un valor promedio de 0,078 mm/mm, a diferencia de la deformación donde se presentó el esfuerzo máximo de cada

una de las probetas, con un valor dentro del rango de 0,04 y 0,06 mm/mm, característica importante para determinar el comportamiento dúctil de un material.

Tabla 12. Características mecánicas de cada probeta de PLA [0°/0°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[0°/0°]-1	1,954	53,421	0,073	0,019	36,731
PLA[0°/0°]-2	2,181	53,992	0,079	0,013	26,787
PLA[0°/0°]-3	2,064	52,626	0,080	0,014	29,648
PLA[0°/0°]-4	1,915	54,677	0,087	0,009	16,428
PLA[0°/0°]-8	2,215	58,108	0,087	0,008	15,717
PLA[0°/0°]-9	1,813	52,879	0,062	0,012	21,353
PLA[0°/0°]-10	1,972	51,960	0,081	0,009	17,027
Promedio simple	2,016	53,952	0,078	0,012	23,384
Desviación estándar	0,145	2,040	0,009	0,004	7,965
Coefficiente de variación (%)	7,199	3,780	10,967	31,810	34,062

Al repetir el procedimiento y teniendo en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, se descartaron adicionalmente los especímenes PLA[0°/0°]-8 y PLA[0°/0°]-10 debido a que se encuentran fuera de tendencia acorde al comportamiento registrado en la Figura 39. Teniendo en cuenta que el número mínimo de registros de pruebas es 5 acorde a la normativa, se obtienen los valores de promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las características mostradas en la Tabla 13.

Tabla 13. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [0°/0°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,985	53,519	0,076	0,013	26,189
Desviación estándar	0,142	0,834	0,009	0,004	7,780
Coefficiente de variación (%)	7,136	1,558	12,182	27,097	29,707

En la Figura 40 se aprecia el comportamiento mecánico de la configuración PLA[0°/0°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

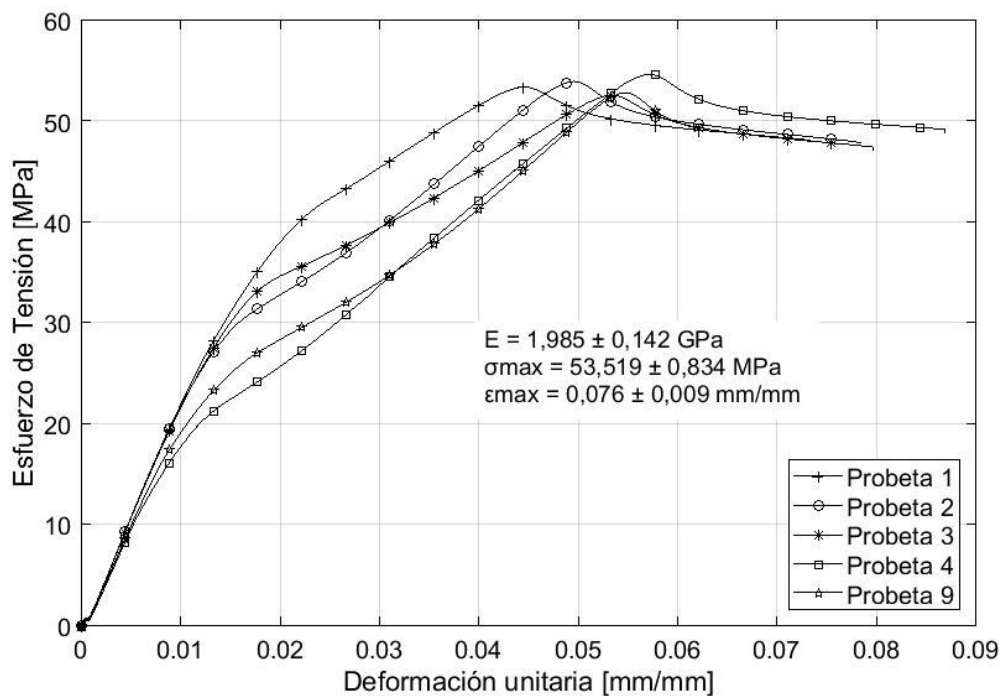


Figura 40. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/0°] probetas seleccionadas.

En la Figura 41 se muestra el comportamiento de la zona elástica de cada una de las probetas seleccionadas con base en el I.C y y el descarte por tendencia, donde se puede apreciar con mayor exactitud la similitud del comportamiento mecánico en la zona elástica. El esfuerzo de transición promedio es de 26,189 MPa mientras la deformación de transición promedio es 0,013 mm/mm, determinando el punto de transición de la región elástica y la región plástica.

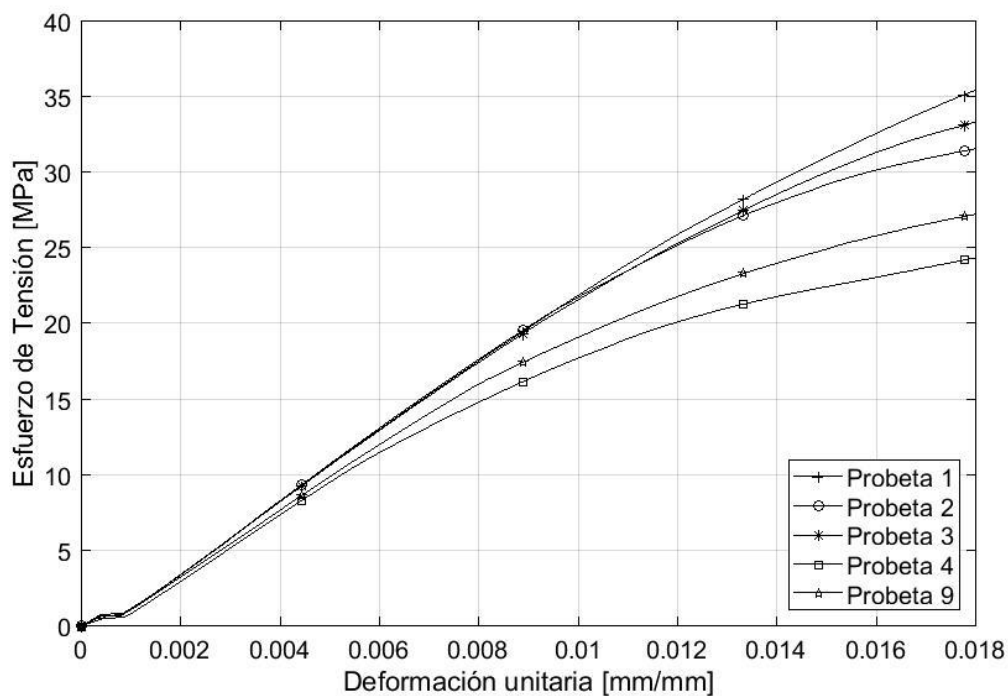


Figura 41 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [0°/0°].

6.1.2. PLA [45°/45°].

La presente configuración fue sometida a ensayos de tensión implementando 10 especímenes, de los cuales la totalidad del grupo de probetas no presentaron fallas durante el ensayo mecánico. Una vez aplicado el intervalo de confianza se descartaron las probetas PLA [45°/45°]-1, PLA[45°/45°]-2, PLA[45°/45°]-3 y la PLA[45°/45°]-6 cuyos valores de esfuerzo máximo no se encontraban dentro del rango establecido tal y como se puede observar en el Anexo 7. Cabe resaltar que la norma ASTM D3039 exige mínimo cinco pruebas exitosas y en este caso se presentan 6 resultados válidos.

En la Figura 42 se presenta el comportamiento del esfuerzo de tensión con respecto a la deformación unitaria de los especímenes. Con respecto al punto de ruptura, cada una de las probetas presenta variaciones en la deformación unitaria y el correspondiente esfuerzo máximo soportado. Cabe destacar que el punto de ruptura es cercano al valor del esfuerzo máximo. La

Tabla 14 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición de cada una de las probetas cuyos resultados obtenidos fueron exitosos.

Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las variables analizadas.

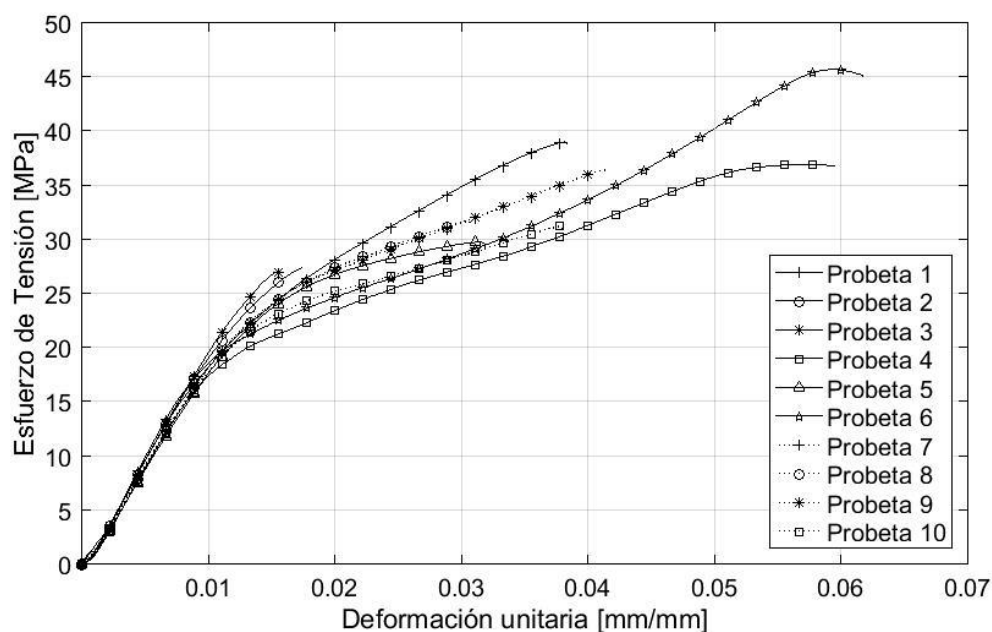


Figura 42. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/45°].

Tabla 14. Características mecánicas de cada probeta de PLA [45°/45°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[45°/45°]-1	1,958	39,036	0,038	0,012	20,848
PLA[45°/45°]-2	1,958	27,436	0,017	0,010	19,874
PLA[45°/45°]-3	1,958	26,994	0,016	0,011	22,786
PLA[45°/45°]-4	1,924	36,930	0,060	0,010	17,501
PLA[45°/45°]-5	1,889	29,775	0,032	0,011	18,103

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[45°/45°]-6	1,846	45,723	0,062	0,009	17,362
PLA[45°/45°]-7	1,960	31,709	0,031	0,012	21,012
PLA[45°/45°]-8	1,960	31,709	0,031	0,012	22,956
PLA[45°/45°]-9	1,932	36,443	0,041	0,013	22,001
PLA[45°/45°]-10	1,898	31,242	0,038	0,012	21,768
Promedio simple	1,927	32,968	0,039	0,012	20,557
Desviación estándar	0,030	2,970	0,011	0,001	2,230
Coefficiente de variación (%)	1,553	9,010	28,692	8,918	10,850

Por otra parte, el comportamiento de la zona plástica varía entre cada uno de los especímenes a diferencia que en la zona elástica. En la Figura 42 cabe destacar que el punto de ruptura de las probetas tuvo una deformación con valores dispersos y con variaciones entre sí. La deformación máxima para todas las probetas obtuvo una deformación unitaria con un promedio simple de 0,039 mm/mm.

Con la finalidad de obtener resultados confiables, teniendo en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, adicionalmente se descartó la probeta PLA[45°/45°]-4 debido a que esta se encuentra fuera de tendencia en la figura anterior. Teniendo en cuenta las cinco pruebas válidas exigidas por la norma, se obtienen los valores de promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las probetas escogidas tal y como se puede observar en la Tabla 15.

Tabla 15. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [45°/45°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,928	32,175	0,035	0,012	21,168
Desviación estándar	0,033	2,514	0,005	0,001	1,849
Coefficiente de variación (%)	1,734	7,813	14,158	5,889	8,733

En la Figura 43 se expone el comportamiento mecánico de la configuración PLA[45°/45°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de

promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

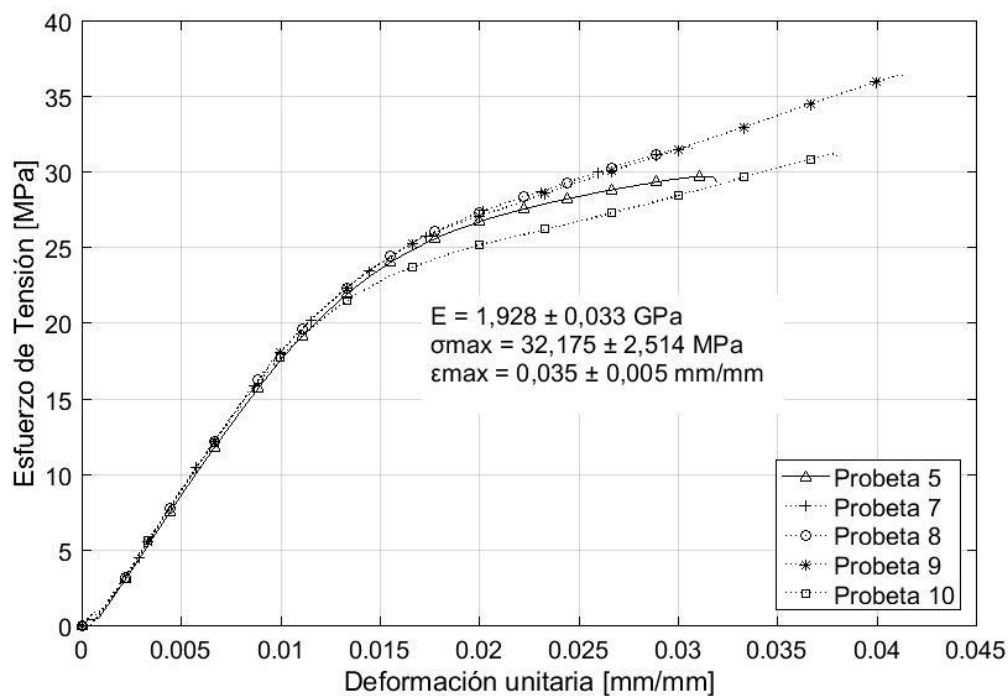


Figura 43. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/45°] probetas seleccionadas.

En la Figura 44 se muestra el comportamiento de cada uno de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia, donde se puede apreciar con mayor exactitud la similitud del comportamiento mecánico en la zona elástica. El valor del esfuerzo de transición promedio es 21,168 MPa y la deformación de transición promedio es 0,012 mm/mm determinando el punto de transición de la región elástica y la región plástica.

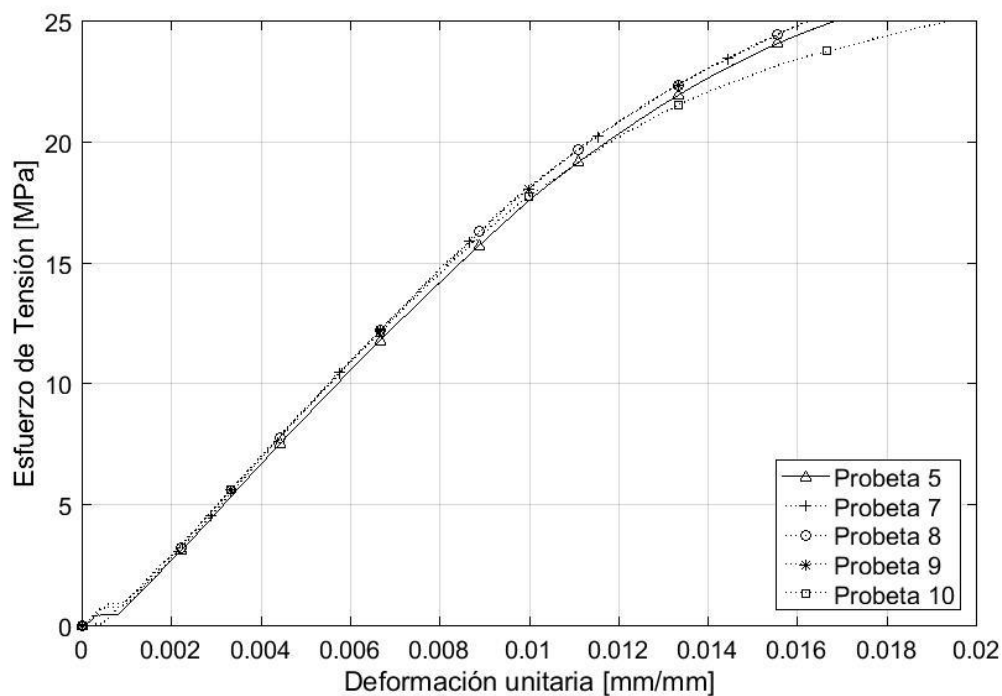


Figura 44 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [45°/45°].

6.1.3. PLA [90°/90°].

En esta configuración se sometieron a ensayos de tensión 10 especímenes. Para la totalidad de los especímenes la totalidad de las pruebas fueron válidas debido a que no presentaron fallas durante el ensayo mecánico. Aplicando el intervalo de confianza únicamente se descartó la probeta PLA[90°/90°]-10 debido a que le valor del esfuerzo no se encuentra de los límites establecidos por el I.C, tal y como se puede observar en el Anexo 7. Cabe resaltar que la norma ASTM D3039 establece un número de 5 probetas con resultados satisfactorios.

En la Figura 45 se puede observar la variación del esfuerzo de tensión frente a la deformación unitaria de cada una de las probetas. Así mismo el punto de ruptura presenta

distintos valores tanto para la deformación unitaria como para su correspondiente esfuerzo máximo soportado cuyo valor es cercano al punto de ruptura de las probetas.

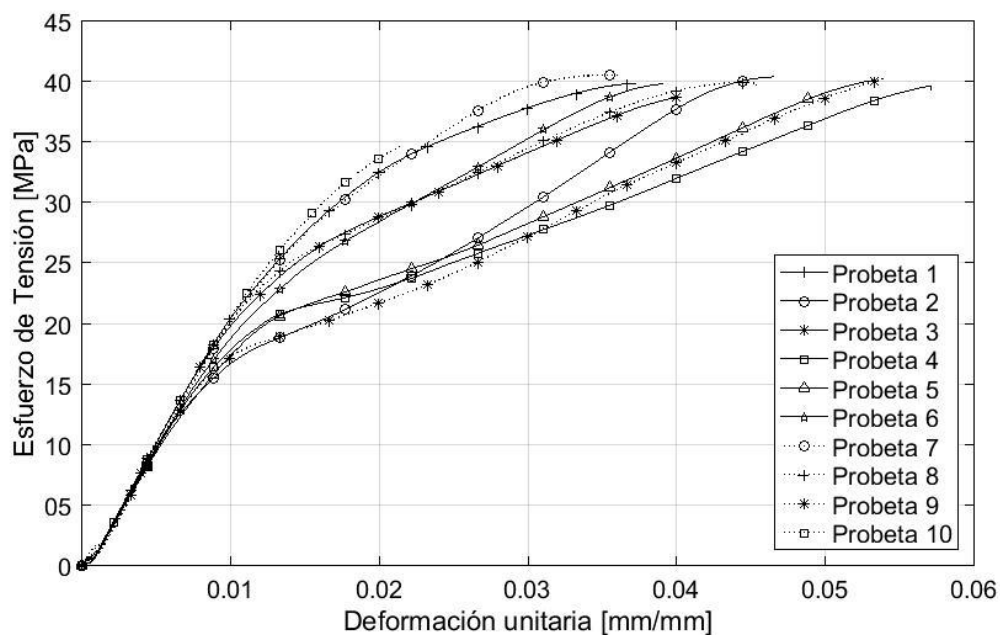


Figura 45 Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [90°/90°].

La Tabla 16 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición para la totalidad de las probetas con resultados satisfactorios. Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las características analizadas, establecido en el Anexo 7. A partir de la gráfica se puede establecer que se presenta una variación significativa en la zona plástica contraria a la uniformidad de la zona elástica. Además, para cada uno de los puntos de ruptura se tienen deformaciones con valores dispersos y con variaciones entre sí.

Tabla 16 Características mecánicas de cada probeta de PLA [90°/90°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[90°/90°]-1	2,183	39,907	0,037	0,013	24,836
PLA[90°/90°]-2	2,262	40,423	0,047	0,011	17,663
PLA[90°/90°]-3	2,183	38,732	0,040	0,012	22,502
PLA[90°/90°]-4	1,930	39,680	0,057	0,012	19,078
PLA[90°/90°]-5	1,863	40,128	0,053	0,012	18,006
PLA[90°/90°]-6	2,018	39,841	0,039	0,012	18,428
PLA[90°/90°]-7	2,194	40,573	0,036	0,013	24,767
PLA[90°/90°]-8	2,168	39,955	0,045	0,012	23,963
PLA[90°/90°]-9	2,110	40,261	0,054	0,008	16,433
PLA[90°/90°]-10	2,159	34,732	0,022	0,013	25,503
Promedio simple	2,107	39,423	0,043	0,012	21,118
Desviación estándar	0,128	1,725	0,011	0,001	3,517
Coefficiente de variación (%)	6,091	4,374	24,584	12,382	16,656

Con la finalidad disminuir la magnitud de la desviación estándar y del coeficiente de variación, además de tener en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, se descartó adicionalmente la probeta PLA[90°/90°]-2, PLA[90°/90°]-4, PLA[90°/90°]-5 y PLA[90°/90°]-9 debido a que esta se encuentra fuera de tendencia como se puede apreciar en la figura anterior. Teniendo en cuenta las cinco pruebas válidas exigidas por la norma, se obtienen el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada una de las probetas seleccionadas tal y como se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [90°/90°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	2,149	39,802	0,040	0,012	22,899
Desviación estándar	0,074	0,666	0,004	0,0005	2,670
Coefficiente de variación (%)	3,429	1,674	9,064	4,343	11,661

En la Figura 46 se aprecia el comportamiento mecánico de la configuración PLA[90°/90°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de

promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

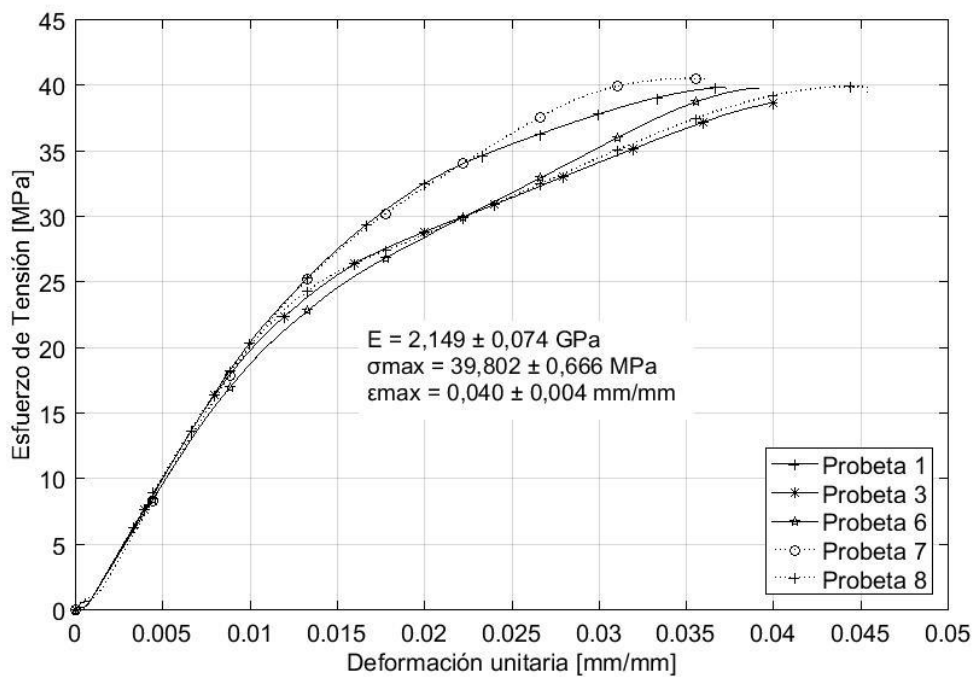


Figura 46. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [90°/90°] probetas seleccionadas.

En la Figura 47 se muestra el comportamiento uniforme de cada uno de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia, el esfuerzo de transición promedio corresponde a 22,899 MPa y el esfuerzo de transición promedio es de 0,012 determinando el punto de transición para la zona elástica y plástica.

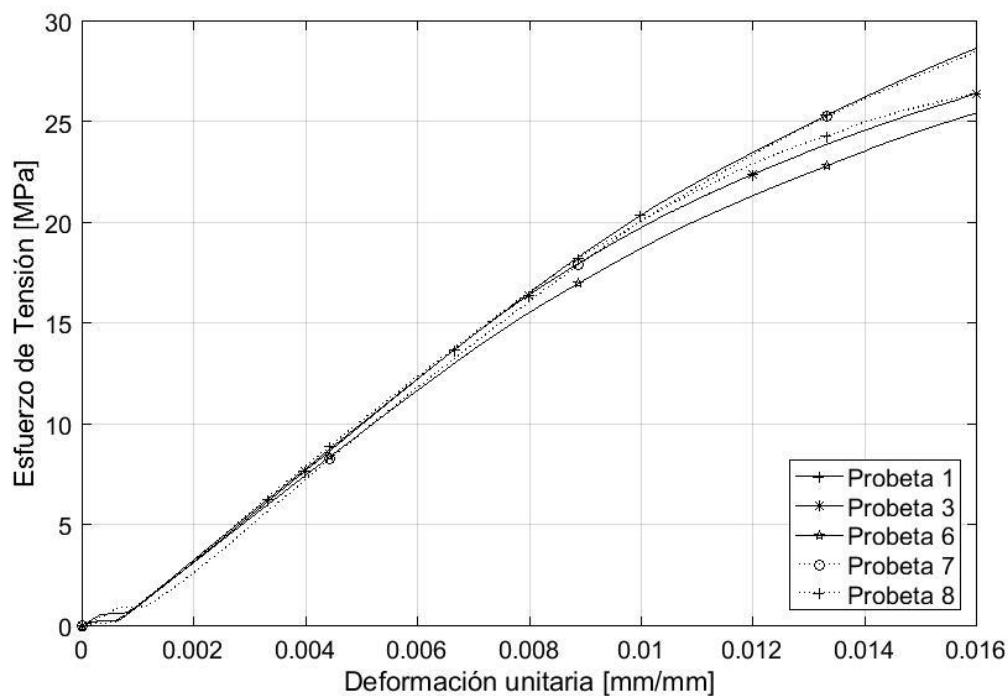


Figura 47 Comportamiento zona elástica de probetas. PLA [90°/90°].

6.1.4. PLA [0°/90°].

En esta configuración se sometieron a ensayos de tensión 10 probetas, de las cuales se descartó únicamente la probeta PLA[0°/90°]-6 por presentar falla durante el ensayo de tensión. A partir del intervalo de confianza para el esfuerzo máximo establecido en el Anexo 7 se descartaron las probetas PLA[0°/90°]-2, PLA[0°/90°]-3 y PLA[0°/90°]-5. No obstante se garantiza que un número de cinco probetas sean aptas para resultados satisfactorios. En la Figura 48 se establece el comportamiento característico del esfuerzo de tensión con respecto a la deformación unitaria de la totalidad de los especímenes. El punto de ruptura experimenta diferentes deformaciones y valores de esfuerzo máximo. La Tabla 18 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión, la deformación

unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación de transición para cada una de las probetas. Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las características mencionadas.

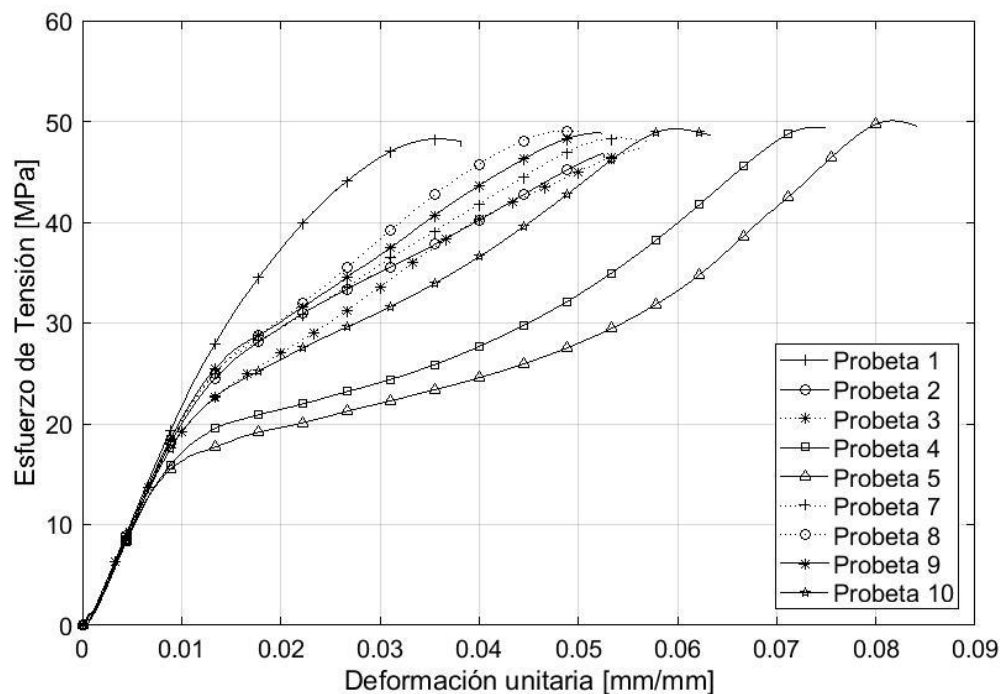


Figura 48 Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/90°].

En la figura se puede apreciar una heterogeneidad relevante en la zona plástica contraria a la uniformidad de la zona elástica. Además, para cada uno de los puntos de ruptura se tienen deformaciones con valores dispersos y con variaciones entre sí.

Tabla 18. Características mecánicas de cada probeta de PLA [0°/90°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[0°/90°]-1	2,312	48,273	0,038	0,015	30,509
PLA[0°/90°]-2	2,312	46,787	0,053	0,012	24,040
PLA[0°/90°]-3	2,312	47,317	0,057	0,009	18,534
PLA[0°/90°]-4	2,055	49,442	0,075	0,009	16,810
PLA[0°/90°]-5	2,082	50,071	0,084	0,008	15,260

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[0°/90°]-7	2,230	48,365	0,057	0,011	23,510
PLA[0°/90°]-8	2,203	49,075	0,050	0,011	22,654
PLA[0°/90°]-9	2,217	48,852	0,052	0,011	24,048
PLA[0°/90°]-10	2,115	49,254	0,063	0,010	19,271
Promedio simple	2,189	48,877	0,056	0,011	22,800
Desviación estándar	0,091	0,475	0,012	0,002	4,687
Coefficiente de variación (%)	4,155	0,972	22,288	18,280	20,557

Para reducir la magnitud de la desviación estándar y del coeficiente de variación, además de tener en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, se descartó adicionalmente la probeta PLA[0°/90°]-4, debido a que esta se encuentra fuera de tendencia como se observa en la figura anterior, manteniendo un mínimo de cinco probetas con resultados satisfactorios tal y como lo exige la normativa, se obtienen los valores de promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación para cada espécimen, estos valores están consignados en la Tabla 19.

Tabla 19. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [0°/90°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	2,215	48,764	0,052	0,012	23,998
Desviación estándar	0,070	0,431	0,009	0,002	4,086
Coefficiente de variación (%)	3,176	0,885	17,988	16,805	17,027

En la Figura 49 se presenta el comportamiento mecánico de la configuración PLA[0°/90°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

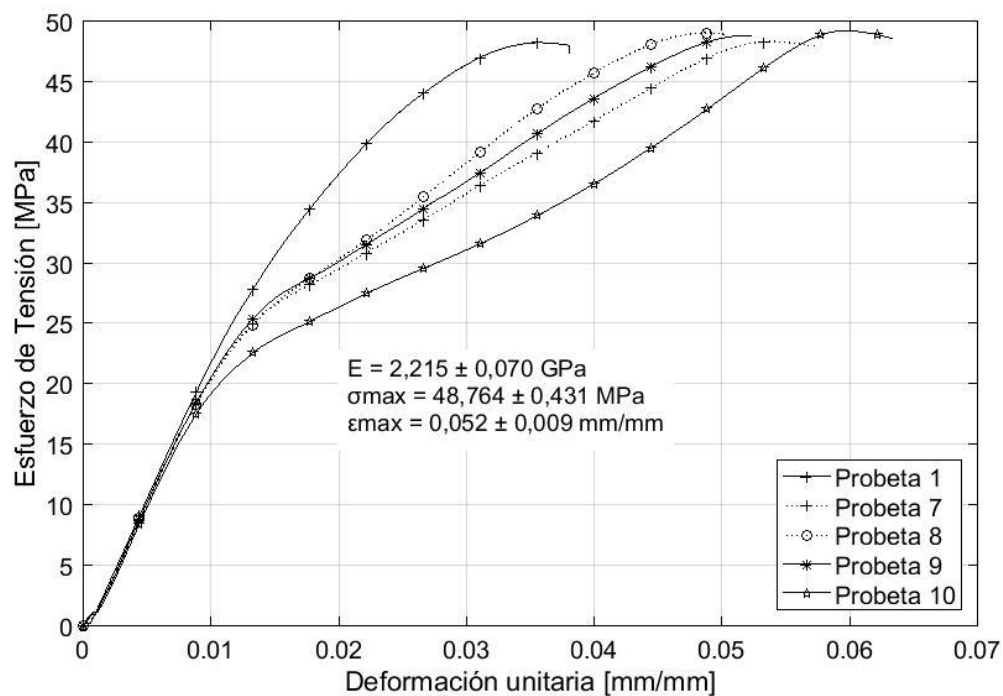


Figura 49. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [0°/90°] probetas seleccionadas.

En la Figura 50 se observa con mayor exactitud la zona elástica de la totalidad de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia. El esfuerzo de transición promedio es de 23,998 MPa mientras que la deformación de transición promedio es de 0,012 mm/mm identificando el punto de transición para la región plástica y elástica.

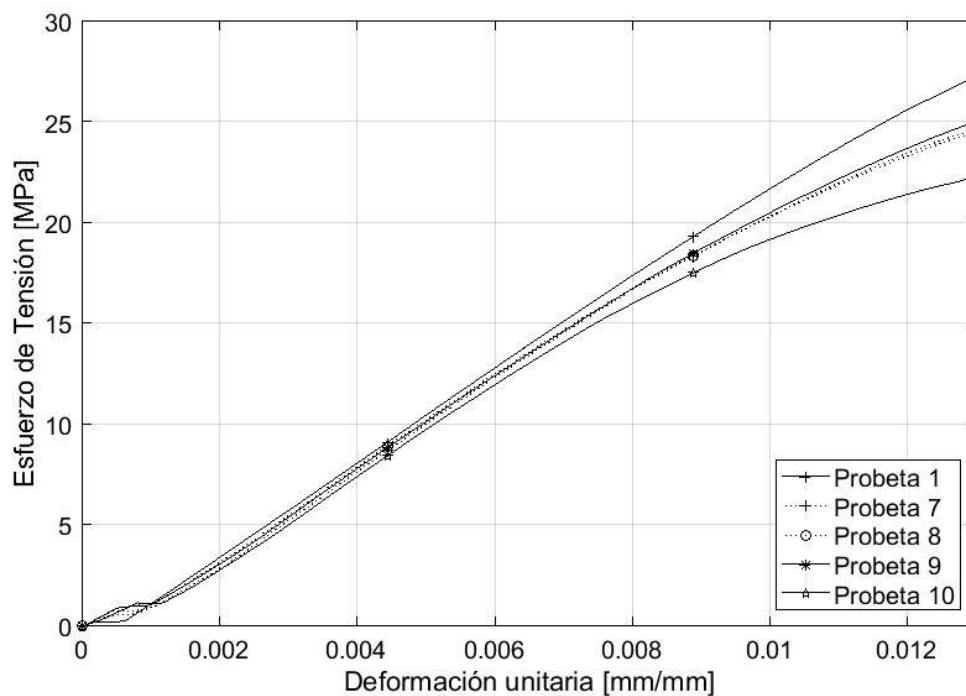


Figura 50 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración PLA [0°/90°].

6.1.5. PLA [45°/-45°].

Para esta configuración se fabricaron un total de 10 probetas para realizar el ensayo de tensión. La totalidad de las pruebas fueron aptas debido a que no se presentó ningún tipo de fallo durante la ejecución. A partir del intervalo de confianza para el esfuerzo máximo establecido en el Anexo 7, se descartaron las probetas PLA[45°/-45°]-2, PLA[45°/-45°]-4 y PLA[45°/-45°]-6 y PLA[45°/-45°]-7. Es de recordar que la norma ASTM D 3039 exige al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados obtenidos como válidos. En la Figura 51 se presenta el comportamiento del esfuerzo de tensión en relación con la deformación unitaria. Los puntos de ruptura en la zona plástica, de comportamiento heterogéneo, presentan variaciones en cuanto a la deformación unitaria y el esfuerzo

máximo soportado. Existe una variación considerable en la zona plástica en contraposición al comportamiento homogéneo de la zona plástica. Para cada uno de los puntos de ruptura se tienen deformaciones con valores dispersos y con variaciones entre sí.

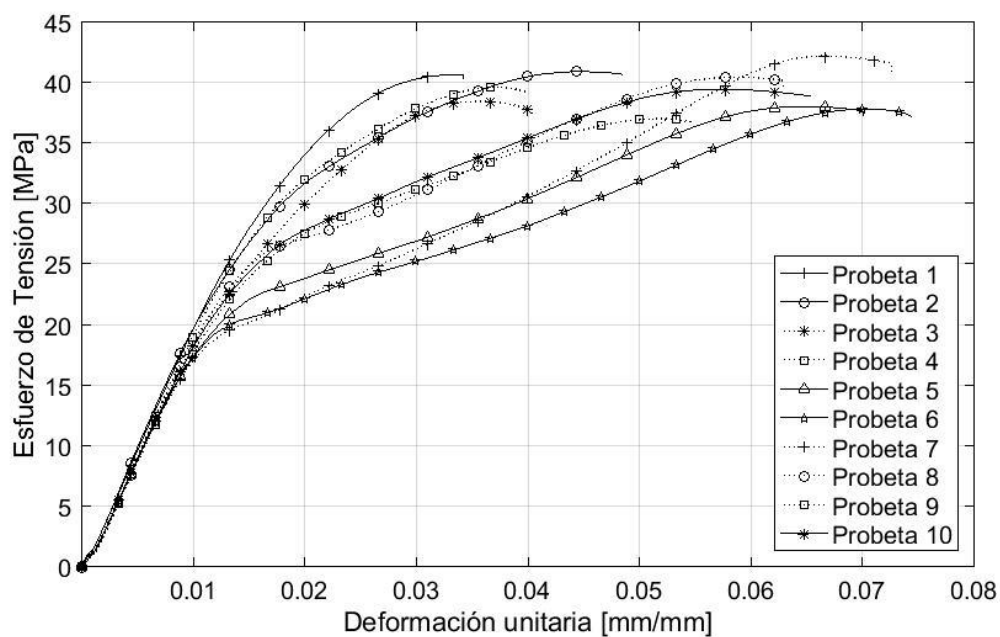


Figura 51. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/-45°].

La Tabla 20 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición para cada espécimen apto. Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las características mencionadas.

Tabla 20. Características mecánicas de cada probeta de PLA [45°/-45°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
PLA[45°/-45°]-1	2,049	40,667	0,034	0,015	27,527
PLA[45°/-45°]-2	2,049	40,946	0,049	0,015	27,582
PLA[45°/-45°]-3	2,049	38,486	0,041	0,014	24,735
PLA[45°/-45°]-4	1,855	37,066	0,055	0,014	23,812
PLA[45°/-45°]-5	1,852	38,065	0,070	0,012	20,039
PLA[45°/-45°]-6	1,853	37,862	0,075	0,012	19,557
PLA[45°/-45°]-7	1,830	42,245	0,073	0,014	20,159
PLA[45°/-45°]-8	1,986	40,481	0,063	0,013	23,517
PLA[45°/-45°]-9	2,045	39,643	0,040	0,015	26,584
PLA[45°/-45°]-10	1,919	39,490	0,065	0,014	24,270
Promedio simple	1,983	39,472	0,052	0,014	24,445
Desviación estándar	0,082	1,042	0,016	0,001	2,625
Coefficiente de variación (%)	4,136	2,639	29,890	8,198	10,740

Teniendo en cuenta las probetas previamente descartadas, se sumó a este grupo la probeta PLA[45°/-45°]-5, ya que el comportamiento mostrado en la figura anterior se encontraba por fuera de tendencia. De esta manera se cumple con la cantidad de probetas válidas acorde a la normativa y se obtienen los valores de promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las características mostradas a continuación en la Tabla 21.

Tabla 21 Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de PLA [45°/-45°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	2,009	39,753	0,049	0,014	25,327
Desviación estándar	0,057	0,873	0,014	0,001	1,671
Coefficiente de variación (%)	2,841	2,197	29,671	5,597	6,596

En la Figura 52 se puede apreciar el comportamiento mecánico de la configuración PLA[45°/-45°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

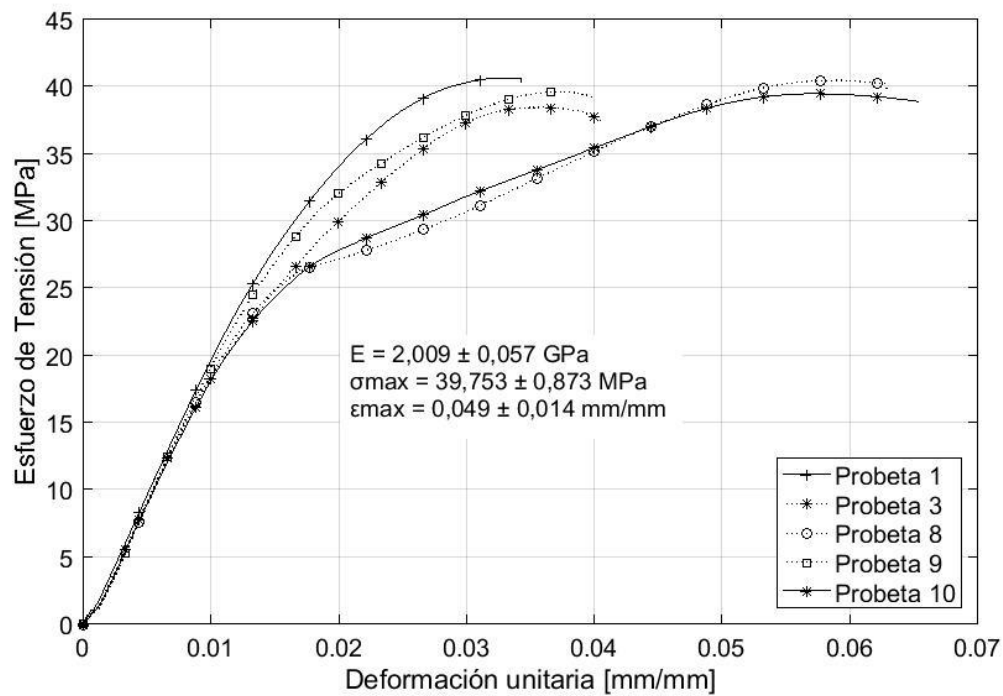


Figura 52. Esfuerzo de tensión vs deformación. PLA [45°/-45°] probetas seleccionadas.

En la Figura 53 se puede apreciar el comportamiento de cada uno de los especímenes seleccionados con base en el I.C. El punto de transición para la zona elástica y plástica se representa con un valor de 25,327 MPa para el esfuerzo de transición mientras que la deformación de transición presenta un valor de 0,014 mm/mm.

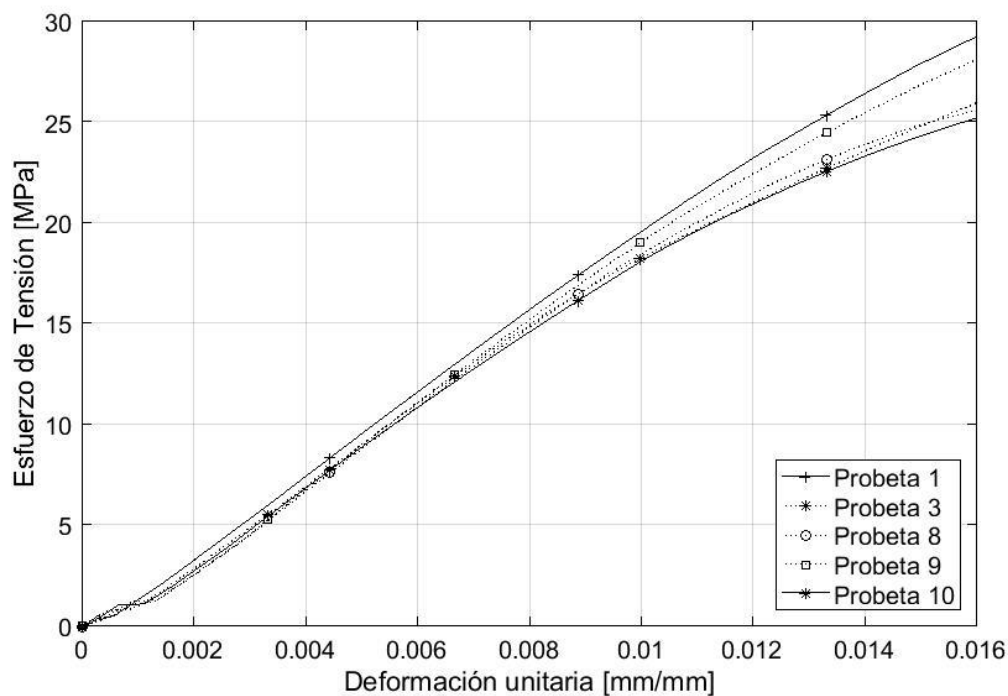


Figura 53 Comportamiento zona elástica de probetas de PLA [45°/-45°].

6.2. Probetas fabricadas en ABS.

A continuación, se presenta el análisis y comparación del comportamiento del esfuerzo en tensión de las probetas fabricadas en ABS con respecto a la deformación unitaria, con la finalidad de cumplir con los objetivos específicos 2 y 3 del presente proyecto. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los resultados registrados después de someter a prueba cada uno de los especímenes con diferentes orientaciones de impresión en material ABS, especificando la correspondiente curva de cada probeta en la parte inferior derecha implementando marcadores para cara una. Por otra parte, se descartaron probetas con base al intervalo de confianza, el cual fue calculado con el promedio simple y la desviación estándar del esfuerzo máximo a tensión de la totalidad de las probetas, aplicando un grado de confianza del 98% de certeza consignado en el Anexo 7.

Adicionalmente, el punto de transición se obtiene de acuerdo con el procedimiento gráfico mostrado en la Figura 38 para cada una de las muestras y se representan en el Anexo 8, consignando el esfuerzo y la deformación de transición en la tabla correspondiente de cada una de las orientaciones.

6.2.1. ABS [0°/0°].

Para esta configuración se destinaron 10 probetas para realizar el ensayo de tensión, sin embargo las probetas ABS[0°/0°]-1 ABS[0°/0°]-2 y ABS[0°/0°]-10 presentaron falla por deslizamiento de mordazas durante el ensayo de tensión aun con el uso de tabs.

Aplicando el intervalo de confianza se descartó la probeta ABS[0°/0°]-7, cabe resaltar que la norma ASTM D3039 exige al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados obtenidos como válidos. En la Figura 54 se puede observar el comportamiento del esfuerzo de tensión con respecto a la deformación unitaria. Los puntos de ruptura para cada espécimen presentan variaciones en cuanto a la magnitud del esfuerzo máximo soportado y la deformación unitaria.

Existe una variación considerable en la zona plástica en contraposición al comportamiento homogéneo de la zona elástica. En la Figura 54 se observa que en el punto de ruptura, la deformación de cada espécimen presenta valores dispersos y diferentes entre sí.

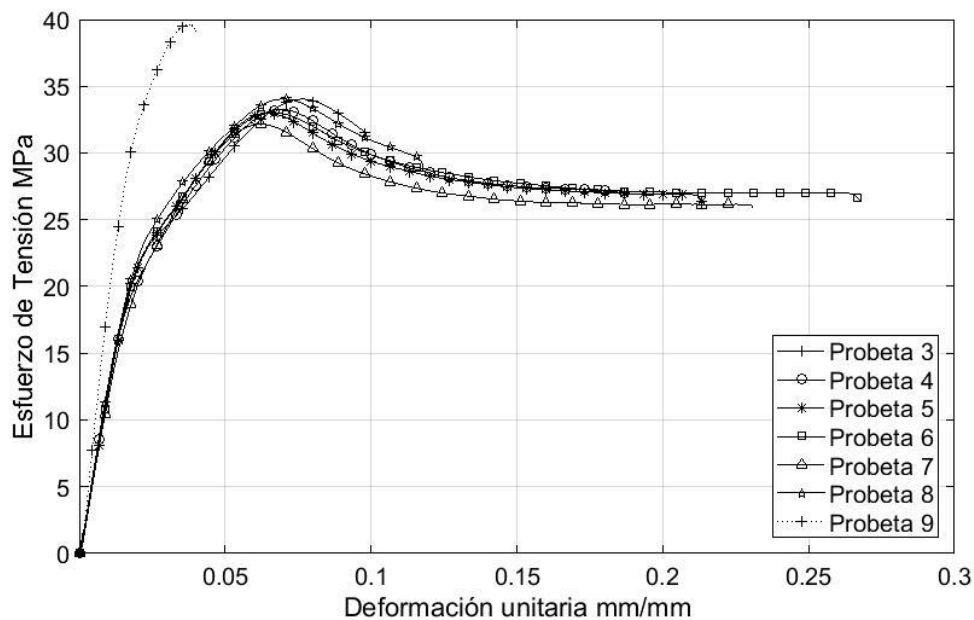


Figura 54. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/0°].

La

Tabla 22 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición para cada espécimen apto. Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las características previamente mencionadas.

Tabla 22. Características mecánicas de cada probeta de ABS [0°/0°]

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[0°/0°]-3	34,032	1,162	0,099	0,024	23,571
ABS[0°/0°]-4	33,264	1,101	0,188	0,021	22,221
ABS[0°/0°]-5	32,995	1,152	0,214	0,025	23,016
ABS[0°/0°]-6	33,046	1,162	0,268	0,025	23,103
ABS[0°/0°]-7	32,167	1,078	0,231	0,025	21,564
ABS[0°/0°]-8	34,044	1,196	0,118	0,025	24,080
ABS[0°/0°]-9	33,925	1,105	0,213	0,024	21,442
Promedio simple	33,551	1,146	0,183	0,024	22,906
Desviación estándar	0,502	0,037	0,064	0,002	0,947

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Coefficiente de variación (%)	1,497	3,211	34,934	6,455	4,134

Al repetir el procedimiento y descartar la probeta ABS[0°/0°]-9, debido a que se encontraba por fuera de tendencia en la figura anterior y además de tener en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, recordando que el mínimo número de probetas aptas es de cinco, se obtienen los valores de promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación para cada una de las características mostradas a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [0°/0°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,155	33,476	0,177	0,024	23,198
Desviación estándar	0,034	0,523	0,070	0,002	0,692
Coefficiente de variación (%)	2,977	1,561	39,309	7,217	2,982

En la

Figura 55 se expone el comportamiento mecánico de la configuración ABS[0°/0°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

En la Figura 56 se puede observar el comportamiento de la zona elástica de cada uno de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia. La deformación de transición presenta un valor promedio de 0,024 mm/mm mientras que el esfuerzo de transición tiene un valor promedio de 23,198 MPa, representando el punto de transición para la zona plástica y elástica.

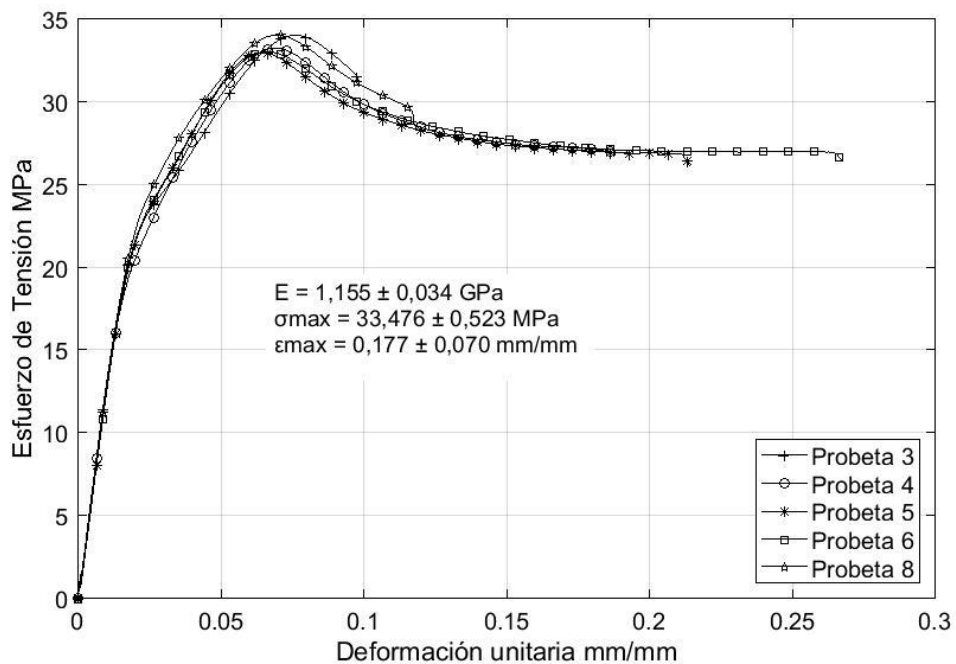


Figura 55. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/0°] probetas seleccionadas.

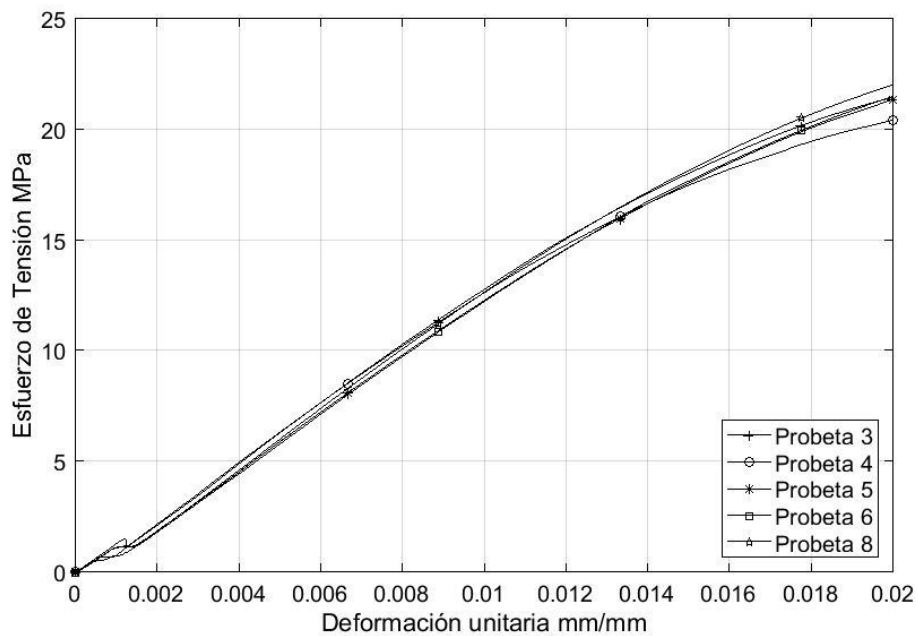


Figura 56 Comportamiento zona elástica de probetas de ABS [0°/0°].

6.2.2. ABS [45°/45°].

En esta configuración se utilizaron en el ensayo de tensión un total de 10 probetas. De este conjunto ninguno de los especímenes presentó falla estructural por deslizamiento durante la prueba de tensión con la presencia de tabs. Aplicando el intervalo de confianza establecido se descartaron las probetas ABS [45°/45°]-3, ABS [45°/45°]-9 y ABS [45°/45°]-10 debido a que no se encontraban dentro de la desviación estándar inicial establecida. Es de recordar que la norma ASTM D3039 exige al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados como fiables.

En la Figura 57 se puede observar el comportamiento del ensayo de tensión del conjunto de probetas teniendo en cuenta el esfuerzo de tensión respecto a su deformación unitaria. Se puede observar que cuando las probetas alcanzan su punto de ruptura la deformación unitaria presenta valores cercanos entre ellas a diferencia de su correspondiente esfuerzo de tensión cuyos valores varían entre sí. Adicionalmente se presentó que la deformación máxima para la totalidad del conjunto de probetas se encontró cercano al promedio simple el cual corresponde 0,028 mm/mm, indicando el comportamiento característico de un material frágil debido a que alcanza el punto de ruptura en el esfuerzo máximo de tensión.

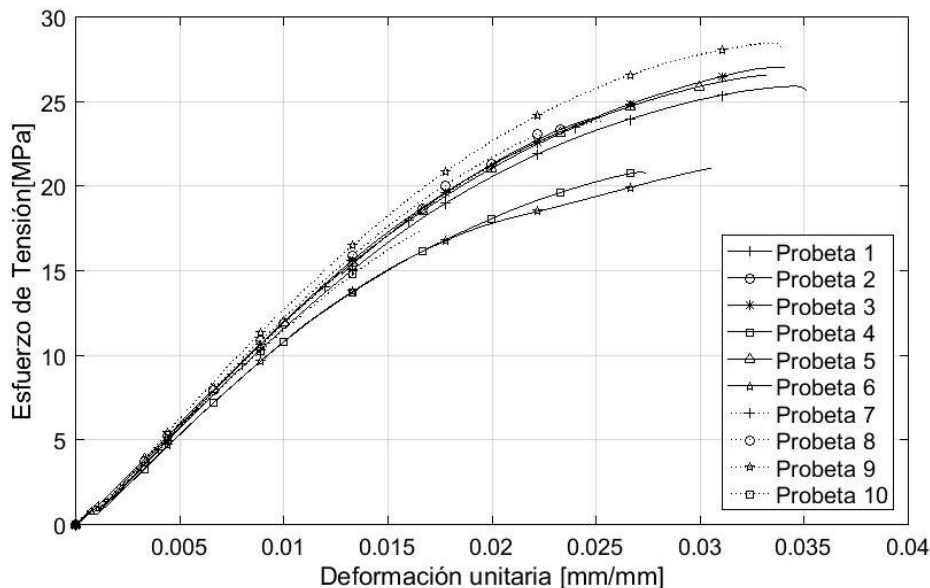


Figura 57. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/45°].

La Tabla 24 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo y la deformación unitaria de transición para cada una de las probetas que cumplieron satisfactoriamente con el ensayo de tensión. Además, se calculó del promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación para las probetas válidas.

Tabla 24. Características mecánicas de cada probeta de ABS [45°/45°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[45°/45°]-1	1,147	25,937	0,035	0,013	14,705
ABS[45°/45°]-2	1,147	24,092	0,025	0,013	14,980
ABS[45°/45°]-3	1,147	27,054	0,034	0,013	14,963
ABS[45°/45°]-4	1,044	20,851	0,027	0,013	13,455
ABS[45°/45°]-5	1,160	26,585	0,033	0,013	15,125
ABS[45°/45°]-6	1,140	21,074	0,031	0,013	13,402
ABS[45°/45°]-7	1,188	23,883	0,025	0,013	15,706
ABS[45°/45°]-8	1,219	23,138	0,022	0,013	15,518
ABS[45°/45°]-9	1,255	28,497	0,034	0,013	15,610
ABS[45°/45°]-10	1,121	17,326	0,017	0,013	14,466
Promedio simple	1,149	23,651	0,028	0,013	14,699
Desviación estándar	0,054	2,192	0,005	0,000	0,929
Coefficiente de variación (%)	4,714	9,267	16,341	1,462	6,318

Siguiendo la tendencia del comportamiento de las probetas en la figura anterior, se descartaron los especímenes ABS [45°/45°]-4 y ABS[45°/45°]-6 debido a que se encuentran fuera de tendencia, a esto se sumaron las probetas descartadas anteriormente por el intervalo de confianza y falla durante la prueba de tensión. De esta manera, se logró disminuir los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada una de las propiedades mecánicas a evaluar en esta investigación, sin dejar a un lado que la normativa exige mínimo 5 probetas para la valides de los resultados, los cuales fueron consignados en la Tabla 25.

Tabla 25. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [45°/45°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,172	24,727	0,028	0,013	15,207
Desviación estándar	0,031	1,463	0,006	0,000	0,405
Coefficiente de variación (%)	2,641	5,915	19,711	1,733	2,663

En la Figura 58 se expone el comportamiento mecánico de la configuración ABS[45°/45°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

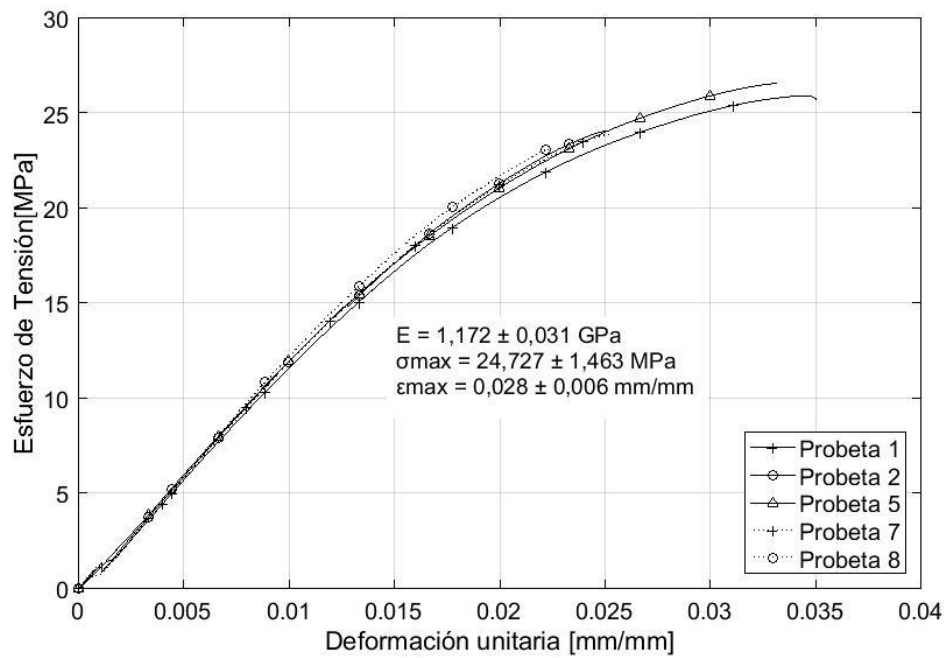


Figura 58. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/45°] probetas seleccionadas.

La Figura 59 muestra el comportamiento de la zona elástica con el fin de apreciar con mayor detalle la similitud de las probetas seleccionadas con base en el I.C y el descarte por tendencia, con valores promedio de 15,207 MPa y 0,013 mm/mm para el esfuerzo de transición y la deformación de transición respectivamente identificando el punto de transición para la zona elástica y plástica.

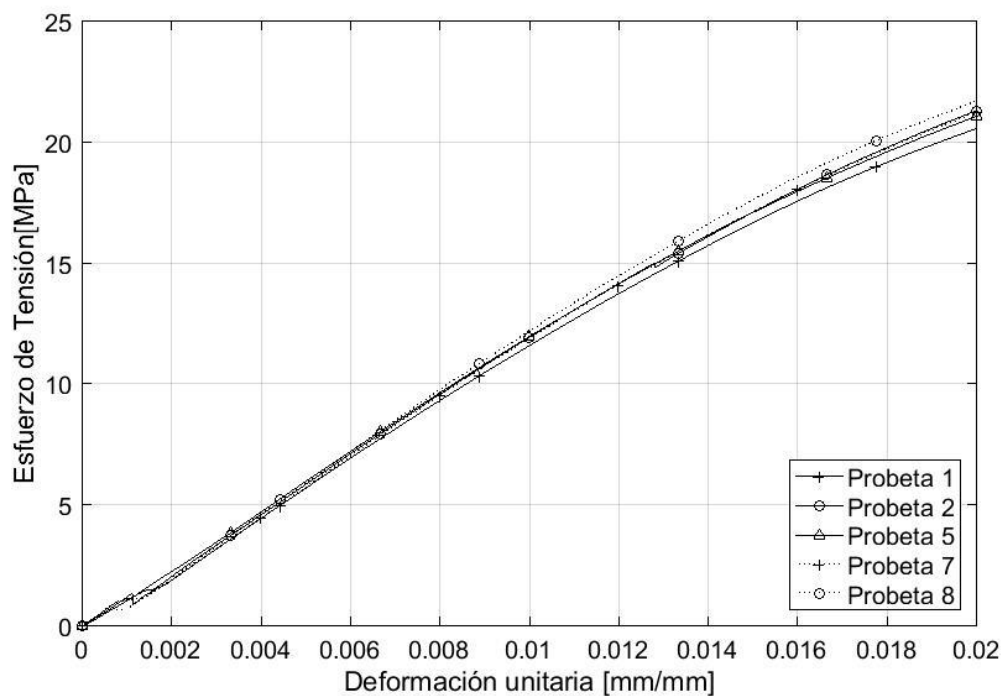


Figura 59 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS [45°/45°].

6.2.3. ABS [90°/90°].

Se utilizaron 10 especímenes sujetos a pruebas de tensión para esta configuración. No existió falla alguna durante el ensayo mecánico para la totalidad de las muestras.

Aplicando el intervalo de confianza se descartaron las probetas ABS[90°/90°]-6, ABS[90°/90°]-7 Y ABS[90°/90°]-9 debido a que los valores de esfuerzo máximo se encuentran por fuera del rango establecido en el Anexo 7. No obstante cabe resaltar la exigencia de la normativa ASTM D3039 de un mínimo de cinco probetas asegurando la validez de los resultados.

Se puede observar en la Figura 60 el comportamiento del esfuerzo máximo con respecto a la deformación unitaria del conjunto de probetas. Se resalta que el punto de ruptura de

cada espécimen presenta valores cercanos respecto a la deformación unitaria, sin embargo, su respectivo esfuerzo de tensión es variable.

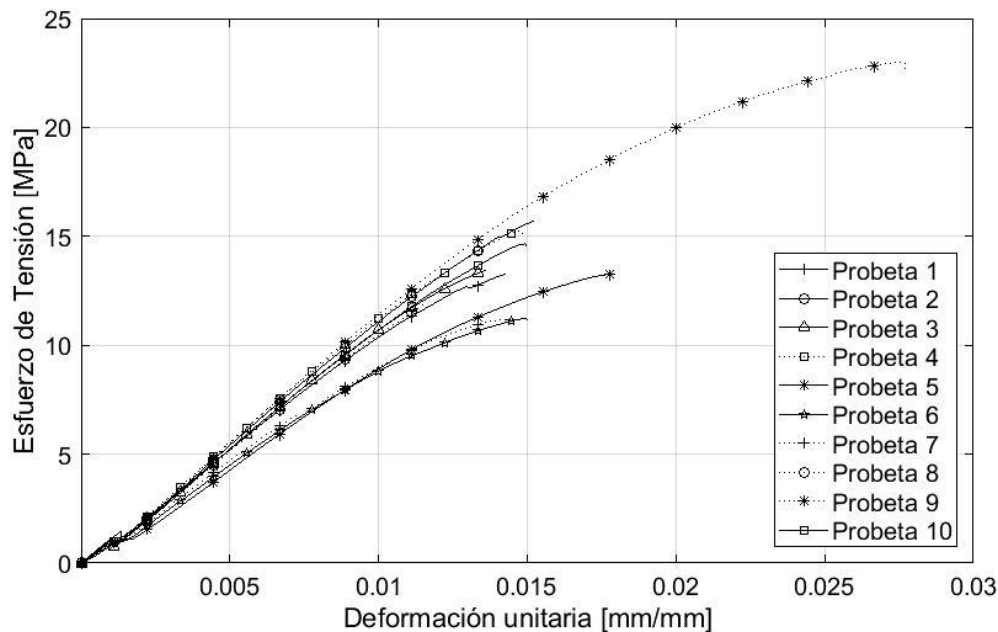


Figura 60. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS[90°/90°].

Debido a que el punto de ruptura se presentó en el esfuerzo máximo a tensión la deformación unitaria máxima obtuvo un promedio simple de 0,015 mm/mm, por ende, el sentido de impresión analizado en esta sección presenta características de un material frágil.

En la Tabla 26 son consignados los valores de las propiedades mecánicas como el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación de transición para el conjunto de probetas en estudio. Además, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las propiedades mencionadas previamente.

Tabla 26. Características mecánicas de cada probeta de ABS[90°/90°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[90°/90°]-1	1,023	13,248	0,014	0,013	12,123
ABS[90°/90°]-2	1,023	15,686	0,015	0,014	14,906
ABS[90°/90°]-3	1,023	13,454	0,014	0,012	12,745
ABS[90°/90°]-4	1,130	15,243	0,015	0,014	14,605
ABS[90°/90°]-5	0,931	13,251	0,018	0,014	11,640
ABS[90°/90°]-6	0,854	11,211	0,015	0,013	10,215
ABS[90°/90°]-7	0,866	11,168	0,014	0,015	10,422
ABS[90°/90°]-8	1,096	11,896	0,012	0,011	11,786
ABS[90°/90°]-9	1,204	22,983	0,028	0,014	16,356
ABS[90°/90°]-10	1,083	14,654	0,015	0,014	14,111
Promedio simple	1,044	13,919	0,015	0,013	13,131
Desviación estándar	0,066	1,331	0,002	0,001	1,383
Coefficiente de variación (%)	6,284	9,559	12,823	8,871	10,535

Al analizar el comportamiento de las probetas en la figura anterior, se descartaron las probetas ABS[90°/90°]-5 y ABS[90°/90°]-1 debido a que se encuentran fuera de tendencia. Estas se suman a las probetas anteriormente descartadas por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión, manteniendo el número mínimo de cinco especímenes exigido por la normativa. En la Tabla 27 se obtuvieron los valores promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación de cada una de las propiedades mecánicas de las probetas seleccionadas.

Tabla 27. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [90°/90°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,071	14,187	0,014	0,013	13,379
Desviación estándar	0,047	1,530	0,002	0,001	1,333
Coefficiente de variación (%)	4,407	10,786	10,815	9,380	9,965

En la Figura 61 se presenta el comportamiento mecánico de la configuración ABS[90°/90°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de

promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

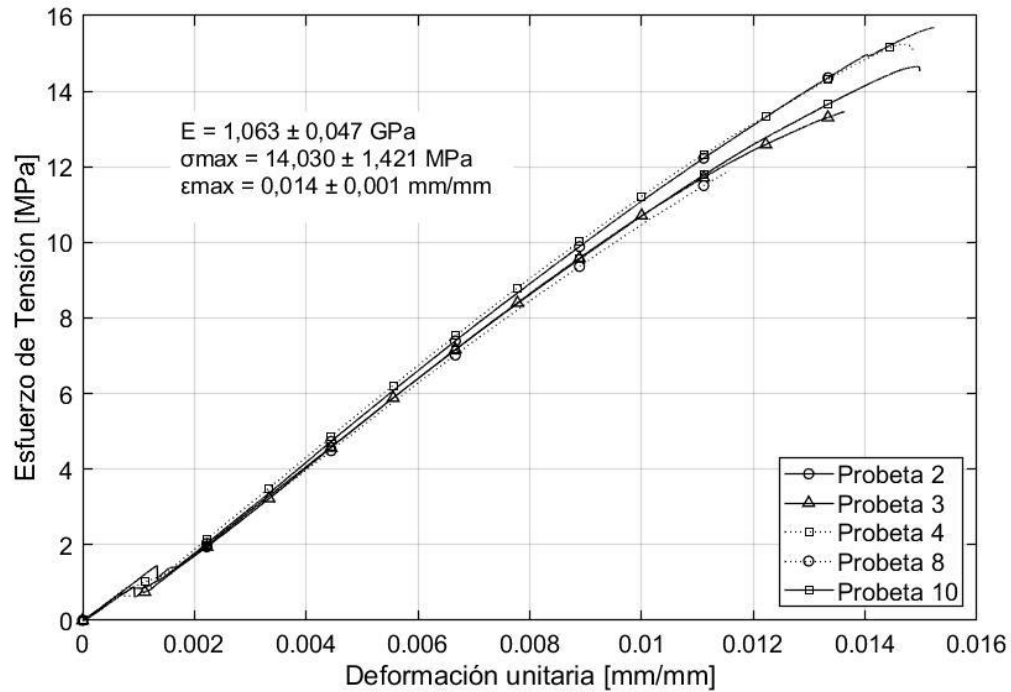


Figura 61. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [90°/90°] probetas seleccionadas.

En la Figura 62 evidencia la zona elástica de la totalidad de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia, cuya deformación de transición tiene un valor promedio de 13,379 MPa y una deformación de transición promedio de 1,333 mm/mm estableciendo el punto de transición.

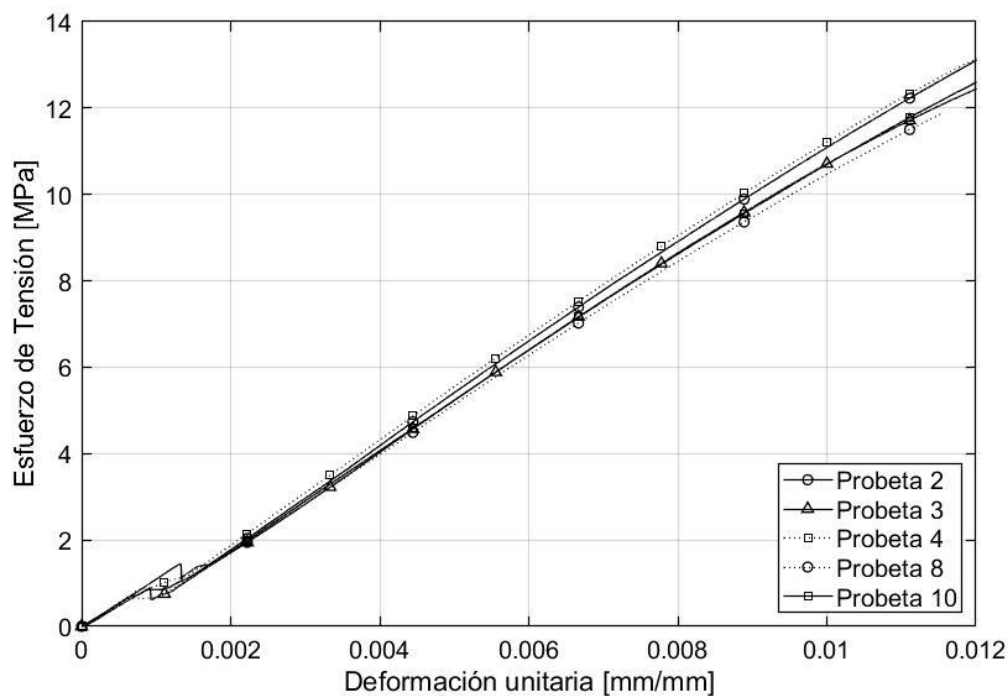


Figura 62. Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS[90°/90°].

6.2.4. ABS [0°/90°].

De esta configuración, se sometieron a prueba 10 probetas para el ensayo de tensión. De este conjunto ninguno de los especímenes presentó falla estructural debido a deslizamiento en las mordazas. Según el intervalo de confianza establecido en el Anexo 7 se descartaron las probetas ABS[0°/90°]-1, ABS[0°/90°]-7, ABS[0°/90°]-8 y ABS[0°/90°]-9 debido a que el esfuerzo máximo de cada una de las probetas se encuentra por fuera de la desviación estándar inicial. No obstante, se cumple con la exigencia mínima establecida por la normativa ASTM D3039 de al menos cinco pruebas exitosas para considerar la valides de los resultados.

En la Figura 63 se puede observar el comportamiento del esfuerzo a tensión con respecto a la deformación unitaria de las probetas seleccionadas. El punto de ruptura de cada una

de las probetas obtuvo variaciones en cuanto a esfuerzo máximo de tensión y su respectiva deformación unitaria.

La Tabla 28 presenta el módulo de Young, el esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación unitaria de transición para cada una de las probetas que cumplieron satisfactoriamente la prueba.

Adicionalmente, se presenta el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las propiedades mencionadas para la totalidad de las probetas válidas.

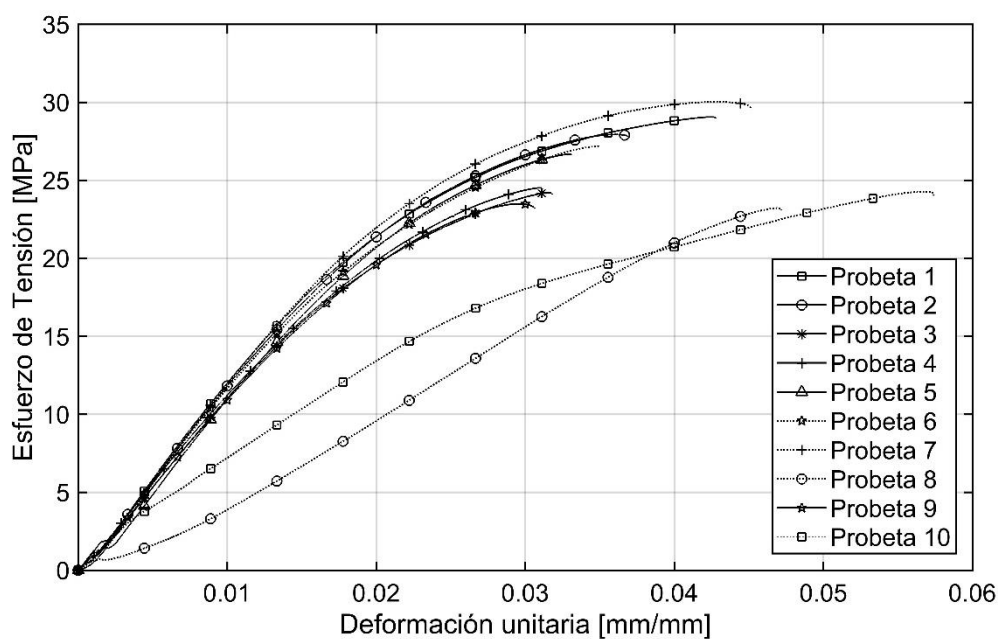


Figura 63. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/90°].

Tabla 28. Características mecánicas de cada probeta de ABS [0°/90°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[0°/90°]-1	1,210	29,070	0,043	0,016	18,241
ABS[0°/90°]-2	1,199	27,949	0,037	0,015	17,597
ABS[0°/90°]-3	1,199	24,222	0,032	0,015	16,684
ABS(0,90)-4	1,087	24,528	0,031	0,016	17,614
ABS[0°/90°]-5	1,182	26,688	0,033	0,015	17,228
ABS[0°/90°]-6	1,161	27,180	0,035	0,015	17,665
ABS[0°/90°]-7	1,236	30,039	0,045	0,016	18,546
ABS[0°/90°]-8	5,648	23,229	0,047	0,016	7,171

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[0°/90°]-9	1,080	23,500	0,031	0,016	16,541
ABS[0°/90°]-10	6,304	24,281	0,057	0,022	14,952
Promedio simple	2,022	25,808	0,038	0,016	16,957
Desviación estándar	2,098	1,657	0,010	0,003	1,050
Coefficiente de variación (%)	103,770	6,420	26,499	17,028	6,191

Se puede apreciar que el punto de ruptura, la deformación unitaria presenta valores dispersos, así como su correspondiente esfuerzo de tensión. El promedio simple de la deformación máxima unitaria obtuvo un valor de 0,038 mm/mm el cual se encuentra dentro del rango de la deformación del esfuerzo máximo, el cual presenta el comportamiento de un material frágil debido a que no presenta deformación posterior a alcanzar el esfuerzo máximo de tensión.

Con la finalidad de reducir la desviación estándar y el coeficiente de variación del conjunto de resultados para los especímenes seleccionados, se tuvo en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el intervalo de confianza y falla en la prueba de tensión y adicionalmente se descartó la probeta ABS[0°/90°]-10 debido a que su comportamiento en la figura anterior se encuentra por fuera de tendencia y teniendo en cuenta que la normativa exige un número mínimo de 5 pruebas satisfactorias, se obtuvo las características de las propiedades mecánicas consignados en la Tabla 29.

Tabla 29. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [0°/90°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,166	26,113	0,034	0,015	17,358
Desviación estándar	0,046	1,653	0,002	0,0004	0,415
Coefficiente de variación (%)	3,988	6,330	7,032	2,845	2,389

En la Figura 64 se expone el comportamiento mecánico de la configuración ABS[0°/90°] bajo cargas de tensión de las 6 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

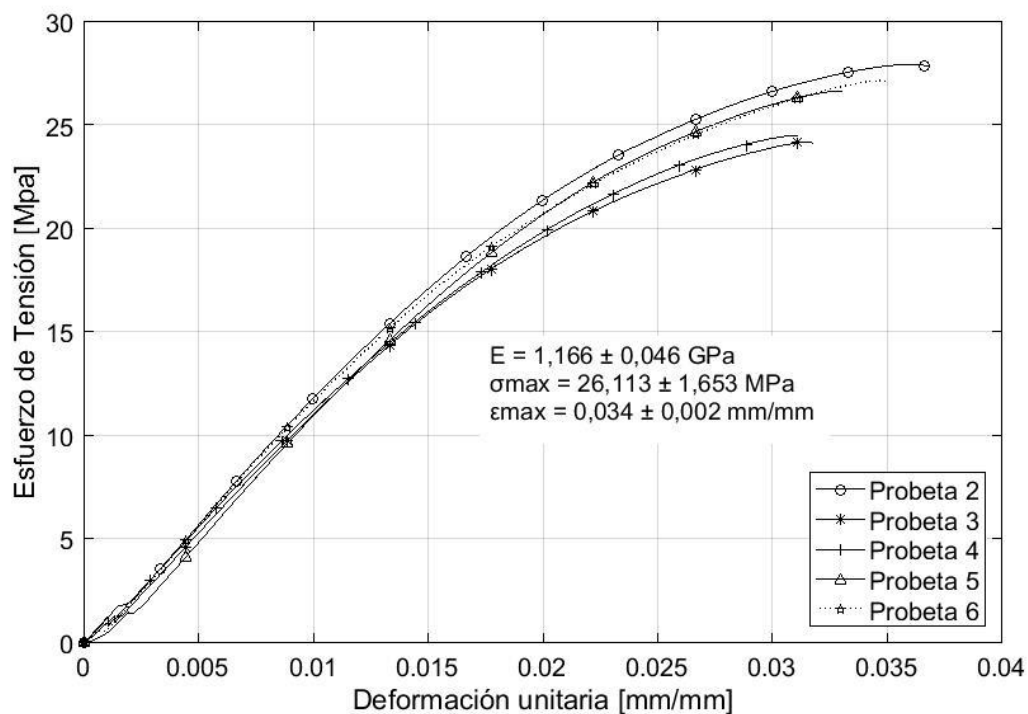


Figura 64. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [0°/90°] probetas seleccionadas.

La zona elástica del conjunto de probetas del material ABS con orientación [0°/90°] se puede apreciar de forma clara en la Figura 65, cuyo esfuerzo de transición presenta un valor promedio de 17,358 MPa y una deformación promedio de 0,015 mm/mm estableciendo el punto de transición de la zona elástica y plástica de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia.

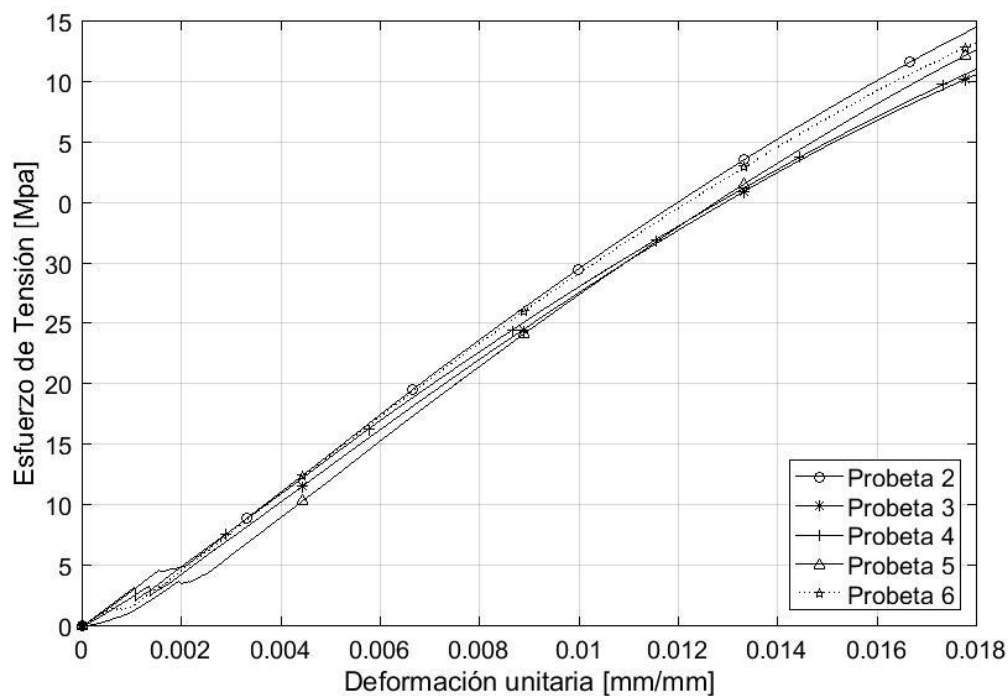


Figura 65 Comportamiento zona elástica de probetas de configuración ABS [0°/90°].

6.2.5. ABS [45°/-45°].

A continuación, se presenta el análisis de los especímenes con orientación [45°/-45°] para el material ABS donde fueron sujetas a pruebas un total de 10 probetas. Se presentó una falla por deslizamiento de mordazas teniendo la presencia de tabs durante el ensayo de tensión en la probeta ABS[45°/-45°]-3, por lo tanto se descartó para el análisis. Con base en el intervalo de confianza tal y como se puede observar en el Anexo 7 fueron descartadas las probetas ABS[45°/-45°]-1, ABS[45°/-45°]-6, ABS[45°/-45°]-7 y ABS[45°/-45°]-9, debido a que no se encontraban dentro de la desviación estándar inicial. Cabe tener claridad que la norma ASTM D3039 exige cinco pruebas exitosas para garantizar resultados certeros.

A continuación, en la Figura 66, se da a conocer la variación del esfuerzo a tensión en relación con la deformación unitaria de las probetas que no fueron descartadas. Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, se observa que las muestras presentan diferentes magnitudes de esfuerzos máximos y deformaciones unitarias en el punto de ruptura. Además, para la totalidad de los especímenes se presentó deformación luego de alcanzar el esfuerzo máximo a tensión. La deformación máxima de todos los especímenes obtuvo una deformación unitaria promedio de 0,063 mm/mm. La deformación del esfuerzo máximo de cada una de las probetas se presenta dentro de un rango entre 0,03 y 0,05 mm/mm, teniendo características semejantes al comportamiento de un material dúctil.

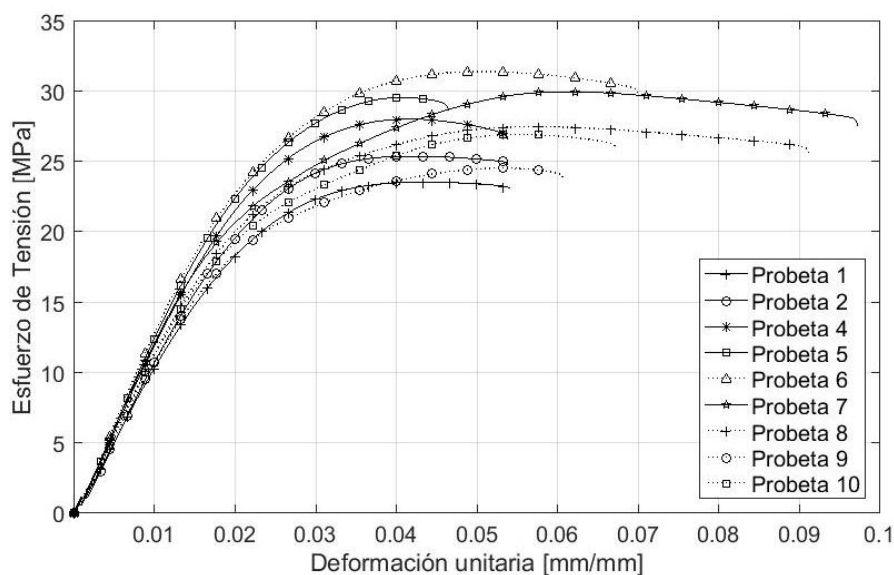


Figura 66. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/-45°].

En la Tabla 30 se consignan los resultados del módulo de Young, esfuerzo máximo de tensión soportado, la deformación unitaria máxima, el esfuerzo de transición y la deformación de transición para todas las muestras de material ABS con orientación [45°/-45°] que cumplieron satisfactoriamente la prueba. Así mismo, se presentan los resultados

del promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las propiedades mencionadas anteriormente.

Tabla 30. Características mecánicas de cada probeta de ABS [45°/-45°].

PROBETA	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
ABS[45°/-45°]-1	0,944	23,575	0,054	0,019	17,241
ABS[45°/-45°]-2	0,944	25,420	0,054	0,020	19,526
ABS[45°/-45°]-4	1,113	28,065	0,054	0,019	22,475
ABS[45°/-45°]-5	1,163	29,595	0,047	0,020	22,352
ABS[45°/-45°]-6	1,179	31,451	0,070	0,020	23,686
ABS[45°/-45°]-7	1,117	30,011	0,097	0,019	21,616
ABS[45°/-45°]-8	1,030	27,523	0,091	0,020	19,857
ABS[45°/-45°]-9	0,998	24,578	0,061	0,020	17,944
ABS[45°/-45°]-10	1,050	26,958	0,067	0,019	18,563
Promedio simple	1,060	27,512	0,063	0,020	20,555
Desviación estándar	0,083	1,527	0,018	0,0005477	1,763
Coeficiente de variación (%)	7,869	5,550	28,332	0,001	8,576

Al repetir el procedimiento y teniendo en cuenta que no se descartó ninguno de los especímenes que presentara un comportamiento fuera de tendencia en la figura anterior, y además de tener en cuenta las probetas excluidas anteriormente por el I.C y falla en la prueba de tensión, se evaluaron las probetas aptas cumpliendo con el número mínimo de probetas válidas acorde a la normativa, obteniendo los valores de promedio simple, desviación estándar y el coeficiente de variación para cada una de las propiedades mecánicas como se observa en la Tabla 31.

Tabla 31. Características mecánicas de la muestra representativa de probetas de ABS [45°/-45°].

Característica	E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{trans} [mm/mm]	σ_{trans} [MPa]
Promedio simple	1,114	28,740	0,066	0,020	20,555
Desviación estándar	0,071	2,621	0,020	0,001	1,763
Coeficiente de variación (%)	6,379	9,119	29,979	2,795	8,576

En la Figura 67 se el comportamiento mecánico de la configuración ABS[45°/-45°] bajo cargas de tensión de las 5 probetas seleccionadas y los valores de promedio de esfuerzo máximo de tensión, deformación máxima de tensión y módulo de elasticidad.

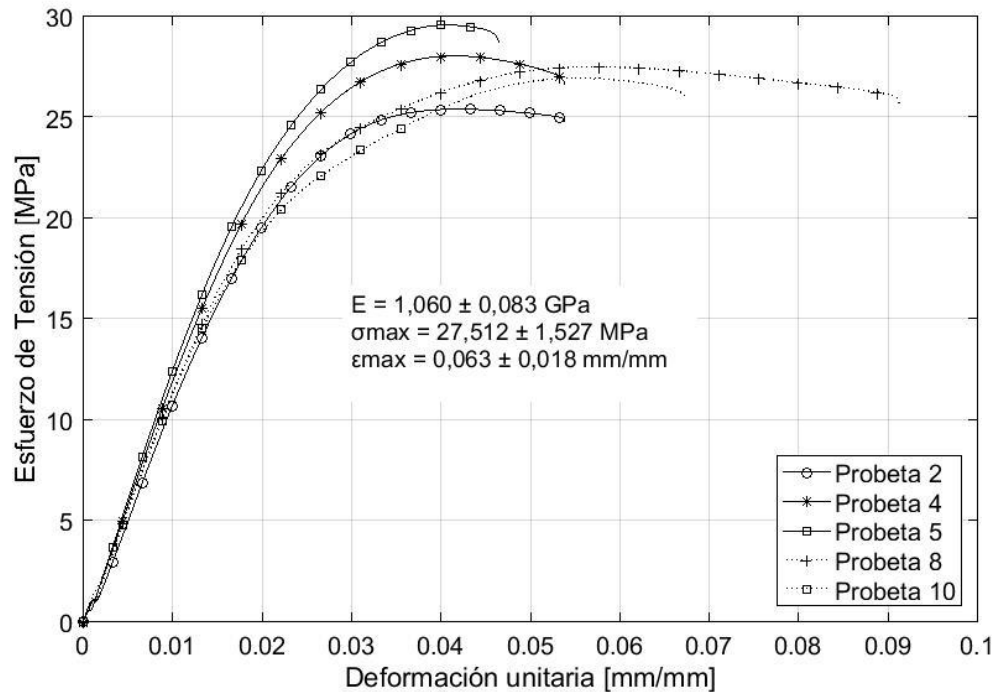


Figura 67. Esfuerzo de tensión vs deformación. ABS [45°/-45°] probetas seleccionadas.

En la Figura 68 se observa la zona elástica de la totalidad de los especímenes seleccionados con base en el I.C y el descarte por tendencia. El esfuerzo de transición tiene un valor promedio de 20,555 MPa y una deformación de transición promedio de 0,020 mm/mm, estableciendo el punto de transición de la zona plástica y elástica del conjunto de probetas [45°/-45°].

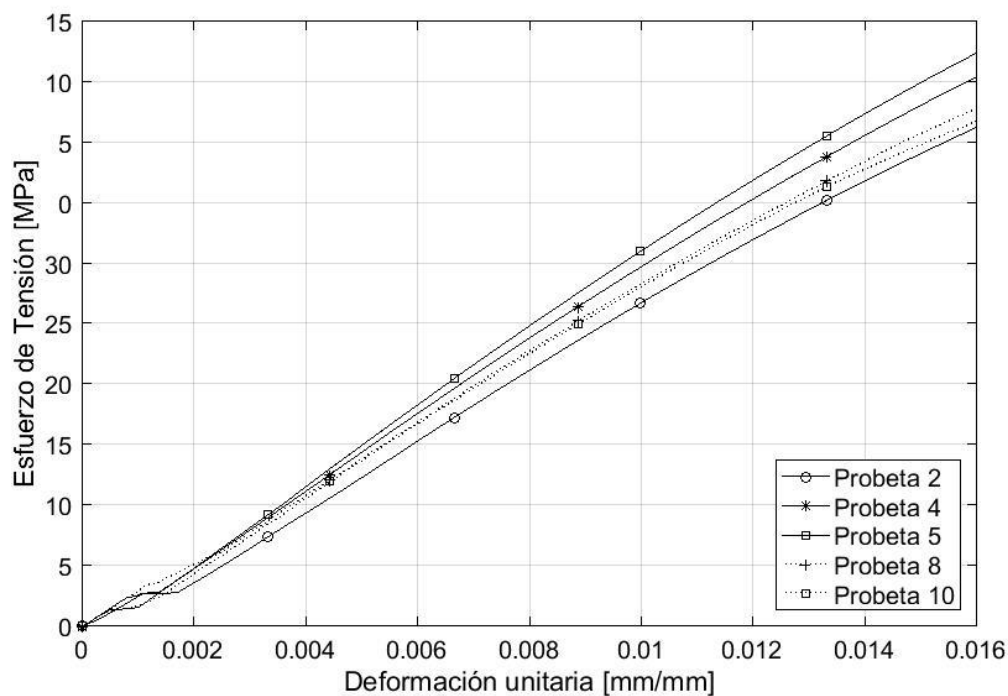


Figura 68 Comportamiento zona elástica de probetas de ABS [45°/-45°].

6.3. Comparación de métodos para calcular el módulo de Young

En este apartado se realiza la comparación entre los resultados obtenidos a partir de dos métodos de cálculo para el módulo de elasticidad. Se refiere al método sugerido por la norma ASTM D 3039 y la norma E 111 empleando el método de mínimos cuadrados como el método “A” y el método aritmético para calcular la pendiente de una recta dados dos puntos, método “B”

En la Tabla 32 se presenta los resultados obtenidos y previamente analizados en el inciso anterior y los resultados de el modulo de elasticidad calculándolos por medio del método “B”.

Tabla 32. Comparación de metodos de calculo para el módulo de elasticidad

CONFIGURACIÓN	MÓDULO DE YOUNG (A) [MPa]	MÓDULO DE YOUNG (B) [MPa]	% DE ERROR
PLA [0°,0°]	1,978	1,985	0,350
PLA [45°,45°]	1,917	1,928	0,582
PLA [90°,90°]	2,276	2,149	5,578
PLA [0°,90°]	2,160	2,215	2,553
PLA [45°,-45°]	2,102	2,009	4,432
ABS [0°,0°]	1,326	1,155	12,882
ABS [45°,-45°]	1,341	1,172	12,572
ABS [90°,90°]	1,181	1,063	9,982
ABS [0°,90°]	1,255	1,166	7,065
ABS [45°,-45°]	1,306	1,114	14,676

En la Tabla 32 se puede apreciar como los porcentajes de error oscilan entre el 0,3% y el 5% para PLA, mientras que el porcentaje de error en el material ABS oscila entre el 7% y el 14%. El rango de porcentajes de error para el material PLA varía significativamente con respecto al rango de error presentado en el material ABS; el fenómeno se debe a que las curvas de la zona elástica del material PLA tienden a la linealidad en mayor proporción que las de el material ABS.

Por otra parte, los métodos presentan diferentes resultados debido a que el método “A” toma en cuenta cada uno de los puntos que construyen la curva de la zona elástica mientras que el método “B” considera la idealización de una línea recta a partir de la selección de dos puntos arbitrarios previos al punto de transición.

6.4. Esfuerzo máximo de tensión y Modulo de Young.

En este numeral se presenta los resultados cuantitativos referentes a las propiedades mecánicas para la totalidad de conjuntos de orientaciones de impresión.

Teniendo en cuenta los resultados de la Figura 69, se pudo establecer que entre las probetas del material termoplástico PLA, la configuración $[0^\circ/0^\circ]$ presentó la mayor resistencia en términos del esfuerzo de tensión máximo. Por otra parte, la orientación de impresión con el menor esfuerzo de tensión máximo corresponde al set de probetas de orientación $[45^\circ/45^\circ]$. Para los especímenes impresos en material ABS se encontró que la orientación que presenta la mayor resistencia en términos del esfuerzo de tensión máximo corresponde a la configuración $[0^\circ/0^\circ]$. Por el contrario, la orientación $[90^\circ/90^\circ]$ obtuvo el menor esfuerzo de tensión máximo.

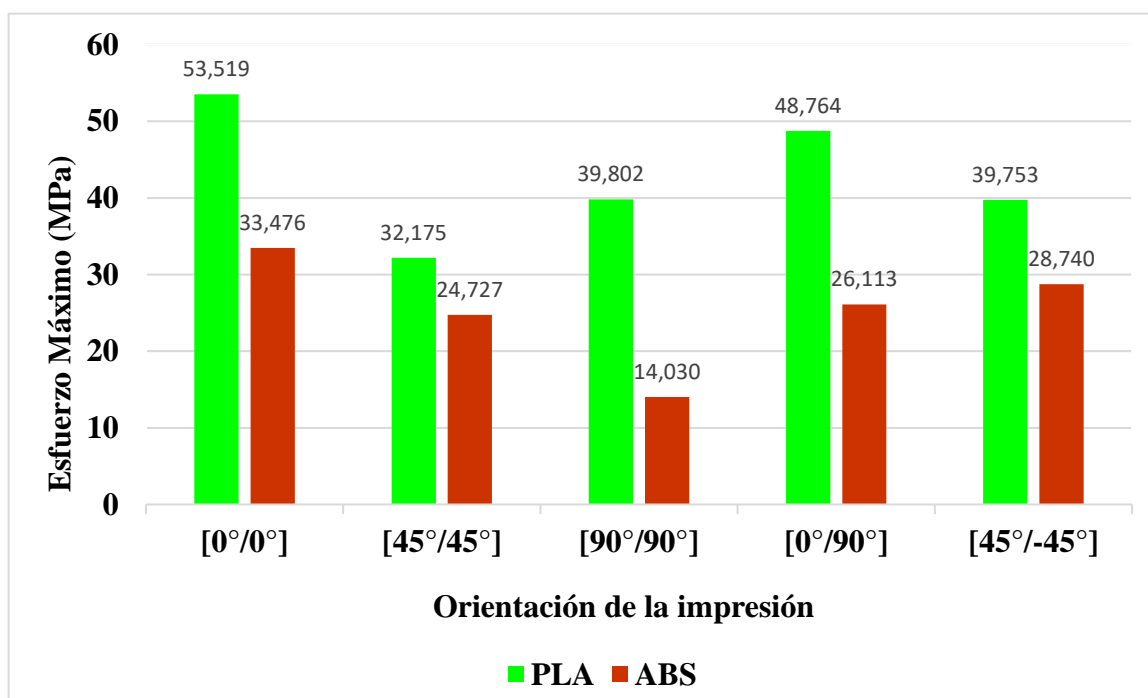


Figura 69. Comparación de esfuerzo máximo de tensión de los materiales PLA y ABS.

Teniendo en cuenta estos resultados, las probetas que presentan mayor resistencia en términos del esfuerzo máximo a tensión, son aquellas fabricadas en PLA con una orientación de impresión de $[0^\circ/0^\circ]$. Adicionalmente, las probetas fabricadas en ABS

presentan menores esfuerzos de tensión máximos en comparación con aquellas fabricadas en el PLA para la totalidad de las orientaciones.

En la *Figura 70* se presentan los valores correspondientes al módulo de Young, tanto para las probetas fabricadas en PLA como en ABS, para cada una de las orientaciones de impresión teniendo en cuenta solo la zona elástica. Las probetas que presentan un mayor módulo de Young son las fabricadas en PLA bajo una orientación $[0^\circ/90^\circ]$. En cambio, la configuración que presentó el menor módulo fue PLA con orientación $[45^\circ/45^\circ]$.

Respecto al material ABS, el máximo módulo de Young se presentó en la configuración $[0^\circ/0^\circ]$, seguido de la orientación $[45^\circ/45^\circ]$. Entre todas las configuraciones sometidas a pruebas, el menor módulo de Young se obtuvo en la orientación de $[90^\circ/90^\circ]$ constituido de material ABS. Acorde a los hallazgos de la investigación, el material que presenta mejores características para soportar una carga a tensión en comparación con la deformación, sin importar la dirección de impresión, es el PLA.

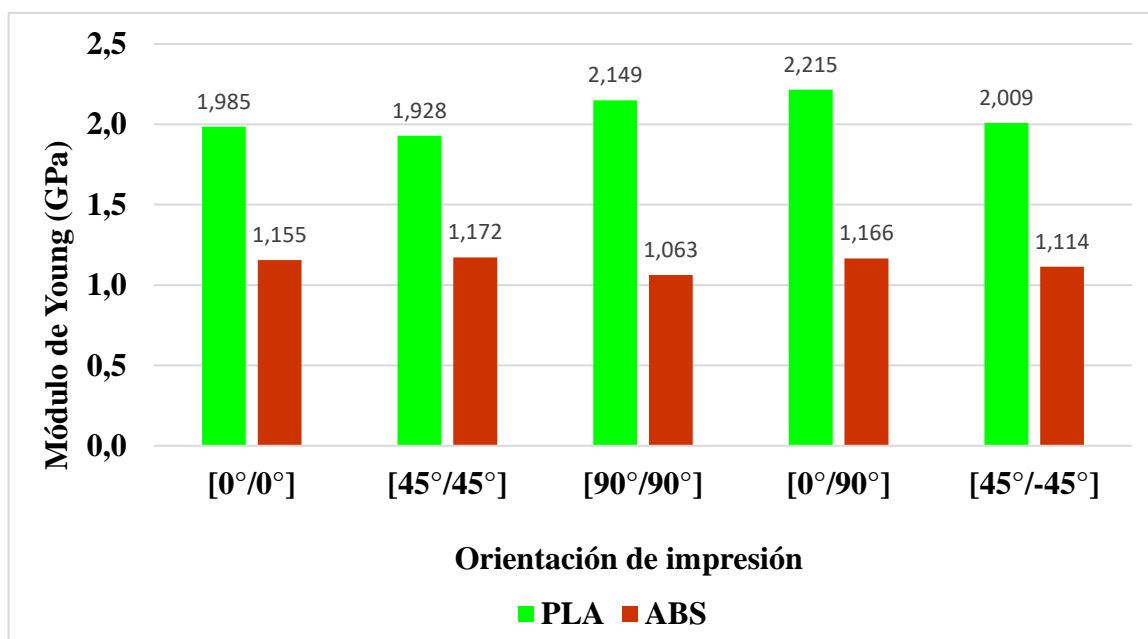


Figura 70. Comparación de Modulo de elasticidad de los materiales PLA y AB

6.5. Punto de transición.

Como se observa en la Figura 71, se realiza para cada una de la totalidad de las muestras una aproximación lineal de la respectiva recta tangente tanto para la zona elástica como para la zona plástica. Debido a que la zona plástica tiene un comportamiento variable respecto a la zona elástica, el punto de transición correspondiente para cada una de las probetas es variable teniendo en cuenta cada una de las orientaciones. En el Anexo 8, se muestra la representación gráfica de cada uno de los especímenes con el fin de obtener el correspondiente punto de transición hallado en cada una de las tablas de cada conjunto de probetas.

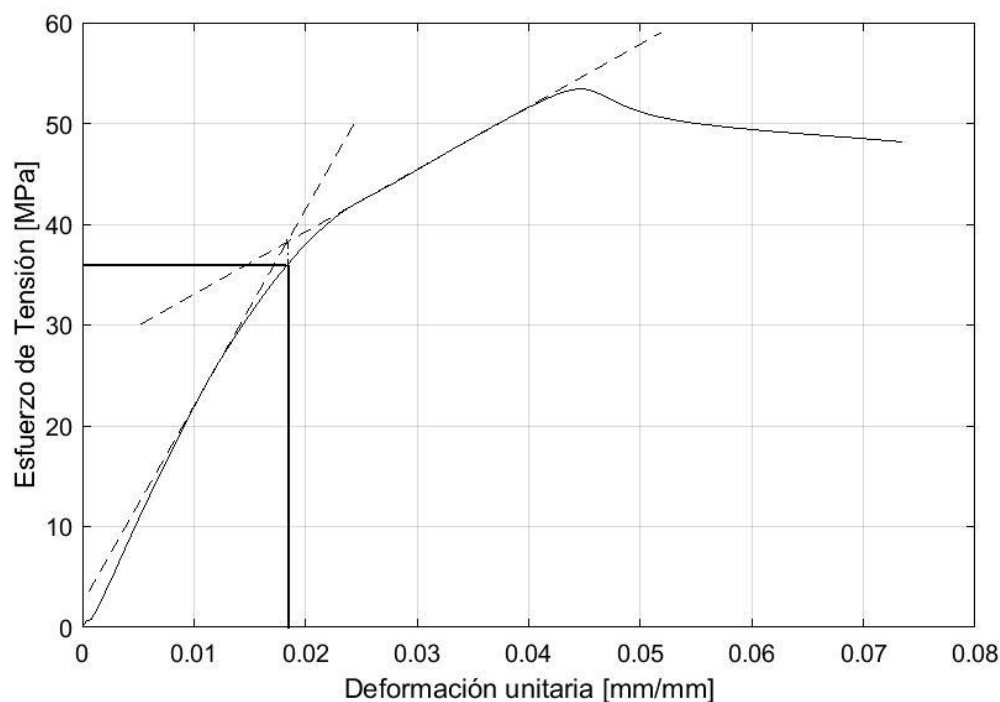


Figura 71. Punto de Transición mediante aproximación lineal para la probeta PLA [0°/0]-1

6.6. Modo de Falla.

En esta sección del documento se presentan los resultados de cada una de las probetas de acuerdo con el código correspondiente al tipo de falla según se muestra en la Figura 37, registrando para cada una de las pruebas de las 100 probetas designadas en el desarrollo de este proyecto. Para esto hace uso de la norma ASTM D3039 donde se especifica los diferentes tipos de ruptura que se pueden presentar durante la prueba mecánica a tensión consignados en el Anexo 9 y Anexo 10.

En primer lugar, el tipo de falla que presentó mayor frecuencia en todas las probetas fue la ruptura lateral en el tipo de falla. Otra característica importante es la ruptura angular donde se visualiza mayormente en los especímenes que tienen orientaciones de impresión [45 °/-45 °]. En los materiales termoplásticos se puede evidenciar que el tipo de orientación influye directamente al tipo de falla que puede presentar el espécimen durante el ensayo de tensión. Cabe destacar que el ABS con orientación [45 °/ -45°] no presenta con mayor frecuencia la ruptura angular en comparación con el PLA. Otro tipo de falla ocasionado únicamente en los especímenes con orientación [0°/0°] del material termoplástico ABS fue la división extensa el cual se relaciona con la propagación de la falla en el sentido paralelo a los filamentos.

Por otra parte, el área de falla predominante para el material ABS fue la zona de longitud de prueba en comparación con el PLA cuya área de falla se presentó tanto en la longitud de prueba como en el tab. Finalmente, la posición de las fallas se mantuvo dentro del límite superior/inferior, así como en el medio.

7. Conclusiones.

- A partir de las pruebas realizadas y de la conformación y acabado de las probetas obtenidas durante el desarrollo del proyecto, se pudo determinar que la mejor temperatura de extrusión en la impresora FlashForge Creator Pro del material PLA del fabricante Prusa Research es de 220°C.
- El material ABS del fabricante Prusa Research requiere de una temperatura de extrusión de 250°C que se encuentra acorde al rango sugerido por el fabricante, permitiendo la fundición completa del material y presentando una adecuada adherencia entre cada una de las capas de material y ente el material y la plataforma de impresión.
- La temperatura de la cama que mejor se acomoda al proceso de impresión de la referencia utilizada de material PLA, fue de 70°C permitiendo la correcta adherencia de la primera capa de material.
- Se requirió el uso de una cama magnética flexible desmontable para la fabricación de las probetas en el material ABS de la referencia seleccionada, con el fin de facilitar el retiro de las piezas debido a la fuerte adherencia de la probeta y la cama de impresión durante el proceso de manufactura.
- La temperatura de la cama de impresión que presentó una mejor adherencia del ABS es de 110°C, ya que retrasa el enfriamiento del material manteniéndolo en su posición durante el proceso de manufactura.

- La altura entre capas utilizada tanto para el material PLA como para el ABS, fue de 0,27 mm el cual asegura la unión adecuada entre capas sucesivas, arrojando la mejor consistencia entre todas las configuraciones probadas.
- La separación entre filamentos, parámetro especificado en el código de impresión, fue fundamental en el proceso de FDM para ABS debido a que permitió la correcta unión entre cada uno de los hilos depositados.
- Hacer uso de un protocolo de control de calidad para la selección de especímenes aptos para ser empleados en pruebas de tensión, reduce en gran medida la probabilidad de fallas prematuras y resultados erróneos debidos a defectos de impresión durante los ensayos destructivos de tensión.
- Los valores de promedios simples y desviación estándar de los parámetros mecánicos obtenidos no eran totalmente fiables debido a la influencia de muestras que se presentaron un comportamiento fuera de tendencia del esfuerzo de tensión vs la deformación unitaria. Sin embargo, el proceso de descarte implementado basado en un intervalo de confianza, fue esencial para obtener resultados fiables y que se acogen a los requisitos de la norma implementada.
- La implementación de tabs en los ensayos de tensión es fue necesaria puesto que la de las probetas con las mordazas transmite una carga que puede inducir a rupturas prematuras e indeseadas de los especímenes de prueba.
- Aplicar una precarga en los ensayos de tensión es innecesario debido a que el error presentado por pandeo en las gráficas obtenidas es mínimo y por lo tanto se puede despreciar para los cálculos realizados en este documento.

- Los dos materiales sometidos a pruebas de tensión presentan un comportamiento diferente. En general, el material PLA presentó mejores características que el material ABS en relación al esfuerzo máximo de tensión soportado antes de la ruptura.
- El sentido de impresión de los especímenes influye directamente en el tipo de ruptura que se presenta, así como en la magnitud del esfuerzo máximo de tensión soportado y el módulo de Young.
- Sin importar el sentido de impresión de los especímenes, la zona que presentó mayor frecuencia de ruptura fue la zona de longitud de prueba.
- La orientación que presentó una mayor deformación después de alcanzar el esfuerzo máximo de tensión corresponde al conjunto de probetas de $[0^\circ/0^\circ]$ en el material termoplástico ABS.
- El material que presenta el mayor esfuerzo máximo a tensión es el PLA con orientación $[0^\circ/0^\circ]$ obteniendo un valor de 53,519 MPa.
- El material que presenta el mayor módulo de Young es el PLA con orientación $[0^\circ/90^\circ]$ obteniendo un valor de 2,215 GPa.
- El material que presenta un mayor comportamiento uniforme en la zona elástica es el PLA en comparación con el ABS.
- La orientación que presenta las mejores características respecto al esfuerzo de tensión máximo y módulo de Young para los dos materiales, es el sentido de impresión $[0^\circ/0^\circ]$.

8. Recomendaciones.

Se sugiere hacer uso del programa de acceso libre Replicator G para la generación del código G, puesto que es compatible con la impresora FlashForge Creator Pro. Así mismo, cuenta con una interfaz de usuario amigable para modificar parámetros de impresión como: velocidad de impresión, altura de capa, diámetro del material a emplear, relación de espesor, temperaturas y tipo y porcentaje de relleno, entre otros. Además, tiene herramientas de pre-visualización tanto del modelo como de la trayectoria de impresión en cada una de las capas que conformaran la probeta.

Se recomienda realizar la calibración de la máquina previa a la impresión garantizando una homogeneidad de filamentos y una adherencia completa entre capas con la finalidad de obtener una impresión acorde a las características geométricas del modelo diseñado. Se sugiere que la máquina de impresión utilizada se precaliente y se mantenga a la temperatura de impresión para PLA de 220°C del extrusor y 70°C de la cama mientras que para el ABS de 250°C en el extrusor y 115°C en la cama, durante al menos 15 minutos antes de la impresión, lo cual contribuirá a la adherencia de la primera capa a la cama de trabajo, así como de filamentos entre cada una de las capas que conforman la probeta, debido a que la cámara de impresión tendrá una temperatura por encima de la temperatura ambiente al momento de iniciar la impresión.

Se aconseja implementar una cama magnética como cama de trabajo para la impresión de probetas en material ABS debido a que favorece la extracción de esta sin ocasionar una deformación geométrica o el desprendimiento de filamentos en las capas inferiores a causa del uso de herramientas para la extracción de esta.

Se sugiere que para futuras impresiones se realice mantenimiento preventivo y correctivo a la máquina de impresión puesto que las impresiones consecutivas en la misma generan el deterioro normal de elementos mecánicos como soportes, varillas, poleas, rodamientos, correas y motores.

Con fin de identificar con certeza el tiempo de solidificación de las piezas realizadas bajo un proceso de modelado por deposición fundida, se sugiere calcular la tasa de enfriamiento de la pieza a tratar.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar un análisis micrométrico del área transversal de los especímenes para constatar porcentajes de área transversal sólida y la existencia de vacíos entre filamentos.

Se recomienda proponer futuras investigaciones encaminadas a determinar otras características mecánicas probetas fabricadas a través de técnicas de modelado por deposición fundida (FDM).

Se sugiere utilizar un software como simplify 3D el cual permite controlar muchas más variables de la impresión.

Se sugiere realizar un estudio estadístico para determinar la cantidad de probetas extra necesarias para asegurar 5 probetas con resultados validos según lo exige la norma ASTM D3039.

Se recomienda calcular experimentalmente la tasa de enfriamiento de los especímenes teniendo en cuenta la temperatura de la probeta, la temperatura del habitáculo de la máquina de impresión y la temperatura del laboratorio.

9. Bibliografía.

- 3D HUBS. (2018). *Introduction to FDM 3D printing*. Obtenido de <http://www.3dhubs.com>
- 3D Systems. (2018). *3S Systems*. Obtenido de <http://es.3dsystems.com>
- Ahn-Sung, H. (2002). Propiedades anisotropicas del material ABS de prototipo rapido. *Rapid Prototyping Journal*, 18.
- Amazing. (2018). *Additive Manufacturing*. Obtenido de <http://www.additivemanufacturing.com>
- ASTM Internacional. (1997). ASTM E111 Standard Test Method for Young`s Modulus, Tangent modulus, and Chord Modulus. United States of America: ASTM.
- ASTM Internacional. (2002). ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Propeties if Polymer Matrix Composite Materials. United States of America: ASTM.
- Balderas, S. (01 de 06 de 2001). *Repositorio*. Obtenido de https://repositorio.itesm.mx/ortec/bitstream/11285/569376/1/DocsTec_1207.pdf
- Bravo, A. (4 de Julio de 2017). *Riull*. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5823/Propiedades%20mecanicas%20de%20componentes%20fabricados%20mediante%20modelado%20por%20deposicion%20fundida.pdf?sequence=1>
- Cardenas, J., & Stewart, C. M. (2015). TENSILE PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID (PLA) ADDITIVE MANUFACTURED PARTS. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Casavola, C., cazzato, A., & Moramarco, V. (2015). Propiedades mecánicas ortotrópicas de piezas de modelado por deposición fundida. *Bari, Materials and Desing*, 10.
- Centro de informacion para la formacion profesional. (09 de Marzo de 2018). *TKNIKA.net*. Obtenido de <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/balsa>
- Cicala, G., Latteri, A., Del Curto, B., Lo Russo, A., Recca, G., & Fare, S. (2017). Engineering thermoplastics for additive manufacturing: a critical perspective with experimental evidence to support functional applications. *JABFM*, 9.
- Corporation, S. (2015). *Shimadzu*. Obtenido de <https://www.ssi.shimadzu.com/sites/ssi.shimadzu.com/files/Products/literature/testing/C224-E057B.pdf>
- Devesa, F., López, J., Samper, M., & Parres, F. (23 de Julio de 2008). *Redisa*. Obtenido de <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A7.pdf>
- Electrónica básica. (2014). *Electronica-basica.com*. Obtenido de <http://www.electronica-basica.com>
- FlashForge corp. (2017). *Creator Pro User Guide*. Zhejiang: FlashForge.
- Forster, A. M. (2015). *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of The Art and Standards Applicability*. Gaithersburg: NIST National Institute of Standars and Technology.

- Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., & Zawadzki, P. (2015). Esfuerzo Maximo de las piezas de ABS producidas por FDM: Un problema de orientacion critica. *Advances in Science and Technology*, 15.
- Griffihs, C., Howarth, J., Rowbotham, A., & Ress , G. (2016). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Journal of Engineering Manufacture*, 11.
- Lidia Yaneth Neita Duarte, E. O. (2011). *Universidad Pontificia Bolivariana*. Obtenido de http://biblioteca.upbga.edu.co/docs/digital_20999.pdf
- NatureWorks. (2017). *NatureWorks* . Obtenido de http://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf?la=en
- NatureWorks LLC. (2017). *Biopolymer 4043D Technical Data Sheet*. Minnetonka: Ingeo.
- Nudelman, N. (2004). *Quimica sustentable* . Santa fe: Argentina.
- PRUSA RESEARCH. (15 de MARZO de 2018). *PRUSA RESEARCH OFICIAL JOSEF PRUSA SHOP*. Obtenido de <https://shop.prusa3d.com/en/filament/40-green-pla-filament-1kg.html>
- R. Hernandez, D. S. (2016). Analisis de las propiedades de tension, compresion y flexion del ABS impreso en 3D basada en la rientacion de impresion usando FDM. *Texas Technical Report*, 16.
- Relaño, P. (2013). *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Simplify3D. (01 de Enero de 2014). *Simplify 3D*. Obtenido de Simplify 3D: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#curling-or-rough-corners>
- Sounderbandian, A. (2008). *Business Statistics*. United States of America: McGraw-Hill.
- Universidad del trabajo del Uruguay. (29 de 09 de 2016). *Campus virtual* . Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/ENSAYOS%20DE%20MATERIALES/RESUMEN%20DE%20TIPOS%20DE%20ENSAYOS..pdf>
- Vargas Henríques, L. (9 de Diciembre de 2004). *Redalyc*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/643/64324305/>
- Velasco Peña, M., Rrodriguez Suarez, J., & Restrepo Ardila, D. (2016). Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM. *Asociacion Española de Ingenieria Mecanica*, 7.