

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO SOBRE EL EFECTO DE LA ORIENTACION
DE LAS CAPAS DE FABRICACION EN LA
RESISTENCIA A LA TENSION Y A LA FLEXION EN
IMPRESIONES 3D MDF**

PRESENTADO POR:

BRYAN ALBERTO RIVAS RUIZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO SOBRE EL EFECTO DE LA ORIENTACION
DE LAS CAPAS DE FABRICACION EN LA
RESISTENCIA A LA TENSION Y A LA FLEXION EN
IMPRESIONES 3D MDF**

Presentado por :

BRYAN ALBERTO RIVAS RUIZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

San Salvador, agosto de 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M.Sc. LEYLA MARINA JIMÉNEZ MONROY

AGRADECIMIENTOS

Siendo este el documento que culmina una etapa que define mucho de lo que será mi vida en adelante, no podría dejar de lado el agradecer a algunas de las personas que me he encontrado por el camino y que de alguna u otra manera extendieron su mano para brindarme su ayuda.

Primeramente y con honor le agradezco a mi familia a quienes dedico este logro y de los cuales Dios sabe la paciencia y el esfuerzo que han puesto de su parte para ayudarme a continuar con mis estudios y que logre forjarme como persona, sobre todo durante esas sesiones de estudio que parecían interminables y en las que muy a mi pesar, no podía dedicarles mi atención.

Agradezco a aquellos amigos y conocidos con los cuales en algún momento del viaje nos tuvimos que apoyar, brindándonos palabras de aliento y esforzándonos juntos con la finalidad de lograr nuestras metas.

También le doy las gracias al personal de PBS El Salvador y de la Universidad Don Bosco que me brindó su apoyo para la obtención de la información y la realización de buena parte de este estudio, el cual sin su ayuda se me hubiera dificultado en gran medida.

Me gustaría dirigir también mi agradecimiento al personal de la Universidad de El Salvador que con su esfuerzo logran forjar profesionales como yo, que apoyaran y dirigirán el futuro de nuestro país.

A todos los mencionados ahora les digo con alegría, muchas gracias.

Bryan Rivas.

Contenido

| | |
|---|-----|
| SIMBOLOGÍA | i |
| OBJETIVOS | ii |
| INTRODUCCIÓN..... | iii |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE LA IMPRESIÓN 3D – MDF..... | 1 |
| 1.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA 3D – MDF..... | 5 |
| 1.2.1. Conceptos básicos | 5 |
| 1.2.2. Maquinaria y sus componentes..... | 6 |
| 1.2.3. Proceso de fabricación con una impresora 3D MDF | 16 |
| 1.3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA IMPRESIÓN 3D – MDF | 18 |
| 1.3.1. Materiales estándar | 19 |
| 1.3.2. Materiales técnicos..... | 20 |
| 1.3.3. Materiales compuestos..... | 21 |
| 1.3.4. Materiales metálicos..... | 23 |
| 1.4. ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES | 23 |
| 1.5. ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES..... | 26 |
| 1.6. NORMATIVA APLICABLE PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE FLEXIÓN EN MATERIALES UTILIZADOS EN LA IMPRESIÓN 3D | 28 |
| 1.6.1. ASTM – D638: Método de ensayo estándar para propiedades de tracción de plásticos..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 1.6.2. ISO – 527: Plásticos – Determinación de las propiedades tensiles . | 31 |
| 1.6.3. ASTM – D790 Métodos de ensayo estándar para propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados y materiales aislantes eléctricos..... | 32 |
| 1.6.4. ISO – 178: Plásticos – Determinación de las propiedades de flexión | 33 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 35 |
| 2.1. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES..... | 35 |
| 2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES A ENSAYAR | 39 |
| 2.2.1. PLA: Ácido Poliláctico | 40 |
| 2.2.2. PAHT – CF15: Poliamida de alta temperatura con 15% de fibra de carbono..... | 42 |
| 2.3. PROCESO DE LOS ENSAYOS | 44 |
| 2.3.1. Proceso de ensayo de tracción basado en la norma ASTM – D638 | 45 |
| 2.3.2. Proceso de ensayo de flexión basado en la norma ASTM – D790.. | 49 |
| 2.4. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS..... | 54 |
| 2.4.1. Diseño de las probetas para el ensayo de tracción | 54 |
| 2.4.2. Diseño de las probetas para el ensayo de flexión | 57 |
| 2.5. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS..... | 59 |
| 2.5.1. Impresión de especímenes XY | 65 |
| 2.5.2. Impresión de especímenes YZ | 68 |
| 2.5.3. Defectos en el material tras la impresión | 72 |

| | |
|--|-----|
| 2.6. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS | 74 |
| 2.6.1. Ensayos de tracción | 74 |
| 2.6.2. Ensayos de flexión | 81 |
| 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 87 |
| 3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENSAYO | 87 |
| 3.2. CÁLCULOS Y GRÁFICAS | 106 |
| 3.2.1. Ensayos de tracción. | 107 |
| 3.2.2. Ensayos de flexión | 121 |
| 3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 147 |
| 3.3.1. Ensayos de tracción | 147 |
| 3.3.2. Ensayo de flexión | 156 |
| CONCLUSIONES..... | 160 |
| RECOMENDACIONES | 163 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 166 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Figura 1 Retrato fotográfico del Dr. Hideo Kodama, junto a su diagrama del equipamiento básico de una impresora tridimensional. | 1 |
| Figura 2 Chuck Hull, el inventor de las impresoras 3D. | 2 |
| Figura 3 Principales tecnologías de impresión 3D. | 3 |
| Figura 4 RepRap versión 1.0 (Darwin)..... | 4 |
| Figura 5 Diferentes aplicaciones de la impresión 3D. | 5 |
| Figura 6 De izquierda a derecha se muestran diferentes impresoras 3D MDF: Creality Ender 3 V2 (3 ejes y 1 cabezal), BCN3D Sigma D25 (3 ejes y 2 cabezales independientes), RotBot (4 ejes y 1 cabezal) y la 5AxisMaker (5 ejes y 1 cabezal de cambio rápido computarizado)..... | 7 |
| Figura 7 Esquema de componentes de un impresor 3D MDF. | 8 |
| Figura 8 Sistema eléctrico y de control de un impresor 3D MDF, se observa en la parte superior derecha la placa base junto a una placa pequeña que es un microcontrolador, en la parte inferior izquierda se pueden observar 2 fuentes de poder, en la parte inferior derecha se observa las placas adicionales para la interfaz de control. | 9 |
| Figura 9 Esquema básico de un sistema de extrusión y calefacción de una impresora 3D MDF..... | 13 |
| Figura 10 Algunos componentes utilizados para transmitir el movimiento en las impresoras 3D MDF..... | 15 |
| Figura 11 Estructura de un impresor 3D MDF. | 16 |
| Figura 12 A la izquierda se muestra un engrane diseñado en Autodesk Fusion 360 y a la derecha se muestra el mismo diseño ya segmentado para la impresión en el software BCN3D Stratos. | 17 |

| | |
|---|----|
| Figura 13 De izquierda a derecha: pieza impresa con soportes, vista inferior de los soportes de la pieza y pieza con soportes retirados. | 18 |
| Figura 14 Pieza impresa en 3D utilizando PLA de color azul. | 20 |
| Figura 15 Engrane impreso en 3D utilizando ABS. | 21 |
| Figura 16 Pieza impresa utilizando PAHT CF15. | 22 |
| Figura 17 Ejemplo de una configuración para la realización de un ensayo de tracción..... | 25 |
| Figura 18 Comparativa de los diferentes comportamientos de los materiales en el diagrama esfuerzo-deformación. | 26 |
| Figura 19 Configuración básica de un ensayo de flexión. | 27 |
| Figura 20 Ejemplo de un diagrama esfuerzo-deflexión, utilizados para los ensayos de flexión..... | 28 |
| Figura 21 Máquina universal de ensayos de materiales: CMS Metrology WAW-1000D, en el Laboratorio de materiales de la UDB | 45 |
| Figura 22 Nomenclatura de las dimensiones de los especímenes de prueba, utilizada por la norma ASTM - D638 para los tipos I, II, III y V. (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2015). | 54 |
| Figura 23 Comparación de las dimensiones de la probeta tipo I de la norma ASTM D638 con las medidas recomendadas por la norma (probeta de la parte superior de la imagen) y de la probeta con las modificaciones permitidas por la norma (probeta de la parte inferior de la imagen)..... | 56 |
| Figura 24 Comparación de las probetas impresas de tipo I de la norma ASTM D638 con las medidas recomendadas por la norma (probeta de la parte superior de la imagen) y modificaciones permitidas por la norma (probeta de la parte inferior de la imagen)..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 Comparación de las dimensiones de la probeta recomendada por la ASTM D790 (probeta de la parte superior de la figura) y la probeta con las dimensiones ajustadas a las consideraciones hechas para el diseño (probeta de la parte inferior de la figura). | 59 |
| Figura 26 Comparación de las probetas impresas con las dimensiones recomendadas por la ASTM D790 (probeta de la parte superior de la figura) y con las dimensiones ajustadas a las consideraciones hechas para el diseño (probeta de la parte inferior de la figura). | 59 |
| Figura 27 Impresora BCN3D: Epsilon W50. | 60 |
| Figura 28 Impresora Creality: Ender – 3. | 61 |
| Figura 29 Ejemplo de ejes de coordenadas en los especímenes: Rojo – Eje X, Verde – Eje Y & Azul – Eje Z. | 63 |
| Figura 30 Categorización de especímenes de prueba, según la dirección de impresión. | 64 |
| Figura 31 Interfaz de usuario de Ultimaker Cura (Izquierda) y BC3D Stratos (Derecha) al establecer los ajustes del perfil de impresión. | 66 |
| Figura 32 Impresión de prueba de un espécimen XY para ensayo de tracción. | 67 |
| Figura 33 Impresión por lotes de los especímenes XY. | 68 |
| Figura 34 Estructuras de impresión de los especímenes YZ, nótese las vigas de sujeción resaltadas en rojo. | 69 |
| Figura 35 Impresión de los especímenes YZ. | 71 |
| Figura 36 Mecanizado posimpresión de los especímenes YZ de PLA. | 72 |
| Figura 37 Defectos visibles en el material impreso. | 73 |
| Figura 38 Defectos en el material impreso, visto a través de un microscopio digital a 1600X. | 73 |

| | |
|---|-----|
| Figura 39 Exposición al ambiente de los especímenes de ensayo de tracción, para el acondicionamiento al ambiente del laboratorio..... | 75 |
| Figura 40 Toma de dimensiones y categorización de especímenes de ensayo de tracción..... | 75 |
| Figura 41 Probetas de tensión acopladas a la máquina de ensayo con un extensómetro: A la izquierda una probeta fabricada en PLA y a la derecha una fabricada en PAHT CF15..... | 79 |
| Figura 42 Ejemplo de previsualización en pantalla de los resultados de un ensayo de tracción..... | 80 |
| Figura 43 A la izquierda el reporte generado por la máquina al terminar un ensayo de tracción y a la derecha el diagrama de esfuerzo – deformación, generado con los datos del reporte..... | 80 |
| Figura 44 Exposición al ambiente de los especímenes de ensayo de flexión, para el acondicionamiento al ambiente del laboratorio..... | 81 |
| Figura 45 Toma de dimensiones y categorización de especímenes de ensayo de flexión..... | 82 |
| Figura 46 Colocación de los especímenes de flexión sobre los rodillos de apoyo..... | 85 |
| Figura 47 A la izquierda el reporte generado por la máquina al terminar un ensayo de flexión y a la derecha el diagrama de carga – desplazamiento, generado con los datos del reporte..... | 86 |
| Figura 48 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 1TXY..... | 108 |
| Figura 49 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 2TXY..... | 108 |
| Figura 50 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 3TXY..... | 109 |
| Figura 51 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 4TXY..... | 109 |
| Figura 52 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 5TXY..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 1TYZ. | 110 |
| Figura 54 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 3TYZ. | 111 |
| Figura 55 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 4TYZ. | 111 |
| Figura 56 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 5TYZ. | 112 |
| Figura 57 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 1TXY. | 112 |
| Figura 58 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 2TXY. | 113 |
| Figura 59 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 3TXY. | 113 |
| Figura 60 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 4TXY. | 114 |
| Figura 61 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 5TXY. | 114 |
| Figura 62 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 5TYZ. | 115 |
| Figura 63 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 6TYZ. | 115 |
| Figura 64 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 1FXY. | 129 |
| Figura 65 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 2FXY. | 129 |
| Figura 66 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 3FXY. | 130 |
| Figura 67 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 4FXY. | 130 |
| Figura 68 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 5FXY. | 131 |
| Figura 69 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 6FXY. | 131 |
| Figura 70 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 1FYZ. | 132 |

| | |
|--|-----|
| Figura 71 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 2FYZ. | 132 |
| Figura 72 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 3FYZ. | 133 |
| Figura 73 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 4FYZ. | 133 |
| Figura 74 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 5FYZ. | 134 |
| Figura 75 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 1FXY. | 134 |
| Figura 76 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 2FXY. | 135 |
| Figura 77 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 3FXY. | 135 |
| Figura 78 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 4FXY. | 136 |
| Figura 79 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 5FXY. | 136 |
| Figura 80 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 1FYZ..... | 137 |
| Figura 81 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 2FYZ..... | 137 |
| Figura 82 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 3FYZ..... | 138 |
| Figura 83 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 4FYZ..... | 138 |

| | |
|---|-----|
| Figura 84 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 5FYZ..... | 139 |
| Figura 85 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 6FYZ..... | 139 |
| Figura 86 Comparación de las fracturas entre los especímenes YZ y XY fabricados en PLA..... | 149 |
| Figura 87 Estrías originadas por la deformación y presentes en los especímenes TXY de PLA..... | 149 |
| Figura 88 Fractura iniciada posiblemente por agujeros creados por burbujas de vapor en el material..... | 152 |
| Figura 89 Fractura en espécimen 3TXY originada por un defecto de impresión llamado costura..... | 152 |
| Figura 90 Fracturas del ensayo de tensión de los especímenes fabricados con PAHT CF15..... | 154 |
| Figura 91 Fracturas relacionadas con defectos en el material, en los especímenes de tensión fabricados con PAHT CF15..... | 155 |
| Figura 92 Fracturas de los especímenes de flexión fabricados en PLA..... | 157 |
| Figura 93 Fracturas de los especímenes de flexión fabricados con PATHC CF15..... | 158 |
| Figura 94 Acercamiento a las fracturas de los especímenes de flexión fabricados en PAHT CF15: A la izquierda las fracturas de todos los especímenes XY, al centro la vista lateral de una de esas fracturas y a la derecha la vista lateral de una fractura de un espécimen YZ..... | 159 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Operacionalización de variables: Primera parte. | 37 |
| Tabla 2 Operacionalización de variables: Segunda parte. | 38 |
| Tabla 3 Tabla de velocidades de ensayo de la norma ASTM D638. (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2015)..... | 48 |
| Tabla 4 Ajustes de interés del perfil de impresión de los especímenes XY..... | 65 |
| Tabla 5 Ajustes de interés del perfil de impresión de los especímenes YZ..... | 70 |
| Tabla 6 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PLA. | 76 |
| Tabla 7 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PAHT CF15..... | 77 |
| Tabla 8 Espesor y ancho de los especímenes de flexión fabricados con PLA. . | 82 |
| Tabla 9 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PAHT CF15..... | 83 |
| Tabla 10 Identificación del material PAHT CF15 ensayado. | 87 |
| Tabla 11 Identificación del material PLA ensayado..... | 88 |
| Tabla 12 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 1TXY..... | 89 |
| Tabla 13 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 2TXY..... | 90 |
| Tabla 14 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 3TXY..... | 91 |
| Tabla 15 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 4TXY..... | 92 |
| Tabla 16 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 5TXY..... | 93 |

| | |
|---|----|
| Tabla 17 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 1TYZ..... | 93 |
| Tabla 18 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 2TYZ, la cual se fracturo durante el acople a las mordazas de la máquina..... | 94 |
| Tabla 19 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 3TYZ..... | 94 |
| Tabla 20 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 4TYZ..... | 94 |
| Tabla 21 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 5TYZ..... | 94 |
| Tabla 22 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 6TYZ, de la cual no fueron guardados los datos por parte de la máquina. | 95 |
| Tabla 23 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1TXY..... | 95 |
| Tabla 24 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2TXY..... | 96 |
| Tabla 25 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3TXY..... | 97 |
| Tabla 26 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4TXY..... | 98 |
| Tabla 27 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5TXY..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 28 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina. | 100 |
| Tabla 29 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina. | 100 |
| Tabla 30 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina. | 100 |
| Tabla 31 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina. | 100 |
| Tabla 32 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5TYZ..... | 100 |
| Tabla 33 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 6TYZ..... | 101 |
| Tabla 34 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 1FXY. | 101 |
| Tabla 35 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 2FXY. | 101 |
| Tabla 36 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 3FXY. | 101 |
| Tabla 37 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 4FXY. | 102 |
| Tabla 38 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 5FXY. | 102 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 39 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 6FXY. | 102 |
| Tabla 40 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 1FYZ..... | 103 |
| Tabla 41 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 2FYZ..... | 103 |
| Tabla 42 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 3FYZ..... | 103 |
| Tabla 43 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 4FYZ..... | 103 |
| Tabla 44 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 5FYZ..... | 103 |
| Tabla 45 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1FXY..... | 104 |
| Tabla 46 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2FXY..... | 104 |
| Tabla 47 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3FXY..... | 104 |
| Tabla 48 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4FXY..... | 105 |
| Tabla 49 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5FXY..... | 105 |
| Tabla 50 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1FYZ..... | 105 |
| Tabla 51 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2FYZ..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 52 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3FYZ..... | 106 |
| Tabla 53 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4FYZ..... | 106 |
| Tabla 54 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5FYZ..... | 106 |
| Tabla 55 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 6FYZ..... | 106 |
| Tabla 56 Ensayo de tracción. Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PLA..... | 116 |
| Tabla 57 Ensayo de tracción. Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 116 |
| Tabla 58 Ensayo de tracción. Puntos máximos de los especímenes fabricados en PLA..... | 116 |
| Tabla 59 Ensayo de tracción. Puntos máximos de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 117 |
| Tabla 60 Ensayo de tracción. Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PLA..... | 117 |
| Tabla 61 Ensayo de tracción. Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 117 |
| Tabla 62 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes XY fabricados con PLA..... | 118 |
| Tabla 63 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PLA..... | 119 |
| Tabla 64 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes XY fabricados con PAHT CF15. | 120 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 65 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PAHT CF15..... | 120 |
| Tabla 66 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 1FXY..... | 123 |
| Tabla 67 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 2FXY..... | 123 |
| Tabla 68 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 3FXY..... | 123 |
| Tabla 69 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 4FXY..... | 124 |
| Tabla 70 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 5FXY..... | 124 |
| Tabla 71 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 6FXY..... | 124 |
| Tabla 72 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 1FYZ..... | 125 |
| Tabla 73 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 2FYZ..... | 125 |
| Tabla 74 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 3FYZ..... | 125 |
| Tabla 75 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 4FYZ..... | 125 |
| Tabla 76 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 5FYZ..... | 125 |
| Tabla 77 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 1FXY. | 125 |
| Tabla 78 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 2FXY. | 126 |
| Tabla 79 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 3FXY. | 126 |
| Tabla 80 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 4FXY. | 126 |
| Tabla 81 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 5FXY. | 127 |
| Tabla 82 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 1FYZ. | 127 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 83 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 2FYZ. | 127 |
| Tabla 84 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 3FYZ. | 127 |
| Tabla 85 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 4FYZ. | 128 |
| Tabla 86 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 5FYZ. | 128 |
| Tabla 87 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 6FYZ. | 128 |
| Tabla 88 Ensayo de flexión: Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PLA..... | 140 |
| Tabla 89 Ensayo de flexión: Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 140 |
| Tabla 90 Ensayo de flexión: Puntos máximos de los especímenes fabricados en PLA..... | 140 |
| Tabla 91 Ensayo de flexión: Puntos máximos de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 141 |
| Tabla 92 Ensayo de flexión: Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PLA..... | 141 |
| Tabla 93 Ensayo de flexión: Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 141 |
| Tabla 94 Ensayo de flexión: Puntos límite del 5 % de deformación de los especímenes fabricados en PLA. | 142 |
| Tabla 95 Ensayo de flexión: Puntos límite del 5 % de deformación de los especímenes fabricados en PAHT CF15..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 96 Ensayo de flexión. Módulo tangente de elasticidad de los especímenes fabricados en PLA..... | 142 |
| Tabla 97 Ensayo de flexión. Módulo tangente de elasticidad de los especímenes fabricados en PAHT CF15. | 143 |
| Tabla 98 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes XY fabricados con PLA. | 144 |
| Tabla 99 Ensayo de flexión: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PLA. | 144 |
| Tabla 100 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes XY fabricados con PAHT CF15..... | 145 |
| Tabla 101 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes YZ fabricados con PAHT CF15..... | 146 |

SIMBOLOGÍA

- R : Velocidad de movimiento de la cruceta o nariz de carga en una máquina de ensayos de flexión.
- L : Claro de viga entre los puntos de apoyo del espécimen en un ensayo de flexión.
- d : Profundidad del haz de viga del espécimen en un ensayo de flexión.
- Z : Velocidad de deformación de la fibra exterior del espécimen o viga en un ensayo de flexión.
- D : Deflexión del punto medio del claro de viga en un espécimen de ensayo de flexión.
- ε_f : Deformación en las fibras exteriores del espécimen o viga en un ensayo de flexión.
- σ_f : Esfuerzo en las fibras exteriores en su punto medio de un espécimen en el ensayo de flexión.
- P : Carga ejercida por nariz de carga sobre el espécimen en un ensayo de flexión.
- b : Ancho del espécimen en el ensayo de flexión.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Obtener información sobre el efecto de la anisotropía en la resistencia a la tensión en piezas impresas en 3D utilizando la tecnología MDF.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de tracción y flexión en probetas obtenidas a partir de la impresión 3D MDF haciendo uso de diferentes perfiles de impresión con distintos materiales como el PLA, fibra de carbono y/o la combinación de éstos.
- Elaborar las fichas técnicas de algunos de los materiales utilizados en la impresión 3D MDF según los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y flexión.
- Comparar las propiedades obtenidas a partir de los perfiles de impresión y materiales comúnmente utilizados en la impresión 3D MDF.

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D ha tomado relevancia en los últimos años, gracias a la ayuda de los usuarios que, haciendo uso del hardware y software libre, lograron expandir el mercado y las aplicaciones de esta tecnología.

El desarrollo tan acelerado de esta tecnología permitió a los usuarios y organizaciones por igual, el probar una gran cantidad de nuevos materiales para la impresión 3D, pero ésta trajo consigo una falta de documentación e investigación sobre las propiedades de los materiales que se estaban desarrollando y los efectos que la impresión 3D tendría sobre esas propiedades.

Al no contar con datos suficientes sobre estos materiales, las aplicaciones de la impresión 3D se han desarrollado en un ambiente doméstico y/o creativo, impidiendo a su vez que esta tecnología pueda alcanzar mercados más enfocados a aplicaciones industriales como piezas o mecanismos finales y funcionales.

Por ello, en el presente documento se muestra un estudio sobre los materiales utilizados en impresión 3D, más concretamente en la tecnología de impresión 3D de modelado por deposición fundida (MDF) la cual es la tecnología más utilizada de impresión 3D; abarcando los principales materiales utilizados por esta tecnología y que son más accesibles al usuario promedio.

Así, el estudio abarca desde aspectos generales de funcionamiento y características de la impresión 3D MDF hasta la realización de ensayos de materiales para la obtención de los datos técnicos de los materiales ensayados, apoyando así a una mejor selección de materiales impresos en 3D en el mercado industrial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE LA IMPRESIÓN 3D – MDF

La impresión 3D vio su nacimiento en la década de 1980 con el proceso de estereolitografía, siendo basada en adaptaciones y avances sobre el concepto de la inyección de tinta.

Los primeros intentos fueron desarrollados como un sistema de prototipado rápido utilizando una aproximación a la creación de prototipos capa por capa, usando resina fotosensible polimerizada por una luz UV. De estos intentos surgió la primera solicitud de patente para un dispositivo de impresión 3D la cual tiene lugar en Japón en 1981, de la mano del Dr. Hideo Kodama (Figura 1) del Instituto Municipal de Investigaciones Industriales de Nagoya, quien inventó 2 métodos de fabricación aditiva con resina foto-sensible, sin embargo, la patente presentada por el Doctor Kodama, fue rechazada.

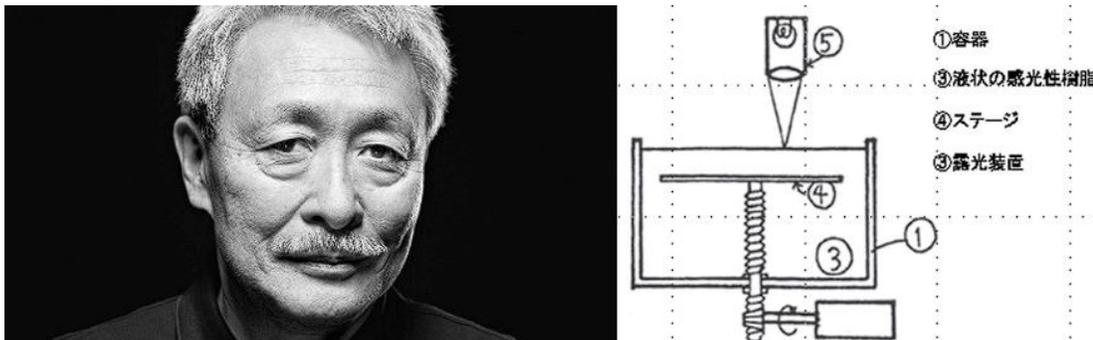


Figura 1 Retrato fotográfico del Dr. Hideo Kodama, junto a su diagrama del equipamiento básico de una impresora tridimensional.

A la vez que el Dr. Kodama, un equipo francés de ingenieros conformado por Alain Le Méhauté, Olivier de Witte y Jean-Claude André, se interesó por la tecnología de fabricación mediante solidificación de resinas foto-sensibles

curadas con luz UV y como resultado de interés, el 16 de julio de 1984 presentaron su patente para el proceso de estereolitografía a través de la compañía General Eléctrica Francesa (ahora Alcatel-Alsthom) y CILAS (The Laser Consortium) y al igual que en el caso del Dr. Kodama, la patente fue abandonada por la compañía bajo la razón de “falta de perspectiva comercial”.

La tecnología de impresión 3D fue introducida al mercado industrial por Chuck Hull (Figura 2) y su compañía 3D Systems, en la cual, gracias a que su patente si fue aceptada, se dice que inventó la estereolitografía y por lo tanto la impresión 3D, un proceso de impresión que permite que un objeto en 3D se cree a partir de datos digitales.

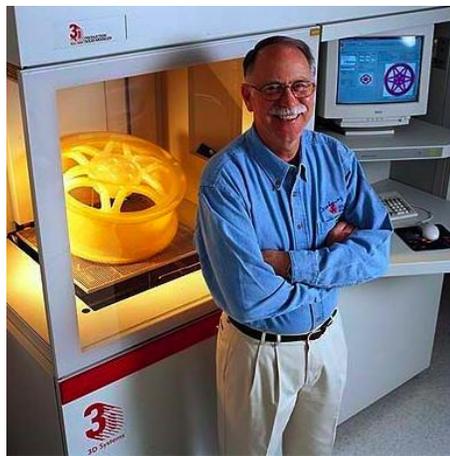


Figura 2 Chuck Hull, el inventor de las impresoras 3D.

Hull definió el proceso como un «sistema para generar objetos tridimensionales mediante la creación de un patrón transversal del objeto a formar», pero esto ya había sido inventado por Kodama. La contribución de Hull fue el diseño del formato de archivo STL (STereoLithography) ampliamente aceptado por el software de impresión 3D, así como las estrategias digitales de corte y relleno comunes a muchos procesos actuales.

El término «impresión en 3D» se refería originalmente a un proceso que empleaba cabezales de impresión de chorro de tinta estándar y personalizados. Esto dio paso a otros métodos de impresión 3D como el Modelado por Deposición Fundida (MDF), desarrollado por S. Scott Crump en la misma década y comercializado por Stratasys, siendo la tecnología de impresión 3D más utilizada por la mayoría de las impresoras 3D hasta la fecha, especialmente los modelos aficionados y orientados al consumidor.

Sin embargo, cabe aclarar que además de las impresoras 3D que funcionan con el principio estereolitografía (SLA) y las de modelado por deposición fundida (MDF o FDM por sus siglas en inglés), existe una tercera tecnología llamada “Sinterizado láser selectivo” (SLS por sus siglas en inglés) la cual usa como base polvos que son polimerizados con un láser. A continuación, en la Figura 3 se presentan las tecnologías de impresión 3D anteriormente mencionadas.

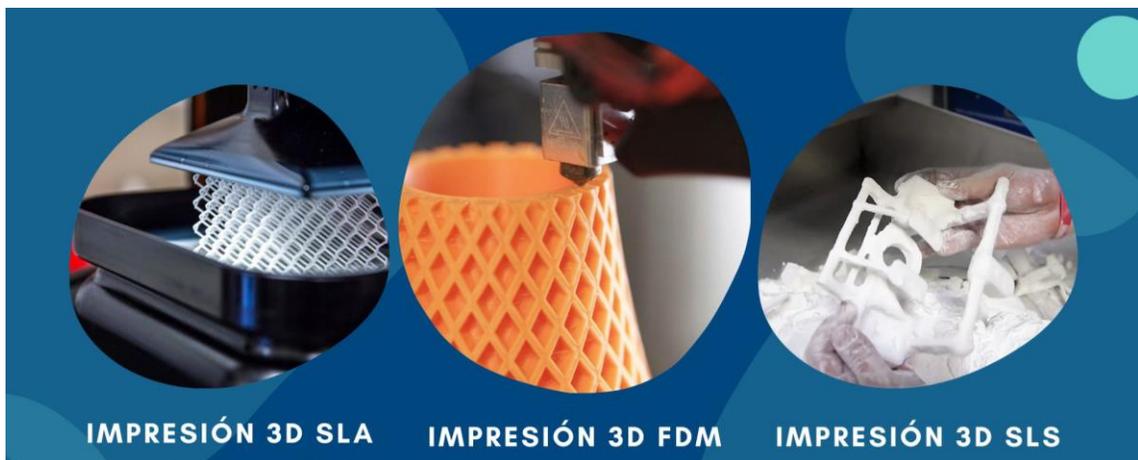


Figura 3 Principales tecnologías de impresión 3D.

A través de los años, esta tecnología pasó desapercibida para la mayoría de las personas, hasta que el 23 de marzo de 2005 nació el *RepRap Project*, el cual es un proyecto creado por el Dr. Adrian Bowyer en el Reino Unido y con la principal meta de producir un aparato auténtico autorreplicable no para el propio proyecto,

sino para ponerlo en manos de individuos de cualquier parte del planeta con una mínima inversión de capital. Esto permitiría el desarrollo de un sistema de fábrica de escritorio que posibilitaría a cualquier persona la fabricación de objetos para su vida cotidiana.

El proyecto usa una técnica de fabricación por adición y está disponible bajo la GNU General Public License, una licencia de software libre, que permite a otros investigadores trabajar en la misma idea y mejorarla.

Originalmente ensamblado en febrero de 2006, a partir del 10 de mayo de 2006 el primer prototipo replicador completo, RepRap 0.1 (Figura 4), diseñado por Vik Olliver en Nueva Zelanda, pronto empezó a extruir formas. A mediados de julio objetos hasta de 15 capas en profundidad y 50 mm de diámetro fueron extruidos por Da Witch, el prototipo de RepRap de Vik Olliver.

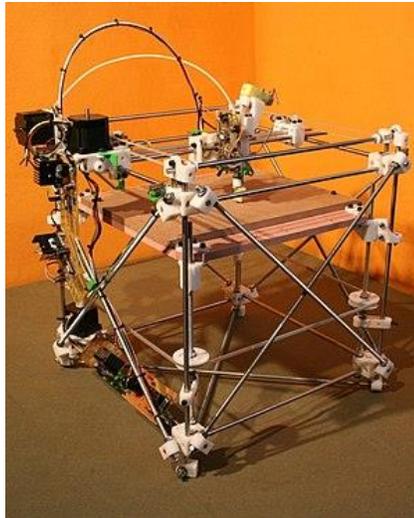


Figura 4 RepRap versión 1.0 (Darwin)

Gracias al RepRap Project, la impresión 3D MDF se convirtió en la actualidad en la opción más popularizada y accesible entre los usuarios y compañías, quienes utilizan actualmente esta tecnología para aplicaciones como prototipado,

producción en serie e incluso en subramas de la tecnología se utiliza para aplicaciones médicas como fabricación de prótesis u órganos sintéticos, se pueden visualizar algunas de estas aplicaciones en la Figura 5.

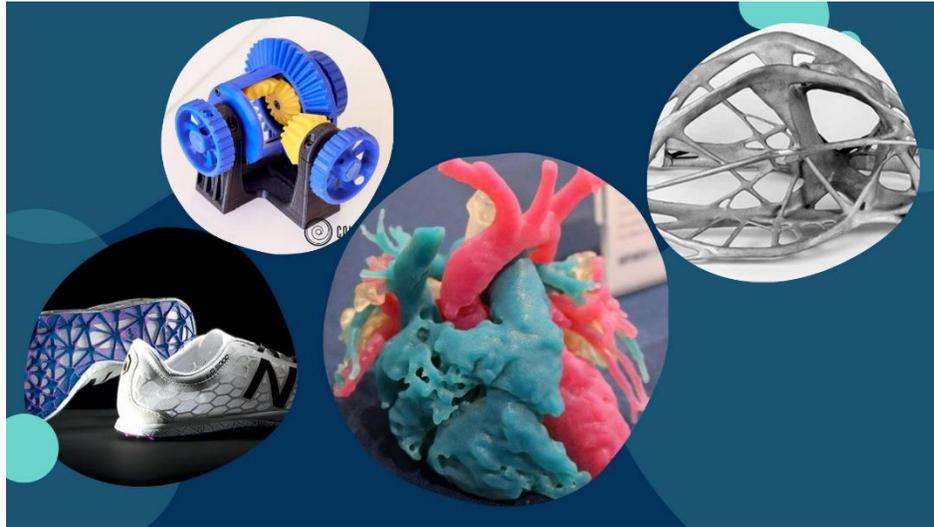


Figura 5 Diferentes aplicaciones de la impresión 3D.

1.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA 3D – MDF

1.2.1. Conceptos básicos

Al hablar de las impresoras 3D MDF (o FDM por sus siglas en inglés) se refiere a todas aquellas que utilizan la tecnología de “Moldeado por deposición fundida” que, a su vez, cabe aclarar, es el nombre corto que se le ha dado. Para ser más precisos, debería llamarse “Proceso de fabricación aditiva por deposición de material fundido”, el cual es un nombre más descriptivo y con el que pueden aclararse dos definiciones:

- Fabricación aditiva: consiste en la fabricación de objetos añadiendo poco a poco material sobre otro material. En el caso de las tecnologías de impresión 3D, para crear el objeto se deposita capa sobre capa de

material, es como estar colocando hojas de papel con formas específicas una sobre otra hasta que obtener el objeto deseado.

- Deposición de material fundido: en el caso específico de la impresión 3D MDF, se funde el material deseado contra un cabezal a alta temperatura, el cual se va moviendo coordinadamente a la vez que deja un hilo de material fundido tras de sí, dicho material se fusiona con el material depositado anteriormente y se solidifica, formando así una nueva capa en el objeto.

Estos son los conceptos básicos para empezar a entender el funcionamiento de una impresora 3D, sin embargo, para lograr que el cabezal se mueva y deposite el material se necesita de muchos otros componentes controlados electrónicamente.

1.2.2. Maquinaria y sus componentes

De manera general, la mayoría de impresoras 3D MDF que se encuentran actualmente en el mercado son máquinas de control numérico de 3 ejes, similar a las conocidas fresadoras y grabadoras láser, pero en la impresora en vez de una herramienta cortante se tiene un cabezal que deposita el material. Es necesario hacer énfasis en que lo anterior solo es aplicable de manera general, ya que también se pueden encontrar impresoras más sofisticadas que por ejemplo funcionan con más ejes de movimiento o que tienen de dos a más cabezales, tal como se muestra en la Figura 6.

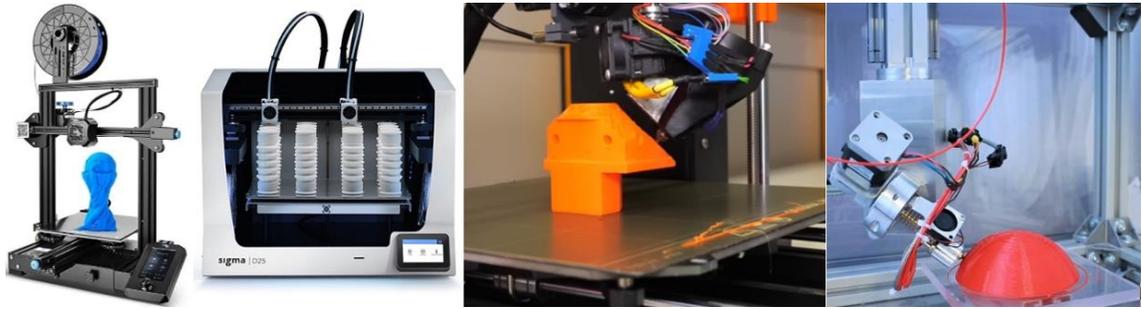


Figura 6 De izquierda a derecha se muestran diferentes impresoras 3D MDF: Creality Ender 3 V2 (3 ejes y 1 cabezal), BCN3D Sigma D25 (3 ejes y 2 cabezales independientes), RotBot (4 ejes y 1 cabezal) y la 5AxisMaker (5 ejes y 1 cabezal de cambio rápido computarizado).

Hablando propiamente de las máquinas o impresoras 3D MDF y los componentes de la misma, pueden distinguirse algunos sistemas básicos que están presentes en la gran mayoría de impresoras en el mercado:

1.2.2.1. Sistema eléctrico de control

Dentro de este sistema podemos englobar las diferentes placas PCB que puede poseer un impresor 3D. Dependiendo del modelo se pueden tener de una a varias placas PCB en el impresor y estas placas en conjunto con los circuitos que poseen, tienen como finalidad el controlar todos los demás componentes de la impresora y proveer la energía suficiente para el movimiento y control de la temperatura de los componentes.

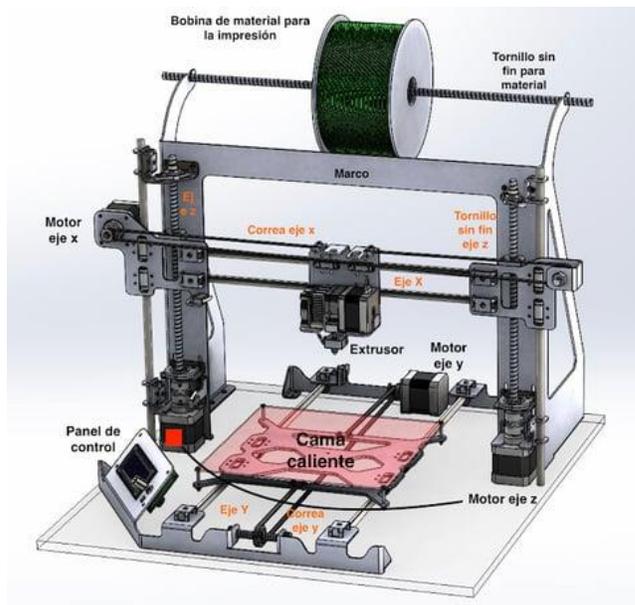


Figura 7 Esquema de componentes de un impresor 3D MDF.

A continuación, se especifican algunos de los componentes más importantes de este sistema, ya que sistemas más complejos podrían tener más o menos componentes. Para una mejor comprensión del tema, deben consultarse la Figura 7 y la Figura 8:

- Placa base: es en esencia una computadora que actúa como el cerebro de la impresora, donde se almacena y ejecuta el firmware cuando se interactúa con el impresor. Suele tener integrado un CPU para coordinar los demás componentes del impresor y además estar conectada a los microcontroladores de los motores, para controlar los pasos que se realizan. No es habitual que los microcontroladores estén integrados en la placa base, ya que se estropean fácilmente y deben de ser sustituibles. Para comunicarse con los demás componentes del impresor tiene varios conectores que sirven como entradas, salidas, puertos de expansión y en algunos casos como alimentación controlada de algunos componentes como la cama caliente del impresor.

- Fuente de alimentación: este componente se encarga de suministrar la potencia eléctrica necesaria para la operación del impresor, además se encarga de estabilizar de manera precisa la corriente para que la placa base puede hacer un correcto control de los motores del impresor. El componente que más le demanda potencia es la cama caliente, el cual representa el mayor consumo energético en el impresor, sin embargo, las impresoras 3D MDF no suelen necesitar una fuente muy potente, ya que su consumo es bastante bajo.
- Interfaz de control: es un componente opcional si el impresor va a estar conectado de manera permanente a una computadora. Aun así, la mayoría de las impresoras cuenta con una interfaz de control que permite al usuario controlar e interactuar con el impresor, permitiéndole un control manual y autónomo de otro dispositivo. Normalmente es una pantalla con botoneras para el control, aunque también se está volviendo habitual el uso de pantallas táctiles. El uso de una pantalla requiere de otra PCB y a veces de un firmware propio para comunicarse con el CPU del impresor.

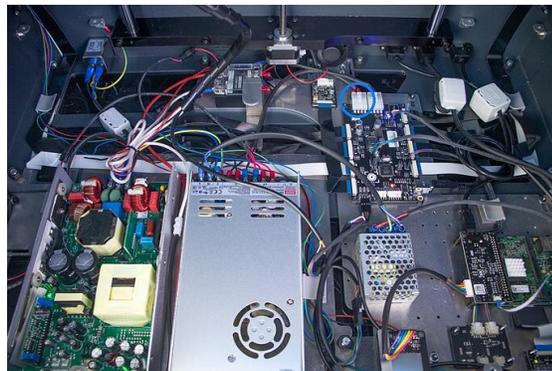


Figura 8 Sistema eléctrico y de control de un impresor 3D MDF, se observa en la parte superior derecha la placa base junto a una placa pequeña que es un microcontrolador, en la parte inferior izquierda se pueden observar 2 fuentes de poder, en la parte inferior derecha se observa las placas adicionales para la interfaz de control.

1.2.2.2. Sistema de extrusión y calefacción

Este sistema es el encargado de la calefacción y extrusión del material a utilizar en la fabricación 3D MDF e inclusive en algunos modelos se utiliza el calor residual de este sistema para controlar las condiciones ambientales del impresor, ya que algunos de los materiales utilizados con la tecnología MDF son muy sensibles a los cambios de temperatura y contaminantes que pueda haber en el ambiente.

Para el sistema de extrusión suelen haber principalmente dos variables que son: la extrusión Bowden y la extrusión directa. En la primera el motor extrusor está separado del cabezal por una determinada distancia y se usa un tubo para guiar el material hacia el cabezal; en la segunda, el motor extrusor está unido al cabezal. Las ventajas de cada sistema las determina la aplicación para la cual se quiera utilizar el impresor, pero como norma general se prefiere la extrusión directa si el impresor se utilizará para imprimir materiales flexibles, ya que el agarre está bien dirigido y cerrado, en cambio en el sistema Bowden, debido al tubo guía, se pierde parte de la potencia transmitida del motor en vencer la fricción generada entre el tubo y el material.

Se hará mención solamente de los componentes más característicos de este sistema en las impresoras 3D MDF y para una ayuda visual el lector puede consultar la Figura 9:

- Cabezal: mejor conocido como “hotend”, es el componente en donde se calienta y funde el material. Además, debido a la presión ejercida por el extrusor sobre el material, éste es forzado a salir por un agujero diminuto. Es importante conocer las dimensiones de este agujero, ya que determina la definición final que se puede lograr con el objeto que se está fabricando.

Entre más pequeño el agujero de salida del cabezal mejor definición se tendrá, pero en contraste la impresión tardará mucho más tiempo y el agujero será más susceptible a atascos.

En el cabezal se encuentra el bloque calefactor, compuesto de una resistencia y termistor, es quien controla la temperatura en la boquilla del cabezal.

Sin embargo, es importante que el calor se quede solamente dentro de la boquilla y que el material se funda solo dentro de ésta, de lo contrario podría ocasionar atascos al ablandarse y perder tracción en el extrusor, por ello es de interés que el material no se funda prematuramente.

Para lograr evitar la fundición prematura se aplica una de dos posibles soluciones, la primera consiste en disipar el calor de la boquilla antes de que el material entre en contacto con ella, lo cual se logra haciendo uso de un difusor y dependiendo de su diseño, se pueden definir las temperaturas a la cuales puede trabajar la boquilla; la segunda solución consiste en colocar un material aislante entre el material y el conducto que dirige el material hacia la boquilla.

La solución del difusor es por lo general la más utilizada ya que al contrario del aislante permite calentar la boquilla a muy altas temperaturas y con un bajo coste, ampliando la gama de materiales que un impresor puede utilizar. Pero en desventaja, añade peso y volumen al cabezal.

- Extrusor: es el motor que tira del material y lo fuerza a pasar a través de la boquilla del cabezal, por medio de un cilindro moleteado o un engranaje. A su vez, es posible que se pueda tirar del material de uno solo o por ambos lados, lo que se conoce como “Dual Drive”.

La transmisión de la fuerza suele hacerse con el cilindro moleteado acoplado directamente al motor, pero puede hacerse también mediante un tren de engranajes que permita aumentar el torque del motor, pero reduciendo su velocidad. Lo último es preferible ya que importa más la fuerza y la precisión, sin embargo, suele ser más caro y pesado, por lo que no muchos fabricantes lo incorporan en sus máquinas por defecto.

- Base: está compuesta generalmente por una cama caliente y la superficie de impresión en la cual se adhiere la primera capa para que la pieza se asiente mientras es fabricada. Con este componente se busca que el agarre de la primera capa sea óptimo y, para lograrlo, se hace uso de una buena alineación de la superficie de impresión con la boquilla y, además, se necesita de una temperatura uniforme y estable. Por ello suele contarse con una cama caliente por debajo de la base, para que caliente la superficie de impresión.

La cama caliente en la mayoría de impresores es un circuito impreso que ofrece resistencia al paso de la corriente, siendo un circuito barato y fácil de fabricar. Además, este circuito suele estar forrado de diferentes aislantes que ayudan a dirigir el calor hacia la superficie de impresión, mejorando así la eficiencia del circuito.

Los materiales utilizados como superficie de impresión son variados, aunque típicamente se suelen usar bases de vidrio ya que soportan bastante bien la temperatura, no se deforma la superficie plana con el calor, es un buen depósito de temperatura que evita que se pierda rápidamente el calor y permite el uso de tratamientos superficiales adicionales.

Existen otros materiales para la base, como el aluminio con una lámina magnética que permite retirar fácilmente las piezas una vez impresas. Así como existen también otras innovaciones como superficies cerámicas que reaccionan a la temperatura, permitiendo la adherencia de la pieza con el calor y un retiro fácil una vez esté impresa la pieza.

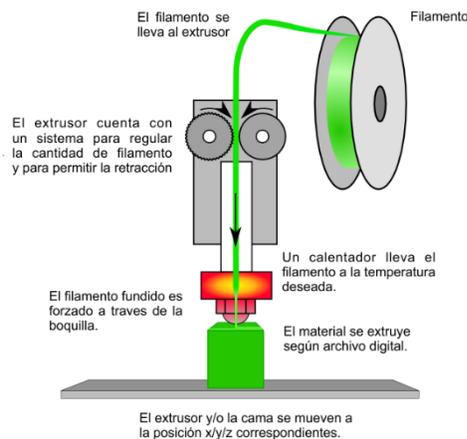


Figura 9 Esquema básico de un sistema de extrusión y calefacción de una impresora 3D MDF.

- Ventiladores: en una impresora 3D MDF se pueden encontrar varios ventiladores con diferentes funciones:
 - Ventilador de capa: este ventilador crea y ayuda a dirigir una corriente de aire que mediante convección enfría el material depositado sobre la pieza, evitando que se acumule el calor sobre el material de la pieza, ya que en algunos materiales este calor acumulado podría generar deformaciones y, en cambio, en otros materiales el uso de este ventilador puede ser contraproducente, evitando que las capas se adhieran entre sí.
 - Ventilador de difusor: produce una ventilación forzada a través del difusor del cabezal, mejorando el enfriamiento del conducto por el

que pasa el material y evitando que el material se funda prematuramente.

- Ventilador de electrónica: esta clasificación corresponde a todos aquellos ventiladores usados para enfriar los componentes electrónicos del impresor.
- Ventilador de cámara: es un ventilador que puede o no, encontrarse en algunos modelos que tengan cámara de impresión. Es utilizado para regular la temperatura del ambiente dentro de la cámara, para que las condiciones ambientales de la impresión sean las óptimas.

1.2.2.3. Sistema de transmisión de los ejes de movimiento

Este sistema se refiere a aquellos componentes que en conjunto logran el movimiento del carro que porta al cabezal y de la base de la superficie de impresión (ver Figura 10).

Este movimiento se realiza a través de guías donde es importante que exista la mínima fricción posible y con otros componentes típicos de una transmisión mecánica, como son, por ejemplo, bandas, rodamientos, engranes, tornillos de potencia, motores eléctricos entre otros. En el caso de las guías, los fabricantes generalmente optan por tres soluciones:

- Barras cilíndricas: la solución media entre coste y calidad.
- Rieles cuadrados: la solución con más calidad y más costo.
- Ruedas sobre guías: la solución más barata y con calidad baja, debido a las bajas velocidades que este tipo de guía puede alcanzar.

De los motores paso a paso es importante mencionar que deben tener un buen torque y una gran cantidad de pasos para controlar lo mejor posible la precisión de la impresión.



Figura 10 Algunos componentes utilizados para transmitir el movimiento en las impresoras 3D
MDF.

1.2.2.4. Estructura

Es el sistema que soporta el peso del impresor y sus componentes, además de mantenerlos en su sitio (ver Figura 11). El diseño de la estructura determina la rigidez del impresor y la firmeza del movimiento, ya que soporta a los ejes en los cuales se produce el movimiento. Por ello, entre más firme la estructura, mejor, pero siempre es importante reducir el coste y el peso del impresor a lo mínimo posible.

También se determina a partir de la estructura el volumen de impresión que podrá tener el impresor. La ventaja de los impresores MDF es que, en la mayoría de los casos si se desea un volumen de impresión mayor, solo es necesario expandir el tamaño de la estructura y de los ejes para lograrlo; obteniendo así, impresiones de mayor volumen, pero con un tiempo de impresión mayor.

Dentro de esta clasificación también se incluye cualquier carcasa o embellecedor que sea colocado sobre la impresora, sin necesidad de que esté directamente soportando algún componente.



Figura 11 Estructura de un impresor 3D MDF.

1.2.3. Proceso de fabricación con una impresora 3D MDF

Una vez definidos los conceptos básicos y los componentes del impresor, puede describirse el proceso de fabricación utilizado para producir objetos con esta tecnología.

Para facilitar su comprensión, el proceso de fabricación puede dividirse en 3 etapas, pre-producción, producción y post-producción, ya que en cada una de ellas se realizan pasos que son, en esencia, bastante diferentes entre sí. La descripción de cada etapa se presenta a continuación.

1.2.3.1. Pre – producción

A esta etapa del proceso corresponden todos aquellos preparativos que se realicen antes de poner en funcionamiento el impresor. Es aquí donde se desarrollan actividades propias de un proceso de diseño y desarrollo, en el cual entre algunas otras actividades se realiza el diseño de la pieza y el diseño de la impresión a realizar, como se puede visualizar en la Figura 12.

En la Pre – producción se hace uso de un software de diseño en 3D generalmente CAD para diseñar la pieza, entre algunos de los ejemplos que se pueden mencionar de este tipo de software podemos encontrar: Fusion360, Solidworks, Inventor, FreeCAD, entre otros.

En el caso del software utilizado para el diseño de la impresión, son conocidos como “slicers” ya que crean la programación llamada “*gcode*” que se introduce en la máquina y es interpretado por el firmware de la misma. Los slicers logran esta programación partiendo la pieza en diferentes capas y luego trazando los movimientos del cabezal en cada una de las capas.

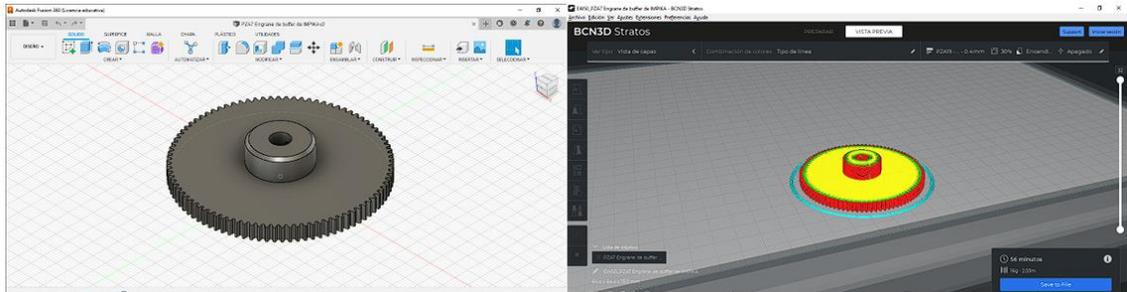


Figura 12 A la izquierda se muestra un engrane diseñado en Autodesk Fusion 360 y a la derecha se muestra el mismo diseño ya segmentado para la impresión en el software BCN3D Stratos.

Por lo general los fabricantes de los impresores optan por crear un software adaptado a su máquina, pero también hay otros casos de software libre de propósito general para la impresión 3D. Una de las opciones más populares y en la que se basan muchos fabricantes para crear sus adaptaciones es Ultimaker CURA.

1.2.3.2. Producción

En esta etapa se prepara la superficie de impresión del impresor y se exporta el *gcode* para utilizarlo en el impresor, es entonces cuando se pone en funcionamiento la maquinaria, la cual calienta el material en el cabezal y lo deposita capa por capa.

En esta etapa también se imprimen los soportes o apoyos de la impresión 3D (ver Figura 13) en los casos en los que se necesitan para las piezas en voladizo

y que se hayan tomado en cuenta al momento de la segmentación realizada en el slicer. También cabe aclarar que los soportes son partes desechables del objeto impreso y cuyo único proceso es sostener el material depositado por cabezal, que de otra manera sería depositado “en el aire” en caída libre.

1.2.3.3. Pos – producción

Una vez impreso el objeto, el usuario procede a retirar la pieza de la base del impresor y si la pieza fue impresa con soportes, el usuario debe comenzar a retirarlos (Figura 13).

Para retirar los soportes se puede realizar de manera manual pero también existe otra opción en la que, si los soportes fueron impresos con algún material soluble, el usuario procede a colocar la pieza en agua para disolver los soportes y obtener la pieza final. Lamentablemente, en la mayoría de los casos, esta opción no está disponible debido al diseño de la mayor parte de modelos de impresoras 3D MDF que se encuentran en el mercado actualmente.



Figura 13 De izquierda a derecha: pieza impresa con soportes, vista inferior de los soportes de la pieza y pieza con soportes retirados.

1.3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA IMPRESIÓN 3D – MDF

Una de las características que convierte a las impresoras 3D MDF en una de las opciones más populares, es la amplia variedad de materiales que se pueden utilizar con esta tecnología. Por tanto, el describir todos y cada uno de ellos está

fuera del alcance de esta investigación, por lo que se presenta una descripción de los materiales basada en una clasificación creada por la empresa española BCN3D, la cual clasifica los materiales de la siguiente manera:

1.3.1. Materiales estándar

En esta clasificación se incluyen aquellos materiales que, por sus características, son baratos y fáciles de imprimir, siendo un buen punto de partida para los más novatos en la impresión 3D.

Dentro de esta categoría podemos encontrar materiales como:

- BVOH (Copolímero de alcohol vinílico butenodiol)
- Tough PLA (Acido poliláctico resistente)
- PLA (Acido poliláctico)
- PET-G (Tereftalato de polietileno modificado con glicol)
- PVA (Alcohol polivinílico)
- TPU (Poliuretano termoplástico)

Dentro del mercado de la impresión 3D, estos materiales se utilizan principalmente para elaborar prototipos funcionales que no buscan ser la pieza final, suelen ser piezas de “sacrificio” que ayudan a mejorar otros procesos de fabricación.

Sin embargo, es posible utilizar algunos de estos materiales para la fabricación de componentes mecánicos en algunas máquinas que no necesiten de piezas con altas propiedades mecánicas.

El material que más resalta de esta categoría es el PLA el cual al ser biodegradable, de bajo costo y baja dificultad al imprimir, se ha vuelto fácilmente

el material estándar y más representativo de la industria, en la Figura 14 se muestra un modelo fabricado con el uso de PLA.



Figura 14 Pieza impresa en 3D utilizando PLA de color azul.

1.3.2. Materiales técnicos

En esta categoría se encuentran los materiales que marcan un punto intermedio en las propiedades mecánicas que se pueden encontrar en el mercado de la impresión 3D. Representan además en algunos casos, un reto al intentar utilizarlos en la impresión 3D, ya que pueden llegar a necesitar de condiciones ambientales controladas para ser utilizados.

En esta categoría pueden mencionarse materiales como:

- ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno)
- PA (Poliamida)
- PP (Polipropileno)

Estos materiales son utilizados inclusive fuera del mercado de la impresión 3D, pues son útiles para fabricar piezas plásticas funcionales, que pueden formar parte de una máquina o producto. Además, estos materiales comienzan a exhibir cierta tolerancia a la exposición prolongada a temperaturas de aproximadamente 100 °C, sin que sus propiedades se vean afectadas. También algunos de ellos poseen resistencia química y pueden ser utilizados en ambientes en los que se requiere que la pieza no interactúe con las sustancias presentes en su ambiente.

Cabe destacar al ABS como el representante, ya que es un material común en varias industrias del mundo, porque combina rigidez y resistencia a los impactos, siendo ideal para aplicaciones técnicas y piezas móviles. Es usado por la industria para fabricar la mayoría de carcasas en aparatos electrónicos y en la Figura 15 se visualiza un engrane de un impresor digital que ha sido fabricado utilizando ABS.



Figura 15 Engrane impreso en 3D utilizando ABS.

1.3.3. Materiales compuestos

En esta categoría, se incluyen aquellos materiales que han sido fabricados mezclando dos o más materiales insolubles entre sí, que además están separados por una interfase y generalmente son distinguibles a simple vista.

Dentro de esta categoría podemos encontrar:

- PP GF30 (Polipropileno con 30% fibra de vidrio)
- PET CF15 (Tereftalato de polietileno reforzado con fibra de carbono)
- PAHT CF15 (Poliamida de alta temperatura con 15% fibra de carbono)

Estos materiales exhiben altas propiedades mecánicas y una resistencia química excelente, inclusive poseen poca absorción de humedad y una resistencia a la exposición continua a temperaturas de alrededor de 170 °C. Por todo ello resisten

bastante bien las condiciones del ambiente y pueden ser utilizados para fabricar componentes de maquinaria.

Sin embargo, estos materiales suponen una dificultad para el usuario del impresor 3D ya que no son fáciles de imprimir, requiriendo que el diseño esté hecho de manera precisa y además necesitando condiciones ambientales especiales y controladas para la impresión.

Estos materiales no pueden ser impresos sin hacer uso de componentes especializados en las impresoras 3D MDF, tales como una boquilla de acero endurecido o con punta de diamante, junto con la obligatoria necesidad de utilizar un sistema de extrusión dual drive.

Estos motivos han provocado que dichos materiales no sean fáciles de obtener para el usuario promedio, pero si para las empresas que están comenzando a utilizar impresoras 3D especializadas en la impresión de estos materiales, utilizándolo para fabricar componentes mecánicos funcionales que inclusive alcanzan a cubrir de momento, cierta demanda en el mercado automotriz. Tales son los ejemplos de BCN3D trabajando de la mano con Nissan en España para cubrir la demanda de algunas piezas utilizadas por el fabricante automotriz. En la Figura 16 se observa una parte del cerrojo de una compuerta de impresor digital, que ha sido fabricado con PAHT CF15.



Figura 16 Pieza impresa utilizando PAHT CF15.

1.3.4. Materiales metálicos

En esta categoría se encuentran clasificados aquellos materiales que son totalmente metálicos o que contienen partículas de metal. Representan una innovación en la actualidad y a su vez representan también el avance que está teniendo la impresión 3D en la sociedad.

Se pueden mencionar algunos materiales como ejemplo en esta clasificación:

- Ultrafuse 316L
- Ultrafuse 17-4PH

Los materiales anteriormente mencionados son una mezcla de polímero con partículas metálicas de acero inoxidable, en donde la intención es obtener piezas semifinalizadas, que solo necesiten de un proceso más de fabricación, como por ejemplo del sinterizado u otros tratamientos térmicos.

Como es de esperarse, necesitan de equipo especializado y de impresoras 3D especializadas para ser utilizados, por lo que son materiales destinados a ser utilizados por empresas e industrias para la fabricación de componentes de maquinaria o herramientas que requieran exigentes propiedades mecánicas para funcionar.

Se prevé que estos materiales sirvan incluso para la industria aeroespacial o aeronáutica, pudiendo fabricar componentes de repuesto mientras los vehículos están operando. Inclusive se busca que sean utilizados para la fabricación de herramientas biomédicas.

1.4. ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES

El ensayo o prueba de tracción o tensión es quizás el ensayo más popular de los ensayos de los materiales, debido a que de él pueden obtenerse una gran

variedad de propiedades que pueden aplicarse al diseño de distintos componentes. En dicha prueba se mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada de manera lenta.

Habitualmente se utiliza una máquina universal de prueba en la que pueden llevarse a cabo ensayos de tensión y compresión. Se utiliza un deformímetro o extensómetro para medir la cantidad que se estira el espécimen entre las marcas calibradas cuando se aplica la fuerza, por lo tanto, se mide el cambio de longitud del espécimen con respecto a la longitud original.

En la Figura 17 se muestra una configuración común para llevar a cabo el ensayo. En términos generales, la fuerza que actúa sobre la muestra sometida a ensayo se registra por separado o se dibuja en el registrador de la máquina de ensayo mediante el desplazamiento del papel de registro o digitalmente, mientras que la deformación correspondiente se obtiene de la señal generada por un extensómetro extremo, sujeto a la muestra. Esta información se registra por separado o si el aparato lo permite, o está incorporado a la máquina, se registra automáticamente y también se dibuja en el papel de registro.

Además, cabe agregar que el ensayo dura varios minutos y es destructivo, es decir, la muestra del ensayo es deformada de forma permanente y a menudo rota.

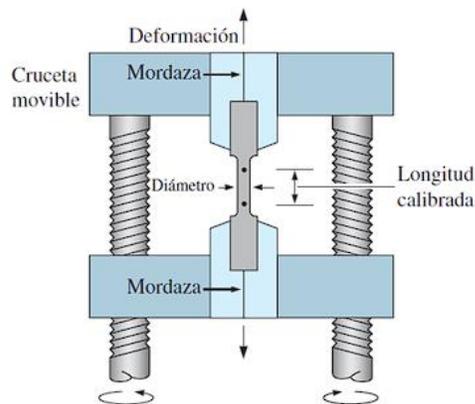


Figura 17 Ejemplo de una configuración para la realización de un ensayo de tracción

Al realizar un ensayo de tensión, la información registrada incluye la carga o fuerza como una función del cambio en la longitud calibrada. Esta información se convierte de manera subsecuente a esfuerzo y deformación y se grafica para su análisis en una curva esfuerzo – deformación unitaria para inferir las propiedades de los materiales.

En la práctica, la magnitud real de los esfuerzos y deformaciones es muy diferente a los graficados en la curva. Esto se debe a que en la realización del ensayo se asumen varias suposiciones, por ejemplo, en el caso de los termoplásticos, se supone que están por encima de la temperatura de transición vítrea.

Los materiales metálicos y termoplásticos muestran una zona elástica inicial y lineal, seguida por una zona plástica no lineal. Sin embargo, cabe mencionar que para los otros tipos de materiales estos comportamientos suelen variar. La Figura 18 muestra una comparación del comportamiento de los materiales en el diagrama esfuerzo-deformación.

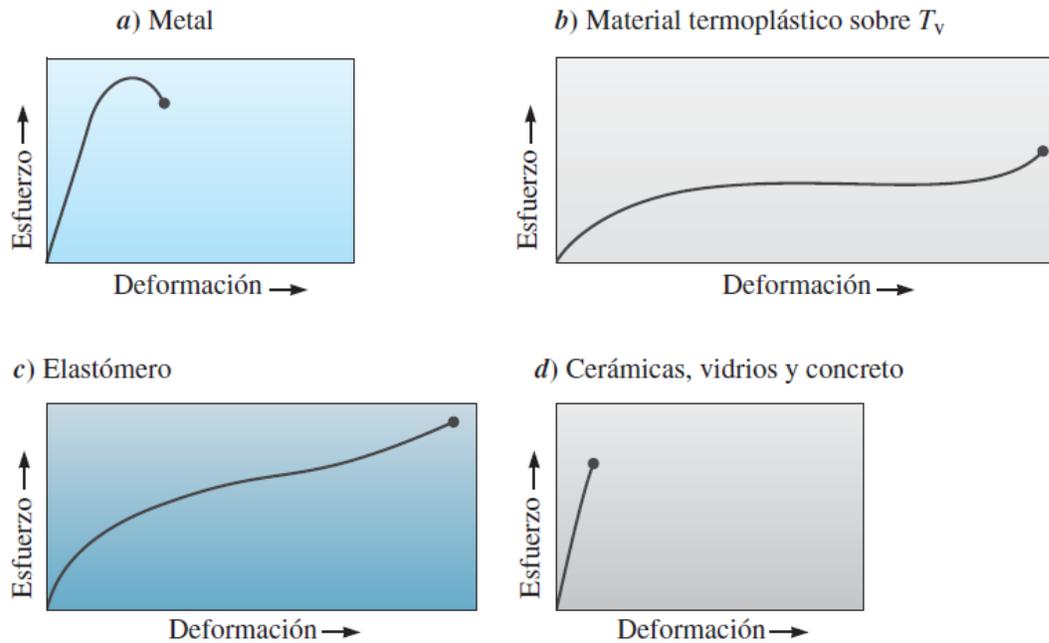


Figura 18 Comparativa de los diferentes comportamientos de los materiales en el diagrama esfuerzo-deformación.

Los resultados de una sola prueba se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de los especímenes de un material dado si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre las marcas calibradas en deformación. Los resultados del esfuerzo y la tensión son los mismos cuando los materiales son iguales sin que importe el tamaño del espécimen.

1.5. ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES

La flexión es una sollicitación que causa una curvatura en un componente. Se produce cuando se aplica una fuerza perpendicular al eje longitudinal del componente, causando una deformación en forma de arco. Algunos ejemplos comunes de componentes expuestos a este tipo de sollicitación son vigas, ejes, barras de soporte, brazos de palanca y elementos estructurales curvos.

El ensayo consiste en aplicar la carga en tres puntos de la probeta, provocando la flexión de la misma. Sobre ella actúa una fuerza de tensión opuesta al punto medio y, por lo tanto, en esta localización es donde comienza la ruptura, es decir, literalmente la probeta se parte en dos al estar un lado de ella en tensión y el otro en compresión. Se puede visualizar una configuración de este ensayo en la Figura 19.

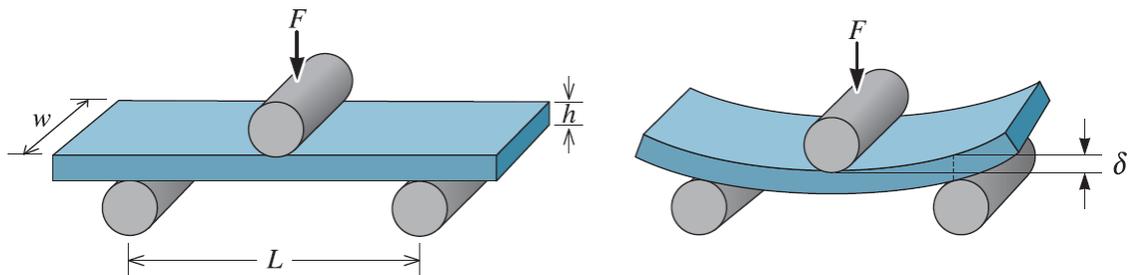


Figura 19 Configuración básica de un ensayo de flexión.

Los diagramas utilizados para graficar los resultados del ensayo de flexión, son similares a los de las curvas de esfuerzo-deformación del ensayo de tensión, sin embargo, el esfuerzo se grafica en función de la deflexión en lugar de hacerlo en función de la deformación, tal como se visualiza en la Figura 20.

Otra configuración conocida para esta prueba, es en 4 puntos y se recomienda su uso para aquellos materiales que contienen imperfecciones, ya que el momento de flexión entre las patinas es constante.

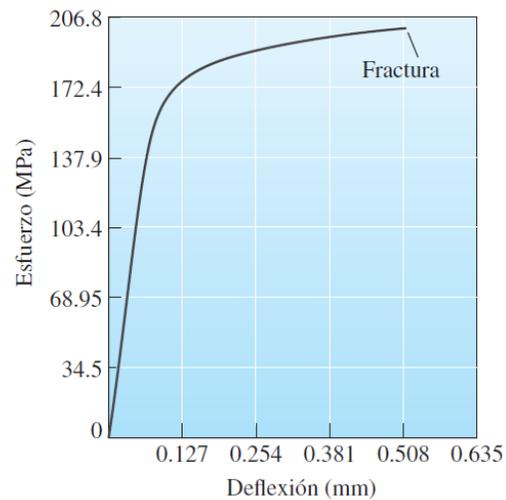


Figura 20 Ejemplo de un diagrama esfuerzo-deflexión, utilizados para los ensayos de flexión.

Si se quieren comprender las características y el comportamiento de un determinado material, no suele bastar con un simple ensayo de tracción. Suele utilizarse en conjunto el ensayo de flexión, ya que de esta manera el espécimen será sometido a compresión, tensión y cizallamiento a la vez en un solo ensayo.

Es por ello, que el ensayo de flexión es utilizado cuando se quiere investigar un material en condiciones de carga más realistas, siendo especialmente eficaz cuando se desea utilizar el material ensayado como estructura de soporte, es decir, que estará sujeto a cargas en muchas direcciones a la vez, como una silla plástica o una soldadura metálica, por ejemplo.

1.6. NORMATIVA APLICABLE PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN Y DE FLEXIÓN EN MATERIALES UTILIZADOS EN LA IMPRESIÓN 3D

Cualquier objeto o estructura utilizado por el ser humano está constituido de diferentes materiales, desde edificios hasta simples juguetes plásticos y es importante conocer las propiedades de los materiales y sus diferentes

aplicaciones, para realizar una correcta selección de dichos materiales en la etapa de diseño. Asimismo, debe procurarse tener criterios económicos que reduzcan a un mínimo la cantidad de material necesario, así como el cumplimiento de los diferentes requisitos mecánicos o de seguridad que deba cumplir el componente a fabricar.

Para la determinación de las propiedades de los materiales, existen una serie de ensayos científicos que por lo general se encuentran normalizados. En ellos, el principal objetivo es obtener resultados referentes a valores numéricos precisos y reproducibles de ciertas magnitudes físicas en el material.

En lo referente a los ensayos de tracción y de flexión, existen principalmente 2 organismos que se encargan de crear las normativas aplicables a dichos ensayos. El primero de estos organismos a mencionar, es la ASTM (American Society for Testing and Materials), creada el 29 de febrero de 1898 por Charles Dudley y la cual en un principio fue creada como una sociedad con el objetivo de normalizar los controles de calidad en los materiales utilizados en la industria ferroviaria del momento en Estados Unidos.

El segundo organismo a mencionar es la ISO (International Organization for Standardization), fundada el 23 de febrero de 1947, que es una organización independiente y no-gubernamental formada por las organizaciones de normalización de sus 167 países miembros. Es el mayor desarrollador mundial de estándares internacionales voluntarios y facilita el comercio mundial al proporcionar estándares comunes entre países.

Dentro de la normativa desarrollada por estas dos organizaciones se encuentran las siguientes normas referidas a los ensayos de tensión y a los ensayos de flexión en polímeros:

- Ensayo de tensión:
 - ASTM – D638
 - ISO – 527
- Ensayo de flexión:
 - ASTM – D790
 - ISO – 178

Lo referente al contenido de estas normas, se mostrará a continuación.

1.6.1. ASTM – D638: Método de ensayo estándar para propiedades de tracción de plásticos

La norma describe un método que cubre la determinación de las propiedades tensiles de plásticos reforzados y no reforzados con especímenes de prueba con la forma estándar de mancuerna, siendo probados bajo condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad y velocidad de ensayo de la máquina.

Esta norma permite que se ensayen materiales de entre 1 mm a 14 mm de espesor y tiene como opción la determinación del coeficiente de Poisson. Recomienda además que, para asegurar resultados directamente comparables, todos los especímenes de ensayo deberán de ser del mismo espesor y entre más ensayos se realicen con ellos, mejor será la precisión de los datos físicos.

Pueden utilizarse los resultados de esta norma para diseños de ingeniería, pero teniendo bajo consideración que la misma no busca replicar condiciones físicas exactas y que pueden existir diferencias teóricas. Bajo esta norma, el estándar de unidades utilizado es el SI, todos los demás valores que se presentan en otras unidades son tomados como informativos.

En la norma no se detallan aquellas consideraciones o reglas de seguridad y salud ocupacional para la realización del ensayo y aclara que dichas consideraciones serán responsabilidad del usuario que ejecute dichos ensayos.

1.6.2. ISO – 527: Plásticos – Determinación de las propiedades tensiles

Esta norma especifica los principios generales para la determinación de las propiedades tensiles de plásticos y compuestos plásticos bajo condiciones definidas. Diferentes tipos de especímenes de prueba se ajustan a distintos tipos de material.

Los métodos bajo esta norma son utilizados para investigar el comportamiento tensil de los especímenes de prueba y para determinar la resistencia, módulo tensil y otros aspectos como la relación esfuerzo – deformación bajo condiciones definidas.

Los métodos son selectivamente ajustables para usarse con los siguientes materiales:

- Materiales termoplásticos rígidos y semirrígidos para moldeo, extrusión y vaciado, incluidos compuestos con relleno y reforzados además de tipos sin relleno; láminas y películas termoplásticas rígidas y semirrígidas.
- Materiales de moldeo termo endurecibles rígidos y semirrígidos, incluidos compuestos rellenos y reforzados, láminas termo endurecibles rígidas y semirrígidas, incluidos los laminados.
- Compuestos termoestables y termoplásticos reforzados con fibras que incorporen refuerzos unidireccionales o no unidireccionales, tales como esteras, telas tejidas, mechas tejidas, hilos cortados, refuerzos combinados e híbridos, mechas y fibras molidas; hoja hecha de materiales pre - impregnados (prepregs).

- Polímeros de cristal líquido termo trópico.

Sin embargo, se debe considerar que los métodos normalmente no se ajustan para usarse con materiales celulares rígidos, o para estructuras tipo sándwich que contengan materiales celulares.

1.6.3. ASTM – D790 Métodos de ensayo estándar para propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados y materiales aislantes eléctricos

Los métodos descritos por esta norma son usados para determinar las propiedades de flexión en plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo compuestos de módulo alto y materiales aislantes eléctricos, utilizando un sistema de carga de tres puntos para aplicar la carga a una viga (espécimen) simplemente apoyada.

Los especímenes de prueba utilizados en esta norma pueden ser moldeados, cortados de moldes, hojas o placas y/o cortados de formas extruidas o moldeadas. Los especímenes deberán de ser sólidos y uniformemente rectangulares.

El método es generalmente aplicable a materiales rígidos y semi – rígidos, pero la resistencia a la flexión no puede ser determinada para aquellos materiales que no se fracturan o deforman en la superficie exterior del espécimen de prueba entre el límite de deformación del 5%. Bajo esta norma, el estándar de unidades utilizado es el SI, todos los demás valores que se presentan en otras unidades son tomados como informativos.

En la norma no se detallan aquellas consideraciones o reglas de seguridad y salud ocupacional para la realización del ensayo y aclara que dichas consideraciones serán responsabilidad del usuario que ejecute dichos ensayos.

1.6.4. ISO – 178: Plásticos – Determinación de las propiedades de flexión

Este estándar internacional especifica un método para determinar las propiedades de flexión de plásticos rígidos y semirrígidos bajo condiciones definidas. Se define un espécimen de prueba estándar, pero se incluyen parámetros para especímenes de medidas alternativas, para ser usados cuando sea apropiado. Se incluye además un rango de velocidades de prueba.

El método se utiliza para investigar el comportamiento en flexión de los especímenes y para determinar la resistencia a la flexión, módulo de flexión y otros aspectos de la relación de flexión de esfuerzo – deformación bajo condiciones definidas. Aplica para una viga soportada libremente, cargada al medio del claro (Ensayo de carga en 3 puntos).

El método se ajusta para ser utilizado en el siguiente rango de materiales:

- Material de moldeo y extrusión de termoplásticos, incluidos compuestos con relleno y reforzados además de tipos sin relleno; láminas termoplásticas rígidas.
- Materiales de moldeo termo endurecibles, incluidos compuestos rellenos y reforzados; láminas termo endurecibles.

De acuerdo con las normas ISO-10350-1 e ISO 10350-2, este estándar internacional aplica a compuestos reforzados con fibra con largos de fibra menores o iguales a 7.6 mm antes del procesamiento. El método normalmente

no se ajusta para usarse con materiales celulares rígidos y estructuras de sándwich conteniendo material celular.

2. METODOLOGÍA

2.1. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

El concepto de variable se puede tomar como “*una característica, magnitud o cantidad que sufre cambios y que es objeto de análisis para la investigación*”. Es decir, que la variable debe de ser una característica observable en la realidad del fenómeno que se está estudiando bajo diferentes evaluaciones y que, bajo un enfoque cuantitativo, puede llegar a asumir valores y unidades de medida.

He aquí la importancia en que las variables sean medidas, inferidas y observadas de acuerdo a un análisis teórico, ya que, de los valores que tome la variable, se obtienen datos de la realidad evaluada.

Es posible identificar las variables en diversos estudios como una frase o palabra en el título o tema de investigación, también es posible identificarlas en el objetivo, problema o hipótesis general. Una vez expuesto este conocimiento es posible proceder a realizar la identificación de las variables para el estudio, teniendo lo siguiente:

- Título del estudio: Estudio sobre el efecto de la **orientación de las capas de fabricación** en la **resistencia a la tensión y a la flexión** en impresiones 3D MDF.
- Objetivo general (Extraído del perfil del trabajo de graduación): Obtener información sobre el efecto de la **anisotropía** en la **resistencia a la tensión** en piezas impresas en 3D utilizando la tecnología MDF.
- Planteamiento del problema (Extraído del perfil del trabajo de graduación): La impresión 3D está tomando relevancia y está comenzando a utilizarse para la fabricación en serie de componentes de maquinaria o para la

fabricación y prueba de prototipos. Pero con el proceso bajo el cual funcionan las diferentes tecnologías de impresión 3D, surge un problema derivado de la ***deposición o solidificación de diferentes capas de impresión***, este problema es la ***anisotropía*** generada debido a que no se fusionan en su totalidad las capas entre sí por la ***diferencia de temperatura entre la capa existente y la que se está depositando sobre ella***, además poco se sabe de las ***propiedades de los materiales*** de las piezas fabricadas con la tecnología MDF, ya que es reconocido que la ***deposición de capas de impresión*** introduce cierta ***anisotropía*** en las piezas pero en contraste, es poco reconocido el efecto que está ***anisotropía*** tiene sobre la pieza.

Del título, objetivo general y planteamiento del problema, se han identificado (enfáticas con negritas y cursivas) las siguientes posibles variables:

- Orientación de las capas de fabricación o impresión
- Resistencia a la tensión
- Resistencia a la flexión
- Anisotropía
- Deposición de las capas de fabricación o impresión
- Solidificación de las capas de fabricación o impresión
- Diferencia de temperatura entre la capa existente y la que se está depositando sobre ella
- Propiedades de los materiales

Bajo el propósito de realizar el proceso de operacionalización de las variables en el cual se debe de procurar el iniciar en lo más general y finalizar en lo más específico; se destacan y seleccionan de las posibles variables las siguientes:

- Capas de impresión 3D MDF
- Anisotropía

En el caso de la variable de “capas de impresión 3D MDF” se selecciona como variable independiente del estudio experimental, se realizará la operacionalización de la misma pero no se medirá, en su lugar se realizará el control o manipulación de los cambios en dicha variable. En el caso de la anisotropía, se selecciona como variable dependiente y cabe agregar que se seleccionan estas dos variables sobre las otras, ya que engloban de manera general o se ven afectada por todas las demás posibles variables listadas.

Una vez seleccionadas las variables del estudio es posible proceder con la operacionalización de las mismas, como se muestra a continuación en la Tabla 1 y la Tabla 2.

Tabla 1 Operacionalización de variables: Primera parte.

| Variables | Definición conceptual | Definición operacional |
|---------------------------|---|---|
| Capas de impresión 3D MDF | Capas de material fundido depositadas una sobre otra y que conforman a una pieza impresa en 3D. | Capas de material que por las limitantes de la impresión 3D MDF deben de ser depositadas en un tamaño especificado y con una orientación relativa a la pieza, pero paralela a la cama de impresión. |

| Variables | Definición conceptual | Definición operacional |
|------------------|---|--|
| Anisotropía. | Propiedad general de la materia, es la variación de las propiedades físicas de la materia en función de la dirección en la que son medidas. | Grado en el cual las propiedades físicas del material son distintas según la dirección en la que se realicen las mediciones en las capas depositadas en la impresión 3D MDF. |

Tabla 2 Operacionalización de variables: Segunda parte.

| Variables | Escala de medición | Dimensiones o Categorización | Indicadores |
|----------------------------|---------------------------|--|---|
| Capas de impresión 3D MDF. | De razón | Tamaño de la capa de impresión | <ol style="list-style-type: none"> 1) Altura de capa de impresión. 2) Ancho de línea de impresión. |
| | | Dirección de la capa de impresión, relativa a la pieza | <ol style="list-style-type: none"> 1) Grados de rotación del eje X de la pieza, relativos al plano de la cama de impresión. 2) Grados de rotación del eje Y de la pieza, relativos al plano de la cama de impresión. 3) Grados de rotación del eje Z de la pieza, relativos al plano de la cama de impresión |

| Variables | Escala de medición | Dimensiones o Categorización | Indicadores |
|--------------|--------------------|------------------------------|---|
| Anisotropía. | De razón | Ensayo de tracción. | Cambio relativo de la resistencia a la tensión entre las direcciones de medición. |
| | | Ensayo de flexión. | Cambio relativo de la resistencia a la flexión entre las direcciones de medición. |

2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES A ENSAYAR

Como se mencionó en el apartado 1.3, se pueden clasificar los materiales utilizados para la impresión 3D en las categorías:

- Materiales estándar
- Materiales técnicos
- Materiales compuestos
- Materiales metálicos

De estas categorías resultan relevantes para el estudio los materiales estándar y los materiales compuestos. Los materiales estándar son de los más utilizados en la industria de la impresión 3D y por lo tanto son también los que cuentan con mayor disponibilidad y los materiales compuestos, por otro lado, son materiales que recientemente han iniciado a desarrollarse para su uso con la impresión 3D ante la popularización de la tecnología y con la exigencia de fabricantes que buscan aprovechar la tecnología para desarrollar nuevos productos.

Han sido seleccionados para la presente investigación, el PLA como material representante de la categoría de materiales estándares y el PAHT – CF15 como

el representante de los materiales compuestos. De estos materiales se profundizarán sus características a continuación.

2.2.1. PLA: Ácido Poliláctico

El ácido Poliláctico (PLA) es un polímero termoplástico y biodegradable cuyo proceso de fabricación en sus inicios fue diseñado por Wallace Carothers en la empresa Dupont en 1932, sin embargo, no fue hasta 1954 que Dupont patentó el proceso tras varias mejoras.

La producción en masa se retrasó debido a los altos costes de producción, no fue hasta que se lograron mejoras en la fermentación de la glucosa para la obtención del ácido láctico que compañías como Cargill se interesaron y desarrollaron el polímero, cuya producción iniciaría en 1997.

De manera general, para obtener el polímero es necesario extraer el azúcar y/o almidones producidos por el maíz, yuca, mandioca o caña de azúcar para posteriormente fermentarlos anaeróbicamente o con sinterización química, realizar la polimerización del ácido láctico presente en dichas sustancias.

Es un material que genera mucha polémica por lo que se suele decir de él, se dice por muchos fabricantes como estrategia de marketing que es biodegradable y compostable, pero no se suele mencionar que esas dos características solo se cumplen al estar el material presente en condiciones de una planta de compostaje industrial que cumpla con una norma como la EN13432, por ello quizás sea mejor considerar alternativas de material como el PVA que es soluble en agua.

A la vez, cabe comentar que el PLA al aire libre puede tardar hasta 80 años en descomponerse, por lo que puede contribuir a la contaminación ambiental de plásticos y, por tanto, no debe lanzarse a la naturaleza.

Se ha dicho que el utilizar este material, eliminaría la necesidad de depender de combustibles fósiles para la obtención de plásticos ya que es posible obtener el PLA del maíz o la yuca, pero si el PLA sustituyera a los plásticos fósiles eso significaría que toneladas de alimento serían destinados a la producción del polímero.

No suele presentar olores al imprimirse, pero ya que muchos fabricantes incluyen aditivos en el material para que sea más fácil su impresión, muchas veces estos aditivos propician que el material aun sin olor emita al ambiente químicos que puedan llegar a ser tóxicos para el ser humano.

Otra ventaja que se suele mencionar es que la apariencia no suele ser muy diferente a la de los plásticos fósiles, pero esto ha generado problemas en la industria del reciclaje ya que en los canales de residuos plásticos actuales generalmente el PLA se suele mezclar con otros plásticos como el PET, dificultando el reciclaje de ambos materiales.

A pesar de las controversias y la desinformación que rodea a este material, se ha vuelto de las opciones más populares para impresión 3D debido a su facilidad de uso al imprimir, siendo ideal para aquellos que se están iniciando en la fabricación con impresoras 3D.

En cuanto a las propiedades físicas del material, debido a la falta de normativa o entidades que regulen dichas propiedades, éstas pueden variar en gran medida dependiendo del fabricante del material. Para efecto de la presente investigación, se esperan valores en las propiedades como los siguientes:

- Resistencia a la tensión: Valores aproximadamente entre 52.5 MPa (Ultimaker, 2017) y 70 MPa (BCN3D).

- Deformación en fluencia: Valores aproximadamente entre 3.4% (Ultimaker, 2017) y 5% (BCN3D).
- Temperatura de reblandecimiento VICAT: Valores aproximadamente entre 60 °C (BCN3D) y 64.5°C (Ultimaker, 2017).

2.2.2. PAHT – CF15: Poliamida de alta temperatura con 15% de fibra de carbono

La poliamida es un tipo de polímero con enlaces covalentes de tipo amida, los cuales pueden ser generados sintéticamente por reacciones químicas para generar por ejemplo Nylon o Kevlar, pero también puede encontrarse de forma natural como la lana o la seda.

Las poliamidas sintéticas nacen de la Dupont Corporation de la mano del equipo liderado por el químico Wallace Hume Carothers a mediados de la década de 1930, dando el primer uso de las poliamidas a la fabricación del Nylon.

Actualmente es de los tipos de polímeros más utilizados en la industria debido a su versatilidad y posibilidades de aplicación. El Nylon es la variedad mayor conocida de las poliamidas y por lo tanto la más utilizada, contando con características como:

- Alta resistencia al desgaste.
- Alta resistencia térmica, llegando a tener en algunos casos puntos de fusión de 300 °C.
- Capacidad para mecanización.
- Amortiguación del ruido.

Cuenta también con algunas desventajas como:

- Absorción de humedad, lo cual disminuye las propiedades mecánicas.

- Poca resistencia a químicos.
- Alta contracción al trabajar con cambios de temperatura.

Para el caso de la fibra de carbono, por si solo es un material compuesto, el cual consiste en fibras extremadamente finas hechas principalmente de átomos de carbono las cuales están dispuestas entre sí de forma aleatoria. Por esta razón la fibra de carbono posee una gran resistencia, ya que de estar ordenadas estas fibras, básicamente se comportaría como el grafito de un lápiz.

Este material inició su desarrollo durante la segunda mitad del siglo XIX, sin embargo, fue Roger Bacon el primero en fabricar un material similar al utilizado en la actualidad. El método que se utilizó en 1958 era muy ineficiente ya que apenas producía fibras con un 20 % de carbono pero que impulsó la tecnología en la dirección correcta para que muchos científicos lograran producir fibras de hasta un 99 % de carbono.

Generalmente para su uso se suele mezclar con polímeros en aproximadamente un 75 %. El polímero más habitual suele ser la resina epoxi en el caso de los componentes fabricados por la industria automotriz. Sin embargo, es posible mezclarlo con otros polímeros como las poliamidas para el caso del PAHT – CF15.

Se le considera un material exótico, ligero y resistente, incluso con valores similares a los del acero, pero tan ligero como el plástico. Algunas de sus características son:

- Alta resistencia mecánica.
- Resistencia a altas temperaturas, pudiendo algunos de los compuestos soportar temperaturas de hasta 815 °C.

- Buena conductividad eléctrica debido a la presencia de los átomos de carbono.
- Resistencia a una gran cantidad de químicos.
- Resistencia a la corrosión.

Una vez descritos los materiales que lo componen, es posible afirmar que el PAHT – CF15 es un material que combina lo mejor de las poliamidas y de la fibra de carbono, abriendo nuevos campos de aplicación para la impresión 3D FDM en piezas que estarán expuestas a altas temperaturas y ambientes agresivos e incluso reemplazando a los metales en algunas otras aplicaciones, haciendo uso de sus características como lo son:

- Resistencia a temperaturas de hasta 180 °C.
- Resistencia a golpes.
- Resistencia al desgaste.
- Resistencia a diversos productos químicos.
- Baja absorción de la humedad.

2.3. PROCESO DE LOS ENSAYOS

Para definir los procesos para los ensayos es necesario seleccionar las normas en las cuales se basará el estudio y el laboratorio de ensayos de materiales que cumpla con los requisitos mínimos para la realización de dichos ensayos.

Se tuvieron en cuenta diversos lugares en los cuales se podría realizar el estudio, como la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, la Universidad de El Salvador, la Escuela Especializada en Ingeniería ITCA FEPADE, entre otros.

De estos lugares, se seleccionó como lugar de ensayo al Laboratorio de materiales de la Universidad Don Bosco (UDB de aquí en adelante) por contar con el equipo más reciente y con un menor costo de ensayo.



Figura 21 Máquina universal de ensayos de materiales: CMS Metrology WAW-1000D, en el Laboratorio de materiales de la UDB .

Basándose en las condiciones y recomendaciones de los operarios y autoridades del laboratorio de la UDB, se seleccionaron para el presente estudio, la norma ASTM - D638 para el ensayo de tracción y la norma ASTM - D790 para el ensayo de flexión.

A continuación, se profundizará más al respecto del proceso de ensayo que se describe en estas normas.

2.3.1. Proceso de ensayo de tracción basado en la norma ASTM – D638

Atendiendo a lo desarrollado en la norma, es posible describir de forma resumida el proceso del ensayo de la siguiente manera:

1. Acondicionar (climatizar) los especímenes de acuerdo a lo especificado en las normas D638 y principalmente en la D618, en las cuales se recomienda el procedimiento A de la norma D618. Sin embargo, para este estudio se utilizará el procedimiento G de la norma D618 por ser el más indicado, útil y confiable para climas tropicales como el de El Salvador. El acondicionamiento es el siguiente:
 - a. Colocar los especímenes en el lugar de acondicionamiento por un mínimo de 40 horas (para este caso de estudio), deben de ser colocados de manera que pueda circular libremente el aire a través de ellos, ya sea colgándolos con ganchos, colocándolos sobre mallas de agujero ancho o en algún tipo de depósito que lo permita.
 - b. La temperatura ambiental durante el tiempo de acondicionamiento debe de ser de $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - c. La humedad relativa debe de ser del $65\% \pm 10\%$.
2. Medir el ancho y espesor de cada espécimen a ensayar, a la precisión más cercana a los 0.025 mm. En el caso de los especímenes planos, se deben medir al centro de cada espécimen y entre 5 mm desde cada extremo de la longitud calibrada (haciendo un total de 3 mediciones). Además, se deben de tomar las mediciones usando los métodos aplicables de la norma ASTM – D5947 la cual describe los aparatos que pueden ser utilizados para la medición, como utilizarlos y la forma de calibrarlos:
 - a. Usar un micrómetro de ratchet o de fricción con la precisión apropiada.

- b. Ubicar el micrómetro en un área diferente a la que se desea en el espécimen y con dimensiones similares al área que verdaderamente se desea medir.
 - c. Cerrar el micrómetro y observar la lectura.
 - d. Abrir el micrómetro aproximadamente unas 100 micras más allá de la lectura esperada y moverlo a la posición del área del espécimen donde se desea tomar la medición.
 - e. Con el ratchet o el dedal de fricción, cerrar el micrómetro a tal velocidad que las divisiones de escala puedan ser contadas fácilmente a medida que pasan la marca de referencia, esta tasa es aproximadamente 50 micras por segundo.
 - f. Continuar el cierre hasta que el ratchet haga clic 3 veces o hasta que el dedal de fricción se deslice y se observe la dimensión indicada.
 - g. Corregir la dimensión indicada por el micrómetro con el gráfico de calibración del mismo (Obtenido al momento de calibrar el micrómetro en un laboratorio estandarizado) y registrar la dimensión corregida.
 - h. Mover el espécimen a otra posición de medición y repetir los pasos del “b” al “g”.
 - i. A menos que se especifique lo contrario, realizar y registrar 3 mediciones de dimensión en cada espécimen. La media aritmética de todos los valores de dimensión es la dimensión aceptada de muestra.
3. Colocar los especímenes en los agarres de la máquina de ensayo, teniendo el cuidado de alinear el eje largo del espécimen y de los agarres

con una línea imaginaria uniendo los puntos de sujeción de los agarres a la máquina. Además, se deberá de tener el cuidado de apretar los agarres uniforme y firmemente para evitar el deslizamiento, pero sin aplastar el espécimen. Cuando se utilicen especímenes planos, la distancia entre los extremos debe ser la indicada en la norma. Esta distancia en los agarres y la posición de estos sobre el espécimen al momento del ensayo es de 168 mm.

4. Acoplar el extensómetro si se desea determinar el módulo de elasticidad.
5. Establecer la velocidad del ensayo a la velocidad apropiada según lo requerido en la sección 8 de la norma. Ya que en el presente estudio se ha utilizado el tipo I de espécimen con adaptaciones, la velocidad del ensayo tomada de la Tabla 3 es de $5 \pm 25\% \text{ mm/min}$ lo que es igual a $0.2 \pm 25\% \text{ in./min}$ con una velocidad de deformación nominal al inicio del ensayo de $0.1 \text{ mm/mm}\cdot\text{min}$.

Tabla 3 Tabla de velocidades de ensayo de la norma ASTM D638. (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2015)

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

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

6. Iniciar la máquina y registrar la curva de carga – extensión del espécimen.
7. Registrar la carga y la extensión en el punto de fluencia (si existe) y nuevamente al momento de la ruptura.

2.3.2. Proceso de ensayo de flexión basado en la norma ASTM – D790

Atendiendo a lo desarrollado en la norma, es posible describir de forma resumida el proceso del ensayo de la siguiente manera:

1. Acondicionar (climatizar) los especímenes de acuerdo a lo especificados en las normas D638 y principalmente en la D618, en las cuales se recomienda el procedimiento A de la norma D618. Sin embargo, para este estudio se utilizará el procedimiento G de la norma D618 por ser el más indicado, útil y confiable para climas tropicales como el de El Salvador. El acondicionamiento es el siguiente:
 - a. Colocar los especímenes en el lugar de acondicionamiento por un mínimo de 88 horas (para el presente estudio), deben de ser colocados de manera que pueda circular libremente el aire a través de ellos, ya sea colgándolos con ganchos, colocándolos sobre mallas de agujero ancho o en algún tipo de depósito que lo permita.
 - b. La temperatura ambiental durante el tiempo de acondicionamiento debe de ser de $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - c. La humedad relativa debe de ser del $65\% \pm 10\%$.
2. Para cada medición utilice un espécimen no ensayado anteriormente. Mida el ancho y la profundidad de cada espécimen con una precisión cercana a 0.03 mm al centro de los puntos de soporte del claro de viga. Las mediciones deben de estar de acuerdo a los métodos de la norma D5947:

- a. Usar un micrómetro de ratchet o de fricción con la precisión apropiada.
- b. Ubicar el micrómetro en un área diferente a la que se desea en el espécimen y con dimensiones similares al área que se desea medir.
- c. Cerrar el micrómetro y observar la lectura.
- d. Abrir el micrómetro aproximadamente unas 100 micras más allá de la lectura esperada y moverlo a la posición del área del espécimen donde se desea tomar la medición.
- e. Con el ratchet o el dedal de fricción cerrar el micrómetro a tal velocidad que las divisiones de escala puedan ser contadas fácilmente a medida que pasan la marca de referencia, esta tasa es aproximadamente 50 micras por segundo.
- f. Continuar el cierre hasta que el ratchet haga clic 3 veces o hasta que el dedal de fricción se deslice y se observe la dimensión indicada.
- g. Corregir la dimensión indicada por el micrómetro con el gráfico de calibración del mismo (Obtenido al momento de calibrar el micrómetro en un laboratorio estandarizado) y registrar la dimensión corregida.
- h. Mover el espécimen a otra posición de medición y repetir los pasos del “b” al “g”.
- i. A menos que se especifique lo contrario, realizar y registrar 3 mediciones de dimensión en cada espécimen. La media aritmética de todos los valores de dimensión es la dimensión aceptada de muestra.

3. Determinar el claro de viga a utilizar según lo indicado en la sección 7 de la norma y establézcalo en la máquina con un error del 1 % del valor determinado y con una precisión cercana a 0.3 mm. Para el presente estudio, este valor ha sido establecido según las limitaciones del equipo de ensayo, el cual solo puede cerrarse como máximo a 14 cm.
4. Calcular la velocidad de movimiento de la nariz de carga y establecer dicho valor en la máquina, el cual bajo ningún caso deberá diferir por más de $\pm 10\%$ del valor calculado, en cuyo cálculo se utiliza la siguiente formula:

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Ecuación 2-1

En donde:

- R = Velocidad de movimiento de la cruceta o nariz de carga en mm/min
- L = Claro de viga entre los puntos de apoyo en mm.
- d = Profundidad del haz de viga en mm.
- Z = Velocidad de deformación de la fibra exterior de la viga en $\frac{mm}{mm.min}$ la cual debe de ser igual 0.01.

Para el caso de estudio:

- R = Valor a calcular.
- L = De las limitantes del equipo de ensayo, el valor es 140 mm.
- d = De las limitantes del equipo de ensayo y lo indicado por la norma, el valor es 8.75 mm.
- Z = De lo indicado por la norma, el valor es $0.01 \frac{mm}{mm.min}$.

Sustituyendo:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} = \frac{\left(0.01 \frac{mm}{mm \cdot min}\right) (140 mm)^2}{6(8.75 mm)} = \frac{196 \frac{mm^2}{min}}{52.5 mm} = 3.7333 \frac{mm}{min}$$

5. Alinear la nariz de carga y los soportes de modo que los ejes de las superficies cilíndricas sean paralelos y la nariz de carga esté a la mitad de la distancia entre los soportes.
6. Centrar el espécimen sobre los soportes, con el eje largo del espécimen perpendicular a la nariz de carga y los soportes. La nariz de carga debe de estar cercana a, pero no en contacto con el espécimen.
7. Aplicar la carga sobre el espécimen a la velocidad especificada y registrar simultáneamente datos de carga – deflexión.
8. Medir la deflexión, ya sea por el movimiento relativo de la nariz de carga con respecto a los soportes o por el uso de un deflectómetro bajo el espécimen en contacto con él al centro del claro de viga.
9. Terminar el ensayo cuando se haya alcanzado la deformación máxima en la superficie exterior del espécimen con un valor de $0.05 \frac{mm}{mm}$, o también si ocurre la fractura antes de alcanzar la deformación máxima. Para calcular la deflexión a la cual ocurrirá dicha deformación y considerando que “r” sea igual a $0.05 \frac{mm}{mm}$, se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\varepsilon_f L^2}{6d}$$

Ecuación 2-2

Donde:

- D = Deflexión del punto medio del claro de viga en mm.
- ε_f = Deformación en las fibras exteriores del espécimen, en $\frac{mm}{m}$.
- L = Claro de viga entre los puntos de apoyo en mm.

- d = Profundidad del haz de viga en mm.

Para el caso de estudio:

- D = Valor a calcular.
- $r = 0.05 \frac{mm}{mm}$. (De lo indicado por la norma)
- $L = 140$ mm. (De las limitantes del equipo de ensayo)
- $d = 8.75$ mm. (De las limitantes del equipo de ensayo y lo indicado por la norma.)

Sustituyendo:

$$D = \frac{rL^2}{6d} = \frac{\left(0.05 \frac{mm}{mm}\right) (140 \text{ mm})^2}{6(8.75 \text{ mm})} = \frac{980 \text{ mm}^2}{52.5 \text{ mm}} = 18.6667 \text{ mm}$$

Los métodos definidos por la norma no son aplicables más allá del 5 % de deformación. En materiales que no presentan fluencia ni fractura dentro del límite, es más conveniente utilizar los métodos de la norma D638 para caracterizar mejor las propiedades mecánicas.

Para algunos materiales que no presentan fluencia o fractura dentro del límite de 5 % de deformación, se realiza el mismo procedimiento, pero cambiando el valor de Z (la velocidad de deformación) a $0.1 \frac{mm}{mm.min}$, lo cual podría inducir al espécimen a presentar fluencia, fractura o ambos dentro del límite del 5 %. Es decir, el nuevo valor de la velocidad de movimiento de la cruceta o nariz de carga sería:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} = \frac{\left(0.1 \frac{mm}{mm.min}\right) (140 \text{ mm})^2}{6(8.75 \text{ mm})} = \frac{1960 \frac{mm^2}{min}}{52.5 \text{ mm}} = 37.3333 \frac{mm}{min}$$

Aun con esta nueva velocidad, se debe de detener el ensayo una vez se haya llegado al límite del 5 % de deformación o cuando ocurra la fractura.

2.4. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS

A pesar de que el laboratorio seleccionado para los ensayos contaba con algunas ventajas, fue necesario realizar algunos ajustes en los especímenes de ensayo y que son permitidos por la norma, para poder realizar los ensayos con el equipamiento de dicho laboratorio.

2.4.1. Diseño de las probetas para el ensayo de tracción

Para la descripción de las consideraciones tomadas en el diseño de los especímenes de prueba, es necesario conocer la nomenclatura utilizada por la norma ASTM - D638 para describir las dimensiones de los especímenes, según lo mostrado en la Figura 22, la nomenclatura es la siguiente:

- W: Ancho de la sección estrecha.
- L: Largo de la sección estrecha.
- WO: Ancho total (mínimo).
- LO: Largo total (mínimo).
- G: Longitud calibrada.
- D: Distancia entre agarres.
- R: Radio del filete.

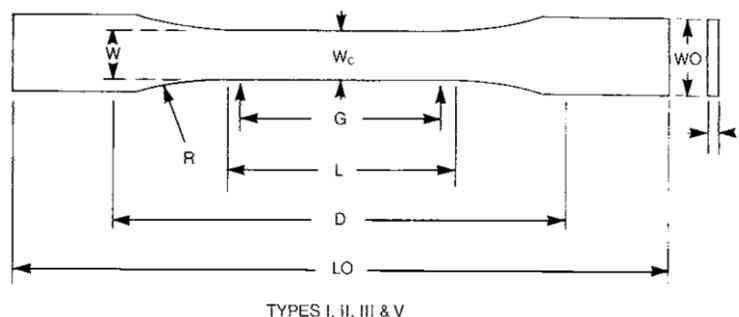


Figura 22 Nomenclatura de las dimensiones de los especímenes de prueba, utilizada por la norma ASTM - D638 para los tipos I, II, III y V. (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2015).

Las dimensiones de las probetas están dadas por la norma, sin embargo, la norma permite ajustes en el diseño para que puedan cumplir con condiciones especiales en el estudio que se desee hacer o con las existentes en el laboratorio donde se realicen los ensayos.

Para el diseño de los especímenes se debieron tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El extensómetro incluido con la máquina universal de ensayo de materiales, tiene un espacio de muestra (L) mínimo de 100 mm; en especímenes con un espacio menor al mencionado, no se les podrá colocar el extensómetro por falta de espacio por lo que es necesario calcular el valor del módulo de elasticidad de forma manual a partir de los datos puntuales del ensayo y del gráfico esfuerzo – deformación.
- Las mordazas de agarre de la máquina universal de ensayo de materiales, son del tipo de apriete automático. Como los materiales a ensayar son polímeros, es posible que se produzca deslizamiento en el agarre al utilizar las dimensiones propuestas por la norma.

Estas consideraciones, abaladas y comentadas en la norma, dieron como resultado cambios en el diseño los cuales se pueden observar y comparar con la Figura 23 y la Figura 24 que muestran las diferencias entre el espécimen originalmente propuesto por la norma y el espécimen con las dimensiones ajustadas a las siguientes decisiones en el diseño:

- Para poder hacer uso del extensómetro se extendió el largo de la sección estrecha (L) de los especímenes de prueba del valor indicado por la norma de 57 mm a 110 mm, lo que incluso deja un margen de maniobrabilidad de 10 mm para colocar más cómodamente el extensómetro.

- Para evitar el deslizamiento en los agarres y gracias a que las mordazas aun cuentan con espacio de agarre, se extendió el espacio entre los extremos del espécimen y el inicio de los filetes (en donde comienza el estrechamiento). Aunque no se muestra en la norma, con las dimensiones propuestas esta longitud es de 32.86 mm y se extendió a 45.86 mm para asegurar un mejor agarre.
- Cabe mencionar que para ahorrar material el diseño de los especímenes ha sido hecho con el espesor mínimo permitido por la norma. Esto debido a que, con el aumento de longitud en los especímenes, estos hubieran utilizado más material del que se utilizaría normalmente con las dimensiones propuestas por la norma.

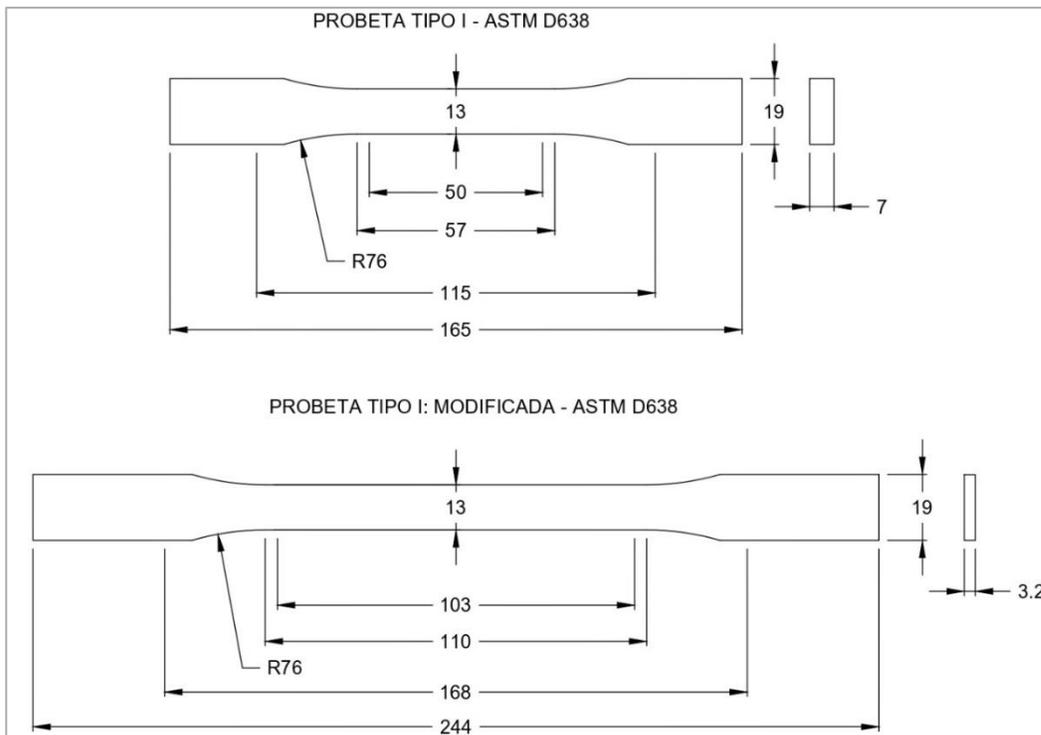


Figura 23 Comparación de las dimensiones de la probeta tipo I de la norma ASTM D638 con las medidas recomendadas por la norma (probeta de la parte superior de la imagen) y de la probeta con las modificaciones permitidas por la norma (probeta de la parte inferior de la imagen).

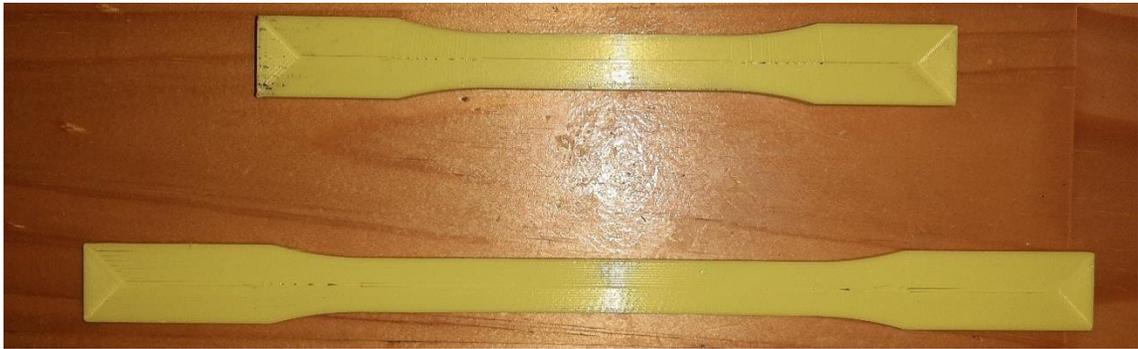


Figura 24 Comparación de las probetas impresas de tipo I de la norma ASTM D638 con las medidas recomendadas por la norma (probeta de la parte superior de la imagen) y modificaciones permitidas por la norma (probeta de la parte inferior de la imagen).

2.4.2. Diseño de las probetas para el ensayo de flexión

En el caso de las probetas para el ensayo de flexión, la norma ASTM D790 proporciona valores, rangos de valores y proporciones entre los valores para las dimensiones, los cuales se mencionan en el apartado 7 de la misma.

Para el diseño de estas probetas se tomaron consideraciones tanto de aquellas mencionadas por la norma como de los requisitos especiales del laboratorio de ensayo, estas consideraciones son las siguientes:

- En el equipo del laboratorio, los puntos de apoyo del espécimen se pueden cerrar como máximo a 14 cm. Es decir, que el claro de viga mínimo que se puede tener para los ensayos es de 14 cm, por lo que, el largo del espécimen debe de ser superior a 14 cm.
- Mencionado en el apartado 7.3.1 de la norma, los extremos del espécimen deben de sobresalir al menos un 10% más allá de los puntos de apoyo del claro de viga, pero nunca menos de 6.4 mm. Esto para procurar que el espécimen este en contacto con los puntos de apoyo y no se deslice entre éstos, cuando se esté realizando el ensayo.

- Ya que se ha definido el claro de viga mínimo en 14 cm, el largo mínimo del espécimen debe ser:
 - $\frac{140\text{ mm (1.1)} - 140\text{ mm}}{2\text{ extremos}} = 7\text{ mm}$
 - $140\text{ mm} + 7\text{ mm (2 extremos)} = 154\text{ mm}$
 - Con esta consideración se obtiene que el largo mínimo que puede tener el espécimen es de 154 mm. Sin embargo, por precaución esta longitud se extendió a 200 mm.
- Mencionado a lo largo del apartado 7 de la norma, se toma como regla general una proporción de 16:1 entre el claro de viga y la profundidad del espécimen. Cabe agregar que, en la norma la “profundidad” del espécimen es el espesor, pero es llamado así ya que es la dimensión que se extiende en la probeta de arriba a abajo o viceversa, cuando ésta es colocada horizontalmente entre los puntos de apoyo, siendo esta dimensión parte de la “profundidad” que baja la nariz de carga cuando se realiza el ensayo.
 - Ya que se tiene definido que el claro de viga mínimo es de 14 cm:
 - $140\text{ mm} / 16 = 8.75\text{ mm}$
 - De la regla general de proporción de 16:1 del claro de viga y la profundidad, obtenemos que la profundidad (espesor) del espécimen debe de ser de 8.75 mm.
- Mencionado en la nota 15 de la norma, si la sensibilidad de la máquina permite registrar correctamente la carga, no es necesario modificar el ancho recomendado de 12.7 mm.

Estas consideraciones dan a lugar al diseño utilizado para el presente estudio, mostrando una comparación de este diseño con el recomendado por la norma en el apartado 7.5 en la Figura 25 y la Figura 26.

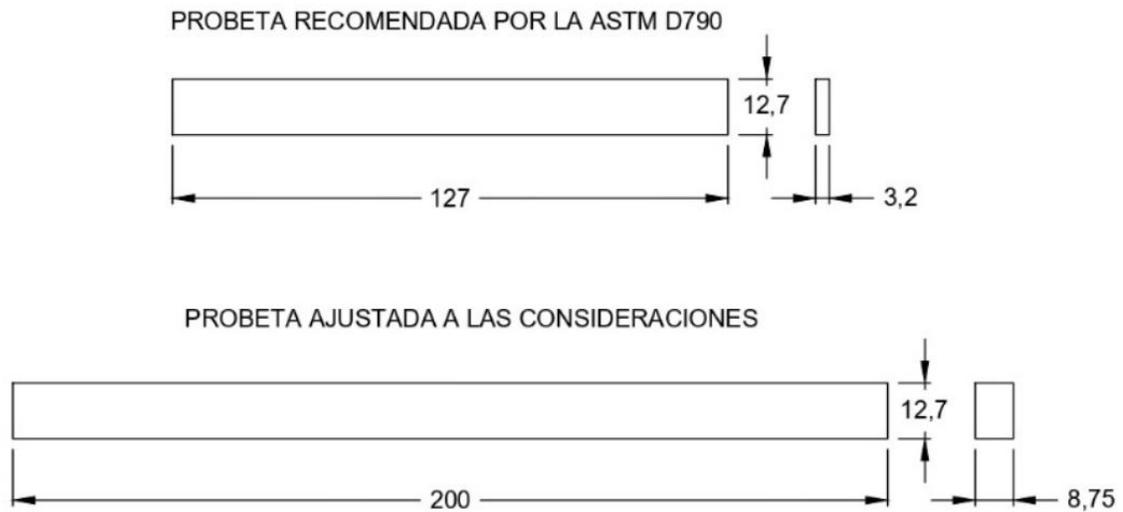


Figura 25 Comparación de las dimensiones de la probeta recomendada por la ASTM D790 (probeta de la parte superior de la figura) y la probeta con las dimensiones ajustadas a las consideraciones hechas para el diseño (probeta de la parte inferior de la figura).



Figura 26 Comparación de las probetas impresas con las dimensiones recomendadas por la ASTM D790 (probeta de la parte superior de la figura) y con las dimensiones ajustadas a las consideraciones hechas para el diseño (probeta de la parte inferior de la figura).

2.5. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

En la fabricación de los especímenes de prueba se utilizaron 2 diferentes impresoras 3D dependiendo del material del espécimen. En el caso de los especímenes fabricados con PAHT CF15 se utilizó la Epsilon W50 del fabricante español BCN3D, la cual se muestra en la Figura 27 y es una impresora que

apunta con su diseño y fabricación al mercado empresarial y a lograr piezas de uso final y no solo prototipos.

El motivo para usar esta impresora 3D es que cuenta con algunas características que le permiten ser de las pocas impresoras que existen actualmente, capaces de imprimir con el PAHT CF15. Para el uso de esta impresora, el fabricante BCN3D proporciona una aplicación para computadora llamada “BCN3D Stratos”, que es una aplicación basada en el código fuente de la aplicación “Ultimaker Cura” pero que ha sido adaptada a las características especiales del impresor.



Figura 27 Impresora BCN3D: Epsilon W50.

En el caso de los especímenes fabricados con PLA se utilizó la Ender – 3 del fabricante chino Creality. Esta impresora se muestra en la Figura 28 y es una impresora destinada al uso doméstico, de aficionados o educativo; cuyo propósito principal es crear prototipos pero que debido a su diseño permite una gran versatilidad al permitir modificaciones que mejoren sus prestaciones.



Figura 28 Impresora Creality: Ender – 3.

Para el uso de esta impresora, Creality ha desarrollado la aplicación “Creality Slicer”, basada en “Ultimaker Cura” y que ha sido adaptada para hacer uso de las máquinas del fabricante.

Esta aplicación posee muy pocas diferencias con “Ultimaker Cura”, junto con el diseño simple y pocos componentes de la Ender – 3, vuelve posible el utilizar directamente “Ultimaker Cura” para hacer uso de la impresora y es la aplicación que ha sido utilizada en este caso, ya que generalmente se vuelve una mejor opción al haber un mejor ciclo de mantenimiento de esta aplicación.

Las aplicaciones basadas en Cura suelen tener la gran mayoría de ajustes que posee Cura, que cuenta con alrededor de 600 opciones, lo que hace muy difícil que se utilicen todas. Además, los ajustes del perfil de impresión pueden variar dependiendo del tipo de impresora, de los componentes de la impresora, de la pieza que se esté imprimiendo, del material, entre otros; lo que suele provocar que algunas veces los valores establecidos en los ajustes sean específicamente útiles para casos muy puntuales.

Por estos motivos solo se hará mención cuando sea necesario, de los ajustes relacionados con la operacionalización de variables realizada en el apartado 2.1 y que son necesarios para lograr cierta repetibilidad de los resultados del presente y cualquier otro estudio similar que se desee realizar. Cabe agregar que la descripción completa de los perfiles de impresión utilizados para imprimir los especímenes sería demasiado extensa y poco útil, ya que muchos ajustes de los que no se hará mención tendrán que ser valorados por la experticia del operario con la máquina que se esté utilizando y de las condiciones en las que se encuentre.

A partir de este punto, se vuelve necesario el diferenciar los especímenes según el grado de rotación de la pieza con la cama de impresión, es decir, la dirección de impresión de los especímenes.

En primer lugar, se definirán los ejes de los especímenes, en ambos casos, tanto para el espécimen del ensayo de flexión como el de tensión, se coloca el eje más largo del espécimen de manera que sea paralelo al eje X de coordenadas y se define el origen en alguna de las esquinas donde se intersequen el largo y el ancho del espécimen.

Una vez hecho lo anterior, tal y como se muestra en la Figura 29, por norma general en las aplicaciones de diseño asistido por computadora y los slicer, los siguientes colores para los ejes:

- Rojo: Eje X.
- Verde: Eje Y.
- Azul: Eje Z.

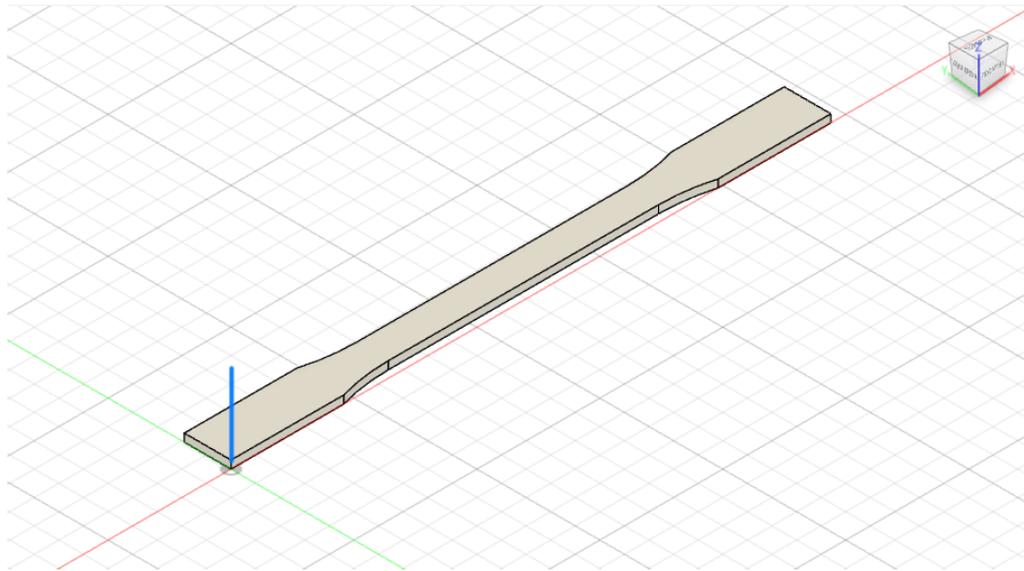


Figura 29 Ejemplo de ejes de coordenadas en los especímenes: Rojo – Eje X, Verde – Eje Y & Azul – Eje Z.

Con los ejes definidos es posible definir los planos del espécimen y con ello se puede categorizar a los especímenes según la dirección de la capa de impresión que se haya utilizado. Las categorías se pueden visualizar en la Figura 30 y se definen de la siguiente forma:

- Especímenes YZ: Son aquellos cuya capa de impresión es paralela al plano YZ del espécimen. Para la impresión, el espécimen debe de haber rotado 90° sobre su eje Y.
- Especímenes XZ: Son aquellos cuya capa de impresión es paralela al plano XZ del espécimen. Para la impresión, el espécimen debe de haber rotado 90° sobre su eje X.
- Especímenes XY: Son aquellos cuya capa de impresión es paralela al plano XY del espécimen. Para la impresión, el espécimen no debe de haber presentado rotación en el eje Y o el X.

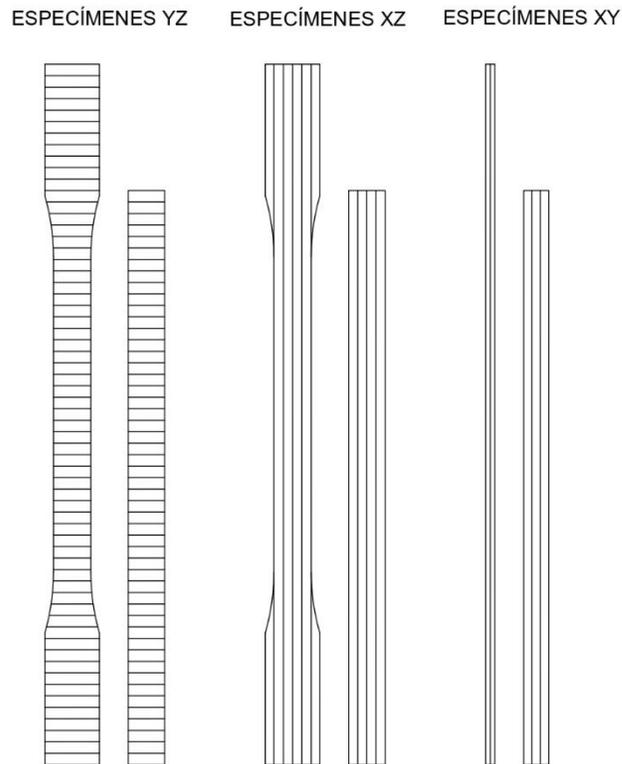


Figura 30 Categorización de especímenes de prueba, según la dirección de impresión.

En este estudio se han impreso los especímenes XY y YZ por ser los más relevantes, ya que las capas de impresión entre ambos especímenes están en planos completamente perpendiculares y ha sido demostrado por algunos fabricantes que esto produce la mayor variación en las propiedades del material.

En cambio, entre los especímenes XY y XZ al estar las capas de ambos especímenes en dirección del eje X, que es a su vez la dirección en la que actúa la carga de tensión, ambos especímenes producen resultados similares con una diferencia poco relevante. Sin embargo, es posible que esto no sea así para el ensayo de tracción, pero el ensayo de tracción en los especímenes XZ queda fuera del alcance del presente estudio.

2.5.1. Impresión de especímenes XY

Los especímenes XY son los que representan menos complicaciones al imprimir ya que tienen más área de contacto con la cama de impresión y su centro de gravedad está más cercano a dicha cama, lo que da como resultado que los especímenes no se muevan con el movimiento de la cama o de la boquilla al depositar material y por lo tanto no se despegan de la cama cuando se están imprimiendo.

En el caso de los especímenes XY, en primer lugar, se diseñó el proceso de impresión, los slicers de las impresoras, estableciendo valores para los ajustes del perfil de impresión para un espécimen que será utilizado para realizar una impresión de prueba. Los valores establecidos para los ajustes de interés se muestran en la Tabla 4 y es posible observar un ejemplo de la interfaz de usuario de las aplicaciones utilizadas en la Figura 31.

Tabla 4 Ajustes de interés del perfil de impresión de los especímenes XY.

| | PAHT CF15 | PLA |
|---------------------------------------|--|--|
| Altura de capa | <ul style="list-style-type: none">Tensión: 0.4 mmFlexión: 0.35 mm | <ul style="list-style-type: none">Tensión: 0.4 mmFlexión: 0.35 mm |
| Altura de capa inicial | <ul style="list-style-type: none">Tensión: 0.4 mmFlexión: 0.35 mm | <ul style="list-style-type: none">Tensión: 0.4 mmFlexión: 0.35 mm |
| Ancho de línea (Diámetro de boquilla) | 0.66 mm (0.6 mm) | 0.6 mm (0.6 mm) |
| Densidad de relleno | 100 % | 100 % |
| Patrón de relleno | Concéntrico | Concéntrico |
| Temperatura de impresión | 275 °C | 205 °C |
| Temperatura de la placa de impresión | 95 °C | 60 °C |
| Velocidad de impresión | 30 mm/s | 30 mm/s |

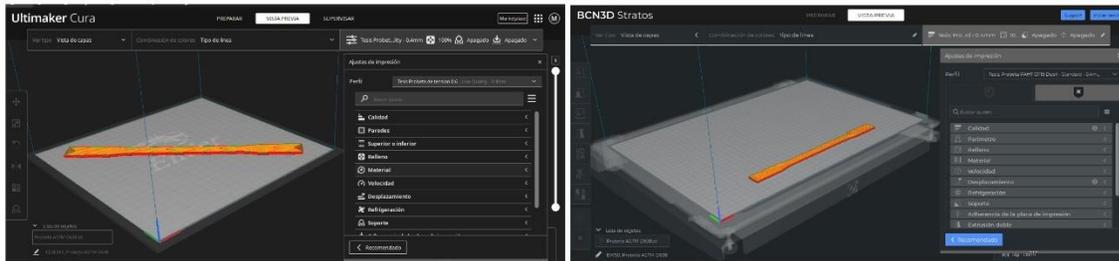


Figura 31 Interfaz de usuario de Ultimaker Cura (Izquierda) y BC3D Stratos (Derecha) al establecer los ajustes del perfil de impresión.

En cuanto al ajuste de “altura de capa” es importante aclarar que, para establecer dicho valor, se tomó en consideración el utilizar la altura de capa máxima permitida por el diámetro de boquilla y que permitiera aproximarse lo más posible al espesor del espécimen, tomando en cuenta el número de capas que se utilizarían para imprimir el espécimen.

De esa consideración se obtuvo para el espesor de 3.2 mm del espécimen de tracción, una altura de capa de 0.4 mm, ya que 3.2 mm entre 0.4 mm da como resultado un número entero de capas (8 capas), asegurando que la impresión se aproximará lo más posible a la dimensión deseada.

De igual manera, en el caso del espécimen de tracción, 8.75 mm entre 0.35 mm da como resultado exactamente 25 capas.

El valor de 0.66 mm de ancho de línea para los especímenes impresos se hizo para solucionar el desbordamiento provocado por la viscosidad del material al imprimir, lo que provocaba frecuentes atascos en la impresora. Con ese valor se logró una mejor separación entre las líneas de impresión.

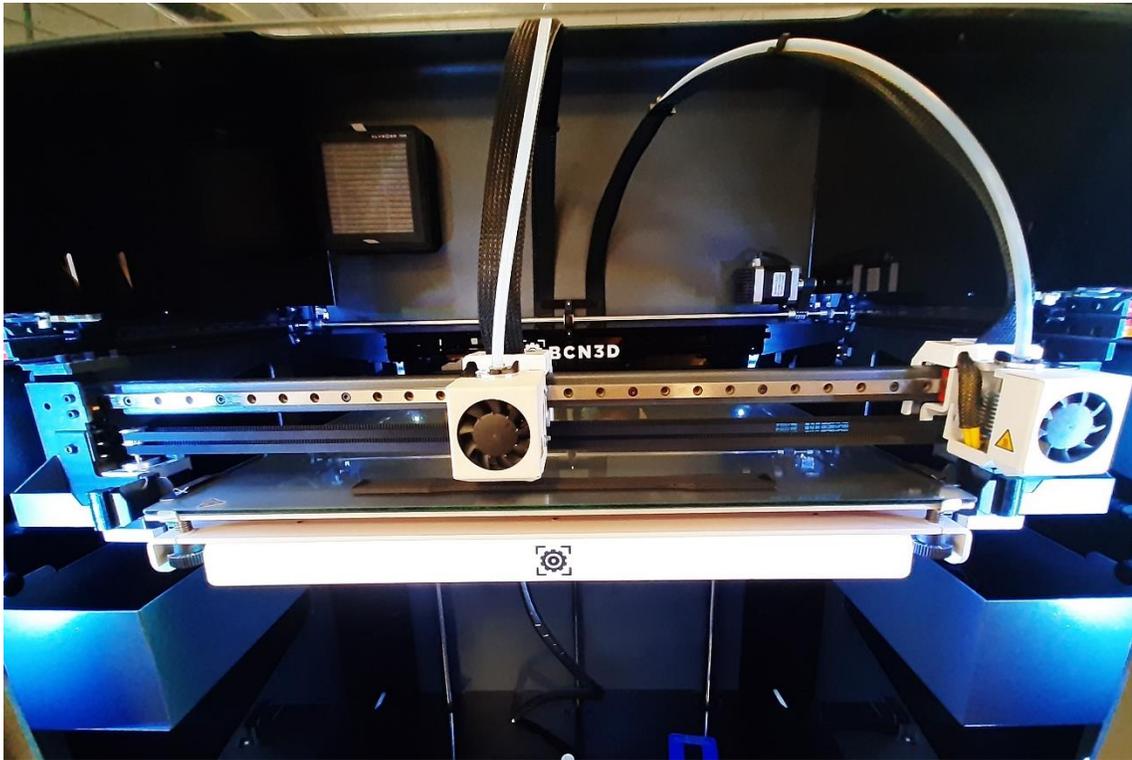


Figura 32 Impresión de prueba de un espécimen XY para ensayo de tracción.

Una vez obtenido un perfil de impresión, se sometió a prueba su funcionalidad imprimiendo un espécimen tal como se muestra en la Figura 32. Si la impresión resulta satisfactoria ese espécimen será utilizado para los ensayos, si no, se aplicarán ajustes al perfil de impresión y se realizará otra prueba de impresión.

Una vez ha sido verificada la funcionalidad del perfil de impresión, se imprimen en lote el resto de especímenes necesarios para los ensayos, lo que se visualiza en la Figura 33.

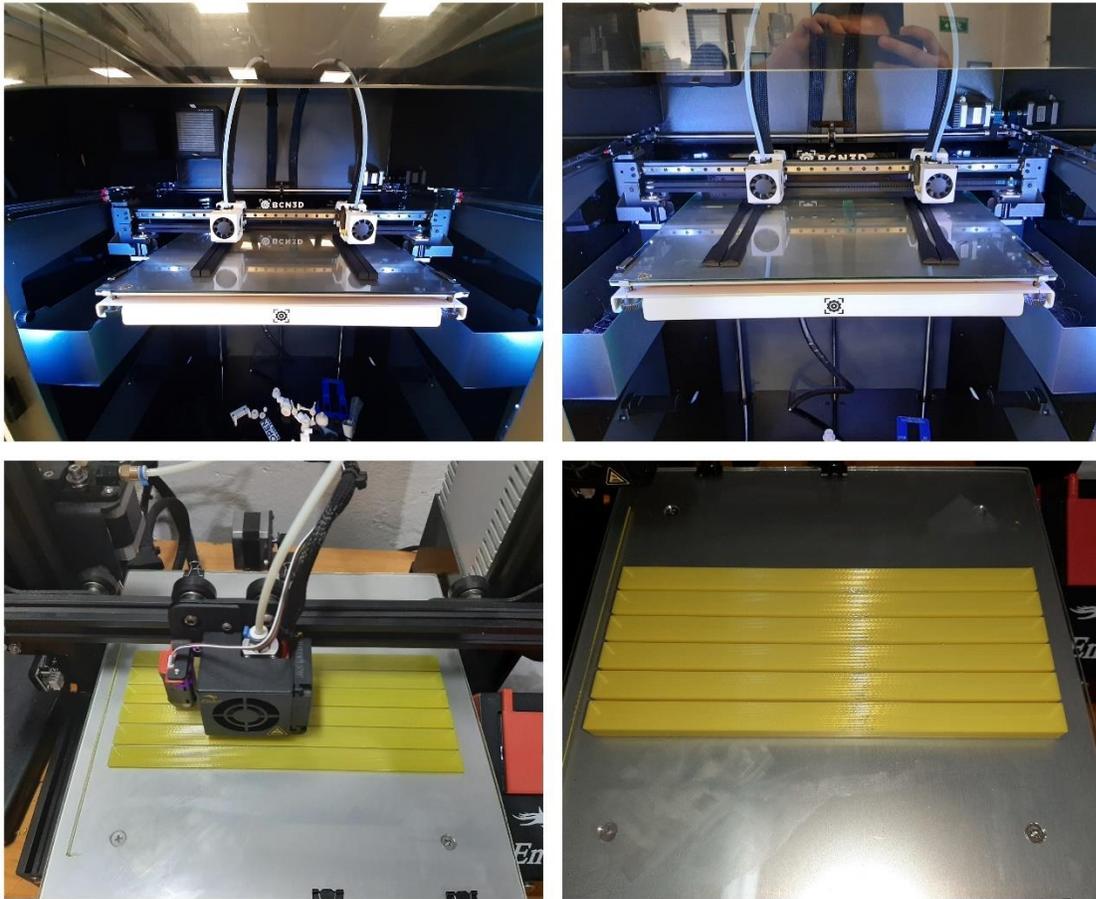


Figura 33 Impresión por lotes de los especímenes XY.

2.5.2. Impresión de especímenes YZ

La impresión de estos especímenes representó dificultades, ya que el centro de gravedad de los mismos se encuentra demasiado elevado de la cama de impresión y no poseen mucha área de contacto con la misma.

Esto provoca el incremento de la altura de la boquilla de impresión y con el movimiento de la cama de impresión, el espécimen comenzara a tambalearse, provocando que se despegue de la cama y estropeando así la impresión. Es posible solucionar este problema aumentando el área de contacto con la cama de impresión, haciendo que la impresión posea más agarre.

Por ello, el proceso de impresión de los especímenes YZ difiere del de los especímenes XY, ya que se vuelve necesario el buscar una forma de aumentar el área de contacto. Para este caso se realizó primero un diseño que permitiera imprimir los especímenes.

El diseño de estas estructuras de impresión se visualiza en la Figura 34. En general son una serie de vigas que conectan los especímenes, que junto al ajuste de “Borde” como tipo de adherencia a la placa de impresión en los slicer, logran aumentar en gran medida el área de contacto con la placa de impresión. Además, las conexiones entre los especímenes hacen mucho más difícil que se muevan de forma independiente.

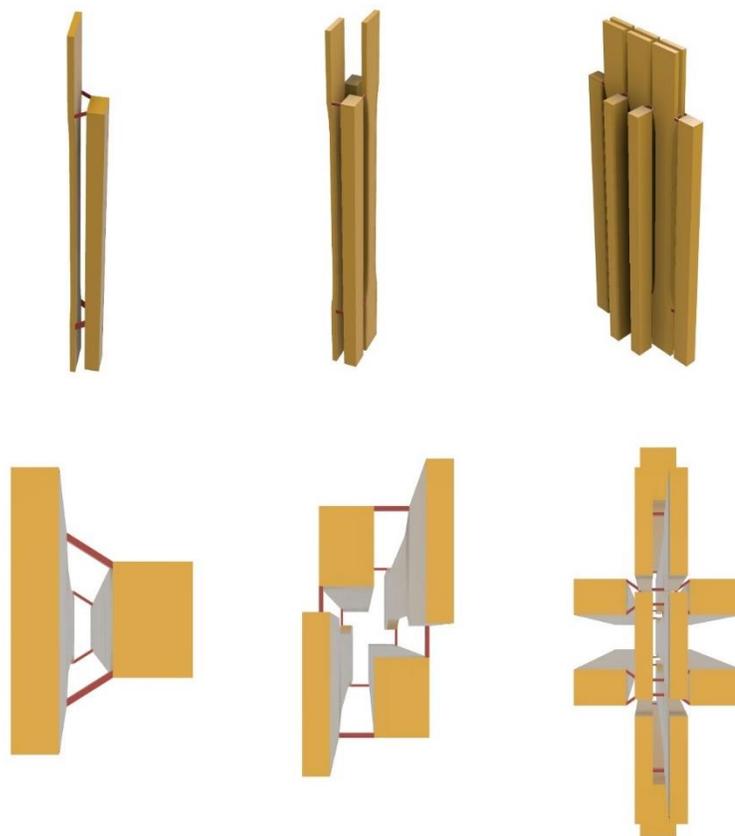


Figura 34 Estructuras de impresión de los especímenes YZ, nótese las vigas de sujeción resaltadas en rojo.

Se utilizaron 3 diseños considerando que para estos especímenes ya no era necesario verificar el funcionamiento del perfil de impresión, ya que fue verificado para los especímenes XY. Por ello, tampoco es necesario realizar impresiones de prueba sino imprimir por lotes los especímenes.

Por añadidura, para aprovechar la productividad duplicada de la Epsilon W50 que puede utilizar simultáneamente 2 boquillas de impresión, se crearon en específico 2 estructuras, mostradas en la Figura 34 de izquierda a derecha. Las primeras dos estructuras para imprimir en PAHT CF15. La tercera estructura que se muestra en la parte derecha de la Figura 34 corresponde a los especímenes impresos en PLA en la Ender 3.

Los valores establecidos en los ajustes del perfil de impresión para los especímenes YZ se pueden observar en la Tabla 5. Se procede a la impresión de las probetas haciendo uso de las estructuras diseñadas y del perfil de impresión, partes de este paso se pueden ver en la Figura 35.

Tabla 5 Ajustes de interés del perfil de impresión de los especímenes YZ.

| | PAHT CF15 | PLA |
|---------------------------------------|------------------|-----------------|
| Altura de capa | 0.4 mm | 0.4 mm |
| Altura de capa inicial | 0.4 mm | 0.4 mm |
| Ancho de línea (Diámetro de boquilla) | 0.66 mm (0.6 mm) | 0.6 mm (0.6 mm) |
| Densidad de relleno | 100 % | 100 % |
| Patrón de relleno | Concéntrico | Concéntrico |
| Temperatura de impresión | 275 °C | 205 °C |
| Temperatura de la placa de impresión | 95 °C | 60 °C |
| Velocidad de impresión | 10 mm/s | 30 mm/s |

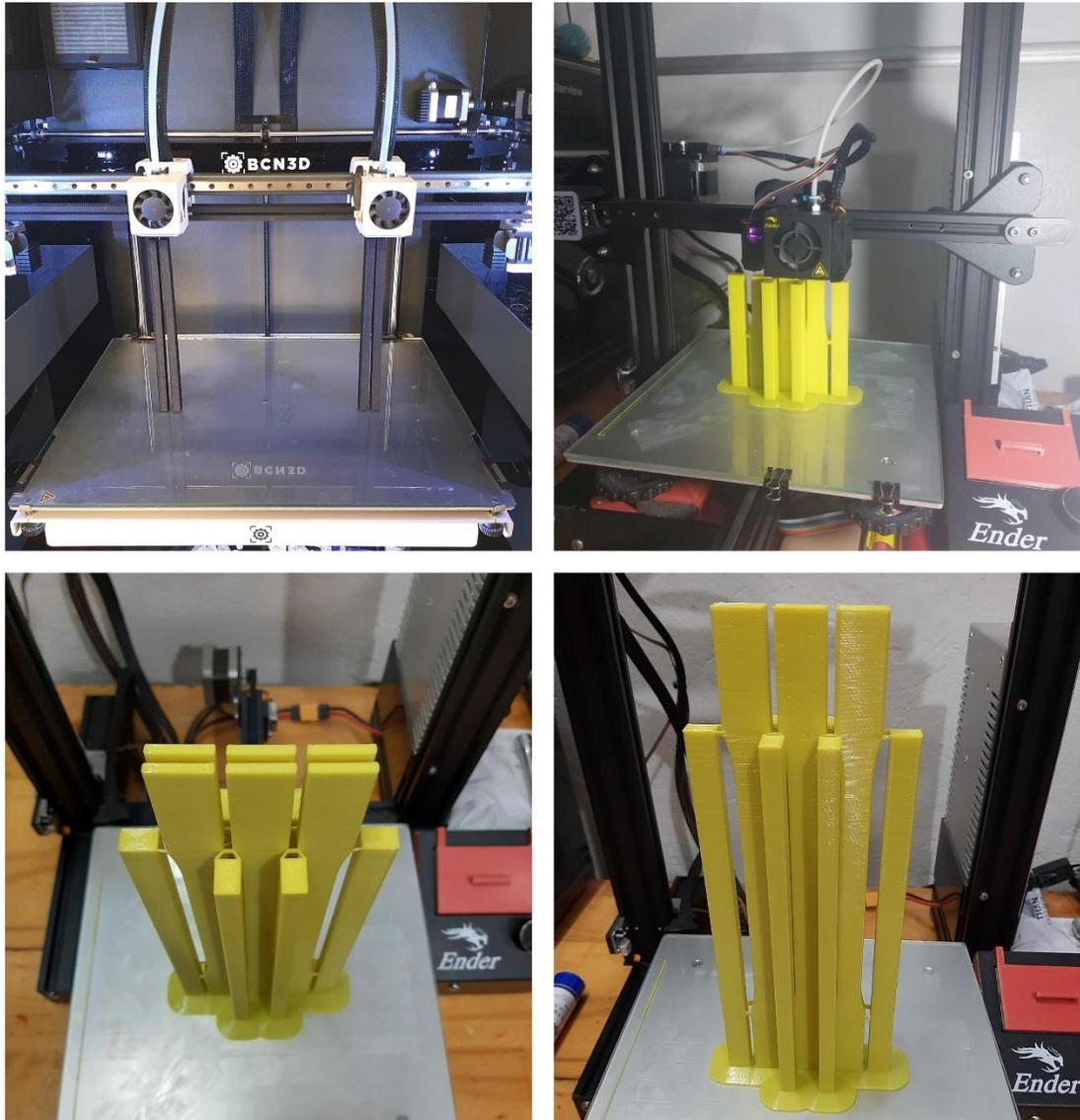


Figura 35 Impresión de los especímenes YZ.

Cabe agregar que el uso de una estructura para poder imprimir los especímenes YZ implica que, una vez terminada la impresión, es necesario mecanizar los especímenes removiendo las vigas y cualquier remanente de material que éstas pudieran dejar, haciendo uso de alicates, abrasivos o cualquier otra herramienta para mecanizar los remanentes. Parte de esto se muestra en la Figura 36.

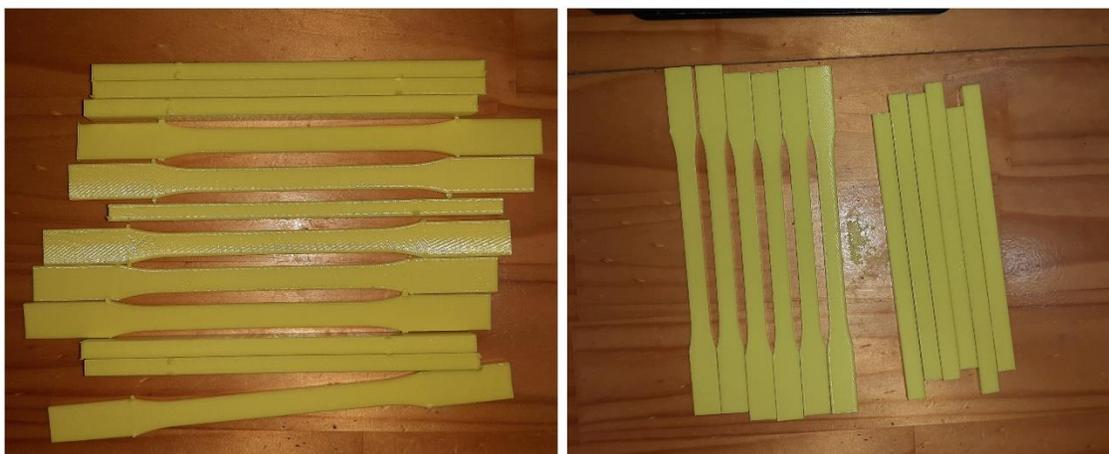


Figura 36 Mecanizado posimpresión de los especímenes YZ de PLA.

2.5.3. Defectos en el material tras la impresión

La impresión 3D como cualquier otro proceso de fabricación no está exento de provocar defectos en el material tras el proceso. En este caso, tal y como se muestra en la Figura 37, se observan defectos a simple vista y en diferentes especímenes como, por ejemplo, excesos de material o agujeros en el material. La vista de estos defectos a través de un microscopio digital puede observarse en la Figura 38.

Estos defectos en la impresión 3D suelen ser comunes y, aunque se puede reducir su aparición, es virtualmente imposible eliminarlos por completo. Su aparición puede llegar a ser aleatoria en muchos casos, dependiendo de la condición del impresor o incluso de la condición del material, tomando en cuenta la característica higroscópica de los polímeros, pudiendo crearse agujeros al imprimir, a partir de burbujas de vapor por el exceso de humedad en el material.



Figura 37 Defectos visibles en el material impreso.

Los defectos presentados son de interés para el presente estudio ya que actualmente la impresión 3D se ha esparcido a niveles en que usuarios domésticos y aficionados sin mucha experticia o conocimiento en el tema, fabrican y distribuyen productos impresos en 3D en el que, dichos defectos, pueden estar presentes.



Figura 38 Defectos en el material impreso, visto a través de un microscopio digital a 1600X.

En vista de que estos defectos pueden ser iniciadores de fallas en el material, resulta de importancia el conocer su efecto en los resultados de los ensayos, como una muestra de la calidad y nivel de resistencia que la actual mayoría de usuarios de la impresión 3D puede llegar a alcanzar bajo condiciones cotidianas

de fabricación y la poca o ninguna regulación vigente sobre los productos impresos en 3D.

Es de esta manera, que se encontrarán la mayoría de productos y no precisamente serán materiales que se hayan impreso o estudiado bajo condiciones controladas de laboratorio, representando así una forma más realista de abordar el estudio del material y que puede desembocar en otros estudios realizados para analizar los defectos que puedan ocurrir en la impresión 3D y sus causas.

2.6. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Siguiendo lo indicado en el subcapítulo 2.3 la realización de los ensayos se llevó a cabo tal como se describe a continuación, en el Laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Don Bosco.

2.6.1. Ensayos de tracción

En primer lugar, los especímenes de prueba se colocaron por aproximadamente 44 horas en la misma habitación en la que se ubica la máquina universal de ensayo, con el fin de acondicionarlos al ambiente, como se muestra en la Figura 39. En ella se destaca como los especímenes de prueba fueron atados a cordales para exponer la totalidad de su superficie al ambiente del laboratorio.

Se colocaron de las maneras especificadas por la norma D618 y haciendo uso del procedimiento G, ya que dicha habitación cuenta con las condiciones ambientales indicadas de $27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ para la temperatura ambiente y de $65 \pm 10 \%$ de humedad relativa.



Figura 39 Exposición al ambiente de los especímenes de ensayo de tracción, para el acondicionamiento al ambiente del laboratorio.

Una vez completado el requisito mínimo de tiempo de acondicionamiento de la ASTM D618, que fue de 40 h, se procedió a realizar los ensayos iniciando con la categorización y toma de dimensiones de los especímenes, tal como se muestra en la Figura 40. Esto se realizó con un micrómetro y escribiendo un código en el espécimen con un marcador permanente.



Figura 40 Toma de dimensiones y categorización de especímenes de ensayo de tracción.

El código de los especímenes de prueba está compuesto por un número correlativo de la probeta seguido de una “T” que hace referencia a que es un espécimen para ensayo de tracción, por último, las dos letras restantes son el plano de impresión de las capas de impresión.

Las dimensiones de espesor y ancho tomadas con el micrómetro se muestran en la Tabla 6 para los especímenes fabricados con PLA y en la Tabla 7 para los especímenes fabricados con PAHT CF15.

Tabla 6 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PLA.

| PLA Código | Ancho | | Espesor | |
|---------------|------------|----------|---------|----------|
| | Mediciones | Promedio | Medidas | Promedio |
| 1TXY | 12.97 | 13.01 | 3.10 | 3.14 |
| | 13.05 | | 3.14 | |
| | 13.02 | | 3.19 | |
| 2TXY | 13.07 | 13.06 | 3.20 | 3.18 |
| | 13.05 | | 3.19 | |
| | 13.07 | | 3.14 | |
| 3TXY | 13.04 | 13.05 | 3.31 | 3.23 |
| | 13.06 | | 3.19 | |
| | 13.06 | | 3.18 | |
| 4TXY | 13.01 | 13.08 | 3.17 | 3.17 |
| | 13.11 | | 3.15 | |
| | 13.13 | | 3.19 | |
| 5TXY | 12.99 | 13.00 | 3.16 | 3.16 |
| | 13.00 | | 3.15 | |
| | 13.01 | | 3.17 | |
| 1TYZ | 13.06 | 13.08 | 3.35 | 3.34 |
| | 13.08 | | 3.31 | |
| | 13.09 | | 3.35 | |
| 2TYZ | 12.99 | 13.04 | 3.23 | 3.25 |
| | 13.11 | | 3.26 | |
| | 13.03 | | 3.26 | |
| 3TYZ | 12.98 | 13.13 | 3.26 | 3.26 |
| | 13.19 | | 3.25 | |
| | 13.21 | | 3.27 | |
| 4TYZ | 13.10 | 13.06 | 3.35 | 3.29 |
| | 13.04 | | 3.25 | |

| PLA | Ancho | | Espesor | |
|--------|------------|----------|---------|----------|
| Código | Mediciones | Promedio | Medidas | Promedio |
| | 13.03 | | 3.26 | |
| 5TYZ | 13.01 | 13.04 | 3.24 | 3.24 |
| | 13.06 | | 3.23 | |
| | 13.04 | | 3.26 | |
| | | | | |
| 6TYZ | 12.98 | 13.01 | 3.26 | 3.25 |
| | 13.02 | | 3.24 | |
| | 13.04 | | 3.25 | |

Tabla 7 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PAHT CF15.

| PAHT CF15 | Ancho | | Espesor | |
|-----------|---------|----------|---------|----------|
| Código | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| 1TXY | 12.59 | 12.58 | 3.25 | 3.28 |
| | 12.57 | | 3.28 | |
| | 12.58 | | 3.31 | |
| 2TXY | 12.85 | 12.86 | 3.33 | 3.33 |
| | 12.86 | | 3.34 | |
| | 12.88 | | 3.32 | |
| 3TXY | 12.70 | 12.68 | 3.34 | 3.36 |
| | 12.68 | | 3.34 | |
| | 12.65 | | 3.41 | |
| 4TXY | 12.87 | 12.83 | 3.28 | 3.31 |
| | 12.82 | | 3.38 | |
| | 12.80 | | 3.28 | |
| 5TXY | 12.91 | 12.93 | 3.27 | 3.30 |
| | 12.98 | | 3.27 | |
| | 12.91 | | 3.36 | |
| 1TYZ | 13.46 | 13.48 | 3.50 | 3.47 |
| | 13.49 | | 3.50 | |
| | 13.50 | | 3.41 | |
| 2TYZ | 13.48 | 13.45 | 3.27 | 3.34 |
| | 13.39 | | 3.34 | |
| | 13.47 | | 3.40 | |
| 3TYZ | 13.52 | 13.43 | 3.31 | 3.32 |
| | 13.41 | | 3.25 | |
| | 13.36 | | 3.39 | |
| 4TYZ | 13.51 | 13.50 | 3.48 | 3.46 |
| | 13.49 | | 3.46 | |
| | 13.50 | | 3.45 | |
| 5TYZ | 13.48 | 13.49 | 3.55 | 3.59 |

| PAHT CF15 | Ancho | | Espesor | |
|------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Código | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| | 13.49 | | 3.66 | |
| | 13.49 | | 3.55 | |
| 6TYZ | 13.47 | 13.48 | 3.44 | 3.45 |
| | 13.47 | | 3.48 | |
| | 13.49 | | 3.43 | |

Posteriormente, para cada ensayo, se colocó el espécimen a ensayar en los agarres de la máquina los cuales para este caso son de cierre y alineación automática.

En este punto, debe señalarse que, debido al mecanismo hidráulico de cierre de la máquina de ensayos, varias probetas fabricadas con PAHT CF15 y una en PLA, resultaron fracturadas al cerrar las mordazas, imposibilitando el realizar el ensayo en estos especímenes; en concreto los especímenes que resultaron afectados fueron:

- PLA: 2TYZ
- PAHT CF15: 1TYZ
- PAHT CF15: 2TYZ
- PAHT CF15: 3TYZ
- PAHT CF15: 4TYZ

Por estos casos de la fractura al cierre de las mordazas, se optó por ensayar un sexto espécimen, con la intención de recopilar datos en compensación de los especímenes fracturados.

Para aquellos especímenes que se acoplaron exitosamente a la máquina de ensayo se continuó acoplando el extensómetro al espécimen, tal como se visualiza en la Figura 41.



Figura 41 Probetas de tensión acopladas a la máquina de ensayo con un extensómetro: A la izquierda una probeta fabricada en PLA y a la derecha una fabricada en PAHT CF15.

Con el espécimen colocado en la máquina, se introdujeron los siguientes datos del espécimen en el software de la máquina:

- Número de muestra (Número correlativo del espécimen).
- Material del espécimen.
- Temperatura ambiente.
- Ancho y espesor del espécimen.
- Velocidad del ensayo.

Llegado a este punto se inició la máquina, la cual registró los datos de carga y extensión del espécimen, mostrando en pantalla luego de finalizar cada ensayo la previsualización de los resultados tal como se muestra en la Figura 42.

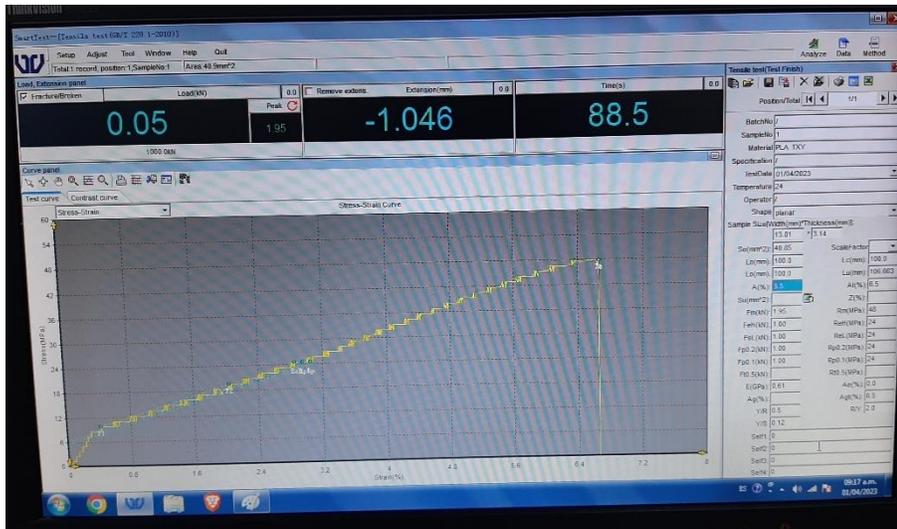


Figura 42 Ejemplo de previsualización en pantalla de los resultados de un ensayo de tracción.

Adicionalmente se guardó un reporte con los datos de carga y extensión tomados por la máquina, así como el diagrama esfuerzo – deformación, ambos con la finalidad de realizar un análisis posterior. La captura de pantalla de ambos se muestra en la Figura 43. Cabe destacar que la máquina en cada ensayo ha tomado miles de puntos o datos para generar el diagrama correspondiente.

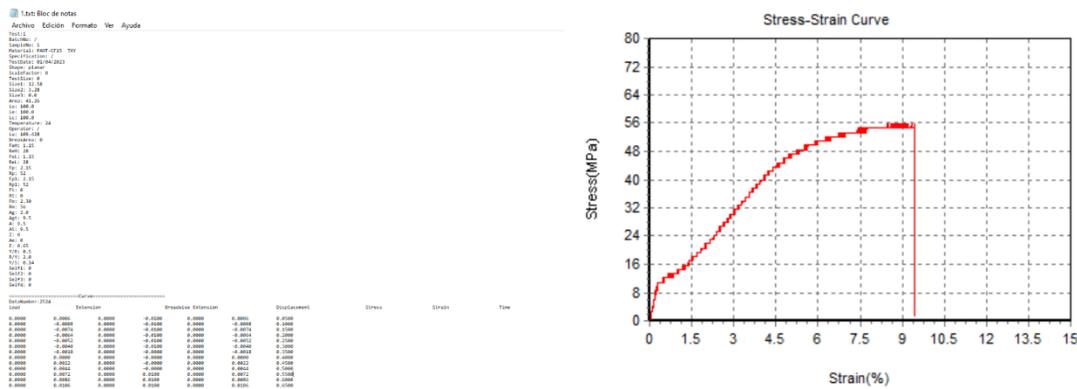


Figura 43 A la izquierda el reporte generado por la máquina al terminar un ensayo de tracción y a la derecha el diagrama de esfuerzo – deformación, generado con los datos del reporte.

2.6.2. Ensayos de flexión

Para este ensayo, los especímenes de prueba se colocaron por 88 horas en el mismo salón en el que se ubica la máquina universal de ensayo, con el fin de acondicionarlos al ambiente.

Según se muestra en la Figura 44, los especímenes fueron colocados sobre dos vigas, las cuales permitían a los especímenes reposar a aproximadamente 25 mm de altura desde la superficie de la mesa, de acuerdo a la especificación de la norma D618, cuya finalidad es poner en contacto la mayor parte de la superficie del espécimen con el ambiente, el cual puede circular libremente gracias a los 25 mm de altura entre la superficie de la mesa y los especímenes.

Los especímenes fueron colocados haciendo uso del procedimiento G, ya que dicha habitación cuenta con las condiciones ambientales indicadas de $27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ para la temperatura ambiente y de $65 \pm 10 \%$ de humedad relativa.



Figura 44 Exposición al ambiente de los especímenes de ensayo de flexión, para el acondicionamiento al ambiente del laboratorio.

Una vez completadas las 88 horas, como requisito mínimo de tiempo de acondicionamiento según la ASTM D618, se procedió a realizar los ensayos iniciando con la categorización y toma de dimensiones de los especímenes tal como se muestra en la Figura 48, utilizando un micrómetro y escribiendo un código en el espécimen con un marcador permanente.



Figura 45 Toma de dimensiones y categorización de especímenes de ensayo de flexión.

El código de los especímenes de prueba está compuesto por un número correlativo de la probeta seguido de una “F” que hace referencia a que es un espécimen para ensayo de flexión, las últimas dos letras representan el plano de impresión de las capas de impresión.

Las dimensiones de espesor y ancho tomadas con el micrómetro se muestran en la Tabla 8 para los especímenes fabricados con PLA y en la Tabla 9 para los especímenes fabricados con PAHT CF15.

Tabla 8 Espesor y ancho de los especímenes de flexión fabricados con PLA.

| PLA Código | Ancho | | Espesor | |
|---------------|---------|----------|---------|----------|
| | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| 1FXY | 12.69 | 12.70 | 8.67 | 8.68 |
| | 12.69 | | 8.67 | |
| | 12.72 | | 8.70 | |
| 2FXY | 12.71 | 12.73 | 8.67 | 8.68 |
| | 12.74 | | 8.67 | |

| PLA | Ancho | | Espesor | |
|--------|---------|----------|---------|----------|
| Código | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| | 12.75 | | 8.70 | |
| 3FXY | 12.65 | 12.69 | 8.66 | 8.67 |
| | 12.73 | | 8.69 | |
| | 12.70 | | 8.65 | |
| | | | | |
| 4FXY | 12.67 | 12.70 | 8.72 | 8.71 |
| | 12.69 | | 8.70 | |
| | 12.73 | | 8.70 | |
| 5FXY | 12.68 | 12.67 | 8.70 | 8.69 |
| | 12.67 | | 8.68 | |
| | 12.66 | | 8.70 | |
| 6FXY | 12.68 | 12.69 | 8.69 | 8.67 |
| | 12.72 | | 8.66 | |
| | 12.66 | | 8.66 | |
| 1FYZ | 12.82 | 12.79 | 8.74 | 8.74 |
| | 12.77 | | 8.73 | |
| | 12.77 | | 8.74 | |
| 2FYZ | 12.75 | 12.73 | 8.72 | 8.73 |
| | 12.68 | | 8.72 | |
| | 12.75 | | 8.74 | |
| 3FYZ | 12.68 | 12.73 | 8.73 | 8.73 |
| | 12.76 | | 8.72 | |
| | 12.75 | | 8.73 | |
| 4FYZ | 12.76 | 12.77 | 8.76 | 8.75 |
| | 12.79 | | 8.75 | |
| | 12.77 | | 8.74 | |
| 5FYZ | 12.75 | 12.74 | 8.77 | 8.78 |
| | 12.73 | | 8.77 | |
| | 12.74 | | 8.79 | |

Tabla 9 Espesor y ancho de los especímenes de tracción fabricados con PAHT CF15.

| PAHT CF15 | Ancho | | Espesor | |
|-----------|---------|----------|---------|----------|
| Código | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| 1FXY | 12.29 | 12.30 | 8.79 | 8.78 |
| | 12.32 | | 8.77 | |
| | 12.30 | | 8.78 | |
| 2FXY | 12.39 | 12.40 | 8.82 | 8.82 |
| | 12.32 | | 8.81 | |
| | 12.50 | | 8.82 | |
| 3FXY | 12.35 | 12.36 | 8.78 | 8.78 |

| PAHT CF15 | Ancho | | Espesor | |
|------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Código | Medidas | Promedio | Medidas | Promedio |
| | 12.37 | | 8.78 | |
| | 12.36 | | 8.78 | |
| 4FXY | 12.32 | 12.30 | 8.84 | 8.83 |
| | 12.27 | | 8.82 | |
| | 12.30 | | 8.83 | |
| 5FXY | 12.33 | 12.39 | 8.86 | 8.83 |
| | 12.42 | | 8.82 | |
| | 12.41 | | 8.81 | |
| 1FYZ | 13.07 | 13.09 | 9.08 | 9.11 |
| | 13.13 | | 9.10 | |
| | 13.08 | | 9.14 | |
| 2FYZ | 13.17 | 13.19 | 9.14 | 9.11 |
| | 13.19 | | 9.11 | |
| | 13.21 | | 9.09 | |
| 3FYZ | 13.09 | 12.98 | 8.90 | 8.93 |
| | 12.93 | | 9.03 | |
| | 12.91 | | 8.86 | |
| 4FYZ | 13.04 | 13.09 | 9.15 | 9.15 |
| | 13.11 | | 9.16 | |
| | 13.13 | | 9.15 | |
| 5FYZ | 13.19 | 13.19 | 9.16 | 9.15 |
| | 13.24 | | 9.14 | |
| | 13.15 | | 9.15 | |
| 6FYZ | 13.12 | 13.09 | 9.30 | 9.32 |
| | 13.07 | | 9.27 | |
| | 13.08 | | 9.39 | |

Posteriormente se ajustó la posición de los rodillos de apoyo y de la nariz de carga en la máquina para poder colocar cada uno de los especímenes, colocando los rodillos de apoyo a 14 cm entre sus centros y la nariz de carga justo en el centro de éstos.

Como se muestra en la Figura 45, los especímenes fueron marcados con 3 líneas que representan la posición aproximada en la que debería de estar cada rodillo de apoyo y el centro entre estos apoyos. Como se puede notar en la Figura 46,

se utilizaron estas 3 líneas de referencia al colocar cada uno de los especímenes sobre los apoyos y así poder centrarlos correctamente.

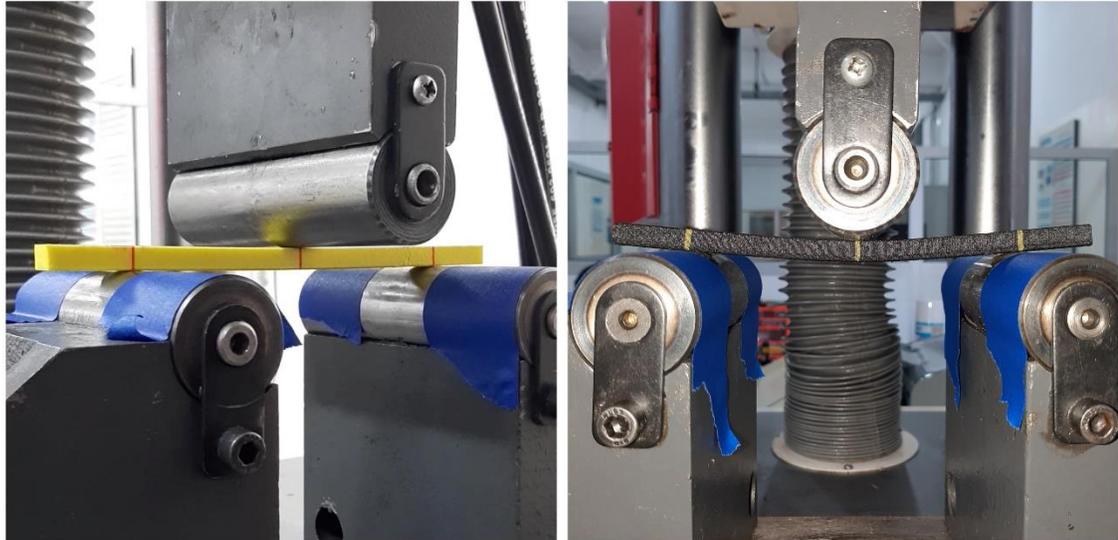


Figura 46 Colocación de los especímenes de flexión sobre los rodillos de apoyo.

Con el espécimen ya colocado en la máquina, se introdujeron los siguientes datos del espécimen en el software de la máquina:

- Número de muestra (Número correlativo del espécimen).
- Material del espécimen.
- Temperatura ambiente.
- Ancho y espesor del espécimen.
- Velocidad del ensayo.

Luego se inició la máquina y se realizó el ensayo, ensayándose la primera probeta de PLA con categorización FXY, la cual no se fracturó, siendo necesario aumentar la velocidad de los siguientes ensayos de dicha categoría para alcanzar la fractura antes del punto de flexión máximo, tal como ha sido descrito en la sección 2.3.2. Por esta razón se ensayó la sexta probeta, con la velocidad más alta.

En cambio, para el caso de la categorización FYZ de las probetas fabricadas con PAHT CF15, hubo una probeta que no registró carga en la máquina debido a la poca resistencia que esta tuvo. Por ello, se ensayó una sexta probeta en compensación de los datos no obtenidos.

Una vez que se finalizaba cada uno de los ensayos, se guardaron los datos obtenidos y grabados por la máquina de ensayo en forma de un informe y un diagrama de carga – desplazamiento, de lo cual se muestra un ejemplo en la Figura 47. Es preciso mencionar que, al momento de realizar los ensayos de flexión, el laboratorio seleccionado no contaba con un deflectómetro, por lo que no fue posible obtener los datos de deflexión.

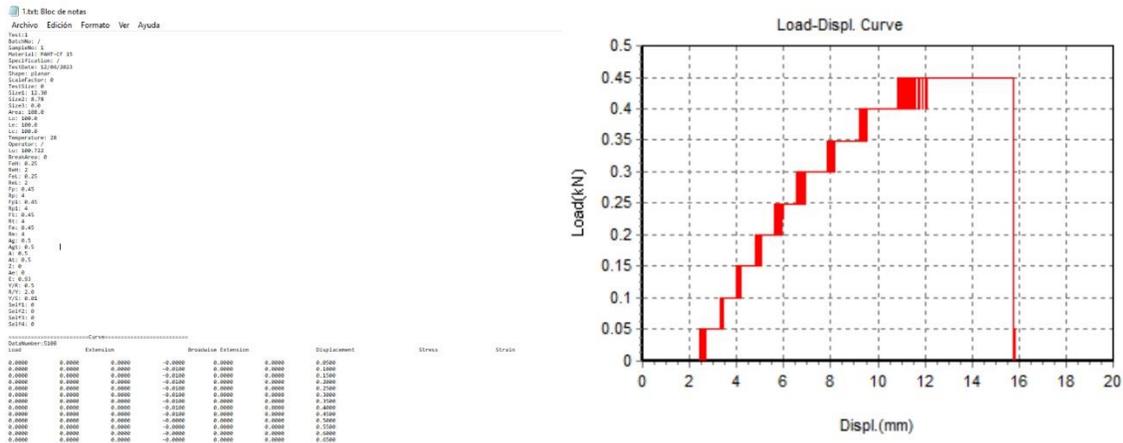


Figura 47 A la izquierda el reporte generado por la máquina al terminar un ensayo de flexión y a la derecha el diagrama de carga – desplazamiento, generado con los datos del reporte.

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, la máquina universal de ensayo del laboratorio seleccionado, graba automáticamente y permite exportar los datos de los ensayos que se realizan.

De esta manera, los reportes de datos exportados desde la máquina son extensos, con miles de datos o puntos, por lo que, para facilitar la interpretación e identificación de tendencias, se elaboró un resumen con los datos más importantes y útiles para el análisis de los ensayos.

Con ese objetivo, se tomó como base lo especificado en la sección 12 de la norma ASTM D638 y la sección 13 de la norma ASTM D790 para especificar la información y datos solicitados por las normas para la correcta caracterización de los materiales, la cual se describe en las siguientes secciones de este capítulo.

3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENSAYO

Las características de los materiales utilizados para los ensayos, PAHT CF15 y PLA; se presentan en la Tabla 10 y la Tabla 11.

Tabla 10 Identificación del material PAHT CF15 ensayado.

| | |
|------------------------------|--|
| Material | Poliamida de alta temperatura con 15% de fibra de carbono (PAHT – CF15). |
| Tipo de material | Compuesto reforzado termoplástico. |
| Fabricante | BASF. |
| Distribuido por | BCN3D. |
| Código del fabricante | Desconocido (El fabricante lo llama Ultrafuse PAHT CF15). |
| Forma y dimensiones | Filamento de impresión 3D de 2.85 mm de diámetro. |
| Historial previo | Retirado del empaque del fabricante y colocado directamente a imprimir. |

Tabla 11 Identificación del material PLA ensayado.

| | |
|------------------------------|---|
| Material | Poliácido láctico (PLA). |
| Tipo de material | Termoplástico rígido. |
| Fabricante | Fabricante de china con nombre desconocido. |
| Distribuido por | Electrónica Steren. |
| Código del fabricante | FIL3D - 020AM |
| Forma y dimensiones | Filamento de impresión 3D de 1.75 mm de diámetro. |
| Historial previo | Retirado del empaque del fabricante y colocado directamente a imprimir. |

Como se ha descrito en el capítulo 2, el método de acondicionamiento utilizado fue el requerido por la norma ASTM D618 en el procedimiento G, cumpliendo las siguientes condiciones atmosféricas:

- Temperatura ambiente de $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Humedad relativa de $65\% \pm 10\%$.

La cantidad de especímenes ensayados fueron:

- Ensayo de tracción: 11 por cada material, de los cuales 5 fueron en una dirección de anisotropía y 6 en otra dirección.
- Ensayo de flexión: 11 por cada material, de los cuales 5 fueron en una dirección de anisotropía y 6 en otra dirección.

Respecto a la velocidad de ensayo y según lo visto en la sección 2.3, se utilizaron los valores:

- Ensayo de tracción: 5 mm/min
- Ensayo de flexión: se realizaron a una velocidad de 3.73 mm/min con excepción de los especímenes fabricados en PLA con la categorización “FXY” del 2 al 6, en los cuales se utilizó la velocidad de 37.33 mm/min .

Los resúmenes de datos de ensayo se distribuyen de la siguiente manera:

- Ensayos de tracción de los especímenes fabricados con PLA: de la Tabla 12 a la Tabla 22.
- Ensayos de tracción de los especímenes fabricados con PAHT CF15: de la Tabla 23 a la Tabla 33.
- Ensayos de flexión de los especímenes fabricados con PLA: de la Tabla 34 a la Tabla 44.
- Ensayos de flexión de los especímenes fabricados con PAHT CF15: de la Tabla 45 a la Tabla 55.

Tabla 12 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 1TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0908 | 0.1805 | 1.2239 | 0.0908 |
| 0.10 | 0.1366 | 0.2707 | 2.4479 | 0.1366 |
| 0.15 | 0.1796 | 0.3509 | 3.6718 | 0.1796 |
| 0.20 | 0.2274 | 0.4612 | 4.8958 | 0.2274 |
| 0.25 | 0.2574 | 0.5815 | 6.1197 | 0.2574 |
| 0.30 | 0.3022 | 0.7018 | 7.3437 | 0.3022 |
| 0.35 | 0.4267 | 0.8322 | 8.5676 | 0.4267 |
| 0.40 | 0.6473 | 1.0527 | 9.7916 | 0.6473 |
| 0.45 | 0.8679 | 1.2733 | 11.0155 | 0.8679 |
| 0.50 | 1.0684 | 1.4738 | 12.2395 | 1.0684 |
| 0.55 | 1.2689 | 1.6743 | 13.4634 | 1.2689 |
| 0.60 | 1.5095 | 1.915 | 14.6874 | 1.5095 |
| 0.65 | 1.71 | 2.1155 | 15.9113 | 1.71 |
| 0.70 | 1.9507 | 2.3561 | 17.1353 | 1.9507 |
| 0.75 | 2.081 | 2.4864 | 18.3592 | 2.081 |
| 0.80 | 2.2815 | 2.687 | 19.5832 | 2.2815 |
| 0.85 | 2.482 | 2.8875 | 20.8071 | 2.482 |
| 0.90 | 2.6625 | 3.068 | 22.0311 | 2.6625 |
| 0.95 | 2.863 | 3.2685 | 23.255 | 2.863 |
| 1.00 | 3.0836 | 3.489 | 24.479 | 3.0836 |
| 1.05 | 3.2841 | 3.6896 | 25.7029 | 3.2841 |
| 1.10 | 3.4445 | 3.85 | 26.9269 | 3.4445 |
| 1.15 | 3.5949 | 4.0004 | 28.1508 | 3.5949 |
| 1.20 | 3.7754 | 4.1808 | 29.3748 | 3.7754 |
| 1.25 | 3.9258 | 4.3312 | 30.5987 | 3.9258 |
| 1.30 | 4.0962 | 4.5017 | 31.8227 | 4.0962 |
| 1.35 | 4.2767 | 4.6821 | 33.0466 | 4.2767 |
| 1.40 | 4.4271 | 4.8325 | 34.2705 | 4.4271 |
| 1.45 | 4.5975 | 5.003 | 35.4945 | 4.5975 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.50 | 4.778 | 5.1834 | 36.7184 | 4.778 |
| 1.55 | 4.9585 | 5.3639 | 37.9424 | 4.9585 |
| 1.60 | 5.1289 | 5.5344 | 39.1663 | 5.1289 |
| 1.65 | 5.3294 | 5.7349 | 40.3903 | 5.3294 |
| 1.70 | 5.5099 | 5.9153 | 41.6142 | 5.5099 |
| 1.75 | 5.7004 | 6.1058 | 42.8382 | 5.7004 |
| 1.80 | 5.9109 | 6.3164 | 44.0621 | 5.9109 |
| 1.85 | 6.1115 | 6.5169 | 45.2861 | 6.1115 |
| 1.90 | 6.6529 | 7.0583 | 46.51 | 6.6529 |
| 1.95 | 6.6629 | 7.0683 | 47.734 | 6.6629 |

Tabla 13 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 2TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0812 | 0.1704 | 1.2039 | 0.0812 |
| 0.10 | 0.1328 | 0.2807 | 2.4079 | 0.1328 |
| 0.15 | 0.1748 | 0.371 | 3.6118 | 0.1748 |
| 0.20 | 0.211 | 0.4712 | 4.8157 | 0.211 |
| 0.25 | 0.2586 | 0.6016 | 6.0196 | 0.2586 |
| 0.30 | 0.3239 | 0.772 | 7.2236 | 0.3239 |
| 0.35 | 0.5645 | 1.0126 | 8.4275 | 0.5645 |
| 0.40 | 0.755 | 1.2031 | 9.6314 | 0.755 |
| 0.45 | 1.0357 | 1.4838 | 10.8353 | 1.0357 |
| 0.50 | 1.1961 | 1.6443 | 12.0393 | 1.1961 |
| 0.55 | 1.3966 | 1.8448 | 13.2432 | 1.3966 |
| 0.60 | 1.6072 | 2.0553 | 14.4471 | 1.6072 |
| 0.65 | 1.8177 | 2.2659 | 15.651 | 1.8177 |
| 0.70 | 2.0283 | 2.4764 | 16.855 | 2.0283 |
| 0.75 | 2.2388 | 2.687 | 18.0589 | 2.2388 |
| 0.80 | 2.4193 | 2.8674 | 19.2628 | 2.4193 |
| 0.85 | 2.6098 | 3.0579 | 20.4667 | 2.6098 |
| 0.90 | 2.8203 | 3.2685 | 21.6707 | 2.8203 |
| 0.95 | 3.0208 | 3.469 | 22.8746 | 3.0208 |
| 1.00 | 3.2113 | 3.6595 | 24.0785 | 3.2113 |
| 1.05 | 3.4018 | 3.85 | 25.2824 | 3.4018 |
| 1.10 | 3.5923 | 4.0405 | 26.4864 | 3.5923 |
| 1.15 | 3.8129 | 4.2611 | 27.6903 | 3.8129 |
| 1.20 | 3.9733 | 4.4215 | 28.8942 | 3.9733 |
| 1.25 | 4.1538 | 4.6019 | 30.0981 | 4.1538 |
| 1.30 | 4.3142 | 4.7624 | 31.3021 | 4.3142 |
| 1.35 | 4.4746 | 4.9228 | 32.506 | 4.4746 |
| 1.40 | 4.6651 | 5.1133 | 33.7099 | 4.6651 |
| 1.45 | 4.8456 | 5.2937 | 34.9138 | 4.8456 |
| 1.50 | 5.016 | 5.4642 | 36.1178 | 5.016 |
| 1.55 | 5.1965 | 5.6446 | 37.3217 | 5.1965 |
| 1.60 | 5.397 | 5.8452 | 38.5256 | 5.397 |
| 1.65 | 5.5975 | 6.0457 | 39.7295 | 5.5975 |
| 1.70 | 5.7579 | 6.2061 | 40.9335 | 5.7579 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.75 | 5.9083 | 6.3565 | 42.1374 | 5.9083 |
| 1.80 | 6.0988 | 6.547 | 43.3413 | 6.0988 |
| 1.85 | 6.5901 | 7.0383 | 44.5452 | 6.5901 |
| 1.90 | 6.6001 | 7.0483 | 45.7492 | 6.6001 |

Tabla 14 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 3TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.087 | 0.1905 | 1.1862 | 0.087 |
| 0.10 | 0.1218 | 0.2908 | 2.3724 | 0.1218 |
| 0.15 | 0.1632 | 0.401 | 3.5586 | 0.1632 |
| 0.20 | 0.2082 | 0.5314 | 4.7448 | 0.2082 |
| 0.25 | 0.2578 | 0.7319 | 5.931 | 0.2578 |
| 0.30 | 0.2992 | 0.9224 | 7.1172 | 0.2992 |
| 0.35 | 0.5432 | 1.1831 | 8.3034 | 0.5432 |
| 0.40 | 0.7538 | 1.3936 | 9.4896 | 0.7538 |
| 0.45 | 0.9743 | 1.6142 | 10.6758 | 0.9743 |
| 0.50 | 1.1749 | 1.8147 | 11.862 | 1.1749 |
| 0.55 | 1.4055 | 2.0453 | 13.0482 | 1.4055 |
| 0.60 | 1.5859 | 2.2258 | 14.2344 | 1.5859 |
| 0.65 | 1.7263 | 2.3661 | 15.4206 | 1.7263 |
| 0.70 | 1.8867 | 2.5266 | 16.6068 | 1.8867 |
| 0.75 | 2.0371 | 2.6769 | 17.793 | 2.0371 |
| 0.80 | 2.2075 | 2.8474 | 18.9792 | 2.2075 |
| 0.85 | 2.3579 | 2.9978 | 20.1654 | 2.3579 |
| 0.90 | 2.5083 | 3.1482 | 21.3516 | 2.5083 |
| 0.95 | 2.6587 | 3.2986 | 22.5378 | 2.6587 |
| 1.00 | 2.8392 | 3.479 | 23.7239 | 2.8392 |
| 1.05 | 2.9896 | 3.6294 | 24.9101 | 2.9896 |
| 1.10 | 3.14 | 3.7798 | 26.0963 | 3.14 |
| 1.15 | 3.3305 | 3.9703 | 27.2825 | 3.3305 |
| 1.20 | 3.4708 | 4.1107 | 28.4687 | 3.4708 |
| 1.25 | 3.6413 | 4.2811 | 29.6549 | 3.6413 |
| 1.30 | 3.8217 | 4.4616 | 30.8411 | 3.8217 |
| 1.35 | 3.9821 | 4.622 | 32.0273 | 3.9821 |
| 1.40 | 4.1526 | 4.7924 | 33.2135 | 4.1526 |
| 1.45 | 4.323 | 4.9629 | 34.3997 | 4.323 |
| 1.50 | 4.5035 | 5.1433 | 35.5859 | 4.5035 |
| 1.55 | 4.684 | 5.3238 | 36.7721 | 4.684 |
| 1.60 | 4.8544 | 5.4942 | 37.9583 | 4.8544 |
| 1.65 | 5.0449 | 5.6847 | 39.1445 | 5.0449 |
| 1.70 | 5.2354 | 5.8752 | 40.3307 | 5.2354 |
| 1.75 | 5.3758 | 6.0156 | 41.5169 | 5.3758 |
| 1.80 | 5.5462 | 6.186 | 42.7031 | 5.5462 |
| 1.85 | 5.7066 | 6.3465 | 43.8893 | 5.7066 |
| 1.90 | 5.8771 | 6.5169 | 45.0755 | 5.8771 |
| 1.95 | 6.0274 | 6.6673 | 46.2617 | 6.0274 |
| 2.00 | 6.0375 | 6.6773 | 47.4479 | 6.0375 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.95 | 6.0475 | 6.6873 | 46.2617 | 6.0475 |

Tabla 15 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 4TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.11 | 0.1504 | 1.2059 | 0.11 |
| 0.10 | 0.159 | 0.2406 | 2.4118 | 0.159 |
| 0.15 | 0.2012 | 0.3309 | 3.6176 | 0.2012 |
| 0.20 | 0.2474 | 0.4411 | 4.8235 | 0.2474 |
| 0.25 | 0.296 | 0.5615 | 6.0294 | 0.296 |
| 0.30 | 0.4159 | 0.6918 | 7.2353 | 0.4159 |
| 0.35 | 0.5562 | 0.8322 | 8.4411 | 0.5562 |
| 0.40 | 0.7868 | 1.0628 | 9.647 | 0.7868 |
| 0.45 | 1.0275 | 1.3034 | 10.8529 | 1.0275 |
| 0.50 | 1.2581 | 1.534 | 12.0588 | 1.2581 |
| 0.55 | 1.4486 | 1.7245 | 13.2646 | 1.4486 |
| 0.60 | 1.6792 | 1.9551 | 14.4705 | 1.6792 |
| 0.65 | 1.9098 | 2.1857 | 15.6764 | 1.9098 |
| 0.70 | 2.0902 | 2.3661 | 16.8823 | 2.0902 |
| 0.75 | 2.3108 | 2.5867 | 18.0882 | 2.3108 |
| 0.80 | 2.4311 | 2.707 | 19.294 | 2.4311 |
| 0.85 | 2.5815 | 2.8574 | 20.4999 | 2.5815 |
| 0.90 | 2.7419 | 3.0178 | 21.7058 | 2.7419 |
| 0.95 | 2.8923 | 3.1682 | 22.9117 | 2.8923 |
| 1.00 | 3.0628 | 3.3387 | 24.1175 | 3.0628 |
| 1.05 | 3.2332 | 3.5091 | 25.3234 | 3.2332 |
| 1.10 | 3.3836 | 3.6595 | 26.5293 | 3.3836 |
| 1.15 | 3.534 | 3.8099 | 27.7352 | 3.534 |
| 1.20 | 3.6944 | 3.9703 | 28.941 | 3.6944 |
| 1.25 | 3.8648 | 4.1407 | 30.1469 | 3.8648 |
| 1.30 | 4.0152 | 4.2911 | 31.3528 | 4.0152 |
| 1.35 | 4.1957 | 4.4716 | 32.5587 | 4.1957 |
| 1.40 | 4.3461 | 4.622 | 33.7646 | 4.3461 |
| 1.45 | 4.5165 | 4.7924 | 34.9704 | 4.5165 |
| 1.50 | 4.6769 | 4.9528 | 36.1763 | 4.6769 |
| 1.55 | 4.8674 | 5.1433 | 37.3822 | 4.8674 |
| 1.60 | 5.0479 | 5.3238 | 38.5881 | 5.0479 |
| 1.65 | 5.2183 | 5.4942 | 39.7939 | 5.2183 |
| 1.70 | 5.3788 | 5.6547 | 40.9998 | 5.3788 |
| 1.75 | 5.5793 | 5.8552 | 42.2057 | 5.5793 |
| 1.80 | 5.7597 | 6.0357 | 43.4116 | 5.7597 |
| 1.85 | 5.9502 | 6.2261 | 44.6174 | 5.9502 |
| 1.90 | 6.1407 | 6.4166 | 45.8233 | 6.1407 |
| 1.95 | 6.3613 | 6.6372 | 47.0292 | 6.3613 |
| 2.00 | 6.6521 | 6.928 | 48.2351 | 6.6521 |
| 2.05 | 6.6621 | 6.938 | 49.441 | 6.6621 |
| 2.00 | 6.6721 | 6.948 | 48.2351 | 6.6721 |

Tabla 16 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 5TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0906 | 0.1805 | 1.2171 | 0.0906 |
| 0.10 | 0.1442 | 0.3008 | 2.4343 | 0.1442 |
| 0.15 | 0.187 | 0.4111 | 3.6514 | 0.187 |
| 0.20 | 0.2402 | 0.5615 | 4.8685 | 0.2402 |
| 0.25 | 0.289 | 0.752 | 6.0857 | 0.289 |
| 0.30 | 0.4811 | 0.9825 | 7.3028 | 0.4811 |
| 0.35 | 0.7518 | 1.2533 | 8.52 | 0.7518 |
| 0.40 | 1.0626 | 1.5641 | 9.7371 | 1.0626 |
| 0.45 | 1.2831 | 1.7846 | 10.9542 | 1.2831 |
| 0.50 | 1.5137 | 2.0152 | 12.1714 | 1.5137 |
| 0.55 | 1.7443 | 2.2458 | 13.3885 | 1.7443 |
| 0.60 | 1.9749 | 2.4764 | 14.6056 | 1.9749 |
| 0.65 | 2.1554 | 2.6569 | 15.8228 | 2.1554 |
| 0.70 | 2.3259 | 2.8273 | 17.0399 | 2.3259 |
| 0.75 | 2.4762 | 2.9777 | 18.2571 | 2.4762 |
| 0.80 | 2.6467 | 3.1482 | 19.4742 | 2.6467 |
| 0.85 | 2.8071 | 3.3086 | 20.6913 | 2.8071 |
| 0.90 | 2.9775 | 3.479 | 21.9085 | 2.9775 |
| 0.95 | 3.148 | 3.6495 | 23.1256 | 3.148 |
| 1.00 | 3.3385 | 3.84 | 24.3427 | 3.3385 |
| 1.05 | 3.5089 | 4.0104 | 25.5599 | 3.5089 |
| 1.10 | 3.6794 | 4.1808 | 26.777 | 3.6794 |
| 1.15 | 3.8598 | 4.3613 | 27.9942 | 3.8598 |
| 1.20 | 4.0303 | 4.5318 | 29.2113 | 4.0303 |
| 1.25 | 4.2308 | 4.7323 | 30.4284 | 4.2308 |
| 1.30 | 4.3912 | 4.8927 | 31.6456 | 4.3912 |
| 1.35 | 4.5717 | 5.0732 | 32.8627 | 4.5717 |
| 1.40 | 4.7722 | 5.2737 | 34.0798 | 4.7722 |
| 1.45 | 4.9426 | 5.4441 | 35.297 | 4.9426 |
| 1.50 | 5.1432 | 5.6446 | 36.5141 | 5.1432 |
| 1.55 | 5.3236 | 5.8251 | 37.7313 | 5.3236 |
| 1.60 | 5.5141 | 6.0156 | 38.9484 | 5.5141 |
| 1.65 | 5.7447 | 6.2462 | 40.1655 | 5.7447 |
| 1.70 | 5.9252 | 6.4267 | 41.3827 | 5.9252 |
| 1.75 | 6.1458 | 6.6472 | 42.5998 | 6.1458 |
| 1.80 | 6.7974 | 7.2989 | 43.8169 | 6.7974 |
| 1.85 | 6.7974 | 7.2989 | 45.0341 | 6.7974 |
| 1.80 | 6.8175 | 7.319 | 43.8169 | 6.8175 |

Tabla 17 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 1TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.13 | 0.2507 | 1.1445 | 0.13 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0.10 | 0.1968 | 0.391 | 2.289 | 0.1968 |
| 0.15 | 0.2666 | 0.5615 | 3.4335 | 0.2666 |
| 0.20 | 0.3686 | 0.7219 | 4.578 | 0.3686 |
| 0.25 | 0.5791 | 0.9324 | 5.7225 | 0.5791 |
| 0.30 | 0.8398 | 1.1931 | 6.867 | 0.8398 |
| 0.35 | 1.1506 | 1.5039 | 8.0115 | 1.1506 |
| 0.40 | 1.4814 | 1.8348 | 9.156 | 1.4814 |
| 0.45 | 1.8725 | 2.2258 | 10.3005 | 1.8725 |
| 0.50 | 2.1732 | 2.5266 | 11.445 | 2.1732 |
| 0.55 | 2.3036 | 2.6569 | 12.5895 | 2.3036 |

Tabla 18 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 2TYZ, la cual se fracturo durante el acople a las mordazas de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 19 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 3TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.1572 | 0.3008 | 1.1681 | 0.1572 |
| 0.10 | 0.2322 | 0.4512 | 2.3362 | 0.2322 |
| 0.15 | 0.2958 | 0.6116 | 3.5044 | 0.2958 |
| 0.20 | 0.4508 | 0.7921 | 4.6725 | 0.4508 |
| 0.25 | 0.5009 | 0.8422 | 5.8406 | 0.5009 |

Tabla 20 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 4TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.209 | 0.2607 | 1.1637 | 0.209 |
| 0.10 | 0.2828 | 0.4211 | 2.3273 | 0.2828 |
| 0.15 | 0.3515 | 0.5113 | 3.491 | 0.3515 |
| 0.20 | 0.3616 | 0.5214 | 4.6547 | 0.3616 |
| 0.15 | 0.3716 | 0.5314 | 3.491 | 0.3716 |

Tabla 21 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 5TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.2412 | 0.2507 | 1.1834 | 0.2412 |
| 0.10 | 0.2966 | 0.381 | 2.3669 | 0.2966 |
| 0.15 | 0.4454 | 0.5314 | 3.5503 | 0.4454 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.20 | 0.6058 | 0.6918 | 4.7338 | 0.6058 |
| 0.25 | 0.7562 | 0.8422 | 5.9172 | 0.7562 |
| 0.30 | 0.9667 | 1.0527 | 7.1007 | 0.9667 |
| 0.35 | 1.1672 | 1.2533 | 8.2841 | 1.1672 |
| 0.40 | 1.4079 | 1.4939 | 9.4675 | 1.4079 |
| 0.45 | 1.6685 | 1.7546 | 10.651 | 1.6685 |
| 0.50 | 1.9693 | 2.0553 | 11.8344 | 1.9693 |
| 0.55 | 2.2901 | 2.3762 | 13.0179 | 2.2901 |
| 0.60 | 2.5809 | 2.6669 | 14.2013 | 2.5809 |
| 0.65 | 2.8015 | 2.8875 | 15.3848 | 2.8015 |

Tabla 22 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PLA con categorización 6TYZ, de la cual no fueron guardados los datos por parte de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 23 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.061 | 0.1003 | 1.2118 | 0.061 |
| 0.10 | 0.0912 | 0.1704 | 2.4235 | 0.0912 |
| 0.15 | 0.119 | 0.2406 | 3.6353 | 0.119 |
| 0.20 | 0.1504 | 0.3309 | 4.847 | 0.1504 |
| 0.25 | 0.1836 | 0.4311 | 6.0588 | 0.1836 |
| 0.30 | 0.2204 | 0.5915 | 7.2705 | 0.2204 |
| 0.35 | 0.2602 | 0.8021 | 8.4823 | 0.2602 |
| 0.40 | 0.2996 | 1.0527 | 9.6941 | 0.2996 |
| 0.45 | 0.5147 | 1.2934 | 10.9058 | 0.5147 |
| 0.50 | 0.8356 | 1.6142 | 12.1176 | 0.8356 |
| 0.55 | 1.0361 | 1.8147 | 13.3293 | 1.0361 |
| 0.60 | 1.2567 | 2.0353 | 14.5411 | 1.2567 |
| 0.65 | 1.397 | 2.1756 | 15.7528 | 1.397 |
| 0.70 | 1.5575 | 2.3361 | 16.9646 | 1.5575 |
| 0.75 | 1.6978 | 2.4764 | 18.1764 | 1.6978 |
| 0.80 | 1.8382 | 2.6168 | 19.3881 | 1.8382 |
| 0.85 | 2.0086 | 2.7872 | 20.5999 | 2.0086 |
| 0.90 | 2.159 | 2.9376 | 21.8116 | 2.159 |
| 0.95 | 2.2793 | 3.0579 | 23.0234 | 2.2793 |
| 1.00 | 2.3996 | 3.1782 | 24.2351 | 2.3996 |
| 1.05 | 2.5099 | 3.2885 | 25.4469 | 2.5099 |
| 1.10 | 2.6403 | 3.4189 | 26.6587 | 2.6403 |
| 1.15 | 2.7806 | 3.5592 | 27.8704 | 2.7806 |
| 1.20 | 2.8809 | 3.6595 | 29.0822 | 2.8809 |
| 1.25 | 3.0313 | 3.8099 | 30.2939 | 3.0313 |
| 1.30 | 3.1616 | 3.9402 | 31.5057 | 3.1616 |
| 1.35 | 3.2919 | 4.0706 | 32.7174 | 3.2919 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.40 | 3.4323 | 4.2109 | 33.9292 | 3.4323 |
| 1.45 | 3.5626 | 4.3413 | 35.141 | 3.5626 |
| 1.50 | 3.693 | 4.4716 | 36.3527 | 3.693 |
| 1.55 | 3.8133 | 4.5919 | 37.5645 | 3.8133 |
| 1.60 | 3.9436 | 4.7222 | 38.7762 | 3.9436 |
| 1.65 | 4.094 | 4.8726 | 39.988 | 4.094 |
| 1.70 | 4.2444 | 5.023 | 41.1997 | 4.2444 |
| 1.75 | 4.4149 | 5.1935 | 42.4115 | 4.4149 |
| 1.80 | 4.6154 | 5.394 | 43.6233 | 4.6154 |
| 1.85 | 4.8159 | 5.5945 | 44.835 | 4.8159 |
| 1.90 | 5.0264 | 5.8051 | 46.0468 | 5.0264 |
| 1.95 | 5.3272 | 6.1058 | 47.2585 | 5.3272 |
| 2.00 | 5.628 | 6.4066 | 48.4703 | 5.628 |
| 2.05 | 5.999 | 6.7776 | 49.682 | 5.999 |
| 2.10 | 6.4501 | 7.2287 | 50.8938 | 6.4501 |
| 2.15 | 6.9615 | 7.7401 | 52.1056 | 6.9615 |
| 2.20 | 7.7335 | 8.5121 | 53.3173 | 7.7335 |
| 2.25 | 9.4178 | 10.1964 | 54.5291 | 9.4178 |
| 2.30 | 9.4279 | 10.2065 | 55.7408 | 9.4279 |

Tabla 24 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0426 | 0.1003 | 1.1934 | 0.0426 |
| 0.10 | 0.067 | 0.1704 | 2.3869 | 0.067 |
| 0.15 | 0.0936 | 0.2607 | 3.5803 | 0.0936 |
| 0.20 | 0.1236 | 0.381 | 4.7738 | 0.1236 |
| 0.25 | 0.1508 | 0.4913 | 5.9672 | 0.1508 |
| 0.30 | 0.1878 | 0.6717 | 7.1606 | 0.1878 |
| 0.35 | 0.2092 | 0.752 | 8.3541 | 0.2092 |
| 0.40 | 0.2342 | 0.8121 | 9.5475 | 0.2342 |
| 0.45 | 0.2648 | 0.9023 | 10.741 | 0.2648 |
| 0.50 | 0.2894 | 0.9725 | 11.9344 | 0.2894 |
| 0.55 | 0.3507 | 1.0527 | 13.1278 | 0.3507 |
| 0.60 | 0.4309 | 1.1329 | 14.3213 | 0.4309 |
| 0.65 | 0.5212 | 1.2232 | 15.5147 | 0.5212 |
| 0.70 | 0.6114 | 1.3134 | 16.7082 | 0.6114 |
| 0.75 | 0.7117 | 1.4137 | 17.9016 | 0.7117 |
| 0.80 | 0.832 | 1.534 | 19.095 | 0.832 |
| 0.85 | 0.9322 | 1.6342 | 20.2885 | 0.9322 |
| 0.90 | 1.0425 | 1.7445 | 21.4819 | 1.0425 |
| 0.95 | 1.1528 | 1.8548 | 22.6754 | 1.1528 |
| 1.00 | 1.2631 | 1.9651 | 23.8688 | 1.2631 |
| 1.05 | 1.3634 | 2.0654 | 25.0622 | 1.3634 |
| 1.10 | 1.4837 | 2.1857 | 26.2557 | 1.4837 |
| 1.15 | 1.604 | 2.306 | 27.4491 | 1.604 |
| 1.20 | 1.7143 | 2.4163 | 28.6426 | 1.7143 |
| 1.25 | 1.8346 | 2.5366 | 29.836 | 1.8346 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.30 | 1.9649 | 2.6669 | 31.0294 | 1.9649 |
| 1.35 | 2.1153 | 2.8173 | 32.2229 | 2.1153 |
| 1.40 | 2.2557 | 2.9577 | 33.4163 | 2.2557 |
| 1.45 | 2.4161 | 3.1181 | 34.6098 | 2.4161 |
| 1.50 | 2.6166 | 3.3186 | 35.8032 | 2.6166 |
| 1.55 | 2.7971 | 3.4991 | 36.9967 | 2.7971 |
| 1.60 | 2.9976 | 3.6996 | 38.1901 | 2.9976 |
| 1.65 | 3.2182 | 3.9202 | 39.3835 | 3.2182 |
| 1.70 | 3.5189 | 4.2209 | 40.577 | 3.5189 |
| 1.75 | 3.7696 | 4.4716 | 41.7704 | 3.7696 |
| 1.80 | 4.1406 | 4.8426 | 42.9639 | 4.1406 |
| 1.85 | 4.5516 | 5.2536 | 44.1573 | 4.5516 |
| 1.90 | 5.0329 | 5.7349 | 45.3507 | 5.0329 |
| 1.95 | 5.7146 | 6.4166 | 46.5442 | 5.7146 |
| 2.00 | 6.7072 | 7.4092 | 47.7376 | 6.7072 |
| 2.05 | 6.7172 | 7.4192 | 48.9311 | 6.7172 |

Tabla 25 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0542 | 0.1303 | 1.1736 | 0.0542 |
| 0.10 | 0.0752 | 0.1805 | 2.3472 | 0.0752 |
| 0.15 | 0.1086 | 0.2707 | 3.5207 | 0.1086 |
| 0.20 | 0.1356 | 0.3609 | 4.6943 | 0.1356 |
| 0.25 | 0.1702 | 0.5013 | 5.8679 | 0.1702 |
| 0.30 | 0.2018 | 0.6216 | 7.0415 | 0.2018 |
| 0.35 | 0.214 | 0.7419 | 8.215 | 0.214 |
| 0.40 | 0.2422 | 0.8823 | 9.3886 | 0.2422 |
| 0.45 | 0.2784 | 1.0828 | 10.5622 | 0.2784 |
| 0.50 | 0.3221 | 1.3034 | 11.7358 | 0.3221 |
| 0.55 | 0.5025 | 1.4838 | 12.9093 | 0.5025 |
| 0.60 | 0.693 | 1.6743 | 14.0829 | 0.693 |
| 0.65 | 0.8735 | 1.8548 | 15.2565 | 0.8735 |
| 0.70 | 1.0439 | 2.0253 | 16.4301 | 1.0439 |
| 0.75 | 1.1943 | 2.1756 | 17.6036 | 1.1943 |
| 0.80 | 1.2845 | 2.2659 | 18.7772 | 1.2845 |
| 0.85 | 1.3848 | 2.3661 | 19.9508 | 1.3848 |
| 0.90 | 1.4851 | 2.4664 | 21.1244 | 1.4851 |
| 0.95 | 1.5954 | 2.5767 | 22.298 | 1.5954 |
| 1.00 | 1.7257 | 2.707 | 23.4715 | 1.7257 |
| 1.05 | 1.826 | 2.8073 | 24.6451 | 1.826 |
| 1.10 | 1.9663 | 2.9476 | 25.8187 | 1.9663 |
| 1.15 | 2.0766 | 3.0579 | 26.9923 | 2.0766 |
| 1.20 | 2.227 | 3.2083 | 28.1658 | 2.227 |
| 1.25 | 2.3573 | 3.3387 | 29.3394 | 2.3573 |
| 1.30 | 2.4776 | 3.459 | 30.513 | 2.4776 |
| 1.35 | 2.618 | 3.5993 | 31.6866 | 2.618 |
| 1.40 | 2.7483 | 3.7297 | 32.8601 | 2.7483 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.45 | 2.8787 | 3.86 | 34.0337 | 2.8787 |
| 1.50 | 3.009 | 3.9903 | 35.2073 | 3.009 |
| 1.55 | 3.1694 | 4.1508 | 36.3809 | 3.1694 |
| 1.60 | 3.3299 | 4.3112 | 37.5545 | 3.3299 |
| 1.65 | 3.4802 | 4.4616 | 38.728 | 3.4802 |
| 1.70 | 3.6707 | 4.6521 | 39.9016 | 3.6707 |
| 1.75 | 3.8913 | 4.8726 | 41.0752 | 3.8913 |
| 1.80 | 4.1319 | 5.1133 | 42.2488 | 4.1319 |
| 1.85 | 4.4127 | 5.394 | 43.4223 | 4.4127 |
| 1.90 | 4.6934 | 5.6747 | 44.5959 | 4.6934 |
| 1.95 | 5.0543 | 6.0357 | 45.7695 | 5.0543 |
| 2.00 | 5.5556 | 6.537 | 46.9431 | 5.5556 |
| 2.05 | 6.1371 | 7.1185 | 48.1166 | 6.1371 |
| 2.10 | 7.0495 | 8.0308 | 49.2902 | 7.0495 |
| 2.05 | 7.0595 | 8.0409 | 48.1166 | 7.0595 |

Tabla 26 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0534 | 0.0902 | 1.1774 | 0.0534 |
| 0.10 | 0.0836 | 0.1404 | 2.3548 | 0.0836 |
| 0.15 | 0.1184 | 0.2105 | 3.5321 | 0.1184 |
| 0.20 | 0.143 | 0.2607 | 4.7095 | 0.143 |
| 0.25 | 0.1744 | 0.3309 | 5.8869 | 0.1744 |
| 0.30 | 0.2102 | 0.4211 | 7.0643 | 0.2102 |
| 0.35 | 0.2428 | 0.5113 | 8.2416 | 0.2428 |
| 0.40 | 0.2692 | 0.5815 | 9.419 | 0.2692 |
| 0.45 | 0.3231 | 0.7118 | 10.5964 | 0.3231 |
| 0.50 | 0.4835 | 0.8723 | 11.7738 | 0.4835 |
| 0.55 | 0.6539 | 1.0427 | 12.9511 | 0.6539 |
| 0.60 | 0.8745 | 1.2633 | 14.1285 | 0.8745 |
| 0.65 | 1.0449 | 1.4337 | 15.3059 | 1.0449 |
| 0.70 | 1.3658 | 1.7546 | 16.4833 | 1.3658 |
| 0.75 | 1.5161 | 1.9049 | 17.6606 | 1.5161 |
| 0.80 | 1.6465 | 2.0353 | 18.838 | 1.6465 |
| 0.85 | 1.7868 | 2.1756 | 20.0154 | 1.7868 |
| 0.90 | 1.9372 | 2.326 | 21.1928 | 1.9372 |
| 0.95 | 2.0275 | 2.4163 | 22.3702 | 2.0275 |
| 1.00 | 2.1177 | 2.5065 | 23.5475 | 2.1177 |
| 1.05 | 2.218 | 2.6068 | 24.7249 | 2.218 |
| 1.10 | 2.2982 | 2.687 | 25.9023 | 2.2982 |
| 1.15 | 2.4085 | 2.7973 | 27.0797 | 2.4085 |
| 1.20 | 2.5087 | 2.8975 | 28.257 | 2.5087 |
| 1.25 | 2.609 | 2.9978 | 29.4344 | 2.609 |
| 1.30 | 2.7193 | 3.1081 | 30.6118 | 2.7193 |
| 1.35 | 2.8596 | 3.2484 | 31.7892 | 2.8596 |
| 1.40 | 2.99 | 3.3788 | 32.9665 | 2.99 |
| 1.45 | 3.1203 | 3.5091 | 34.1439 | 3.1203 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.50 | 3.2506 | 3.6394 | 35.3213 | 3.2506 |
| 1.55 | 3.4211 | 3.8099 | 36.4987 | 3.4211 |
| 1.60 | 3.5715 | 3.9603 | 37.676 | 3.5715 |
| 1.65 | 3.7219 | 4.1107 | 38.8534 | 3.7219 |
| 1.70 | 3.9224 | 4.3112 | 40.0308 | 3.9224 |
| 1.75 | 4.1229 | 4.5117 | 41.2082 | 4.1229 |
| 1.80 | 4.3535 | 4.7423 | 42.3856 | 4.3535 |
| 1.85 | 4.5741 | 4.9629 | 43.5629 | 4.5741 |
| 1.90 | 4.8348 | 5.2235 | 44.7403 | 4.8348 |
| 1.95 | 5.1255 | 5.5143 | 45.9177 | 5.1255 |
| 2.00 | 5.4764 | 5.8652 | 47.0951 | 5.4764 |
| 2.05 | 5.9577 | 6.3465 | 48.2724 | 5.9577 |
| 2.10 | 6.469 | 6.8578 | 49.4498 | 6.469 |
| 2.15 | 7.2911 | 7.6799 | 50.6272 | 7.2911 |
| 2.20 | 7.2911 | 7.6799 | 51.8046 | 7.2911 |
| 2.15 | 7.3011 | 7.6899 | 50.6272 | 7.3011 |

Tabla 27 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5TXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.0334 | 0.1003 | 1.1718 | 0.0334 |
| 0.10 | 0.0582 | 0.1704 | 2.3436 | 0.0582 |
| 0.15 | 0.083 | 0.2406 | 3.5154 | 0.083 |
| 0.20 | 0.1074 | 0.3208 | 4.6872 | 0.1074 |
| 0.25 | 0.1344 | 0.4411 | 5.8591 | 0.1344 |
| 0.30 | 0.1472 | 0.6116 | 7.0309 | 0.1472 |
| 0.35 | 0.1774 | 0.8823 | 8.2027 | 0.1774 |
| 0.40 | 0.2054 | 1.0728 | 9.3745 | 0.2054 |
| 0.45 | 0.2312 | 1.2934 | 10.5463 | 0.2312 |
| 0.50 | 0.2574 | 1.5139 | 11.7181 | 0.2574 |
| 0.55 | 0.283 | 1.7044 | 12.8899 | 0.283 |
| 0.60 | 0.3335 | 1.8648 | 14.0617 | 0.3335 |
| 0.65 | 0.5039 | 2.0353 | 15.2335 | 0.5039 |
| 0.70 | 0.5942 | 2.1255 | 16.4054 | 0.5942 |
| 0.75 | 0.6543 | 2.1857 | 17.5772 | 0.6543 |
| 0.80 | 0.7445 | 2.2759 | 18.749 | 0.7445 |
| 0.85 | 0.8348 | 2.3661 | 19.9208 | 0.8348 |
| 0.90 | 0.935 | 2.4664 | 21.0926 | 0.935 |
| 0.95 | 1.0253 | 2.5566 | 22.2644 | 1.0253 |
| 1.00 | 1.1456 | 2.6769 | 23.4362 | 1.1456 |
| 1.05 | 1.2458 | 2.7772 | 24.608 | 1.2458 |
| 1.10 | 1.3561 | 2.8875 | 25.7798 | 1.3561 |
| 1.15 | 1.4564 | 2.9877 | 26.9517 | 1.4564 |
| 1.20 | 1.5767 | 3.1081 | 28.1235 | 1.5767 |
| 1.25 | 1.697 | 3.2284 | 29.2953 | 1.697 |
| 1.30 | 1.8173 | 3.3487 | 30.4671 | 1.8173 |
| 1.35 | 1.9577 | 3.489 | 31.6389 | 1.9577 |
| 1.40 | 2.0981 | 3.6294 | 32.8107 | 2.0981 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1.45 | 2.2284 | 3.7598 | 33.9825 | 2.2284 |
| 1.50 | 2.3788 | 3.9101 | 35.1543 | 2.3788 |
| 1.55 | 2.5292 | 4.0605 | 36.3261 | 2.5292 |
| 1.60 | 2.7096 | 4.241 | 37.498 | 2.7096 |
| 1.65 | 2.8801 | 4.4114 | 38.6698 | 2.8801 |
| 1.70 | 3.0405 | 4.5719 | 39.8416 | 3.0405 |
| 1.75 | 3.231 | 4.7624 | 41.0134 | 3.231 |
| 1.80 | 3.4014 | 4.9328 | 42.1852 | 3.4014 |
| 1.85 | 3.6621 | 5.1935 | 43.357 | 3.6621 |
| 1.90 | 3.8727 | 5.404 | 44.5288 | 3.8727 |
| 1.95 | 4.1835 | 5.7148 | 45.7006 | 4.1835 |
| 2.00 | 4.5143 | 6.0457 | 46.8724 | 4.5143 |
| 2.05 | 4.9555 | 6.4868 | 48.0442 | 4.9555 |
| 2.10 | 5.3565 | 6.8879 | 49.2161 | 5.3565 |

Tabla 28 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 29 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 30 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 31 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4TYZ, el cual se fracturó durante el acople a las mordazas de la máquina.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 32 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | -0.0664 | 0.5715 | 1.0324 | -0.0664 |
| 0.10 | 0.0968 | 0.8823 | 2.0649 | 0.0968 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.15 | 0.3287 | 1.3335 | 3.0973 | 0.3287 |
| 0.20 | 0.6294 | 1.6342 | 4.1297 | 0.6294 |

Tabla 33 Resumen de datos de ensayo de tracción del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 6TYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0.3247 | 0.8322 | 1.0672 | 0.3247 |
| 0.10 | 0.6756 | 1.1831 | 2.1344 | 0.6756 |
| 0.15 | 1.1067 | 1.6142 | 3.2016 | 1.1067 |
| 0.20 | 1.618 | 2.1255 | 4.2689 | 1.618 |

Tabla 34 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 1FXV.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 5.1534 | 0.4536 | 0 |
| 0.10 | 0 | 6.4567 | 0.9071 | 0 |
| 0.15 | 0 | 7.6699 | 1.3607 | 0 |
| 0.20 | 0 | 8.9933 | 1.8143 | 0 |
| 0.25 | 0 | 10.3067 | 2.2679 | 0 |
| 0.30 | 0 | 12.9536 | 2.7214 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.6584 | 3.175 | 0 |

Tabla 35 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 2FXV.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.4991 | 0.4525 | 0 |
| 0.10 | 0 | 4.7724 | 0.905 | 0 |
| 0.15 | 0 | 6.9179 | 1.3575 | 0 |
| 0.20 | 0 | 8.1712 | 1.81 | 0 |
| 0.25 | 0 | 9.5548 | 2.2625 | 0 |
| 0.30 | 0 | 11.6803 | 2.715 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.5782 | 3.1675 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.5481 | 3.62 | 0 |
| 0.45 | 0 | 18.6083 | 4.0725 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.6484 | 3.62 | 0 |

Tabla 36 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 3FXV.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.05 | 0 | 5.8552 | 0.4545 | 0 |
| 0.10 | 0 | 7.2388 | 0.9089 | 0 |
| 0.15 | 0 | 8.3717 | 1.3634 | 0 |
| 0.20 | 0 | 9.7453 | 1.8178 | 0 |
| 0.25 | 0 | 11.5098 | 2.2723 | 0 |
| 0.30 | 0 | 13.6354 | 2.7267 | 0 |
| 0.35 | 0 | 17.6257 | 3.1812 | 0 |
| 0.40 | 0 | 17.6458 | 3.6356 | 0 |
| 0.45 | 0 | 17.6558 | 4.0901 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.6283 | 3.1812 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.6383 | 3.6356 | 0 |

Tabla 37 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 4FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 6.0958 | 0.452 | 0 |
| 0.10 | 0 | 7.3591 | 0.904 | 0 |
| 0.15 | 0 | 8.863 | 1.356 | 0 |
| 0.20 | 0 | 10.2466 | 1.808 | 0 |
| 0.25 | 0 | 12.2518 | 2.2601 | 0 |
| 0.30 | 0 | 18.6183 | 2.7121 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.5882 | 3.1641 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.6484 | 3.6161 | 0 |

Tabla 38 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 5FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 4.6019 | 0.4541 | 0 |
| 0.10 | 0 | 6.1159 | 0.9082 | 0 |
| 0.15 | 0 | 7.4994 | 1.3624 | 0 |
| 0.20 | 0 | 8.5121 | 1.8165 | 0 |
| 0.25 | 0 | 10.016 | 2.2706 | 0 |
| 0.30 | 0 | 12.7731 | 2.7247 | 0 |
| 0.35 | 0 | 17.6257 | 3.1789 | 0 |
| 0.40 | 0 | 17.6558 | 3.633 | 0 |
| 0.45 | 0 | 17.6658 | 4.0871 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.6383 | 3.633 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.6584 | 3.1789 | 0 |

Tabla 39 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 6FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0.05 | 0 | 5.3539 | 0.4545 | 0 |
| 0.10 | 0 | 6.7776 | 0.9089 | 0 |
| 0.15 | 0 | 8.0409 | 1.3634 | 0 |
| 0.20 | 0 | 9.4445 | 1.8178 | 0 |
| 0.25 | 0 | 10.7078 | 2.2723 | 0 |
| 0.30 | 0 | 15.1493 | 2.7267 | 0 |
| 0.35 | 0 | 17.3149 | 3.1812 | 0 |
| 0.40 | 0 | 17.2949 | 3.6356 | 0 |
| 0.45 | 0 | 17.345 | 4.0901 | 0 |
| 0.35 | 0 | 18.3476 | 3.6356 | 0 |
| 0.40 | 0 | 18.6283 | 3.1812 | 0 |

Tabla 40 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 1FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 6.2061 | 0.4545 | 0 |
| 0.10 | 0 | 6.8979 | 0.9089 | 0 |

Tabla 41 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 2FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.5392 | 0.4499 | 0 |

Tabla 42 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 3FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.6996 | 0.4499 | 0 |

Tabla 43 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 4FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.1782 | 0.4475 | 0 |

Tabla 44 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PLA con categorización 5FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.05 | 0 | 5.8351 | 0.447 | 0 |
| 0.10 | 0 | 6.1058 | 0.894 | 0 |

Tabla 45 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.3988 | 0.463 | 0 |
| 0.10 | 0 | 4.2009 | 0.926 | 0 |
| 0.15 | 0 | 5.0331 | 1.389 | 0 |
| 0.20 | 0 | 5.9454 | 1.852 | 0 |
| 0.25 | 0 | 6.9079 | 2.3149 | 0 |
| 0.30 | 0 | 8.1411 | 2.7779 | 0 |
| 0.35 | 0 | 9.5247 | 3.2409 | 0 |
| 0.40 | 0.7118 | 15.7408 | 3.7039 | 0.7118 |
| 0.45 | 0.7219 | 15.7508 | 4.1669 | 0.7219 |

Tabla 46 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 1.4738 | 0.4572 | 0 |
| 0.10 | 0 | 2.316 | 0.9143 | 0 |
| 0.15 | 0 | 3.1381 | 1.3715 | 0 |
| 0.20 | 0 | 4.0505 | 1.8287 | 0 |
| 0.25 | 0 | 5.2737 | 2.2859 | 0 |
| 0.30 | 0 | 6.8778 | 2.743 | 0 |
| 0.35 | 0 | 8.7126 | 3.2002 | 0 |
| 0.40 | 0 | 8.8129 | 3.6574 | 0 |
| 0.45 | 0 | 8.8329 | 4.1145 | 0 |
| 0.40 | 0 | 12.0613 | 3.6574 | 0 |
| 0.35 | 0 | 12.1315 | 3.2002 | 0 |
| 0.30 | 0 | 12.1515 | 2.743 | 0 |

Tabla 47 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 1.3335 | 0.4607 | 0 |
| 0.10 | 0 | 2.0854 | 0.9215 | 0 |
| 0.15 | 0 | 2.8574 | 1.3822 | 0 |
| 0.20 | 0 | 3.8199 | 1.843 | 0 |
| 0.25 | 0 | 4.6621 | 2.3037 | 0 |
| 0.30 | 0 | 5.9554 | 2.7644 | 0 |
| 0.35 | 0 | 7.2187 | 3.2252 | 0 |

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.40 | 0 | 9.1537 | 3.6859 | 0 |
| 0.45 | 1.0427 | 10.8481 | 4.1467 | 1.0427 |
| 0.50 | 1.0527 | 10.8582 | 4.6074 | 1.0527 |
| 0.45 | 1.0628 | 12.0813 | 4.1467 | 1.0628 |
| 0.40 | 1.0628 | 12.1515 | 3.6859 | 1.0628 |

Tabla 48 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 3.6294 | 0.457 | 0 |
| 0.10 | 0 | 4.3212 | 0.914 | 0 |
| 0.15 | 0 | 4.9929 | 1.3711 | 0 |
| 0.20 | 0 | 5.9254 | 1.8281 | 0 |
| 0.25 | 0 | 6.7976 | 2.2851 | 0 |
| 0.30 | 0 | 7.7601 | 2.7421 | 0 |
| 0.35 | 0 | 8.8229 | 3.1992 | 0 |
| 0.40 | 0 | 10.1062 | 3.6562 | 0 |
| 0.45 | 4.3513 | 15.6205 | 4.1132 | 4.3513 |
| 0.50 | 4.3613 | 15.6305 | 4.5702 | 4.3613 |
| 0.45 | 4.3613 | 15.6606 | 4.1132 | 4.3613 |

Tabla 49 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5FXY.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 1.3435 | 0.457 | 0 |
| 0.10 | 0 | 2.0453 | 0.914 | 0 |
| 0.15 | 0 | 2.8374 | 1.3711 | 0 |
| 0.20 | 0 | 3.7497 | 1.8281 | 0 |
| 0.25 | 0 | 4.7022 | 2.2851 | 0 |
| 0.30 | 0 | 5.9554 | 2.7421 | 0 |
| 0.35 | 0 | 7.5095 | 3.1992 | 0 |
| 0.40 | 0 | 12.322 | 3.6562 | 0 |
| 0.45 | 0 | 12.332 | 4.1132 | 0 |
| 0.40 | 0 | 12.4723 | 3.6562 | 0 |

Tabla 50 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 1FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 10.4371 | 0.4193 | 0 |

Tabla 51 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 2FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 12.8533 | 0.4161 | 0 |

Tabla 52 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 3FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 11.6201 | 0.4314 | 0 |

Tabla 53 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 4FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 54 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 5FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 18.5882 | 0.4143 | 0 |

Tabla 55 Resumen de datos de ensayo de flexión del espécimen fabricado en PAHT CF15 con categorización 6FYZ.

| Carga (KN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 0 | 18.6183 | 0.4098 | 0 |

3.2. CÁLCULOS Y GRÁFICAS

La cantidad de cálculos necesarios a realizar difiere para cada tipo de ensayo, en el caso del ensayo de tensión, se contó con todo el equipo necesario para la realización del ensayo y la obtención semiautomatizada de los resultados.

Sin embargo, en el caso de los ensayos de flexión el laboratorio no contaba con un deflectómetro para ser utilizado. Por ello, se puede observar que no hay

lecturas en las columnas de extensión ni en las columnas de deformación de las tablas correspondientes a los ensayos de flexión.

Además, se hace mención nuevamente que las gráficas y cálculos presentados en el presente informe de investigación, se realizaron siguiendo el esquema de las normas ASTM D638 y D790; con la finalidad de obtener los datos de los materiales que se deben de reportar según dichas normas.

3.2.1. Ensayos de tracción.

Con los datos de extensión y deformación, contenidos en las tablas presentadas en el subcapítulo 3.1, se elaboraron las gráficas esfuerzo versus deformación.

A partir de la Figura 48 hasta la Figura 56 se muestran las gráficas esfuerzo versus deformación de los especímenes fabricados con PLA y de la Figura 57 a la Figura 63, las gráficas correspondientes a los fabricados en PAHT CF15. Debe aclararse que no se muestran gráficas para aquellos especímenes que resultaron fracturados durante el acople o cuyos datos no registró la máquina de ensayo.

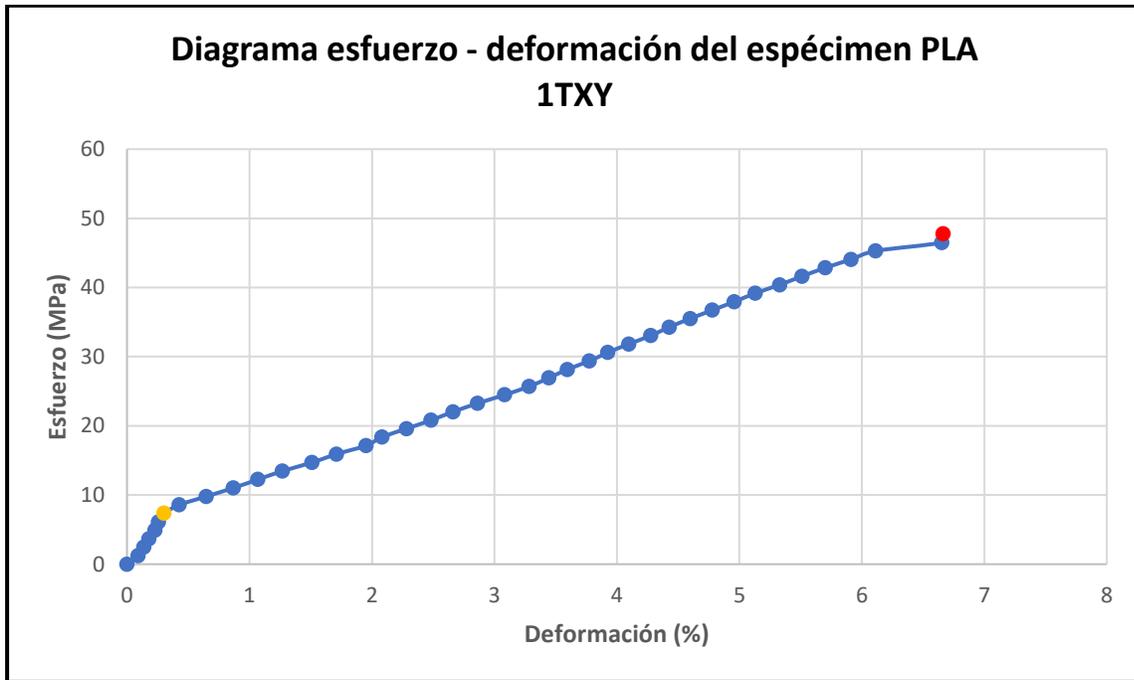


Figura 48 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 1TXY.

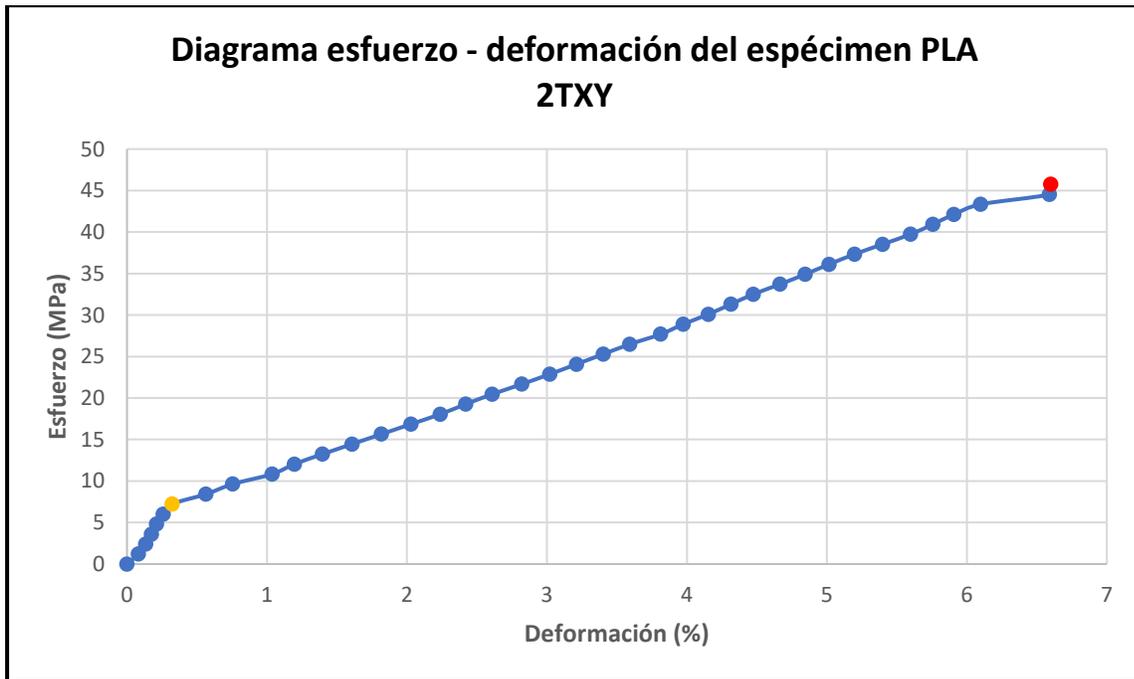


Figura 49 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 2TXY.

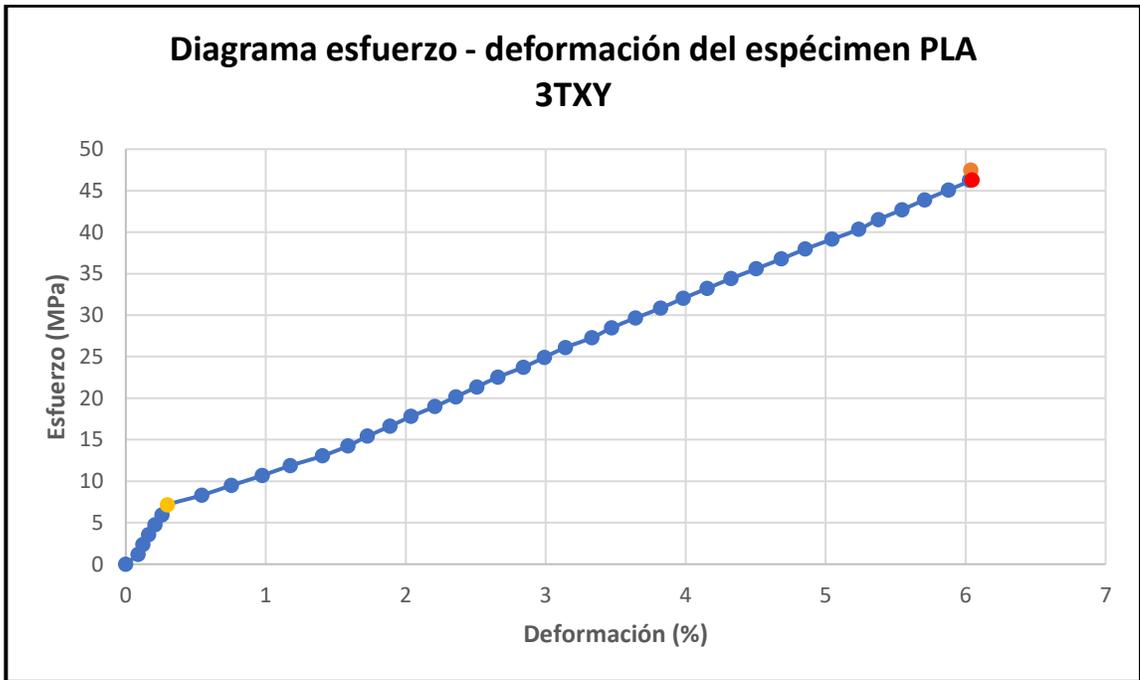


Figura 50 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 3TXY.

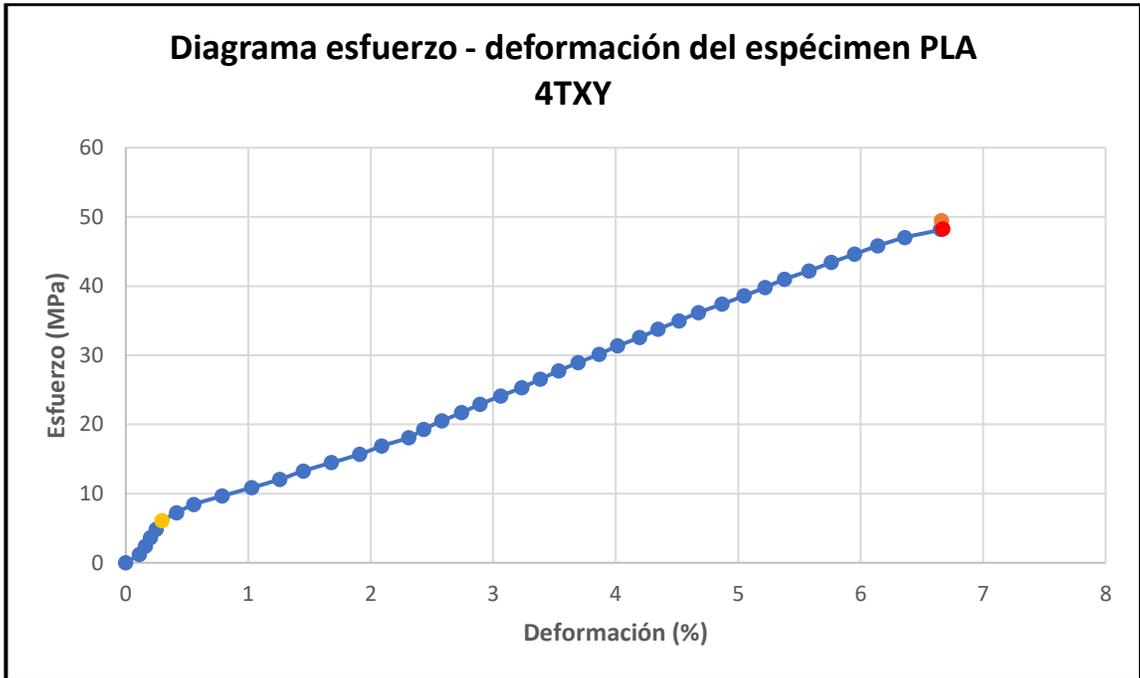


Figura 51 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 4TXY.

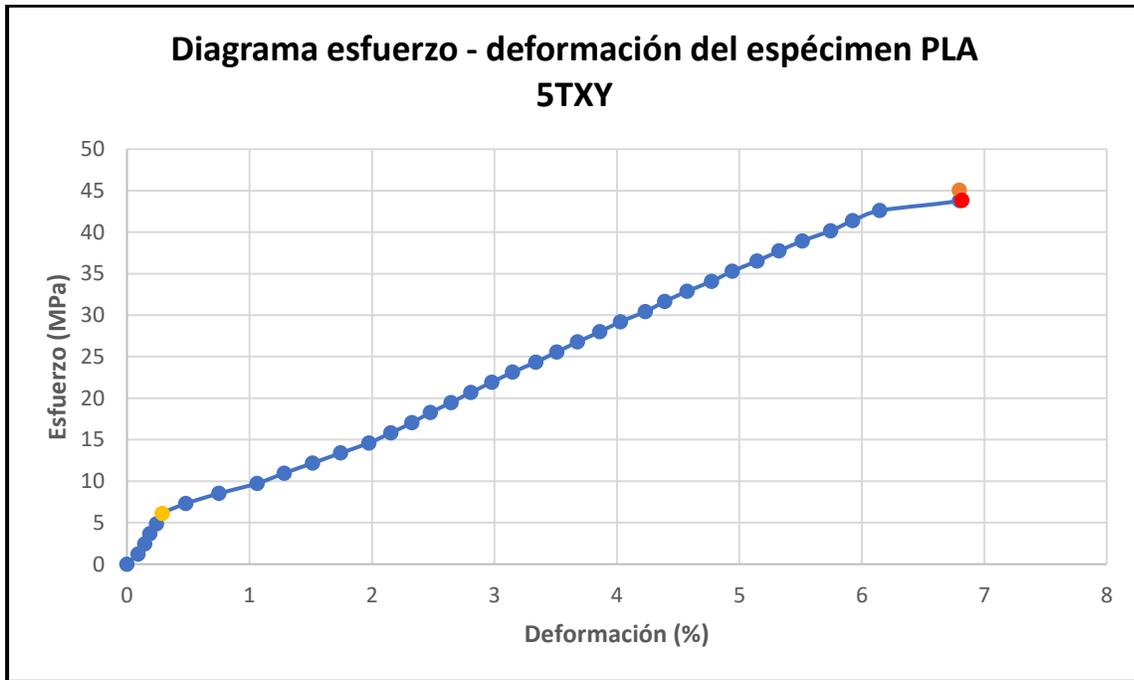


Figura 52 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 5TXY.

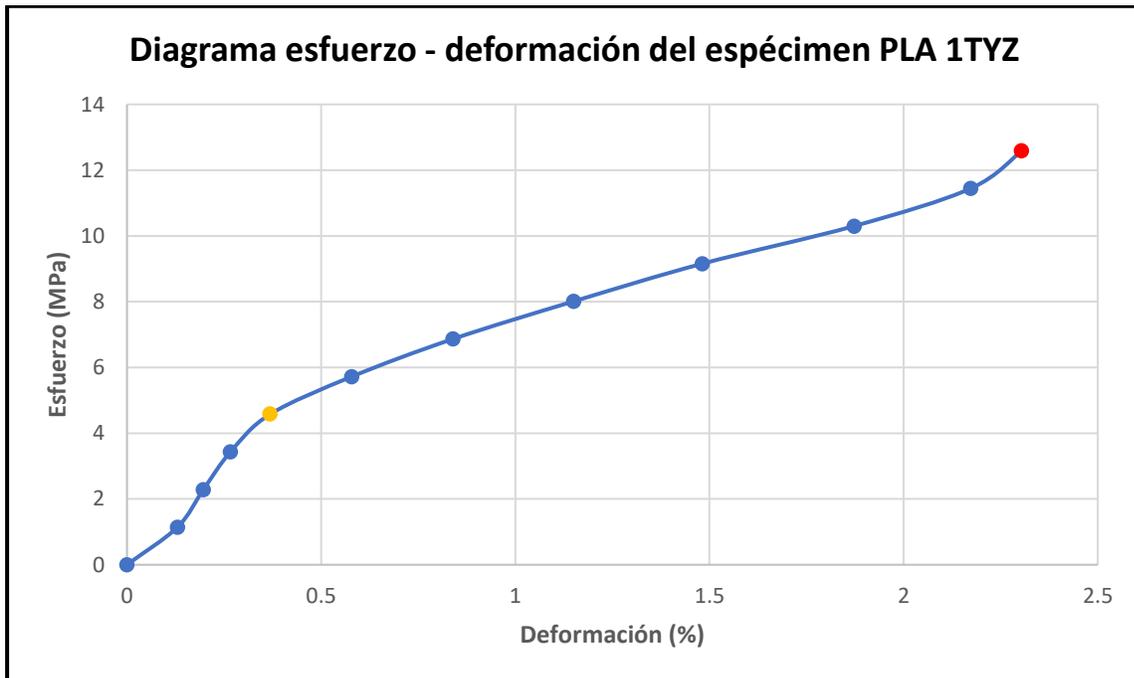


Figura 53 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 1TYZ.

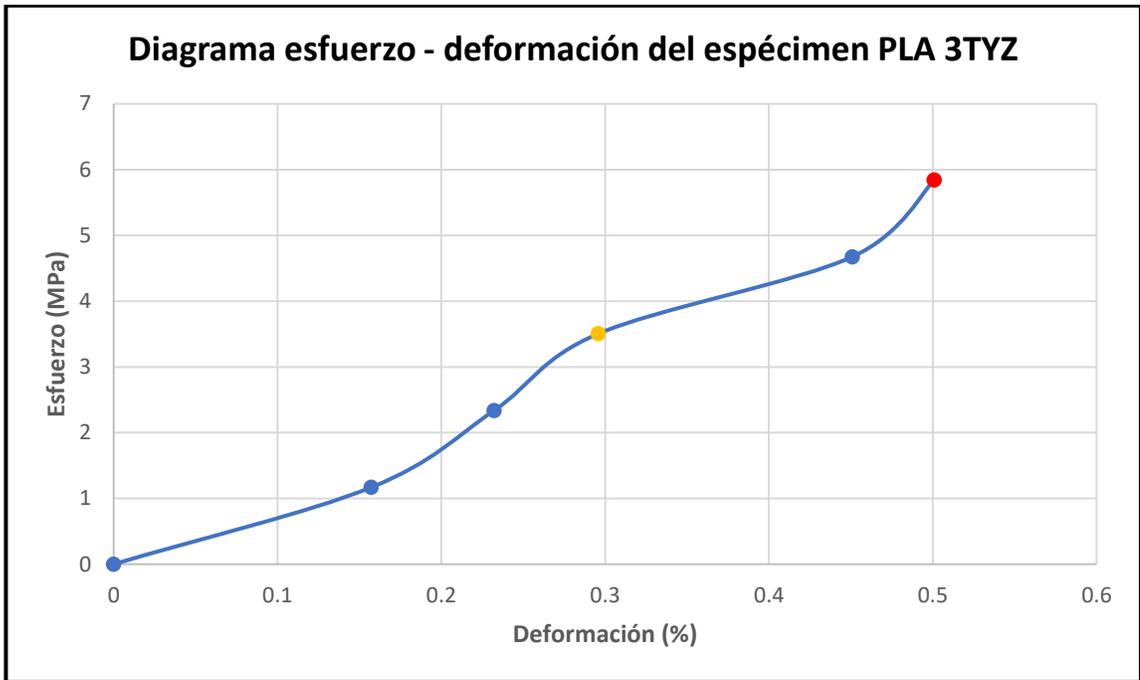


Figura 54 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 3TYZ.

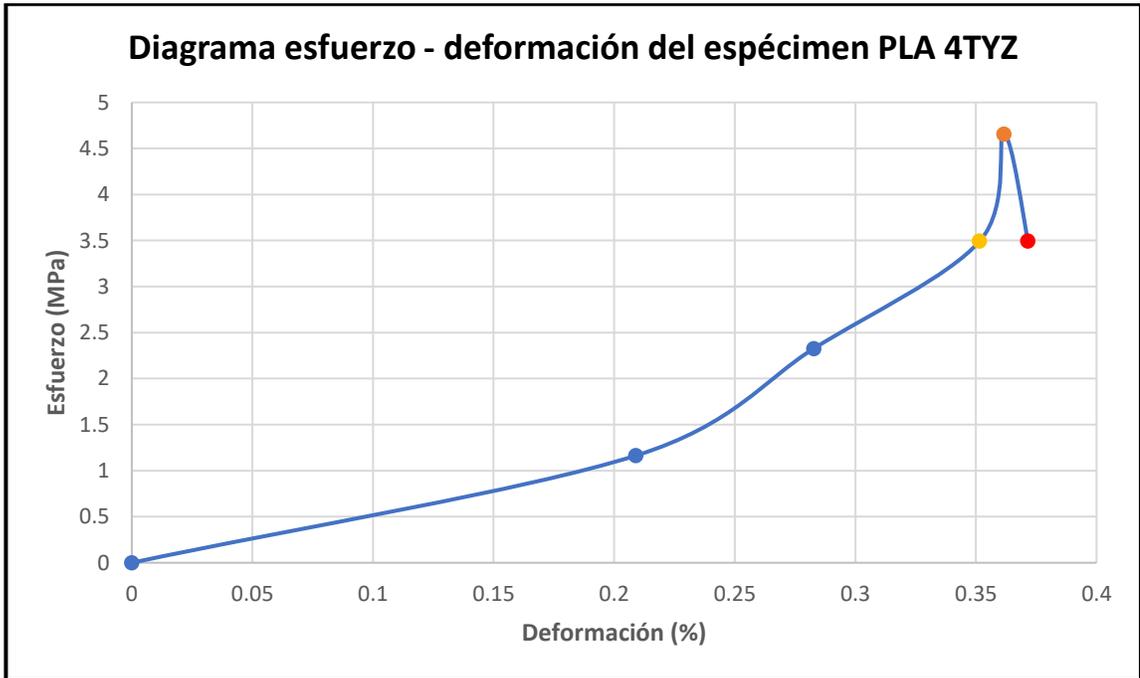


Figura 55 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 4TYZ.

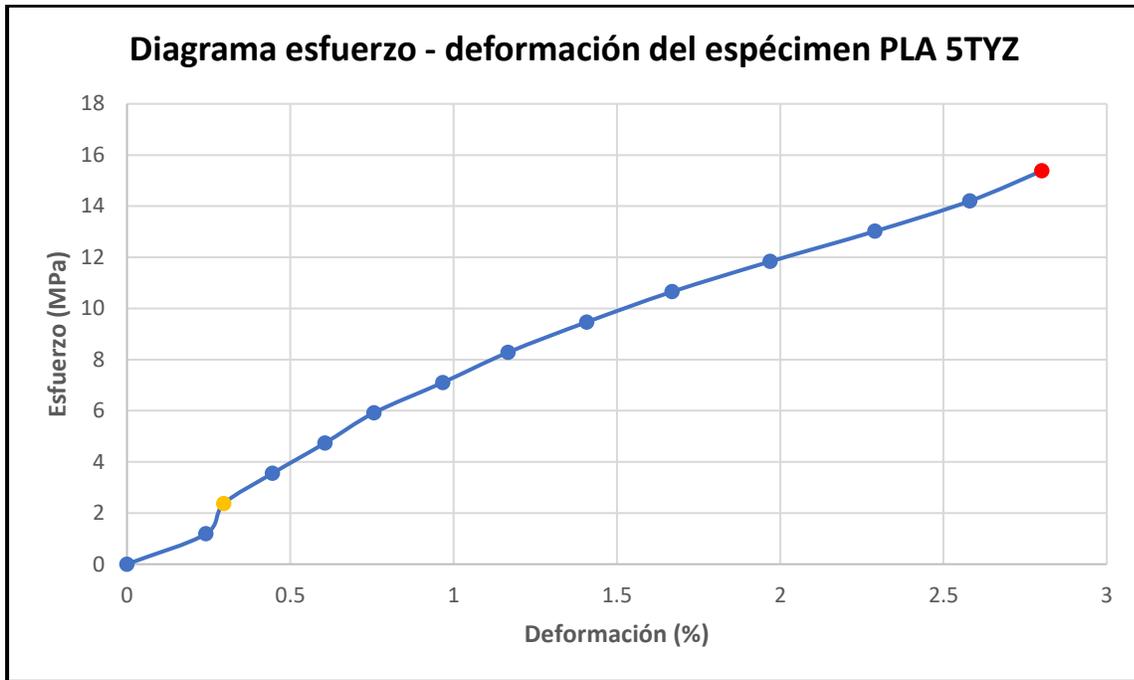


Figura 56 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PLA 5TYZ.

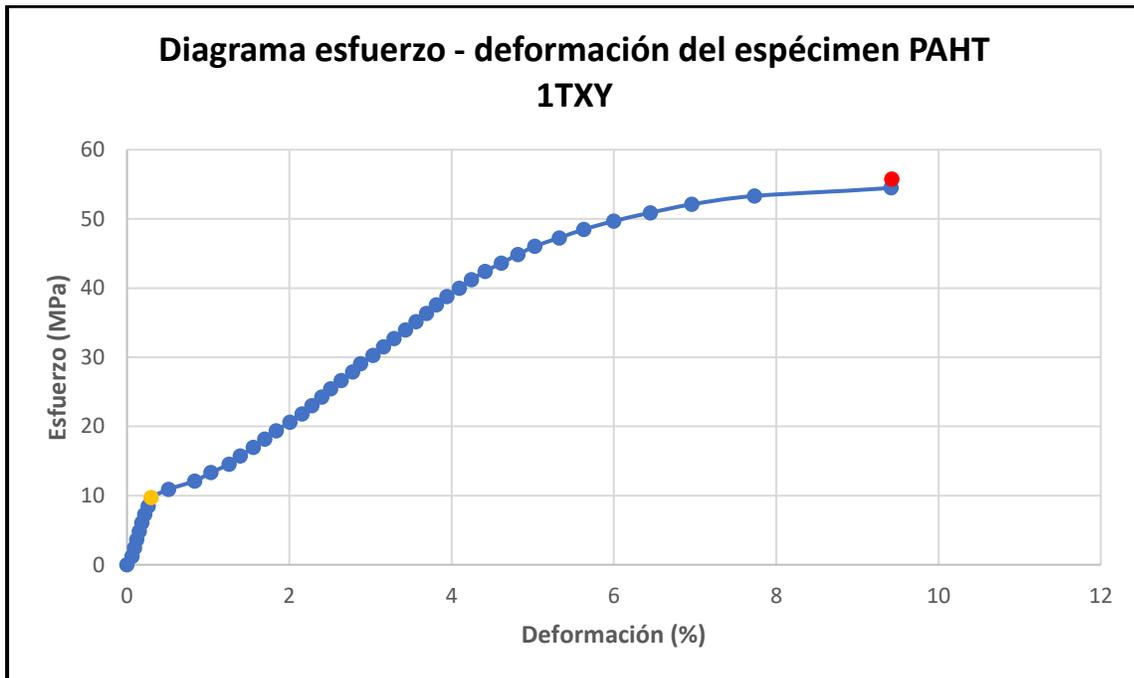


Figura 57 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 1TXY.

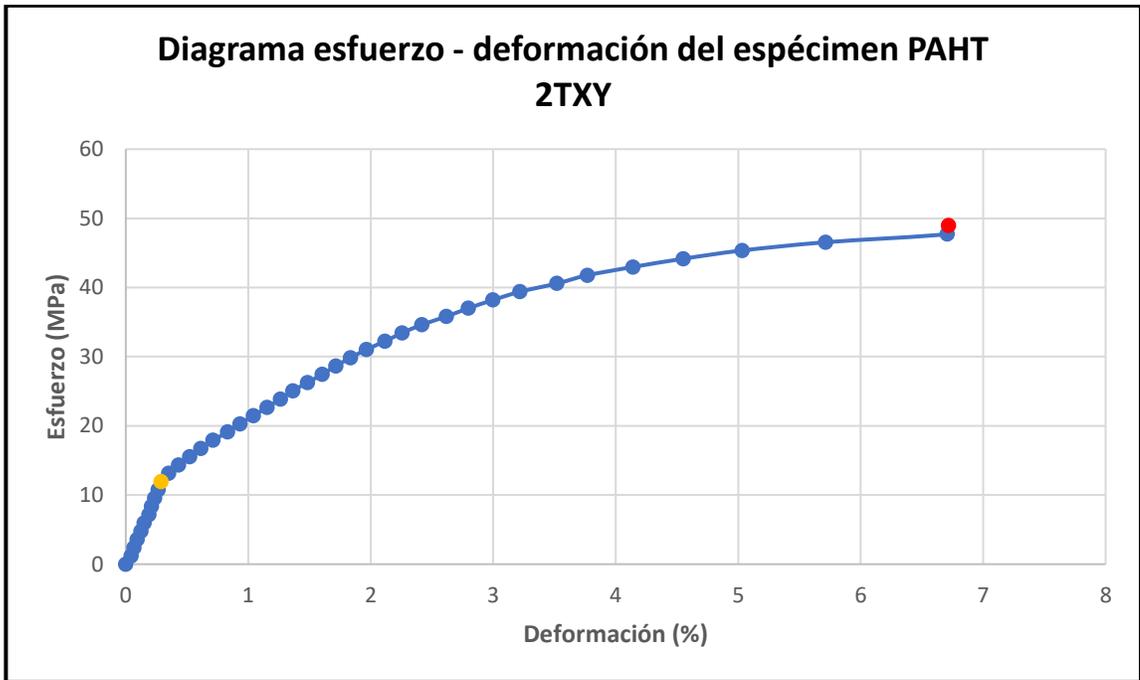


Figura 58 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 2TXY.

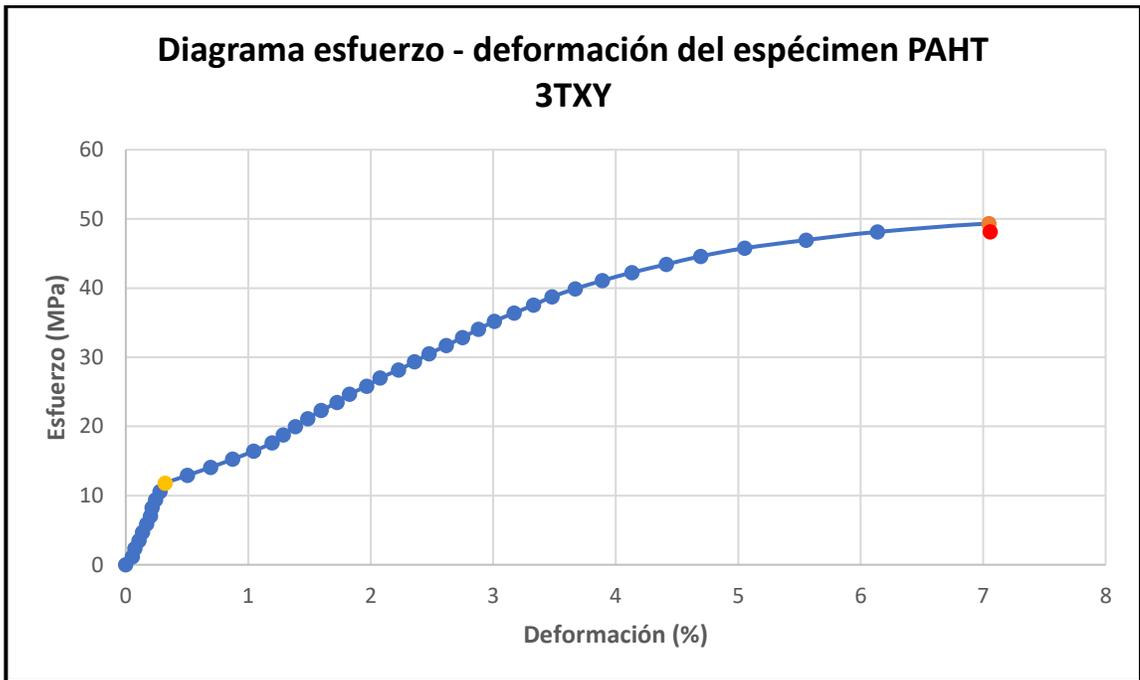


Figura 59 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 3TXY.

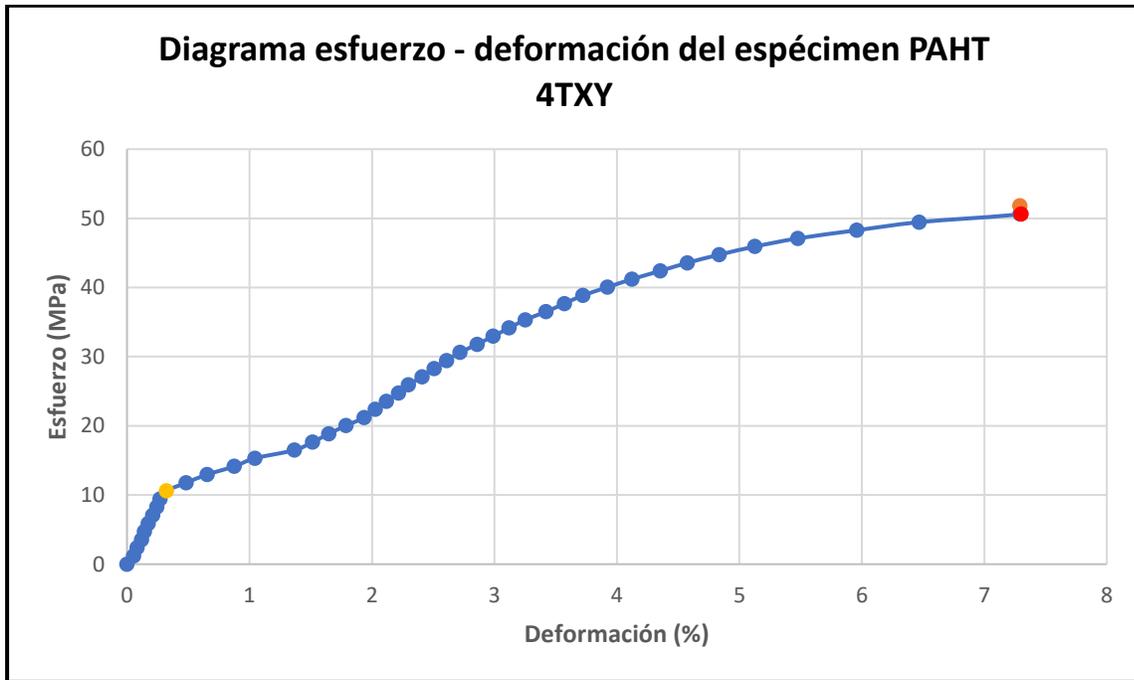


Figura 60 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 4TXY.

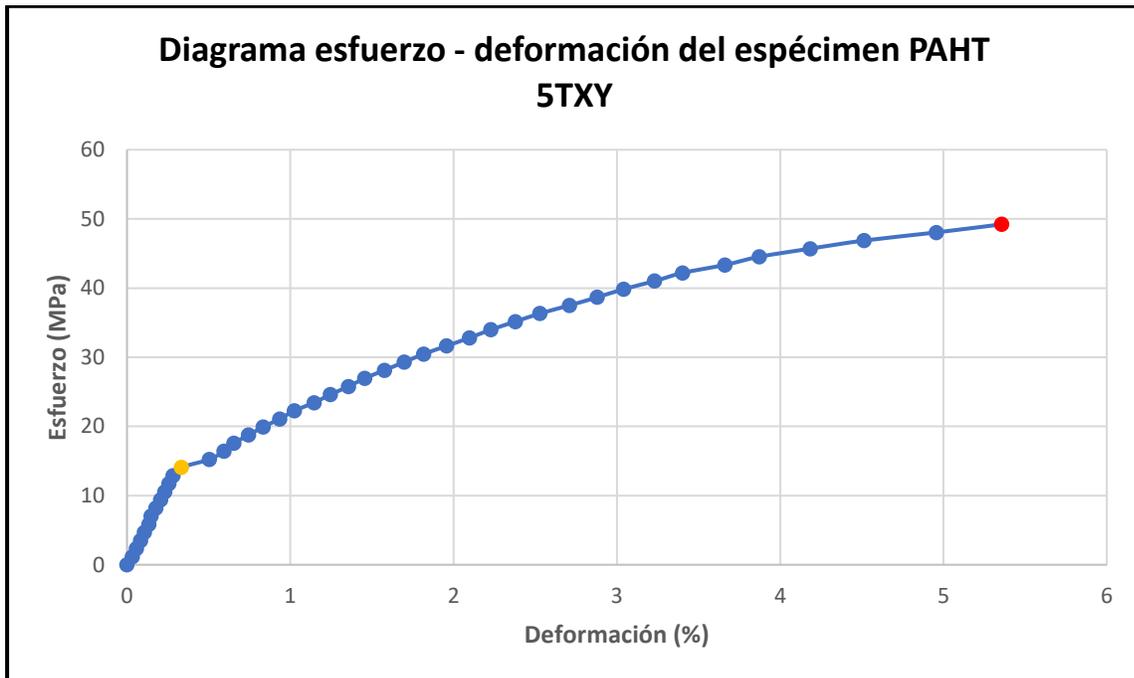


Figura 61 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 5TXY.

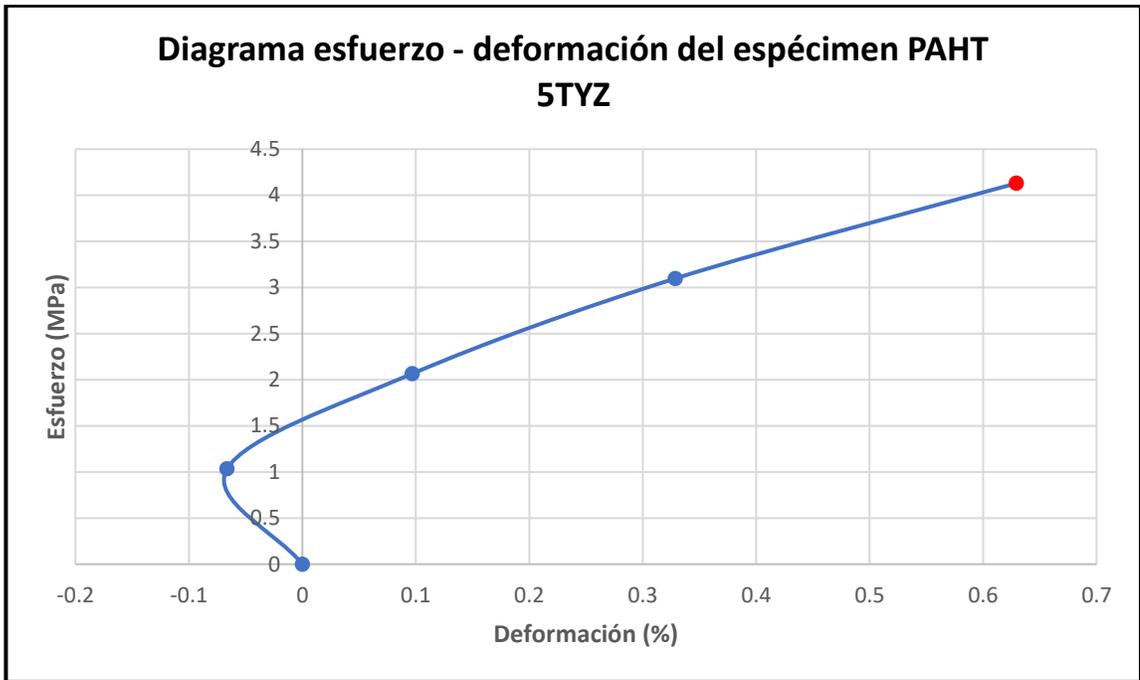


Figura 62 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 5TYZ.

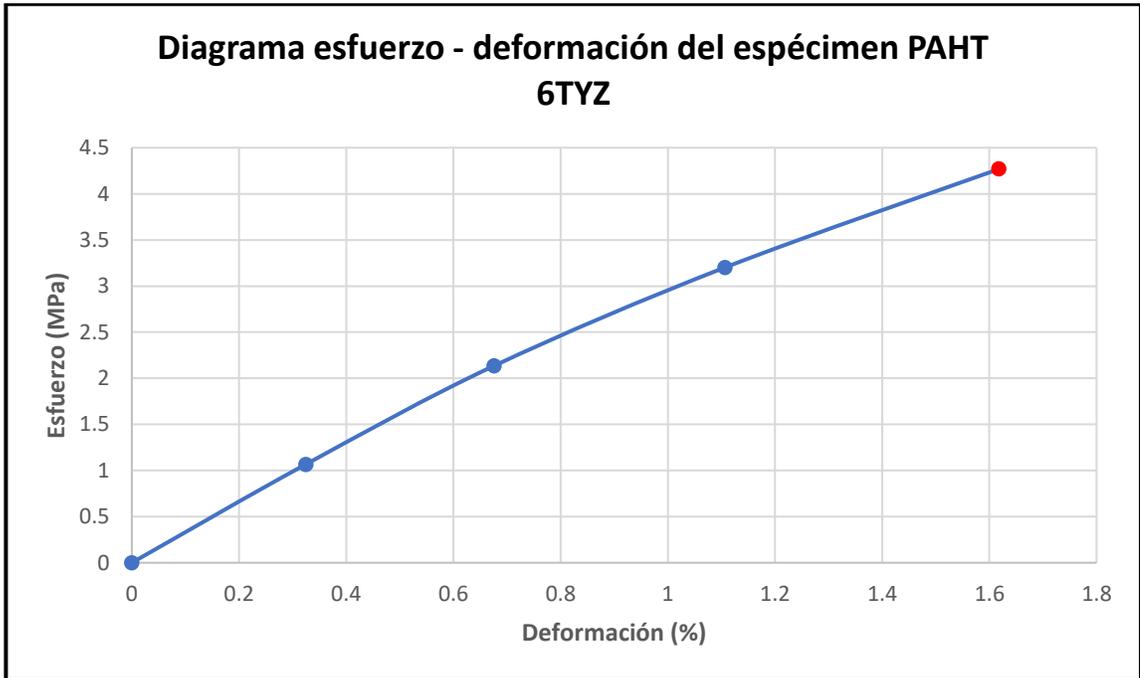


Figura 63 Diagrama esfuerzo - deformación del espécimen PAHT 6TYZ.

Como segundo paso, deben recopilarse los datos de los puntos críticos, el recopilatorio de puntos críticos se presenta de la Tabla 56 a la Tabla 61.

Tabla 56 Ensayo de tracción. Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 0.30 | 0.3022 | 0.7018 | 7.3437 | 0.3022 |
| 2TXY | 0.30 | 0.3239 | 0.7720 | 7.2236 | 0.3239 |
| 3TXY | 0.30 | 0.2992 | 0.9224 | 7.1172 | 0.2992 |
| 4TXY | 0.25 | 0.2960 | 0.5615 | 6.0294 | 0.2960 |
| 5TXY | 0.25 | 0.2890 | 0.7520 | 6.0857 | 0.2890 |
| 1TYZ | 0.20 | 0.3686 | 0.7219 | 4.5780 | 0.3686 |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | 0.15 | 0.2958 | 0.6116 | 3.5044 | 0.2958 |
| 4TYZ | 0.15 | 0.3515 | 0.5113 | 3.4910 | 0.3515 |
| 5TYZ | 0.10 | 0.2966 | 0.3810 | 2.3669 | 0.2966 |
| 6TYZ | Datos no guardados | | | | |

Tabla 57 Ensayo de tracción. Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PAHT

CF15.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 0.40 | 0.30 | 1.05 | 9.69 | 0.30 |
| 2TXY | 0.50 | 0.29 | 0.97 | 11.93 | 0.29 |
| 3TXY | 0.50 | 0.32 | 1.30 | 11.74 | 0.32 |
| 4TXY | 0.45 | 0.32 | 0.71 | 10.60 | 0.32 |
| 5TXY | 0.60 | 0.33 | 1.86 | 14.06 | 0.33 |
| 1TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 4TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 5TYZ | 0.20 | 0.63 | 1.63 | 4.13 | 0.63 |
| 6TYZ | 0.20 | 1.62 | 2.13 | 4.27 | 1.62 |

Tabla 58 Ensayo de tracción. Puntos máximos de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 1.95 | 6.66 | 7.07 | 47.73 | 6.66 |
| 2TXY | 1.90 | 6.60 | 7.05 | 45.75 | 6.60 |
| 3TXY | 2.00 | 6.04 | 6.68 | 47.45 | 6.04 |
| 4TXY | 2.05 | 6.66 | 6.94 | 49.44 | 6.66 |
| 5TXY | 1.85 | 6.80 | 7.30 | 45.03 | 6.80 |
| 1TYZ | 0.55 | 2.30 | 2.66 | 12.59 | 2.30 |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | 0.25 | 0.50 | 0.84 | 5.84 | 0.50 |
| 4TYZ | 0.20 | 0.36 | 0.52 | 4.65 | 0.36 |
| 5TYZ | 0.65 | 2.80 | 2.89 | 15.38 | 2.80 |
| 6TYZ | Fracturada en acople | | | | |

Tabla 59 Ensayo de tracción. Puntos máximos de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 2.30 | 9.43 | 10.21 | 55.74 | 9.43 |
| 2TXY | 2.05 | 6.72 | 7.42 | 48.93 | 6.72 |
| 3TXY | 2.10 | 7.05 | 8.03 | 49.29 | 7.05 |
| 4TXY | 2.20 | 7.29 | 7.68 | 51.80 | 7.29 |
| 5TXY | 2.10 | 5.36 | 6.89 | 49.22 | 5.36 |
| 1TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 4TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 5TYZ | 0.20 | 0.63 | 1.63 | 4.13 | 0.63 |
| 6TYZ | 0.20 | 1.62 | 2.13 | 4.27 | 1.62 |

Tabla 60 Ensayo de tracción. Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 1.95 | 6.66 | 7.07 | 47.73 | 6.66 |
| 2TXY | 1.90 | 6.60 | 7.05 | 45.75 | 6.60 |
| 3TXY | 1.95 | 6.05 | 6.69 | 46.26 | 6.05 |
| 4TXY | 2.00 | 6.67 | 6.95 | 48.24 | 6.67 |
| 5TXY | 1.80 | 6.82 | 7.32 | 43.82 | 6.82 |
| 1TYZ | 0.55 | 2.30 | 2.66 | 12.59 | 2.30 |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | 0.25 | 0.50 | 0.84 | 5.84 | 0.50 |
| 4TYZ | 0.15 | 0.37 | 0.53 | 3.49 | 0.37 |
| 5TYZ | 0.65 | 2.80 | 2.89 | 15.38 | 2.80 |
| 6TYZ | Fracturada en acople | | | | |

Tabla 61 Ensayo de tracción. Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Extensión (%) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1TXY | 2.30 | 9.43 | 10.21 | 55.74 | 9.43 |
| 2TXY | 2.05 | 6.72 | 7.42 | 48.93 | 6.72 |
| 3TXY | 2.05 | 7.06 | 8.04 | 48.12 | 7.06 |
| 4TXY | 2.15 | 7.30 | 7.69 | 50.63 | 7.30 |
| 5TXY | 2.10 | 5.36 | 6.89 | 49.22 | 5.36 |
| 1TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 2TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 3TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 4TYZ | Fracturada en acople | | | | |
| 5TYZ | 0.20 | 0.63 | 1.63 | 4.13 | 0.63 |
| 6TYZ | 0.20 | 1.62 | 2.13 | 4.27 | 1.62 |

Una vez recopilados los datos de los puntos críticos se obtuvieron el promedio, la desviación estándar y el porcentaje de cambio de cada uno de los resultados solicitados por la norma.

Los cálculos se realizaron utilizando Microsoft Excel y la fórmula contemplada en la norma para el cálculo de la desviación estándar de cada dato, que es la misma utilizada por el software mencionado.

Las funciones que fueron utilizadas en MS Excel son las siguientes:

- Promedio (Media aritmética): PROMEDIO()
- Desviación estándar: DESVEST.M()
- Porcentaje de cambio: $\frac{x_2-x_1}{x_1}$

Los resultados referentes al ensayo de tracción para los especímenes fabricados en PLA en sus dos distintas direcciones de impresión, se presentan en la Tabla 62 y la Tabla 63.

Del mismo modo, los resultados relativos al ensayo de tracción para los especímenes fabricados en PAHT CF15 en sus dos distintas direcciones de impresión, se presentan en la Tabla 64 y Tabla 65.

Tabla 62 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes XY fabricados con PLA.

| Módulo de elasticidad | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 0.02643 | 0.0019 | 53.38% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.28 | 0.0274 | 86.67% |
| Extensión (%) | 0.3021 | 0.0132 | -7.94% |
| Desplazamiento (mm) | 0.7419 | 0.1301 | 33.33% |
| Esfuerzo (MPa) | 6.7599 | 0.6465 | 93.97% |
| Deformación (%) | 0.3021 | 0.0132 | -7.94% |

| Punto máximo | | | |
|------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 1.95 | 0.0791 | 372.73% |
| Extensión (%) | 6.5520 | 0.2965 | 339.17% |
| Desplazamiento (mm) | 7.0062 | 0.2259 | 305.68% |
| Esfuerzo (MPa) | 47.0812 | 1.7388 | 389.54% |
| Deformación (%) | 6.5520 | 0.2965 | 339.17% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 1.92 | 0.0758 | 380.00% |
| Extensión (%) | 6.5600 | 0.2974 | 338.97% |
| Desplazamiento (mm) | 7.0142 | 0.2282 | 305.56% |
| Esfuerzo (MPa) | 46.3594 | 1.7503 | 397.07% |
| Deformación (%) | 6.5600 | 0.2974 | 338.97% |

Tabla 63 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PLA.

| Módulo de elasticidad | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 0.01724 | 0.0029 | -34.80% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.15 | 0.0408 | -46.43% |
| Extensión (%) | 0.3281 | 0.0375 | 8.63% |
| Desplazamiento (mm) | 0.5565 | 0.1452 | -25.00% |
| Esfuerzo (MPa) | 3.4851 | 0.9028 | -48.45% |
| Deformación (%) | 0.3281 | 0.0375 | 8.63% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.41 | 0.2213 | -78.85% |
| Extensión (%) | 1.4919 | 1.2428 | -77.23% |
| Desplazamiento (mm) | 1.7270 | 1.2176 | -75.35% |
| Esfuerzo (MPa) | 9.6174 | 5.1958 | -79.57% |
| Deformación (%) | 1.4919 | 1.2428 | -77.23% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.40 | 0.2380 | -79.17% |
| Extensión (%) | 1.4944 | 1.2398 | -77.22% |
| Desplazamiento (mm) | 1.7295 | 1.2143 | -75.34% |
| Esfuerzo (MPa) | 9.3265 | 5.5843 | -79.88% |
| Deformación (%) | 1.4944 | 1.2398 | -77.22% |

Tabla 64 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes XY fabricados con PAHT CF15.

| Módulo de elasticidad | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 0.0393 | 0.0040 | 1136.52% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.49 | 0.0742 | 145.00% |
| Extensión (%) | 0.3135 | 0.0183 | -72.10% |
| Desplazamiento (mm) | 1.1810 | 0.4366 | -37.17% |
| Esfuerzo (MPa) | 11.6045 | 1.6454 | 176.34% |
| Deformación (%) | 0.3135 | 0.0183 | -72.10% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 2.15 | 0.1000 | 975.00% |
| Extensión (%) | 7.1684 | 1.4681 | 537.93% |
| Desplazamiento (mm) | 8.0449 | 1.2783 | 327.95% |
| Esfuerzo (MPa) | 50.9966 | 2.8943 | 1114.41% |
| Deformación (%) | 7.1684 | 1.4681 | 537.93% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 2.13 | 0.1037 | 965.00% |
| Extensión (%) | 7.1724 | 1.4681 | 538.29% |
| Desplazamiento (mm) | 8.0489 | 1.2776 | 328.17% |
| Esfuerzo (MPa) | 50.5264 | 3.0524 | 1103.21% |
| Deformación (%) | 7.1724 | 1.4681 | 538.29% |

Tabla 65 Ensayo de tracción: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PAHT CF15.

| Módulo de elasticidad | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 0.00318 | 0.0010 | -91.91% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.20 | 0.0000 | -59.18% |
| Extensión (%) | 1.1237 | 0.6990 | 258.39% |
| Desplazamiento (mm) | 1.8799 | 0.3474 | 59.17% |
| Esfuerzo (MPa) | 4.1993 | 0.0984 | -63.81% |
| Deformación (%) | 1.1237 | 0.6990 | 258.39% |

| Punto máximo | | | |
|------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.20 | 0.0000 | -90.70% |
| Extensión (%) | 1.1237 | 0.6990 | -84.32% |
| Desplazamiento (mm) | 1.8799 | 0.3474 | -76.63% |
| Esfuerzo (MPa) | 4.1993 | 0.0984 | -91.77% |
| Deformación (%) | 1.1237 | 0.6990 | -84.32% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.20 | 0.0000 | -90.61% |
| Extensión (%) | 1.1237 | 0.6990 | -84.33% |
| Desplazamiento (mm) | 1.8799 | 0.3474 | -76.64% |
| Esfuerzo (MPa) | 4.1993 | 0.0984 | -91.69% |
| Deformación (%) | 1.1237 | 0.6990 | -84.33% |

3.2.2. Ensayos de flexión

Como ya se ha mencionado, en el caso de los ensayos de flexión, la falta del deflectómetro impidió que se pudiera registrar la deformación por deflexión que el espécimen estaba sufriendo en su parte más baja. Asimismo, tampoco fue posible medir el esfuerzo en esa parte del espécimen.

Por tanto, para la obtención de los resultados y datos solicitados por la norma para los ensayos de flexión, primero se hizo necesario calcular los esfuerzos y deformaciones que los especímenes hayan percibido durante los ensayos, aplicando las fórmulas contenidas en la sección 12 de la norma ASTM D790.

Dichas fórmulas son las siguientes:

Para la obtención del esfuerzo de flexión, se utiliza la siguiente fórmula dada por la norma (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2017):

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

Ecuación 3-1

En la cual:

- σ_f : esfuerzo en las fibras exteriores del espécimen en su punto medio, en MPa.
- P : carga en un punto dado de la curva de carga – deflexión (desplazamiento), en N.
- L : claro de viga (distancia entre los puntos de apoyo), en mm.
- b : ancho del espécimen, en mm.
- d : profundidad (espesor) del espécimen, en mm.

La deformación por deflexión se obtuvo utilizando la siguiente formula dada por la norma (American Society for Testing and Materials o ASTM International, 2017):

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

Ecuación 3-2

En la cual:

- ε_f : deformación en las fibras exteriores del espécimen, en mm/mm .
- D : deflexión máxima en el centro del espécimen, en mm.
- L : claro de viga (distancia entre los puntos de apoyo), en mm.
- d : profundidad (espesor) del espécimen, en mm.

Utilizando la Ecuación 3-1 y la Ecuación 3-2 en conjunto con los datos presentados de la Tabla 34 a la Tabla 55 y el software de MS Excel, se obtuvieron los datos de esfuerzo y de deformación para cada espécimen ensayado. Dichos datos se muestran de la Tabla 66 a la Tabla 76 para los especímenes fabricados con PLA y de la Tabla 77 a la Tabla 87 para los fabricados con PAHT CF15.

Tabla 66 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 1FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|---|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.70 | 8.68 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 5.1534 | 10.9735 | 1.3693 |
| 0.10 | 6.4567 | 21.9470 | 1.7156 |
| 0.15 | 7.6699 | 32.9206 | 2.0380 |
| 0.20 | 8.9933 | 43.8941 | 2.3896 |
| 0.25 | 10.3067 | 54.8676 | 2.7386 |
| 0.30 | 12.9536 | 65.8411 | 3.4420 |
| 0.35 | 18.6584 | 76.8147 | 4.9578 |
| Nota: Limite de deformación de 5 % alcanzado sin fractura. | | | |

Tabla 67 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 2FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|--|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.73 | 8.68 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.4991 | 10.9448 | 0.9298 |
| 0.10 | 4.7724 | 21.8896 | 1.2681 |
| 0.15 | 6.9179 | 32.8344 | 1.8382 |
| 0.20 | 8.1712 | 43.7792 | 2.1712 |
| 0.25 | 9.5548 | 54.7240 | 2.5388 |
| 0.30 | 11.6803 | 65.6688 | 3.1036 |
| 0.35 | 18.5782 | 76.6136 | 4.9365 |
| 0.40 | 18.5481 | 87.5584 | 4.9285 |
| 0.45 | 18.6083 | 98.5032 | 4.9445 |
| 0.40 | 18.6484 | 87.5584 | 4.9551 |
| Nota: Especimen fracturado antes del límite de deformación del 5 %. | | | |

Tabla 68 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 3FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|---|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.69 | 8.67 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 5.8552 | 11.0131 | 1.5534 |
| 0.10 | 7.2388 | 22.0262 | 1.9205 |
| 0.15 | 8.3717 | 33.0393 | 2.2211 |
| 0.20 | 9.7453 | 44.0524 | 2.5855 |
| 0.25 | 11.5098 | 55.0655 | 3.0536 |
| 0.30 | 13.6354 | 66.0786 | 3.6176 |
| 0.35 | 17.6257 | 77.0917 | 4.6762 |
| 0.40 | 17.6458 | 88.1048 | 4.6815 |
| 0.45 | 17.6558 | 99.1179 | 4.6842 |
| 0.35 | 18.6283 | 77.0917 | 4.9422 |
| 0.40 | 18.6383 | 88.1048 | 4.9449 |
| Nota: Límite de deformación de 5 % alcanzado sin fractura. | | | |

Tabla 69 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 4FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|---|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.70 | 8.71 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 6.0958 | 10.9093 | 1.6247 |
| 0.10 | 7.3591 | 21.8185 | 1.9614 |
| 0.15 | 8.863 | 32.7278 | 2.3623 |
| 0.20 | 10.2466 | 43.6371 | 2.7310 |
| 0.25 | 12.2518 | 54.5464 | 3.2655 |
| 0.30 | 18.6183 | 65.4556 | 4.9623 |
| 0.35 | 18.5882 | 76.3649 | 4.9543 |
| 0.40 | 18.6484 | 87.2742 | 4.9704 |
| Nota: Límite de deformación de 5 % alcanzado sin fractura. | | | |

Tabla 70 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 5FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|---|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.67 | 8.69 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 4.6019 | 10.9658 | 1.2247 |
| 0.10 | 6.1159 | 21.9316 | 1.6276 |
| 0.15 | 7.4994 | 32.8974 | 1.9958 |
| 0.20 | 8.5121 | 43.8632 | 2.2653 |
| 0.25 | 10.016 | 54.8290 | 2.6655 |
| 0.30 | 12.7731 | 65.7948 | 3.3992 |
| 0.35 | 17.6257 | 76.7605 | 4.6906 |
| 0.40 | 17.6558 | 87.7263 | 4.6986 |
| 0.45 | 17.6658 | 98.6921 | 4.7013 |
| 0.40 | 18.6383 | 87.7263 | 4.9601 |
| 0.35 | 18.6584 | 76.7605 | 4.9654 |
| Nota: Límite de deformación de 5 % alcanzado sin fractura. | | | |

Tabla 71 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 6FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.69 | 8.67 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 5.3539 | 11.0104 | 1.4210 |
| 0.10 | 6.7776 | 22.0208 | 1.7988 |
| 0.15 | 8.0409 | 33.0312 | 2.1341 |
| 0.20 | 9.4445 | 44.0416 | 2.5066 |
| 0.25 | 10.7078 | 55.0521 | 2.8419 |
| 0.30 | 15.1493 | 66.0625 | 4.0207 |
| 0.35 | 17.3149 | 77.0729 | 4.5955 |
| 0.40 | 17.2949 | 88.0833 | 4.5902 |
| 0.45 | 17.345 | 99.0937 | 4.6035 |
| 0.35 | 18.3476 | 77.0729 | 4.8696 |
| 0.40 | 18.6283 | 88.0833 | 4.9441 |

Nota: Límite de deformación de 5 % alcanzado sin fractura.

Tabla 72 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 1FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.79 | 8.74 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 6.2061 | 10.7582 | 1.6598 |
| 0.10 | 6.8979 | 21.5164 | 1.8448 |

Tabla 73 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 2FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.73 | 8.73 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.5392 | 10.8337 | 0.9455 |

Tabla 74 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 3FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.73 | 8.73 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.6996 | 10.8309 | 0.9883 |

Tabla 75 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 4FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.77 | 8.75 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.1782 | 10.7367 | 0.8513 |

Tabla 76 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PLA 5FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.74 | 8.78 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 5.8351 | 10.6994 | 1.5677 |
| 0.10 | 6.1058 | 21.3989 | 1.6405 |

Tabla 77 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 1FXY.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.30 | 8.78 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.3988 | 11.0708 | 0.9135 |
| 0.10 | 4.2009 | 22.1415 | 1.1291 |

| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0.15 | 5.0331 | 33.2123 | 1.3528 |
| 0.20 | 5.9454 | 44.2830 | 1.5980 |
| 0.25 | 6.9079 | 55.3538 | 1.8567 |
| 0.30 | 8.1411 | 66.4246 | 2.1881 |
| 0.35 | 9.5247 | 77.4953 | 2.5600 |
| 0.40 | 15.7408 | 88.5661 | 4.2307 |
| 0.45 | 15.7508 | 99.6368 | 4.2334 |

Tabla 78 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 2FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.40 | 8.82 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 1.4738 | 10.8904 | 0.3978 |
| 0.10 | 2.316 | 21.7807 | 0.6251 |
| 0.15 | 3.1381 | 32.6711 | 0.8470 |
| 0.20 | 4.0505 | 43.5614 | 1.0932 |
| 0.25 | 5.2737 | 54.4518 | 1.4234 |
| 0.30 | 6.8778 | 65.3421 | 1.8563 |
| 0.35 | 8.7126 | 76.2325 | 2.3515 |
| 0.40 | 8.8129 | 87.1228 | 2.3786 |
| 0.45 | 8.8329 | 98.0132 | 2.3840 |
| 0.40 | 12.0613 | 87.1228 | 3.2553 |
| 0.35 | 12.1315 | 76.2325 | 3.2743 |
| 0.30 | 12.1515 | 65.3421 | 3.2797 |

Tabla 79 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 3FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.36 | 8.78 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 1.3335 | 11.0200 | 0.3584 |
| 0.10 | 2.0854 | 22.0400 | 0.5605 |
| 0.15 | 2.8574 | 33.0600 | 0.7680 |
| 0.20 | 3.8199 | 44.0800 | 1.0267 |
| 0.25 | 4.6621 | 55.1000 | 1.2531 |
| 0.30 | 5.9554 | 66.1200 | 1.6007 |
| 0.35 | 7.2187 | 77.1400 | 1.9402 |
| 0.40 | 9.1537 | 88.1600 | 2.4603 |
| 0.45 | 10.8481 | 99.1800 | 2.9157 |
| 0.50 | 10.8582 | 110.2001 | 2.9184 |
| 0.45 | 12.0813 | 99.1800 | 3.2472 |
| 0.40 | 12.1515 | 88.1600 | 3.2660 |

Tabla 80 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 4FX Y.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|------------------|--------------------|--|
| 12.30 | 8.83 | 140 | |

| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 3.6294 | 10.9517 | 0.9810 |
| 0.10 | 4.3212 | 21.9033 | 1.1680 |
| 0.15 | 4.9929 | 32.8550 | 1.3496 |
| 0.20 | 5.9254 | 43.8067 | 1.6017 |
| 0.25 | 6.7976 | 54.7584 | 1.8374 |
| 0.30 | 7.7601 | 65.7100 | 2.0976 |
| 0.35 | 8.8229 | 76.6617 | 2.3849 |
| 0.40 | 10.1062 | 87.6134 | 2.7318 |
| 0.45 | 15.6205 | 98.5651 | 4.2223 |
| 0.50 | 15.6305 | 109.5167 | 4.2250 |
| 0.45 | 15.6606 | 98.5651 | 4.2332 |

Tabla 81 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 5FXY.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 12.39 | 8.83 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 1.3435 | 10.8721 | 0.3632 |
| 0.10 | 2.0453 | 21.7442 | 0.5529 |
| 0.15 | 2.8374 | 32.6163 | 0.7670 |
| 0.20 | 3.7497 | 43.4884 | 1.0136 |
| 0.25 | 4.7022 | 54.3605 | 1.2710 |
| 0.30 | 5.9554 | 65.2326 | 1.6098 |
| 0.35 | 7.5095 | 76.1047 | 2.0299 |
| 0.40 | 12.322 | 86.9768 | 3.3307 |
| 0.45 | 12.332 | 97.8489 | 3.3334 |
| 0.40 | 12.4723 | 86.9768 | 3.3713 |

Tabla 82 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 1FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 13.09 | 9.11 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 10.4371 | 9.6699 | 2.9096 |

Tabla 83 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 2FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 13.19 | 9.11 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 12.8533 | 9.5850 | 3.5858 |

Tabla 84 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 3FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|------------|------------------|--------------------|--|
| 12.98 | 8.93 | 140 | |

| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|-------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 11.6201 | 10.1467 | 3.1766 |

Tabla 85 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 4FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 13.09 | 9.15 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 86 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 5FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 13.19 | 9.15 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 18.5882 | 9.5059 | 5.2066 |

Tabla 87 Datos de esfuerzo y deformación del espécimen PAHT CF15 6FYZ.

| Ancho (mm) | Profundidad (mm) | Claro de viga (mm) | |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 13.09 | 9.32 | 140 | |
| Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 18.6183 | 9.2346 | 5.3119 |

Es preciso hacer notar que los esfuerzos contenidos de la Tabla 66 a la Tabla 87 son diferentes a los presentados de la Tabla 34 a la Tabla 55, debido a que estos últimos han sido calculados automáticamente por el software de la máquina de ensayos, tomando a las medidas de los especímenes como si fueran de un ensayo de tracción y ha calculado un esfuerzo de tracción el cual es completamente diferente para un ensayo de flexión.

Con los datos de la Tabla 66 a la Tabla 87, se vuelve posible trazar los gráficos de esfuerzo – deformación, los cuales se presentan de la Figura 64 a la Figura 74 para los especímenes fabricados con PLA y de la Figura 75 a la Figura 85 para los fabricados con PAHT CF15.

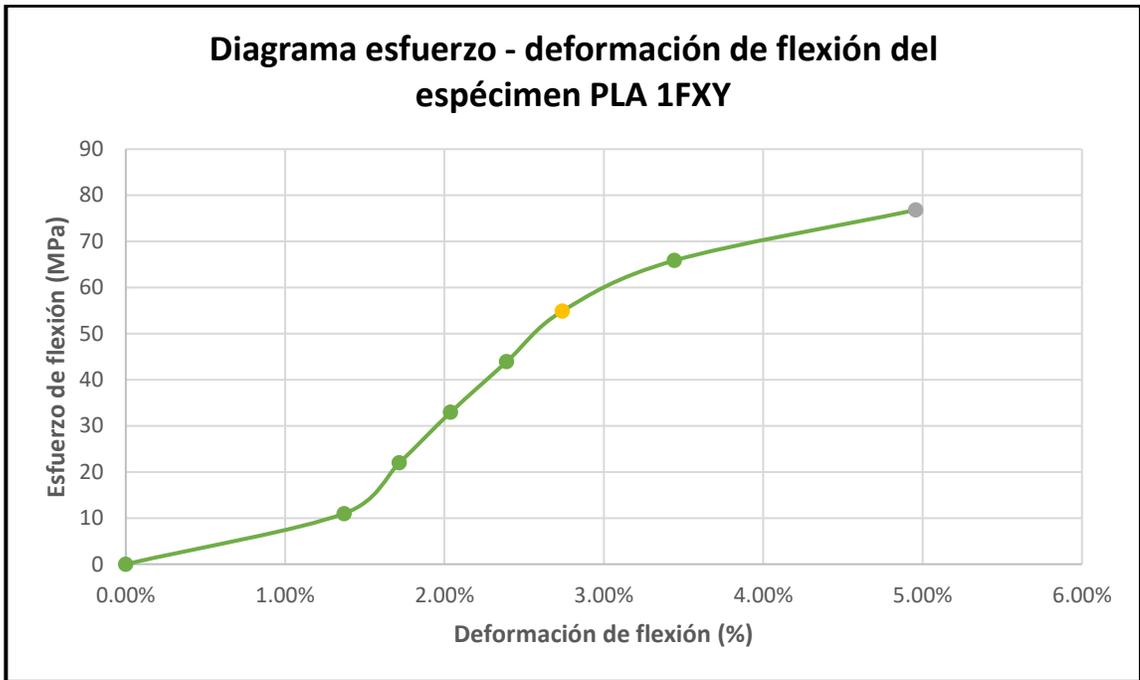


Figura 64 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 1FXY.

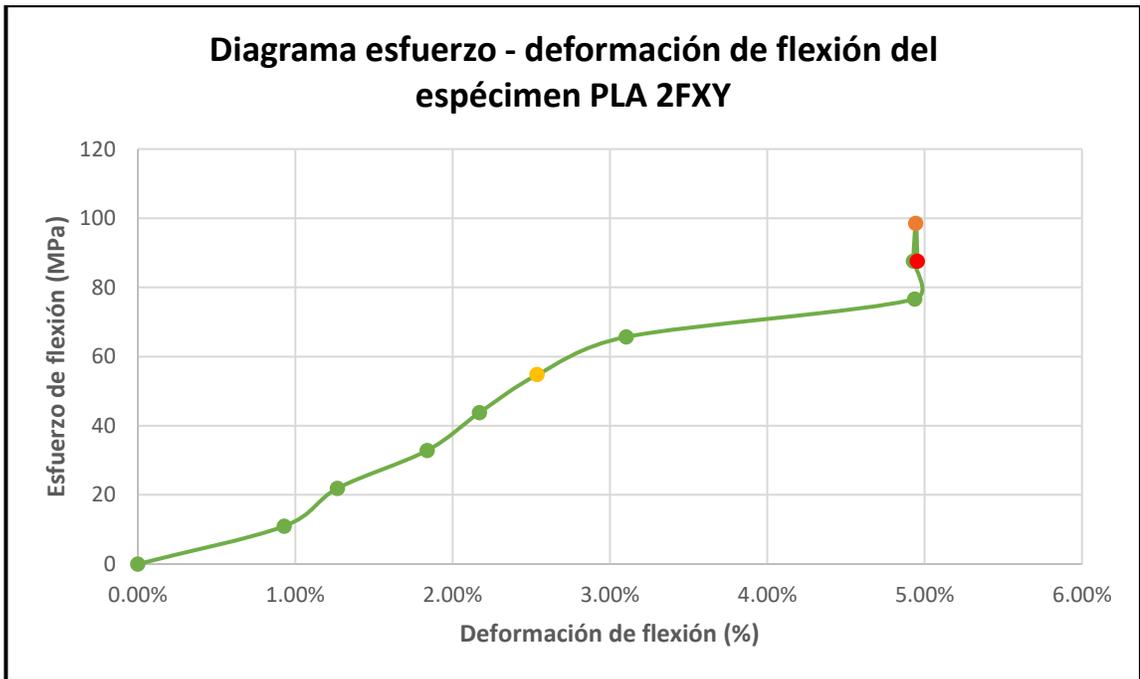


Figura 65 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 2FXY.

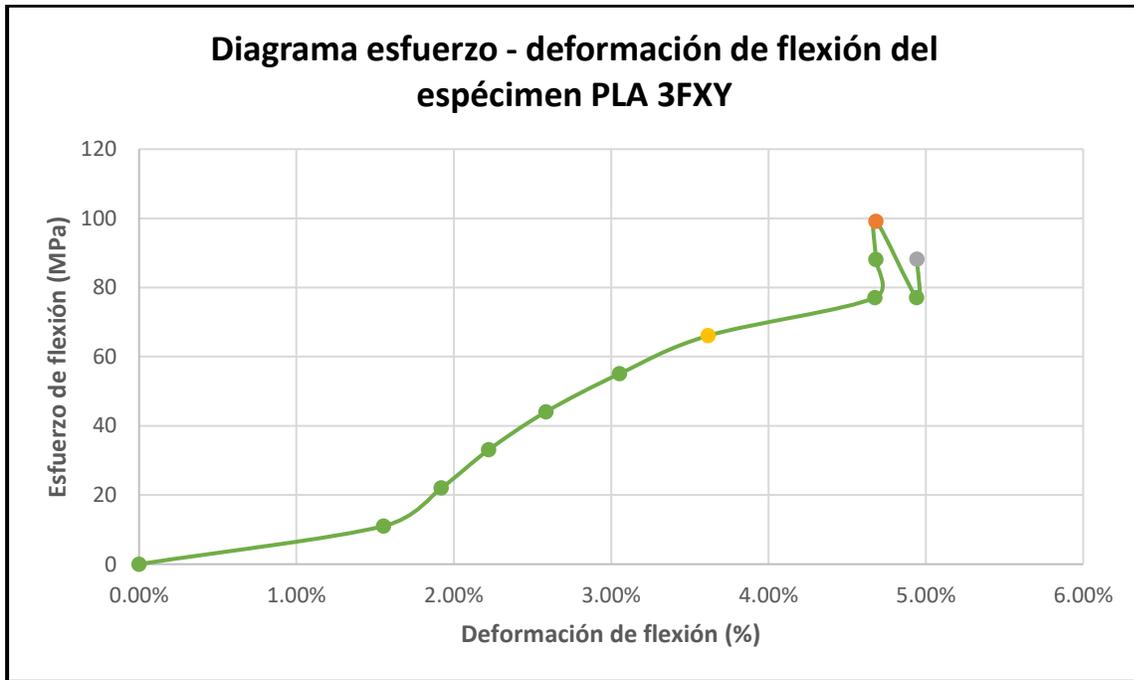


Figura 66 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 3FXY.

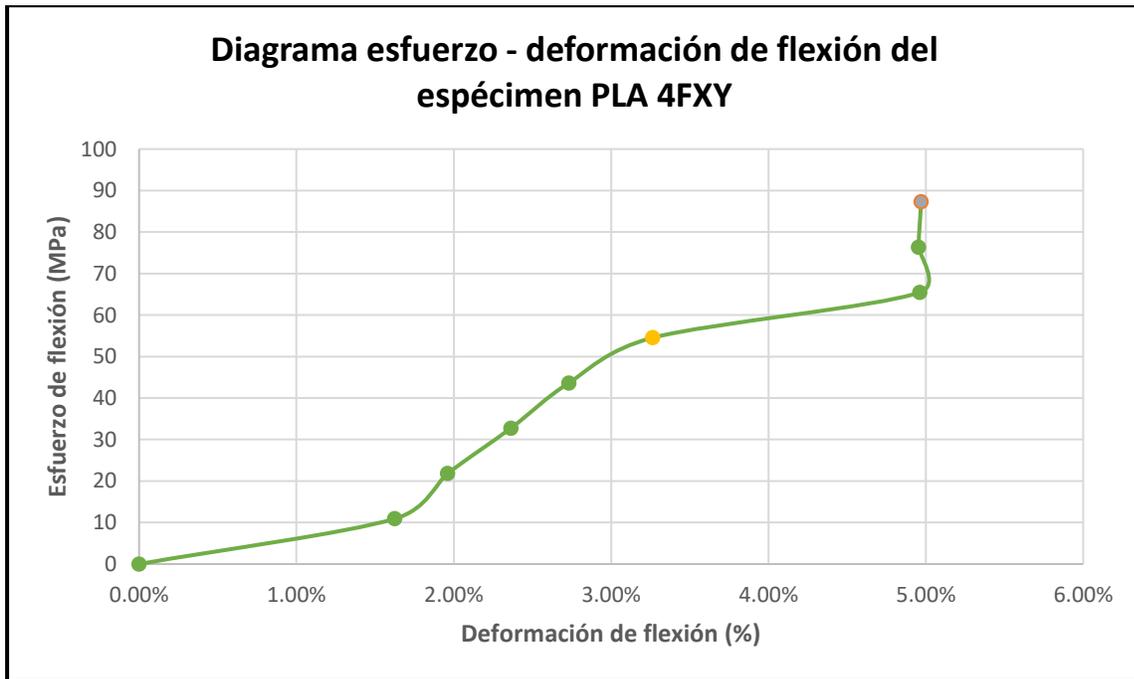


Figura 67 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 4FXY.

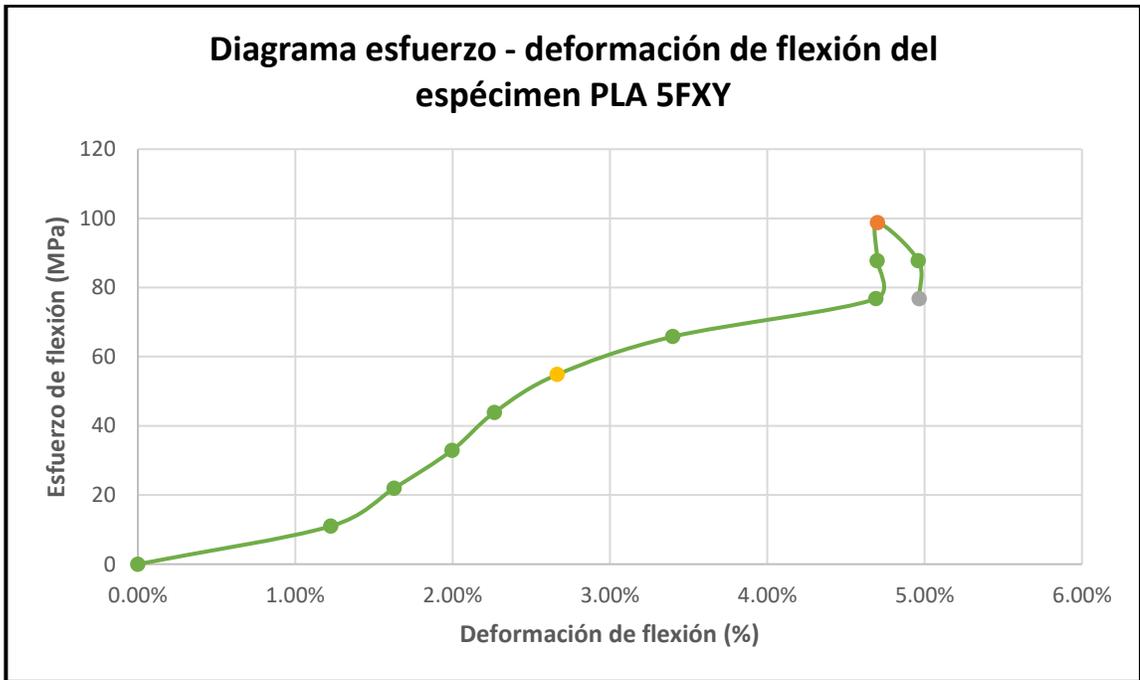


Figura 68 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 5FXY.

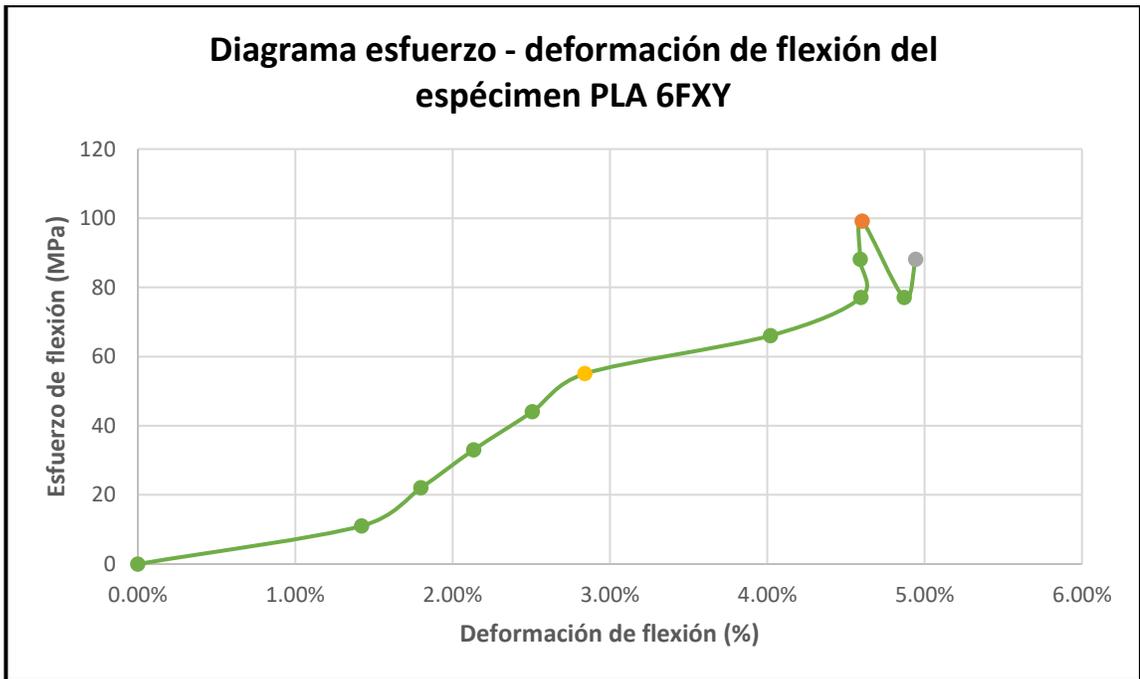


Figura 69 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 6FXY.

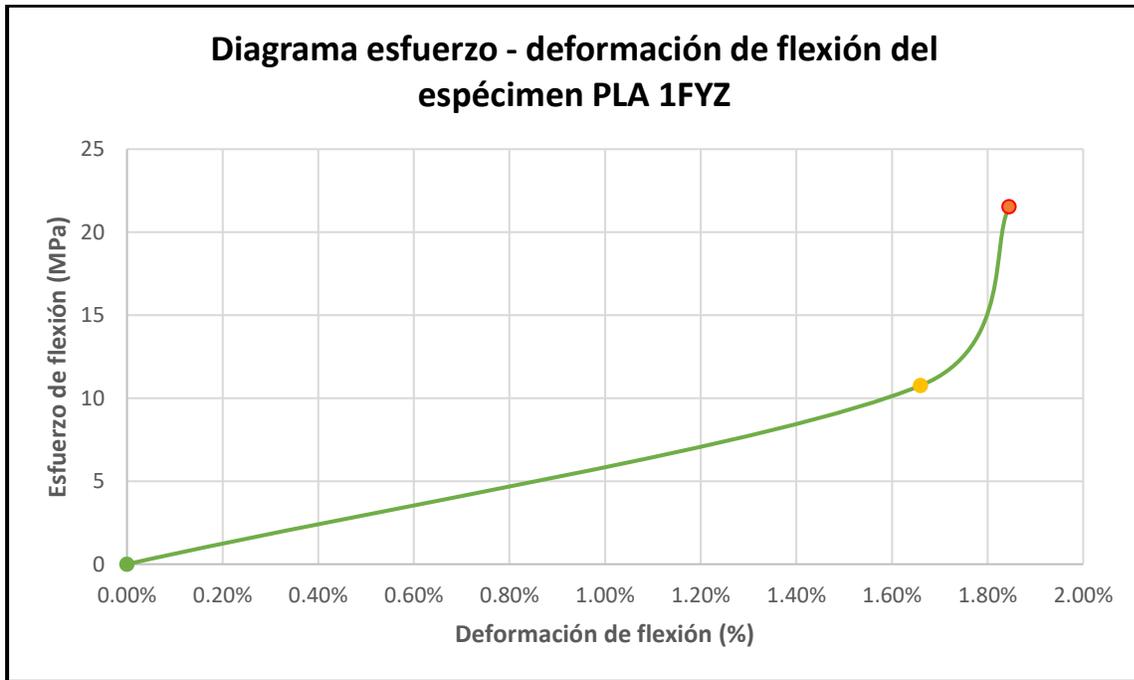


Figura 70 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 1FYZ.

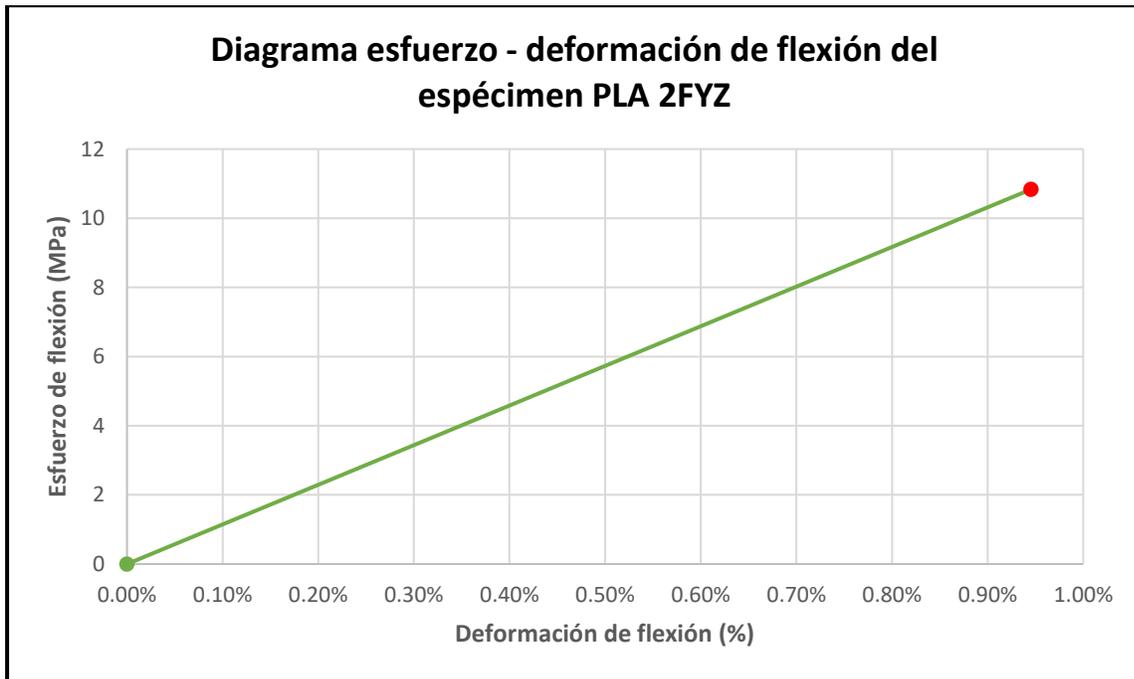


Figura 71 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 2FYZ.

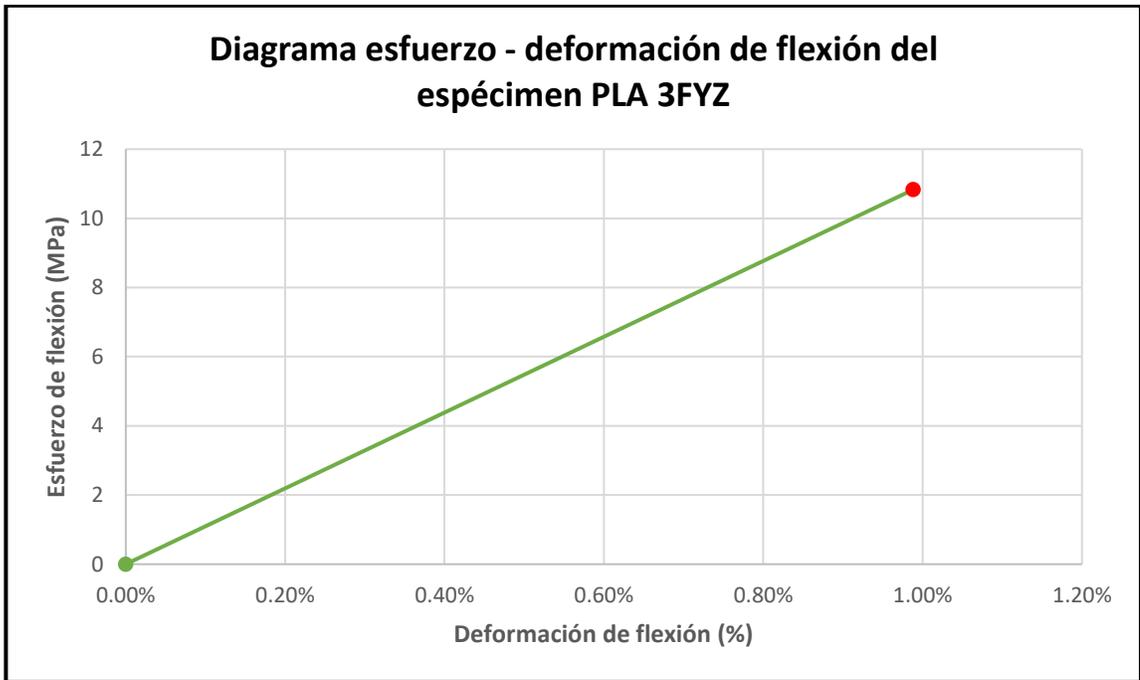


Figura 72 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 3FYZ.

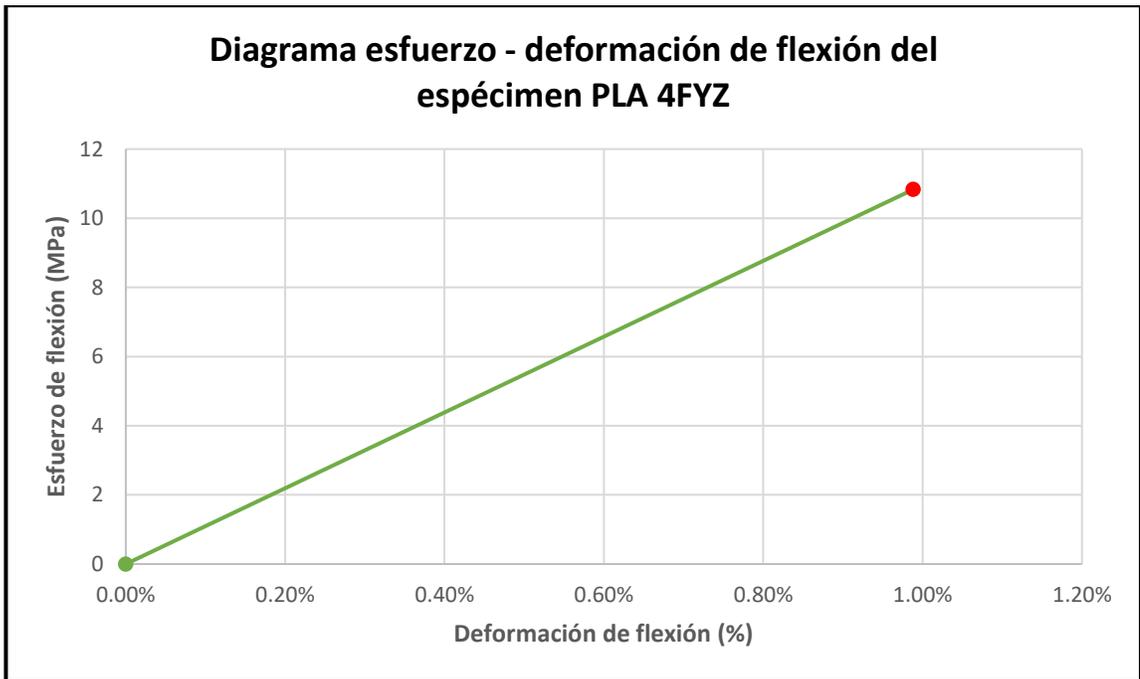


Figura 73 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 4FYZ.

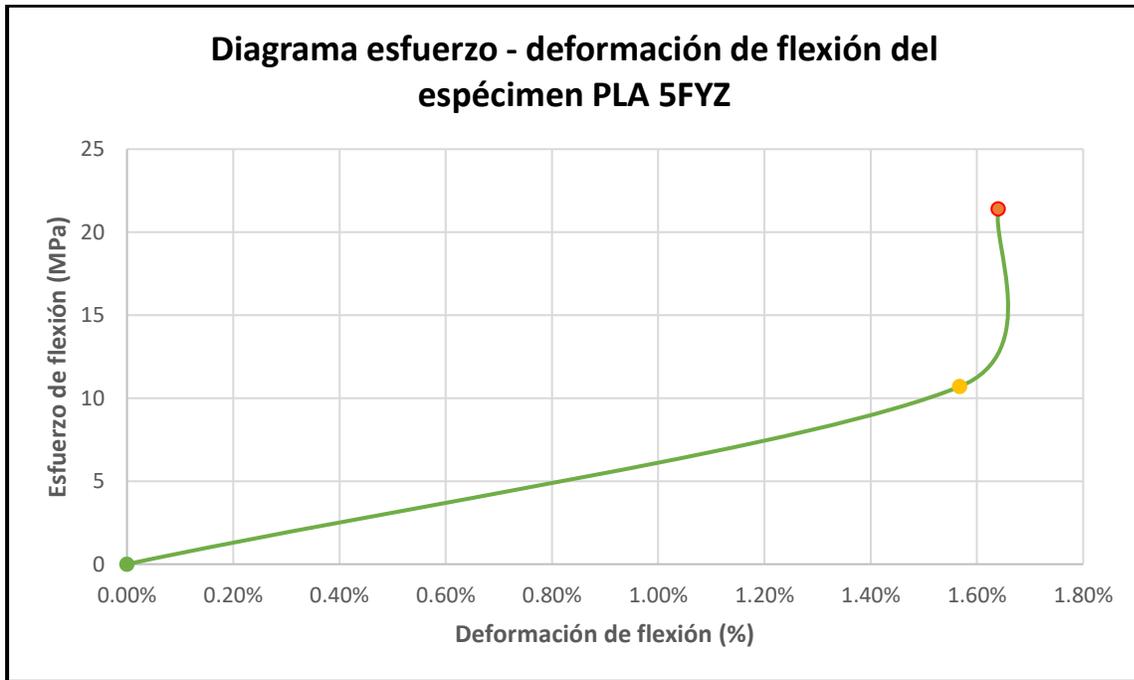


Figura 74 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PLA 5FYZ.

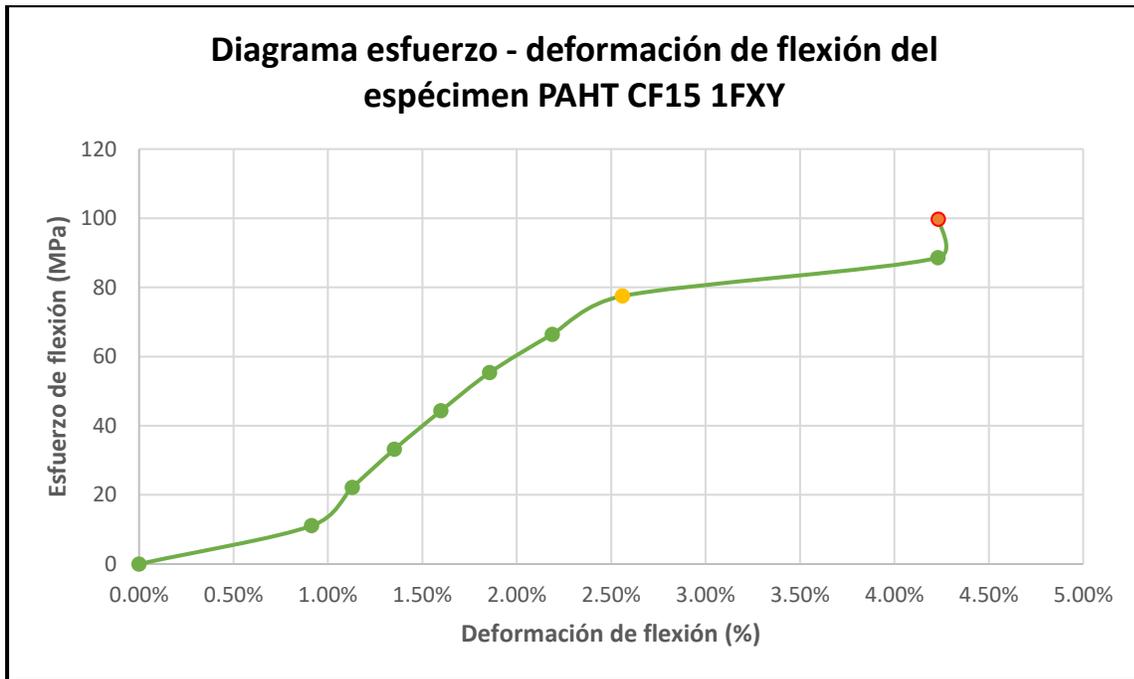


Figura 75 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 1FX Y.

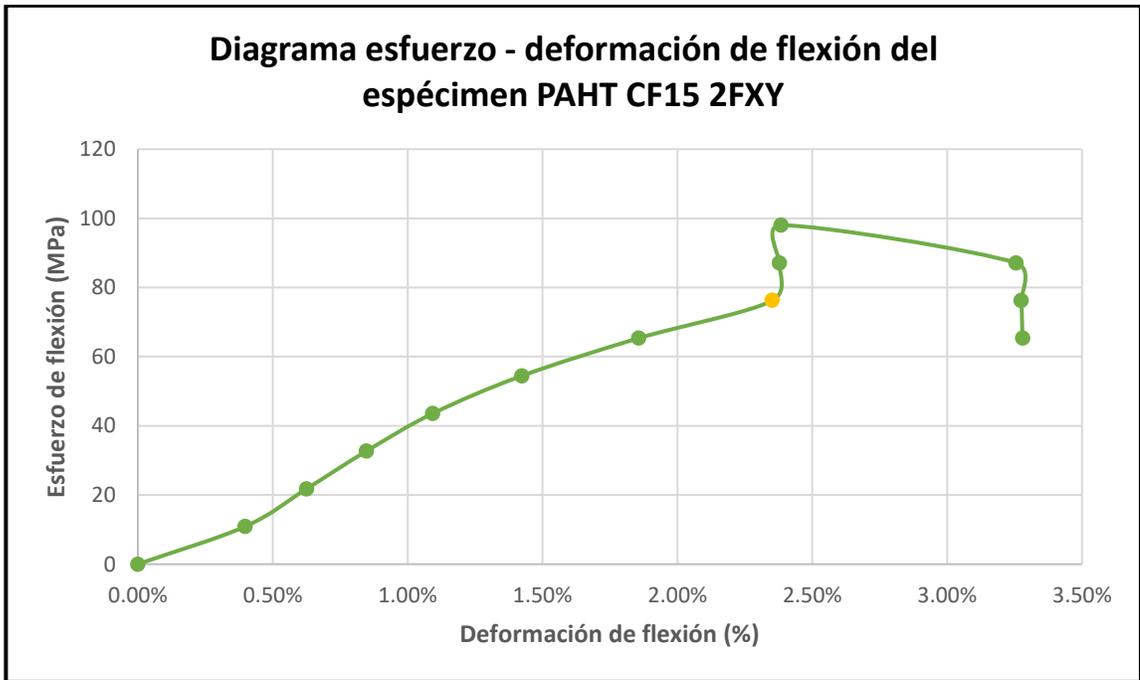


Figura 76 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 2FX Y.

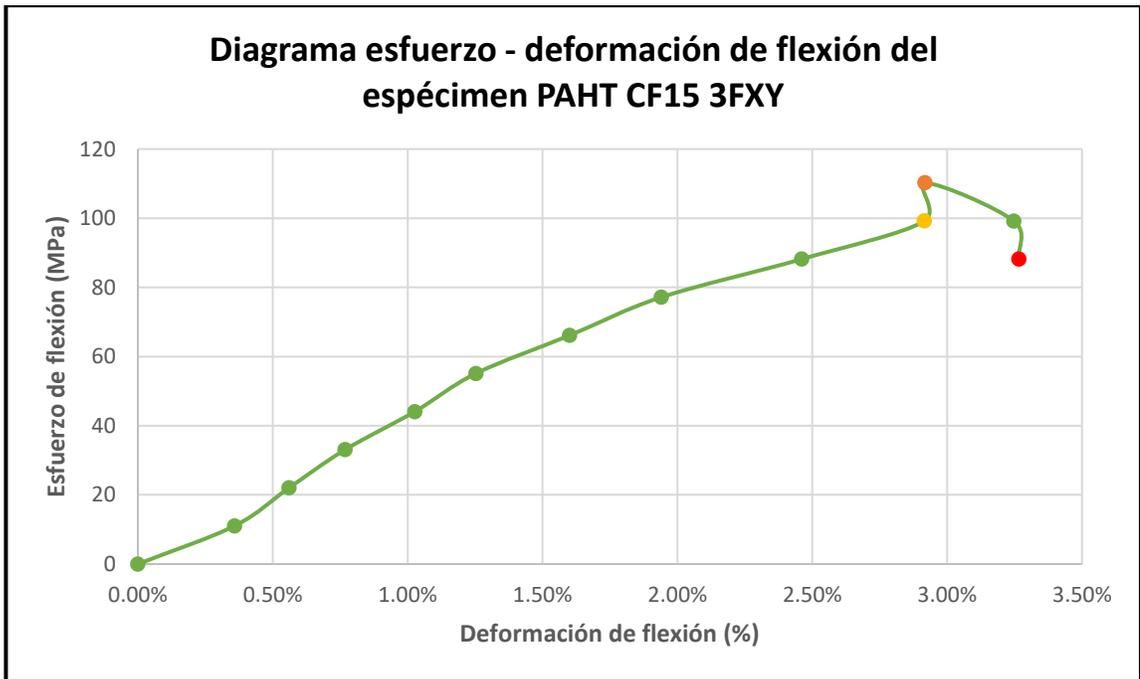


Figura 77 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 3FX Y.

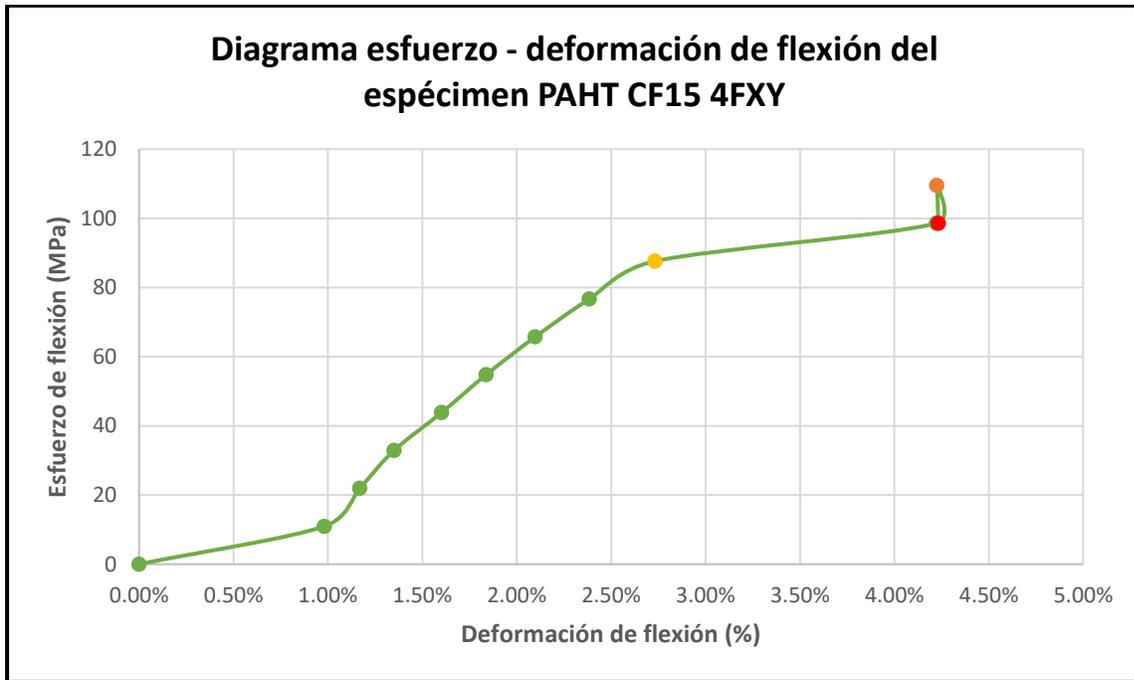


Figura 78 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 4FXY.

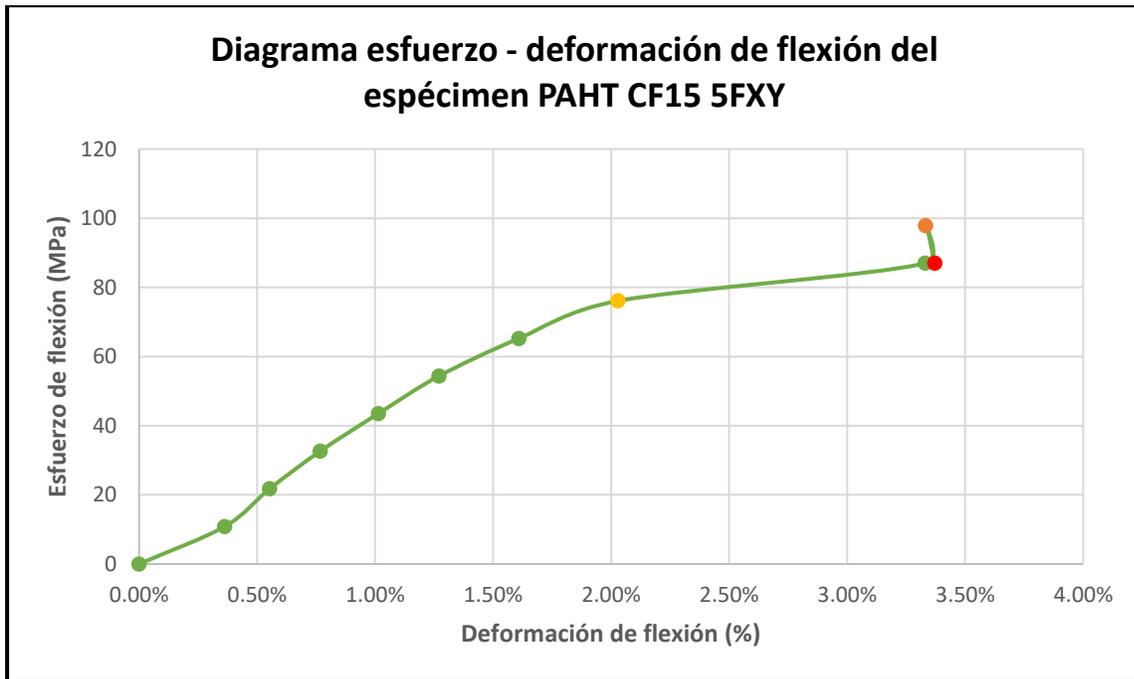


Figura 79 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 5FXY.

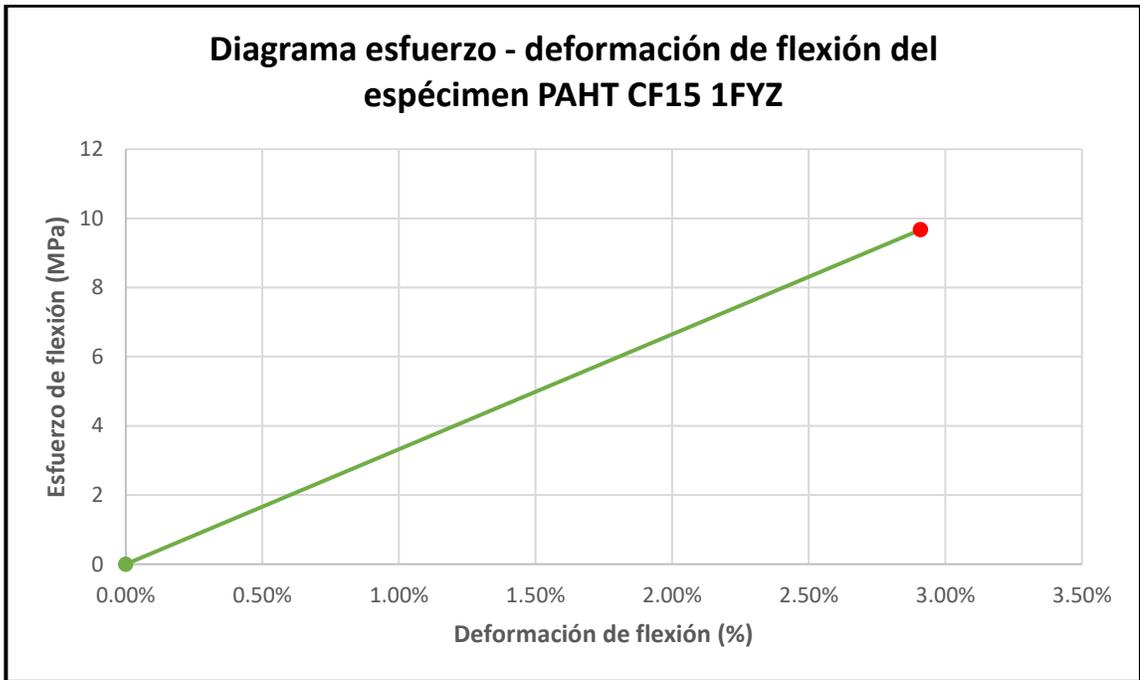


Figura 80 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 1FYZ.

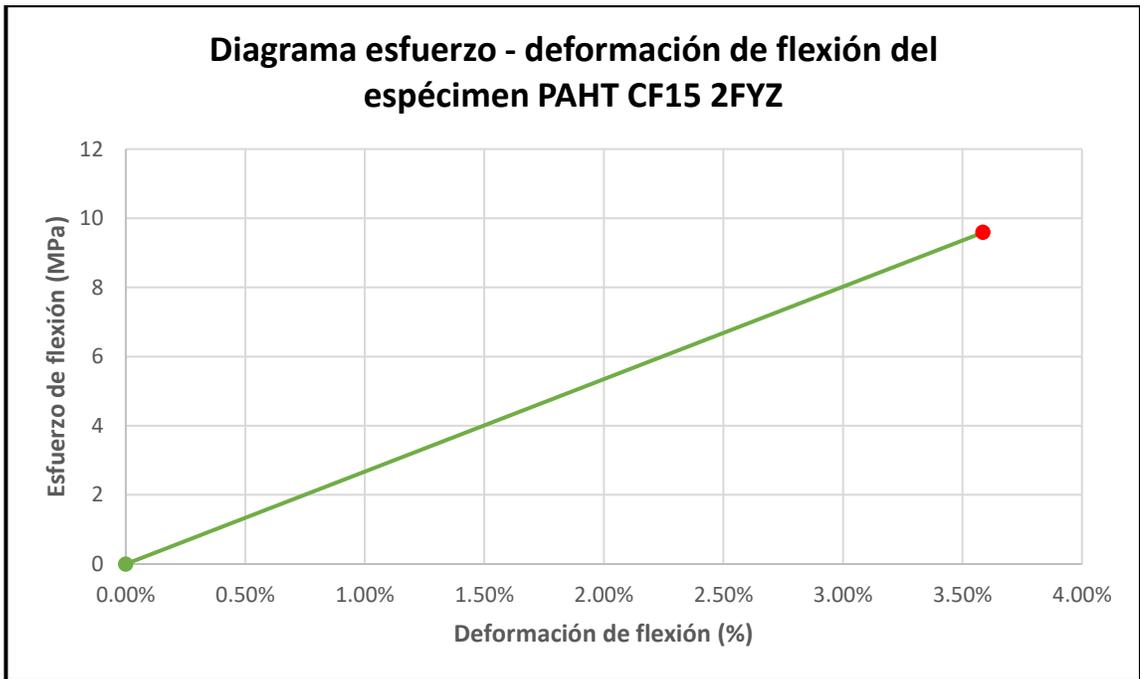


Figura 81 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 2FYZ.

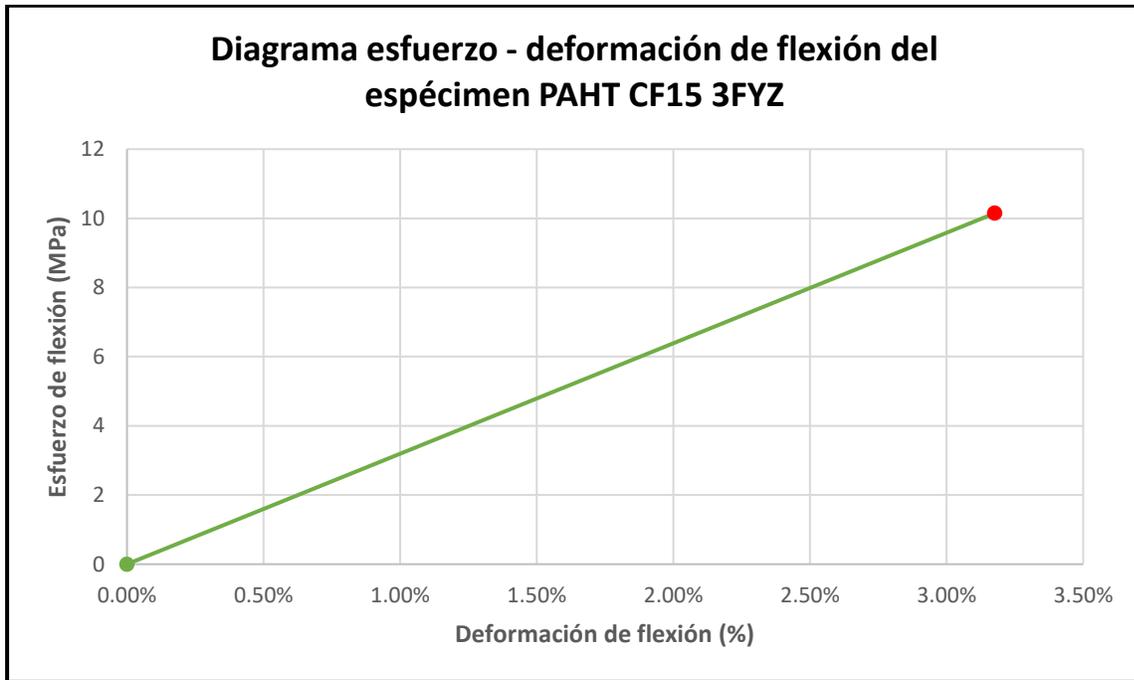


Figura 82 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 3FYZ.

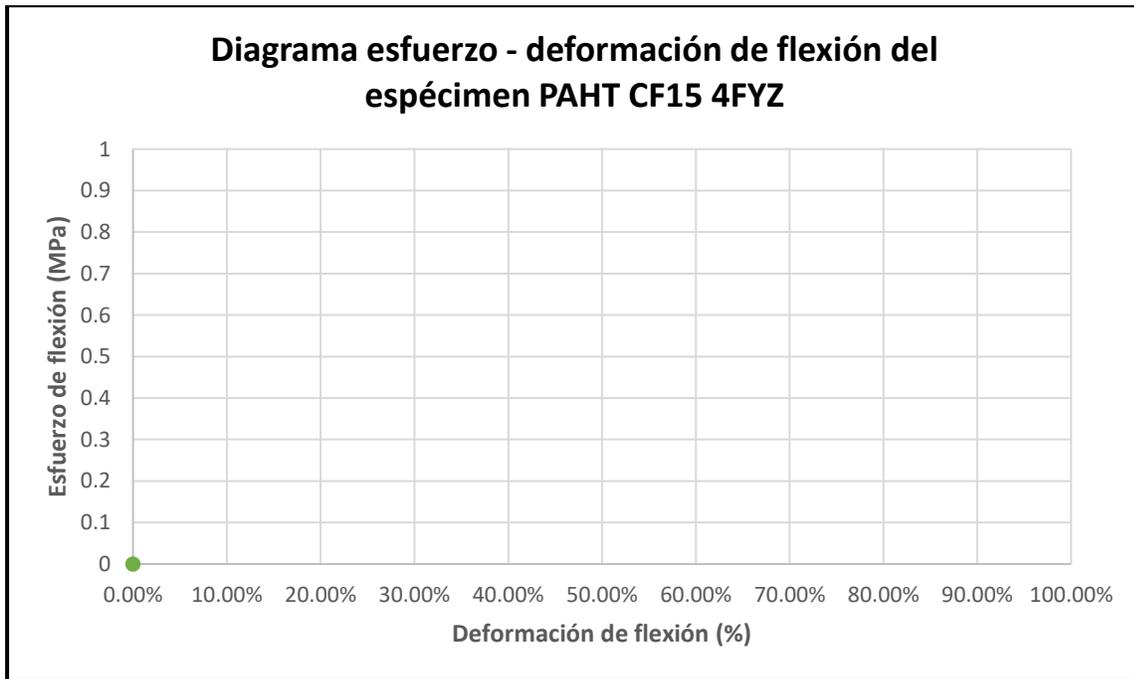


Figura 83 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 4FYZ.

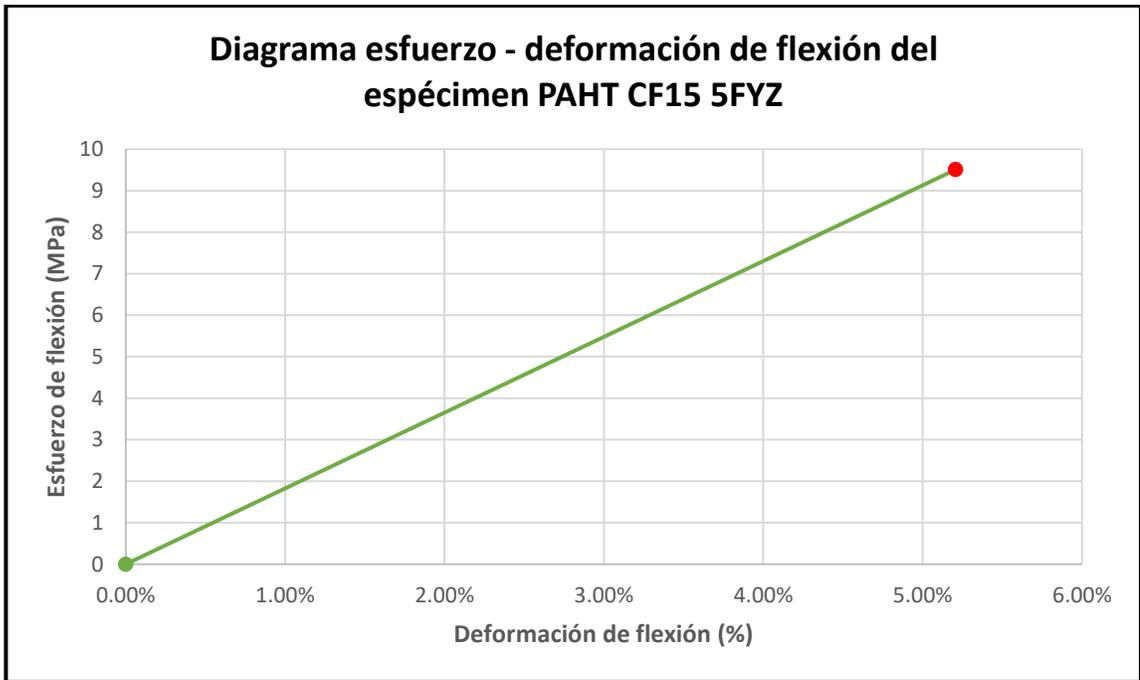


Figura 84 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 5FYZ.

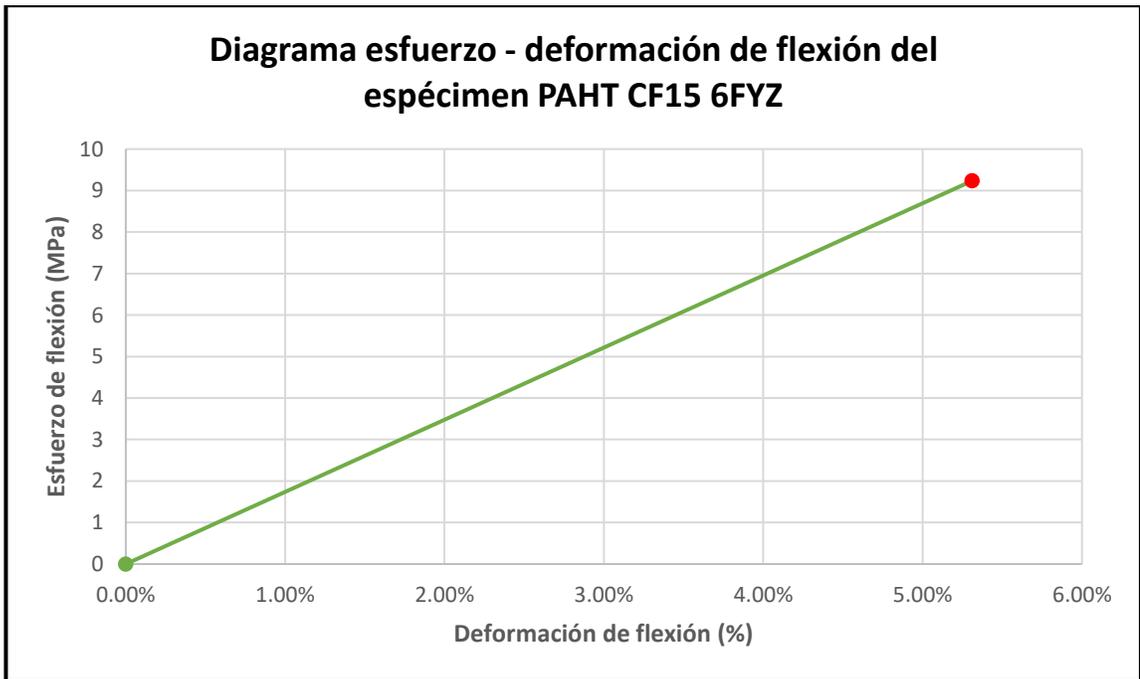


Figura 85 Diagrama esfuerzo - deformación de flexión del espécimen PAHT CF15 6FYZ.

Con la identificación de los puntos críticos en las gráficas de esfuerzo – deformación y haciendo un uso conjunto de los datos en la Tabla 66 a la Tabla 87, se han recopilado los datos de los puntos críticos. El recopilatorio de datos de puntos críticos se muestra de la Tabla 88 a la Tabla 97.

Tabla 88 Ensayo de flexión: Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.25 | 10.3067 | 54.8676 | 2.7386 |
| 2FXY | 0.25 | 9.5548 | 54.7240 | 2.5388 |
| 3FXY | 0.30 | 13.6354 | 66.0786 | 3.6176 |
| 4FXY | 0.25 | 12.2518 | 54.5464 | 3.2655 |
| 5FXY | 0.25 | 10.0160 | 54.8290 | 2.6655 |
| 6FXY | 0.25 | 10.7078 | 55.0521 | 2.8419 |
| 1FYZ | 0.05 | 6.2061 | 10.7582 | 1.6598 |
| 2FYZ | 0.05 | 3.5392 | 10.8337 | 0.9455 |
| 3FYZ | 0.05 | 3.6996 | 10.8309 | 0.9883 |
| 4FYZ | 0.05 | 3.1782 | 10.7367 | 0.8513 |
| 5FYZ | 0.05 | 5.8351 | 10.6994 | 1.5677 |

Tabla 89 Ensayo de flexión: Puntos de fluencia de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.35 | 9.52 | 77.50 | 2.5600 |
| 2FXY | 0.35 | 8.71 | 76.23 | 2.3515 |
| 3FXY | 0.45 | 10.85 | 99.18 | 2.9157 |
| 4FXY | 0.40 | 10.11 | 87.61 | 2.7318 |
| 5FXY | 0.35 | 7.51 | 76.10 | 2.0299 |
| 1FYZ | 0.05 | 10.4371 | 9.6699 | 2.9096 |
| 2FYZ | 0.05 | 12.8533 | 9.5850 | 3.5858 |
| 3FYZ | 0.05 | 11.6201 | 10.1467 | 3.1766 |
| 4FYZ | Sin carga registrada | | | |
| 5FYZ | 0.05 | 18.59 | 9.51 | 5.2066 |
| 6FYZ | 0.05 | 18.62 | 9.23 | 5.3119 |

Tabla 90 Ensayo de flexión: Puntos máximos de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.35 | 18.6584 | 76.8147 | 4.9578 |
| 2FXY | 0.45 | 18.6083 | 98.5032 | 4.9445 |
| 3FXY | 0.45 | 17.6558 | 99.1179 | 4.6842 |
| 4FXY | 0.40 | 18.6484 | 87.2742 | 4.9704 |
| 5FXY | 0.45 | 17.6658 | 98.6921 | 4.7013 |
| 6FXY | 0.45 | 17.3450 | 99.0937 | 4.6035 |
| 1FYZ | 0.10 | 6.8979 | 21.5164 | 1.8448 |
| 2FYZ | 0.05 | 3.5392 | 10.8337 | 0.9455 |
| 3FYZ | 0.05 | 3.6996 | 10.8309 | 0.9883 |
| 4FYZ | 0.05 | 3.1782 | 10.7367 | 0.8513 |

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 5FYZ | 0.10 | 6.1058 | 21.3989 | 1.6405 |

Tabla 91 Ensayo de flexión: Puntos máximos de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.45 | 15.7508 | 99.6368 | 4.2334 |
| 2FXY | 0.45 | 8.8329 | 98.0132 | 2.3840 |
| 3FXY | 0.50 | 10.8582 | 110.2001 | 2.9184 |
| 4FXY | 0.50 | 15.6305 | 109.5167 | 4.2250 |
| 5FXY | 0.45 | 12.3320 | 97.8489 | 3.3334 |
| 1FYZ | 0.05 | 10.4371 | 9.6699 | 2.9096 |
| 2FYZ | 0.05 | 12.8533 | 9.5850 | 3.5858 |
| 3FYZ | 0.05 | 11.6201 | 10.1467 | 3.1766 |
| 4FYZ | Sin carga registrada | | | |
| 5FYZ | 0.05 | 18.5882 | 9.5059 | 5.2066 |
| 6FYZ | 0.05 | 18.6183 | 9.2346 | 5.3119 |

Tabla 92 Ensayo de flexión: Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2FXY | 0.40 | 18.6484 | 87.5584 | 4.9551 |
| 3FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 4FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 5FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 6FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 1FYZ | 0.10 | 6.8979 | 21.5164 | 1.8448 |
| 2FYZ | 0.05 | 3.5392 | 10.8337 | 0.9455 |
| 3FYZ | 0.05 | 3.6996 | 10.8309 | 0.9883 |
| 4FYZ | 0.05 | 3.1782 | 10.7367 | 0.8513 |
| 5FYZ | 0.10 | 6.1058 | 21.3989 | 1.6405 |

Tabla 93 Ensayo de flexión: Puntos de rotura de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|----------------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.45 | 15.7508 | 99.6368 | 4.2334 |
| 2FXY | 0.30 | 12.1515 | 65.3421 | 3.2797 |
| 3FXY | 0.40 | 12.1515 | 88.1600 | 3.2660 |
| 4FXY | 0.45 | 15.6606 | 98.5651 | 4.2332 |
| 5FXY | 0.40 | 12.4723 | 86.9768 | 3.3713 |
| 1FYZ | 0.05 | 10.4371 | 9.6699 | 2.9096 |
| 2FYZ | 0.05 | 12.8533 | 9.5850 | 3.5858 |
| 3FYZ | 0.05 | 11.6201 | 10.1467 | 3.1766 |
| 4FYZ | Sin carga registrada | | | |
| 5FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 6FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |

Tabla 94 Ensayo de flexión: Puntos límite del 5 % de deformación de los especímenes

fabricados en PLA.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | 0.35 | 18.6584 | 76.8147 | 4.9578 |
| 2FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 3FXY | 0.40 | 18.6383 | 88.1048 | 4.9449 |
| 4FXY | 0.40 | 18.6484 | 87.2742 | 4.9704 |
| 5FXY | 0.35 | 18.6584 | 76.7605 | 4.9654 |
| 6FXY | 0.40 | 18.6283 | 88.0833 | 4.9441 |
| 1FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 3FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 4FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 5FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |

Tabla 95 Ensayo de flexión: Puntos límite del 5 % de deformación de los especímenes

fabricados en PAHT CF15.

| Código | Carga (kN) | Desplazamiento (mm) | Esfuerzo (MPa) | Deformación (%) |
|--------|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| 1FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 3FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 4FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 5FXY | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 1FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 2FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 3FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 4FYZ | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 5FYZ | 0.05 | 18.5882 | 9.5059 | 5.2066 |
| 6FYZ | 0.05 | 18.6183 | 9.2346 | 5.3119 |

Tabla 96 Ensayo de flexión. Módulo tangente de elasticidad de los especímenes fabricados en

PLA.

| Código | Módulo tangente de elasticidad (GPa) |
|--------|--------------------------------------|
| 1FXY | 261.7267 |
| 2FXY | 266.49 |
| 3FXY | 249.08 |
| 4FXY | 265.23 |
| 5FXY | 224.30 |
| 6FXY | 241.76 |
| 1FYZ | 467.79 |
| 2FYZ | 92.94 |
| 3FYZ | 88.86 |
| 4FYZ | 101.11 |
| 5FYZ | 1171.69 |

Tabla 97 Ensayo de flexión. Módulo tangente de elasticidad de los especímenes fabricados en PAHT CF15.

| Código | Módulo tangente de elasticidad (GPa) |
|---------------|---|
| 1FXY | 423.04 |
| 2FXY | 386.63 |
| 3FXY | 447.15 |
| 4FXY | 474.57 |
| 5FXY | 461.03 |
| 1FYZ | 23.06 |
| 2FYZ | 18.37 |
| 3FYZ | 23.71 |
| 4FYZ | N/A |
| 5FYZ | 12.39 |
| 6FYZ | 11.25 |

Con los datos de los puntos críticos recopilados, se obtuvieron el promedio, la desviación estándar y el porcentaje de cambio de cada uno de los resultados solicitados por la norma ASTM D790. Como se ha mencionado anteriormente, los cálculos se realizaron utilizando Microsoft Excel y la fórmula contemplada en la norma para el cálculo de la desviación estándar de cada dato, que es la misma utilizada por el software mencionado.

Las funciones utilizadas en MS Excel son las siguientes:

- Promedio (Media aritmética): PROMEDIO()
- Desviación estándar: DESVEST.M()
- Porcentaje de cambio: $\frac{x_2 - x_1}{x_1}$

Los resultados de los ensayos para los especímenes fabricados en PLA en sus dos distintas direcciones de impresión se presentan en la Tabla 98 y la Tabla 99, mientras que los resultados para los especímenes fabricados en PAHT CF15 se presentan en la Tabla 100 y la Tabla 101.

Tabla 98 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes XY fabricados con PLA.

| Módulo tangente de elasticidad | | | |
|--|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Módulo tangente de elasticidad (GPa) | 251.43 | 16.4835 | -34.60% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.26 | 0.0204 | 416.67% |
| Desplazamiento (mm) | 11.0788 | 1.5555 | 146.65% |
| Esfuerzo (MPa) | 56.6829 | 4.6059 | 426.22% |
| Deformación (%) | 2.9447% | 0.0041 | 144.87% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.43 | 0.0418 | 507.14% |
| Desplazamiento (mm) | 18.0970 | 0.6044 | 286.35% |
| Esfuerzo (MPa) | 93.2493 | 9.2911 | 519.05% |
| Deformación (%) | 4.8103% | 0.0016 | 283.57% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.40 | N/A (Un dato) | 471.43% |
| Desplazamiento (mm) | 18.6484 | N/A (Un dato) | 298.12% |
| Esfuerzo (MPa) | 87.5584 | N/A (Un dato) | 481.27% |
| Deformación (%) | 4.9551% | N/A (Un dato) | 295.12% |
| Punto al límite de deformación del 5% | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.38 | 0.0274 | N/A |
| Desplazamiento (mm) | 4.6841 | 1.6934 | N/A |
| Esfuerzo (MPa) | 15.0633 | 5.8375 | N/A |
| Deformación (%) | 1.2541% | 0.0045 | N/A |

Tabla 99 Ensayo de flexión: Resultados de los especímenes YZ fabricados con PLA.

| Módulo tangente de elasticidad | | | |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Módulo tangente de elasticidad (GPa) | 384.48 | 468.8630 | 52.92% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |

| Punto de fluencia | | | |
|--|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.05 | 0.0000 | -80.65% |
| Desplazamiento (mm) | 4.4916 | 1.4146 | -59.46% |
| Esfuerzo (MPa) | 10.7718 | 0.0591 | -81.00% |
| Deformación (%) | 1.2025% | 0.0038 | -59.16% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.07 | 0.0274 | -83.53% |
| Desplazamiento (mm) | 4.6841 | 1.6934 | -74.12% |
| Esfuerzo (MPa) | 15.0633 | 5.8375 | -83.85% |
| Deformación (%) | 1.2541% | 0.0045 | -73.93% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.07 | 0.0274 | -82.50% |
| Desplazamiento (mm) | 4.6841 | 1.6934 | -74.88% |
| Esfuerzo (MPa) | 15.0633 | 5.8375 | -82.80% |
| Deformación (%) | 1.2541% | 0.0045 | -74.69% |
| Punto al límite de deformación del 5% | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | N/A | N/A | N/A |
| Desplazamiento (mm) | N/A | N/A | N/A |
| Esfuerzo (MPa) | N/A | N/A | N/A |
| Deformación (%) | N/A | N/A | N/A |

Tabla 100 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes XY fabricados con PAHT CF15.

| Módulo tangente de elasticidad | | | |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Módulo tangente de elasticidad (GPa) | 438.48 | 34.6870 | 2369.45% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.38 | 0.0447 | 660.00% |
| Desplazamiento (mm) | 9.3402 | 1.2884 | -35.24% |
| Esfuerzo (MPa) | 83.3252 | 10.0771 | 765.41% |
| Deformación (%) | 2.5178% | 0.0034 | -37.65% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |

| Punto máximo | | | |
|--|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.47 | 0.0274 | 840.00% |
| Desplazamiento (mm) | 12.6809 | 3.0156 | -12.08% |
| Esfuerzo (MPa) | 103.0431 | 6.2652 | 970.20% |
| Deformación (%) | 3.4189% | 0.0081 | -15.34% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | 0.40 | 0.0612 | 700.00% |
| Desplazamiento (mm) | 13.6373 | 1.8930 | 17.19% |
| Esfuerzo (MPa) | 87.7362 | 13.7944 | 795.22% |
| Deformación (%) | 3.6767% | 0.0051 | 14.04% |
| Punto al límite de deformación del 5% | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes YZ |
| Carga (kN) | N/A | N/A | N/A |
| Desplazamiento (mm) | N/A | N/A | N/A |
| Esfuerzo (MPa) | N/A | N/A | N/A |
| Deformación (%) | N/A | N/A | N/A |

Tabla 101 Ensayo de flexión. Resultados de los especímenes YZ fabricados con PAHT CF15.

| Módulo tangente de elasticidad | | | |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Módulo tangente de elasticidad (GPa) | 17.76 | 5.8092 | -95.95% |
| Punto de fluencia | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.05 | 0.0000 | -86.84% |
| Desplazamiento (mm) | 14.4234 | 3.9101 | 54.42% |
| Esfuerzo (MPa) | 9.6284 | 0.3325 | -88.44% |
| Deformación (%) | 4.0381% | 0.0114 | 60.38% |
| Punto máximo | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.05 | 0.0000 | -89.36% |
| Desplazamiento (mm) | 14.4234 | 3.9101 | 13.74% |
| Esfuerzo (MPa) | 9.6284 | 0.3325 | -90.66% |
| Deformación (%) | 4.0381% | 0.0114 | 18.11% |
| Punto de rotura | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |

| Punto de rotura | | | |
|--|-----------------|----------------------------|---|
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.05 | 0.0000 | -87.50% |
| Desplazamiento (mm) | 11.6368 | 1.2082 | -14.67% |
| Esfuerzo (MPa) | 9.8005 | 0.3028 | -88.83% |
| Deformación (%) | 3.2240% | 0.0034 | -12.31% |
| Punto al límite de deformación del 5% | | | |
| Concepto | Promedio | Desviación estándar | Porcentaje de cambio relativo a los especímenes XY |
| Carga (kN) | 0.05 | 0.0000 | N/A |
| Desplazamiento (mm) | 18.6033 | 0.0213 | N/A |
| Esfuerzo (MPa) | 9.3702 | 0.1918 | N/A |
| Deformación (%) | 5.2593% | 0.0007 | N/A |

3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el apartado anterior. Se analizaron las diferencias en las propiedades de los materiales al variar la dirección de la capa de impresión, la cual ha sido evidenciada a través de las gráficas obtenidas a partir de los resultados de los ensayos.

3.3.1. Ensayos de tracción

En este apartado se compararon los resultados del ensayo de tracción de los especímenes YZ relativos a, o tomando como referencia los resultados de los especímenes XY. De acuerdo a la orientación de las capas, la dirección en que actúa la carga y las complicaciones al imprimir, puede suponerse que los especímenes XY presentarían las mayores propiedades del material y resulta interesante comparar las cantidades menores de los especímenes YZ con las mayores de los XY.

3.3.1.1. PLA

En primer lugar, el módulo de elasticidad de los especímenes YZ disminuyó en un 34.80 %, lo cual indica que la rigidez del material ha disminuido en al menos una pequeña proporción, volviendo al PLA un material con mayor deformación

para el mismo nivel de esfuerzo que cuando se imprime con la dirección de capa YZ.

Como curiosidad, a pesar de ser los especímenes YZ un poco más dúctiles que los XY, la fractura de los especímenes YZ es totalmente limpia tal como se visualiza en la Figura 86, contrastando con las XY en donde la fractura fue hasta cierto punto progresiva. Esto puede deberse a que la mayor ductilidad de los especímenes YZ estaría asociada a la suma de la ductilidad de cada soldadura entre las capas de impresión.

En el punto de fluencia es donde comienzan a verse las diferencias en las propiedades del material según la dirección de la capa de impresión. Principalmente en el valor del esfuerzo de fluencia, donde los especímenes YZ comenzaron a presentar pérdida de estabilidad dimensional (deformación plástica) a un esfuerzo un 48.45 % menor al de los especímenes XY.

En los puntos máximos y de ruptura, los valores obtenidos de los especímenes YZ presentan una disminución entre el 75 % y el 80 %, en comparación con los especímenes XY, debido al cambio de dirección de la capa de impresión y su consecuente aumento de número de capas de impresión y por lo tanto de puntos de soldadura, siendo estos puntos de soldadura entre capas, los puntos más débiles del material.

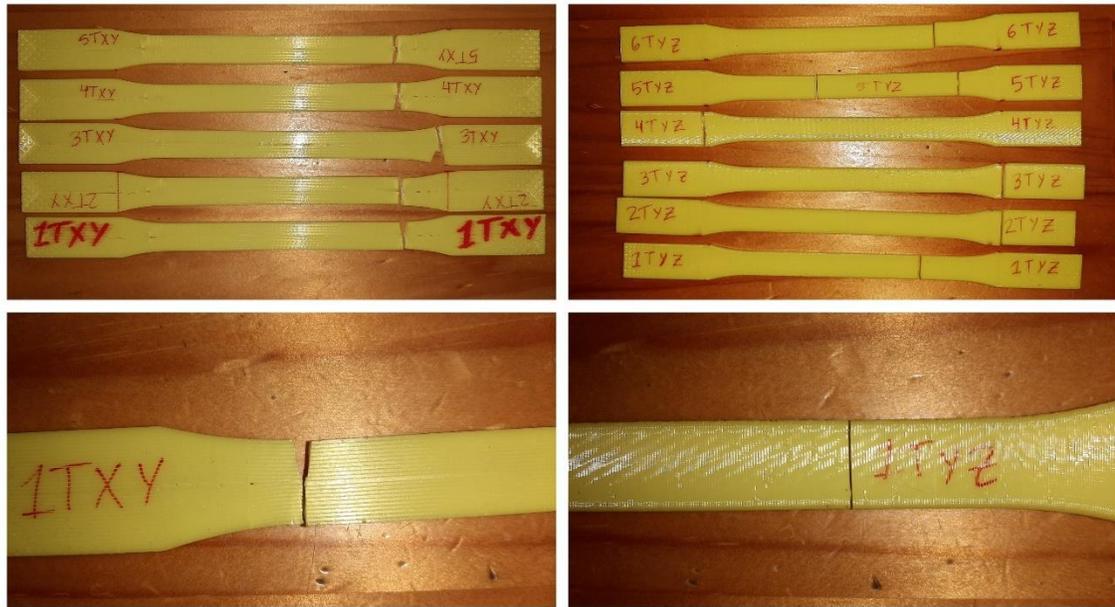


Figura 86 Comparación de las fracturas entre los especímenes YZ y XY fabricados en PLA.

En la Figura 87 se muestra un acercamiento del espécimen 5TXY, en el cual son más visibles las estrías ocasionadas por la deformación, evidencias del desgarre del material durante el ensayo. Aunque se aclara que estas estrías también aparecieron en los otros especímenes TXY de PLA, en mayor o menor medida.

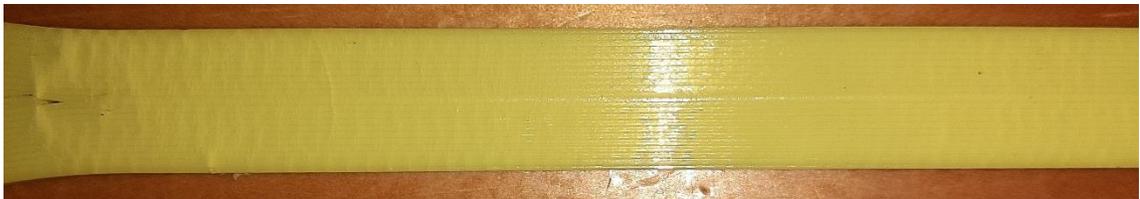


Figura 87 Estrías originadas por la deformación y presentes en los especímenes TXY de PLA.

Para los especímenes YZ, el tipo de fractura parece ser consecuencia directa de la “calidad” de la soldadura entre capas, siendo este punto de soldadura la parte menos resistente del material, como resultado a su vez de las diferencias de temperatura entre la pieza y la capa que se deposita sobre ella.

Cabe mencionar que esta disminución de la resistencia del material en los puntos de soldadura de las capas, en conjunto con el sistema de cierre instantáneo de las mordazas de la máquina de ensayos, son las causantes de que el espécimen 2TYZ se haya fracturado durante el acople a la máquina.

Casos como éste, pueden solucionarse al disminuir el intervalo de diferencia de temperatura de las capas, permitiendo que éstas se adhieran mejor, requiriendo una impresora de cabina cerrada para mantener la temperatura del ambiente mejor controlada y evitando que el material se enfríe demasiado rápido y se generen tensiones residuales.

Sin embargo, la mayoría de impresoras no están equipadas con una cámara cerrada, ya que contar con un aislamiento aumenta drásticamente el precio de la impresora y algunos tipos de cabina cerrada aún están protegidos por patentes. Para el presente estudio, los especímenes de PLA fueron impresos en una Creality Ender 3, la cual no es una impresora con cabina cerrada.

Mediante la realización de más estudios podría desarrollarse una tecnología que permitiese controlar la temperatura de la pieza, es decir de la capa sobre la cual se va a depositar otra, para de esta manera disminuir el gradiente de temperatura y mejorar la adhesión entre las capas. Además, puede optarse por disminuir la velocidad de impresión permitiendo que el inyector permanezca en contacto más tiempo con el material, aunque esto puede afectar la eficiencia con la que se producen piezas con esta tecnología.

Como dato curioso, aunque en realidad no soluciona la causa raíz del problema, se puede disminuir el efecto de las soldaduras de las capas de impresión aumentando la altura de capa y el grosor de la boquilla, lo que dará como resultado piezas más resistentes. Esto es debido a que, aumentando la altura de

capa y el grosor de la boquilla, se disminuye el número de capas y de líneas de impresión, disminuyendo por lo tanto también la cantidad de puntos de soldadura, los puntos más débiles de una pieza impresa por un impresor 3D FDM.

También deben considerarse otros fenómenos como los ocasionados por los errores del proceso de fabricación de impresión 3D de los que se hace mención en el apartado 2.5.3.

En la Figura 88 se muestra la fractura del espécimen 4TYZ en la que la fractura pudo haber sido iniciada por un agujero de una burbuja de vapor formada por la humedad del material al imprimir, ya que como se puede visualizar la fractura inició con la separación de una capa y posteriormente se extendió para separar varias fibras de material que a su vez se fragmentaron en las ubicaciones donde seguramente se encontraban más agujeros; confiriendo a la fractura de esa apariencia aserrada.

Para el caso de estos agujeros, se puede disminuir su aparición con tratamiento térmico de secado al material antes de imprimirlo, de modo que se disminuya lo más posible la humedad que haya absorbido el material.

También puede ser aconsejable el revisar la fecha de fabricación del material de impresión para saber si por el tiempo pudo haber estado expuesto al ambiente y a su vez controlar que los fabricantes usen un empaque correcto sellado al vacío (y que conserve ese vacío) que evite el contacto del material con el ambiente.



Figura 88 Fractura iniciada posiblemente por agujeros creados por burbujas de vapor en el material.

En el caso de los especímenes XY se encuentra el de la probeta 3XY que se muestra en la Figura 89, en la cual se puede observar como el punto de inicio de la fractura fue justamente en la ubicación de la costura de impresión, la cual es el lugar donde la boquilla sube al terminar una capa y comienza a depositar la siguiente, es en este movimiento de subir en que se deposita en forma de gota una pequeña cantidad de material debido a la presión en la boquilla y/o goteo.



Figura 89 Fractura en espécimen 3TXY originada por un defecto de impresión llamado costura.

Este defecto es característico de la impresión FDM y es virtualmente imposible eliminarlo por la naturaleza del proceso de fabricación, a menos hasta que se mejore la tecnología, por ello lo más aconsejable para reducir sus efectos sería

activar las retracciones en el cambio de capa para reducir el goteo o ubicar la costura en la pieza fuera de un lugar que soporte carga, cuando sea posible.

3.3.1.2. PAHT CF15

En los especímenes YZ el módulo de elasticidad disminuyó un 91.91 % en comparación con los XY, es decir que la presencia de un mayor número de puntos de soldadura (mayor número de capas) confirió al material una mayor ductilidad.

Sin embargo, cabe aclarar que este dato del módulo de elasticidad en los especímenes YZ puede estar influenciado por el hecho de que la mayoría de especímenes se fracturaron durante el acople con las mordazas y los últimos dos que, si se ensayaron, no mostraron los 3 puntos críticos en la curva de esfuerzo – deformación, sino que solamente mostraron uno al final de una curva similar a una recta con pendiente.

Esta es la razón por la cual los 3 puntos críticos en la tabla de resultados muestran exactamente los mismos datos, ya que, en el caso del punto de rotura, éste fue el último punto registrado en los únicos dos especímenes YZ que se ensayaron (5TYZ y 6TYZ).

Es importante destacar que el ensayar más especímenes YZ, no habría cambiado casi en nada los resultados a menos que se hubieran modificado las dimensiones de la probeta para que pudiera soportar más carga y así ser acoplada a la máquina sin fracturarse. Sin embargo, hubiese sido necesario modificar parámetros de fabricación y repetibilidad dentro de las bases establecidas del estudio. Siendo esto también algo aplicable a los especímenes fabricados en PLA.

Partiendo de esa idea, se pueden analizar con seguridad los datos en los puntos de rotura; en el cual, en los especímenes YZ se denota una clara diferenciación en la carga que pudieron soportar en comparación con los especímenes XY. Los YZ soportaron un 91.69 % menos de esfuerzo comparado con un 84.33 % menos de deformación en la rotura, por lo que, el decir que los especímenes YZ pueden ser más dúctiles que los XY en base al módulo de elasticidad, podría ser algo cuestionable.

En cuanto a las fracturas mostradas en la Figura 90, los especímenes YZ al igual que aquellos fabricados en PLA presentan una característica fractura aparentemente frágil en la cual la fractura ocurre en el punto de soldadura entre dos capas, provocando la separación completa de una capa de impresión.



Figura 90 Fracturas del ensayo de tensión de los especímenes fabricados con PAHT CF15.

La adhesión entre capas como ya se comentó para el caso del PLA, se corregiría solamente disminuyendo el intervalo de diferencia de temperatura entre la capa a depositar y la capa sobre la que se deposita.

Las fracturas de los especímenes XY por otros lados muestran un aspecto fibroso de una fractura dúctil por propagación de una cizalladura, aunque ese aspecto se debe más a la razón de que este es un material compuesto por fibras, al igual que la madera, y dichas fibras se van fracturando poco a poco a medida que se propaga la fractura.

Los casos de fracturas posiblemente ocasionadas por defectos del material se muestran en la Figura 91, en los cuales la fractura del espécimen 5TXY se encuentra en la ubicación de un exceso de material provocado seguramente por goteo en la boquilla, lo cual como se ha comentado solo es posible disminuir su probabilidad de aparición mediante la configuración de retracciones en la impresión u otras mejoras en el material o el proceso de fabricación.



Figura 91 Fracturas relacionadas con defectos en el material, en los especímenes de tensión fabricados con PAHT CF15.

Por otro lado, para los especímenes YZ se encuentran los casos 5TYZ y 6TYZ, los únicos 2 especímenes que se ensayaron completamente y cuyas fracturas se encuentran ubicadas sobre capas en las que es posible visualizar la presencia

de agujeros, provocados por la poca adhesión entre capas que presenta este material en los especímenes YZ.

3.3.2. Ensayo de flexión

3.3.2.1. PLA

Iniciando con los datos de la tabla de resultados, el módulo de elasticidad tangente de los especímenes YZ aumentó un 52.92 %, una vez más evidenciando un efecto anisotrópico en el cual aumenta la rigidez y fragilidad del material en comparación con los especímenes XY.

Sin embargo, se debe aclarar que, debido a la sensibilidad de la máquina de ensayos utilizada, para ninguno de los especímenes YZ se presentaron 3 puntos críticos diferenciados en las gráficas de esfuerzo – deformación. De hecho, en los casos 2FYZ, 3FYZ y 4FYZ los puntos de fluencia, máximo y rotura son uno solo.

Esto último, explica la gran desviación estándar presentada en el promedio calculado del módulo de elasticidad tangente y es también la explicación a que los datos del punto máximo y de fluencia sean exactamente los mismos en los especímenes YZ.

A pesar de ello la diferencia en la resistencia del material es significativa entre los especímenes YZ y XY, en donde los YZ presentaron como resistencia máxima un valor que es 83.85 % menor a la XY.

En relación a las fracturas, las cuales se muestran en la Figura 92, las de los especímenes YZ una vez más fueron producidas a través de la separación completa de una de sus capas, dejando una fractura similar a corte limpio, evidenciando la fragilidad del material al imprimirse de esa manera y la

anisotropía que se le induce. De hecho, al fracturarse las dos piezas resultantes salen despedidas a gran distancia de la máquina.

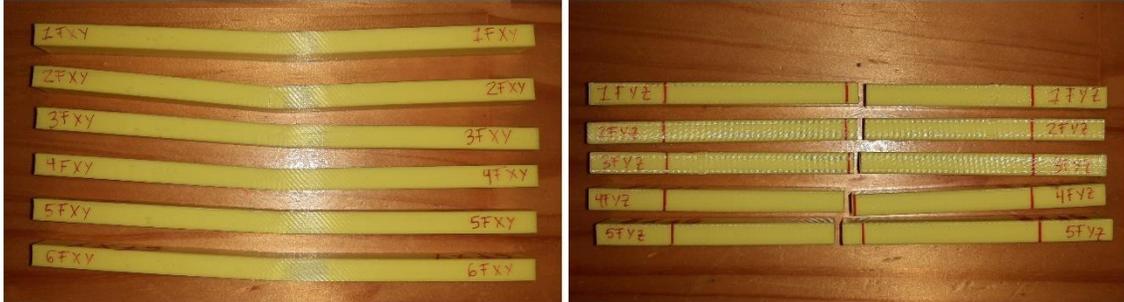


Figura 92 Fracturas de los especímenes de flexión fabricados en PLA.

En cambio, los especímenes XY como se ha mencionado anteriormente en el apartado 2.6.2, el primero de ellos fue ensayado a menor velocidad y el resto a la segunda velocidad establecida por la norma. Aun con el cambio de velocidad, el único espécimen en presentar una fractura fue el 2FXY con una apariencia de inicio de cizalladura o desgarro; el resto de los especímenes solo presentaron estrías opacas como efecto de la deformación.

Estos especímenes fabricados en PLA no presentaron ninguna fractura que visiblemente parezca estar relacionada con algún defecto en el material.

3.3.2.2. PAHT CF15

El módulo de elasticidad tangente de los especímenes YZ es muy bajo en comparación con el de los especímenes XY, un 95.95 % menos. Esta ductilidad queda evidenciada principalmente con los especímenes 5FYZ y 6FYZ, los cuales alcanzaron el límite del 5% de deformación con una carga bastante baja.

Una vez más debido a la carga tan baja y de manera similar a los especímenes de tensión YZ de PAHT CF15, la sensibilidad de la máquina a cargas bajas ha provocado que no se haya registrado los 3 puntos críticos diferenciados en la

gráfica de esfuerzo – deformación y es de nuevo la razón de que aparezcan los mismos datos para los puntos de fluencia y máximo. También que raramente la deformación del punto de rotura ocurra a una cantidad menor que la de los puntos de fluencia y máximo.

A pesar de estos inconvenientes, la diferencia entre la resistencia del material entre los especímenes XY y YZ es más que clara, rondado un 90 % menos de esfuerzo soportado por los especímenes YZ en comparación con los XY.

Tal como se muestra en la Figura 93, el patrón de fractura de los especímenes YZ se ha repetido nuevamente con una fractura que consiste en una separación de estilo de corte limpio entre las capas de impresión. A pesar de ser una fractura al estilo de un material frágil, la ductilidad de este material en los puntos de soldadura de las capas, sería proporcionado por el nylon, el cual es el componente base que mantiene unidas las fibras de carbono.



Figura 93 Fracturas de los especímenes de flexión fabricados con PATHC CF15.

La Figura 94 permite visualizar las fracturas de los especímenes XY, en las que se observa la apariencia de sierra. Además, en la imagen del centro es posible observar como la cizalladura se extendió desde la base del espécimen hasta el centro, donde se equilibran los esfuerzos de compresión y tensión, permitiendo que la fractura se extendiera hasta separar la capa de impresión.

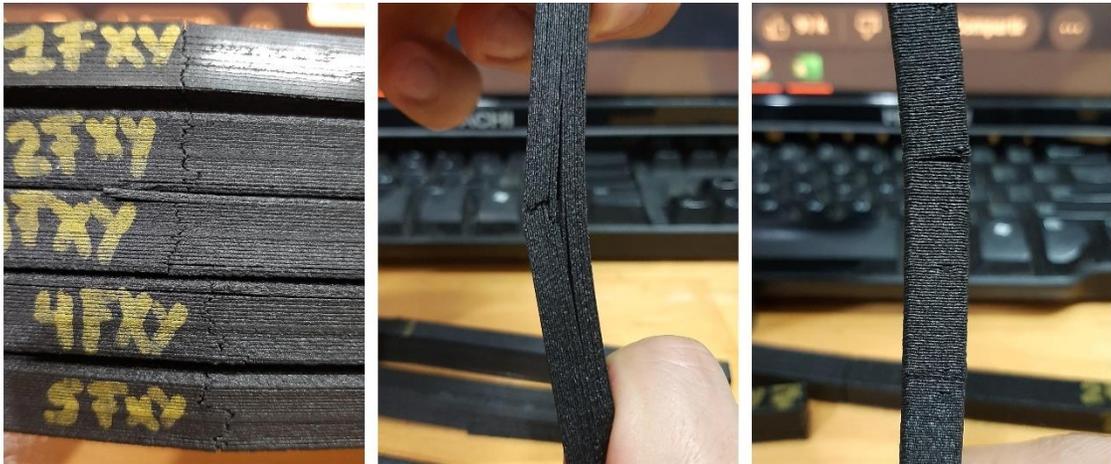


Figura 94 Acercamiento a las fracturas de los especímenes de flexión fabricados en PAHT CF15: A la izquierda las fracturas de todos los especímenes XY, al centro la vista lateral de una de esas fracturas y a la derecha la vista lateral de una fractura de un espécimen YZ.

Como curiosidad, este comportamiento de rasgadura y separación de capa, puede ser observado también en materiales como la madera, que, al ser un material compuesto por fibras de celulosa unidas con lignina, se comporta de manera similar al PAHT CF15 el cual está compuesto de fibras de carbono unidas con poliamida de alta temperatura.

En estos especímenes al igual que con los de PLA no se observan fracturas que hayan estado visiblemente relacionadas con algún defecto en el material.

CONCLUSIONES

- A través de la realización de ensayos de tracción y de flexión bajo los estándares de la ASTM, se estudió el efecto anisotrópico que tiene la dirección en la que se depositan las capas en la impresión 3D. El valor de la resistencia a la tensión obtenido mediante los ensayos realizados a los especímenes de PLA en el plano de impresión XY son bastante cercanos al valor esperado, reportado por Ultimaker (Ultimaker, 2017). En cambio, son mucho menores en el plano YZ
- En cuanto al efecto en el valor del módulo de elasticidad, en el caso de los ensayos de tracción, el cambio de dirección provocó que los especímenes YZ presentaran una disminución en el módulo de elasticidad del 34.80 % y del 91.91 % para el PLA y el PAHT CF15 respectivamente. La principal causa recae en la cantidad y orientación totalmente ortogonal de los filamentos respecto a la fuerza y en la cantidad de uniones.
- Esta orientación ortogonal de los filamentos en ambos materiales en los especímenes YZ hace que estos especímenes presenten fracturas de características frágiles al contrario de los XY, cuya orientación paralela a la fuerza, aumenta su resistencia reduciendo el alargamiento del espécimen a la vez que presentan una fractura de características dúctiles.
- Además, parece ser que los resultados obtenidos de los ensayos de tracción no son extrapolables cuando el material es sometido a esfuerzos de flexión ya que, al contrario de la tracción, para el PLA el módulo de elasticidad aumentó un 52.92 %, aumentando su rigidez y conservando el tipo de fractura. Para el PAHT CF15, sin embargo, si se aprecia una fractura de tipo frágil en conjunto con una disminución en el módulo de

elasticidad del 95.95 % similar a la disminución vista en los especímenes YZ de tracción.

- La diferencia de los resultados de los ensayos de tracción entre los especímenes XY y YZ se acentúan a partir del umbral de punto de fluencia del material, después del cual se vuelve muy notoria la diferencia entre los valores de los resultados de los puntos máximos y de rotura. Apreciándose valores en las propiedades que han disminuido por encima de un 75 % en los especímenes YZ de PLA con respecto a los XY y para el caso de los PAHT CF15 una disminución por encima del 84%.
- Esto no aplica para los casos de los ensayos de flexión en los cuales las diferencias entre las propiedades del PLA son notorias desde un inicio pudiendo alcanzar diferencia de alrededor del 83 % de disminución en los especímenes YZ de los XY, en los puntos de fluencia, máximos y de rotura. En el PAHT CF15 en cambio, hay una gran variabilidad en las diferencias de los resultados de los especímenes YZ con respecto a los XY, ya que presentan resultados en sus propiedades que pueden llegar a aumentar hasta alrededor de 60% o que pueden llegar a disminuir a alrededor de 89 %.
- Los especímenes YZ de PAHT CF15 en flexión, exhiben un valor similar de deformación en rotura al de los especímenes XY, pero con la cualidad de que dicha deformación ha sido alcanzada con un valor de esfuerzo un 88.83 % menor en los especímenes YZ en comparación con los XY.
- De manera general, en todos los casos analizados e independientemente del material, ha sido evidenciado que los especímenes XY presentan propiedades de material con valores mayores a los valores de los especímenes YZ y que por lo tanto para aplicaciones en las que se somete

a los materiales a resistencias exigentes, es más conveniente alinear cuando sea posible la dirección de la capa de impresión con la dirección de la carga que soportará el componente, para obtener el mejor desempeño del material.

- El proceso de fabricación de impresión 3D no es perfecto y los especímenes presentaron algunos defectos en el material que además son característicos de esta tecnología. Siendo el principal defecto en el caso del PAHT CF15, la presencia de goteos y excesos de material, lo cual puede solucionarse mediante una mejor configuración en el archivo de impresión, limpieza de las boquillas antes de imprimir.
- Para el caso del PLA el principal defecto fue la presencia de agujeros debido a explosiones de gases en el material que, por lo general es causado por la presencia de humedad en el material, aunque también puede deberse a un exceso de temperatura al imprimir, puede solucionarse realizando un secado al material en los casos que sea posible, pero es más importante el correcto almacenaje del material por parte del usuario y del fabricante.
- Es la presencia de puntos de soldadura entre las capas y entre las líneas de impresión, los que tiene un mayor efecto anisotrópico en las propiedades de los materiales impresos en 3D. En general, entre mas puntos de soldadura estén presentes en el material, mas se afectan las propiedades del mismo y a su vez los puntos de soldadura se ven afectados por la difusión atómica como producto del intercambio de calor y las temperaturas entre la pieza, el ambiente y la capa de material fundido que se deposita.

RECOMENDACIONES

Para toda aquella persona que desee llevar a cabo un estudio similar al realizado, es aconsejable tomar en consideración las siguientes recomendaciones:

- De las primeras cosas que se debe de hacer al iniciar el desarrollo del estudio, es investigar y seleccionar un proveedor del servicio de los ensayos que se desean realizar ya que de este factor dependen aspectos importantes como: la selección de los materiales que se deseen ensayar, las normas y proceso de ensayo a utilizar, complejidad de cálculos post – ensayos y el diseño mismo de los especímenes de prueba con dimensiones reguladas bajo normas.
- Al seleccionar los materiales que han de estudiarse, se debe asegurar que:
 - El material sea accesible y cuente con disponibilidad, ya que hay materiales especiales que no se distribuyen o al menos no de forma fácil, en el país.
 - El equipo de impresión 3D debe de ser capaz de imprimir el material, ya que para este estudio se utilizaron dos impresores ya que el PAHT CF15 al ser un material nuevo, era necesario un equipo especializado para utilizarlos.
 - El fabricante utilice métodos de almacenaje que eviten que el material se degrade por exposición al ambiente.
- Si la máquina de ensayos seleccionada tiene mordazas de cierre instantáneo o automático, y también dependiendo de la sensibilidad de la máquina, puede que llegue a ser necesario variar el ancho y el espesor de los especímenes para aumentar su resistencia y evitar que se fracturen

durante el acople con las mordazas o en otros casos, lograr que la sensibilidad de la maquina registre la carga aplicada.

- Para la impresión de los especímenes es recomendable realizar cuando sea posible los tratamientos en el material que sean necesarios para minimizar los errores o defectos en el material tras la impresión, tratamientos como el secado de las bobinas de filamento para la impresión 3D FDM.
- En el caso de la impresión 3D FDM, si la máquina tiene la cama de impresión expuesta al ambiente y si no es posible encapsular el impresor con una cámara, es recomendable que el impresor opere en una habitación que tenga condiciones ambientales que favorezcan resultados satisfactorios con el material con el que se esté trabajando.
- Una vez se haya terminado la impresión y postprocesos de los especímenes, éstos se deben de almacenar en un compartimiento que evite la climatización y absorción de humedad del ambiente hasta que se realicen los ensayos, como por ejemplo en un contenedor con gel de sílice, con la finalidad de evitar que los especímenes se climaticen con un ambiente diferente a la del laboratorio de ensayo.
- Para la realización de este estudio, al plantear la operacionalización de variables del estudio, se buscó que el patrón de relleno no fuera una variable más que pudiera afectar a los resultados del estudio. Para lograr esto tal cual se describe en el apartado 2.5, se utilizó el patrón concéntrico en todas las probetas y se configuró también que la densidad del relleno fuera del 100 % para que la capa de impresión ocupara todo el espacio interior de la probeta y también para que hubiera el máximo de área de soldadura entre las capas. Es necesario tener en cuenta que al estudiar

las propiedades de los materiales impresos en 3D, el patrón de relleno podrá jugar un factor determinante por lo que solo se recomienda utilizar uno diferente al descrito si es el propósito el estudiar el efecto de los patrones de relleno sobre el desempeño de los materiales impresos en 3D.

BIBLIOGRAFÍA

¿Cómo funciona una impresora 3D FDM? (s.f.). Obtenido de Capa sobre capa (CSC): <https://capasobrecapa.com/como-funciona-fdm/>

Aceromafe. (s.f.). *Qué es la poliamida y para qué sirve*. Obtenido de Aceromafe: <https://www.aceromafe.com/poliamida-usos-propiedades/>

American Society for Testing and Materials o ASTM International. (2003). *ASTM D5947 - 03: Metodos estandar de ensayo para dimensiones fisicas de especimenes solidos de plastico*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials o ASTM International. (2013). *ASTM D618 - 13: Prácticas estandar para acondicionamiento de plasticos para ensayos*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials o ASTM International. (2015). *ASTM D638-10: Método de prueba estándar para determinar las propiedades de tracción de los plásticos*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials o ASTM International. (2017). *ASTM D790-17: Métodos de prueba estándar para determinar las propiedades de resistencia a la flexión de los plásticos reforzados y no reforzados y los materiales de aislamiento eléctrico*. ASTM International.

Arias Gonzáles, J. L. (2021). *Guía para elaborar la operacionalización de variables*. Arequipa: Espacio I+D: Innovación más desarrollo.

Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *Ciencia e ingeniería de los materiales, Sexta Edición*. México D.F.: Cengage Learning Editores S.A.

Bauce, G. J., Córdova, M. A., & Avila, A. V. (2018). *Operacionalización de variables*. Caracas: Instituto Nacional de Higiene “Rafael Rangel”.

BCN3D. (s.f.). *BCN3D Filamentos*. Obtenido de BCN3D: <https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-filamentos/>

BCN3D. (s.f.). *Filaments Technical Data Sheet PLA*. Barcelona: BCN3D.

BCN3D. (s.f.). *PAHT CF15*. Obtenido de BCN3D: <https://www.bcn3d.com/es/producto/paht-cf15-bcn3d-filamentos/>

Betancur López, S. I. (s.f.). *Operacionalización de Variables*. Manizales: Universidad de Caldas.

C., L. (23 de Julio de 2019). *¿Qué tan «ecológico» es realmente el filamento PLA?* Obtenido de 3D Natives: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!>

Callister Jr., W. D. (s.f.). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté S.A.

Castrocomposites. (s.f.). *Propiedades principales de la fibra de carbono*. Obtenido de Castro composites: <https://castrocomposites.com/informacion-tecnica/propiedades-principales-de-la-fibra-de-carbono/>

Espinoza Freire, E. E. (02 de Septiembre de 2019). *Las variables y su operacionalización en la investigación educativa. Segunda parte*. Obtenido de Scielo: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442019000400171

Gómez, J. L. (8 de Marzo de 2023). *Qué es la fibra de carbono, ese material que por sí solo no vale para nada y que con resina lo vale todo*. Obtenido de Diariomotor: <https://www.diariomotor.com/que-es/tecnologia/fibra-de-carbono/>

Infinitia. (23 de Febrero de 2021). *Ensayo de flexión en materiales ¿Cuándo se realizan?* Obtenido de Infinitia: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-de-flexion-en-materiales-cuando-se-realizan/>

International Organization for Standardization (ISO). (2003). *ISO 178: Plásticos - Determinación de las propiedades de flexión*. International Organization for Standardization (ISO).

International Organization for Standardization (ISO). (2012). *ISO 527: Plásticos - Determinación de las propiedades tensiles*. International Organization for Standardization (ISO).

Jhair, J. (s.f.). *Ventajas, desventajas y características fibra de carbono 7 las ventajas, desventajas y características kevlar*. Obtenido de Issuu: https://issuu.com/jaiderrhair/docs/materiales_sinteticos_2/s/11297936

López, J. C. (30 de Junio de 2019). *Fibra de carbono: qué es y por qué es tan atractiva para la electrónica de consumo como para la aeronáutica o la automoción*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/investigacion/fibra-carbono-que-que-atractiva-para-electronica-consumo-como-para-aeronautica-automocion>

Pechter, D. (23 de Diciembre de 2018). *History of 3D Printing – Who Invented the 3D Printer?* Obtenido de All3DP: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-who-invented-the-3d-printer/>

Pixel sistemas. (s.f.). *Tecnología FDM*. Obtenido de Pixel sistemas: <https://www.pixelsistemas.com/fabricacion-aditiva-impresion-3d/tecnologia-fdm>

PLA. (s.f.). Obtenido de EIS.UVA.ES: <http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/pla.htm>

Plásticos ASCASO. (s.f.). *Poliamida: Qué es y características*. Obtenido de Plásticos ASCASO: <https://plasticosascaso.es/que-es-la-poliamida/>

Plastigen. (s.f.). *Poliamida*. Obtenido de Plastigen: <https://plastigen.cl/poliamida/#:~:text=Una%20Poliamida%20es%20un%20termopl%C3%A1stico,y%20para%20el%20mantenimiento%20industrial.>

Prime biopolymers. (30 de Junio de 2022). *Plástico PLA: qué es y para qué se utiliza este material*. Obtenido de Prime biopolymers: <https://primebiopol.com/plastico-pla-que-es-y-para-que-se-utiliza/>

Quintana Pumachoque, S. (s.f.). *La Operacionalización de variables; “CLAVE” para armar una Tesis Parte 1*. Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín.

Sculpteo. (s.f.). *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today*. Obtenido de Sculpteo: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>

Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson educación.

Sicnova. (19 de Julio de 2022). *¿Cómo funciona una impresora 3D FMD?* Obtenido de Sicnova: <https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/como-funciona-una-impresora-3d-fdm/>

SINTAC. (12 de Mayo de 2022). *¿Qué es la poliamida?* Obtenido de SINTAC: <https://sintac.es/que-es-la-poliamida/>

Ultimaker. (2017). *Technical Data Sheet PLA*. Ultimaker.

Vasquez, J. (26 de Abril de 2018). *Historia de la impresión 3D*. Obtenido de Impresión 3D: <https://sites.google.com/site/impresion3dticjorge/historia-de-la-impresion-3d>

Wikipedia. (27 de Diciembre de 2021). *Poliamida*. Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Poliamida>

Wikipedia. (9 de Enero de 2022). *Alain Le Mehaute*. Obtenido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Alain_Le_Mehaute

Wikipedia. (22 de Diciembre de 2022). *ASTM*. Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/ASTM>

Wikipedia. (27 de Abril de 2022). *Ensayo de materiales*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_materiales#Seg%C3%BAAn_la_rigurosidad_del_ensayo

Wikipedia. (6 de Febrero de 2023). *Ácido poliláctico*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_polil%C3%A1ctico

Wikipedia. (24 de Enero de 2023). *Fibra de carbono*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono

Wikipedia. (27 de Febrero de 2023). *Organización Internacional de Normalización*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Organizaci%C3%B3n_Internacional_de_Normalizaci%C3%B3n