



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE TERMOPLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

TOMÁS VLADO VUKASOVIĆ HERRERO

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
DIEGO JAVIER CELENTANO
JUAN FRANCISCO VIVANCO

Santiago de Chile, Noviembre, 2018

© 2018, Tomás Vukasović

A Dios, mis padres y profesores, que
me apoyaron en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
1. Introducción y objetivos.....	1
1.2. Hipótesis	4
1.3. Objetivo general	4
1.4. Objetivos específicos.....	5
1.5. Metodología.....	5
2. Antecedentes	6
2.1. Tipos de impresión 3D	6
2.2. Materiales de impresión: ABS y PLA	18
2.3. Teoría de los ensayos cuasi estáticos aplicados a probetas impresas	19
2.4. Normas para ensayos de tracción, compresión y flexión aplicadas a MA	24
2.5. Trabajos previos	28
2.5.1. Tracción.....	29
2.5.2. Compresión	39
2.5.3. Flexión	42
2.5.4. Modelamiento	42

3.	Desarrollo experimental	45
3.1.	Impresora y materiales	45
3.2.	Pruebas mecánicas.....	45
3.3.	Modelado, fabricación y ensayo.....	48
3.4.	Resultados	53
3.4.1.	Tracción.....	54
3.4.2.	Compresión	65
3.4.3.	Flexión	74
4.	Modelamiento	80
4.1.	Modelo constitutivo.....	80
4.2.	Solución analítica del ensayo de flexión	83
4.3.	Implementación computacional.....	86
5.	Validación experimental	88
5.1.	Solución analítica	88
5.2.	Solución numérica.....	91
6.	Conclusiones	95
6.1.	Conclusiones	95
6.2.	Trabajos futuros.....	96
7.	Bibliografía	98
8.	Anexos	105
8.1.	Anexo A. Variación porcentaje de relleno en probetas de ABS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de impresión 3D por SLA (recuperado de www.additively.com). ..8	8
Figura 2.2: Esquema de impresión 3D por SGC (“Manufacturing Guide recuperado de www.manufacturingguide.com).....9	9
Figura 2.3: Esquema de impresión 3D por PJ (recuperado de www.additively.com).10	10
Figura 2.4: Esquema de impresión 3D por laminado (recuperado de www.manufacturingguide.com).....12	12
Figura 2.5: Esquema de impresión 3D por FDM (recuperado de www.additively.com).13	13
Figura 2.6: Esquema de impresión 3D por SLS (recuperado de www.additively.com). .15	15
Figura 2.7: Esquema de impresión 3D por BJ (recuperada de www.additively.com).16	16
Figura 2.8: Esquema de impresión 3D por sinterizado por haz de electrones (www.additively.com).....17	17
Figura 2.9: Curva de esfuerzo-deformación típica obtenida de un ensayo de tracción (Kalpakjian & Schmid, 2002).21	21
Figura 2.10: Esquema del ensayo de flexión de 3 (izquierda) y 4 (derecha) puntos (Soranakom & Mobasher, 2007).....23	23
Figura 2.11: Especímenes para ensayo de tracción según la norma ISO 527 (Grellmann & Seidler, 2013).26	26
Figura 2.12: Orientaciones de las probetas utilizadas por Bertoldi et al. (1998).29	29
Figura 2.13: Probetas de tracción con 0°, θ° y 90° según norma ASTM D3039 (Rodríguez et al., 2001).....30	30
Figura 2.14: Espécimen con 76 mm de radio (a) y con 244 mm de radio (b) (Croccolo et al., 2013).32	32
Figura 2.15: Orientaciones de las probetas: borde arriba (a), frente (b) y vertical (c) (Khuong et al., 2014).33	33
Figura 2.16: Espécimen modificado utilizado por Lanzotti et al. (2015) (dimensiones en mm).34	34

Figura 2.17: Patrones de relleno: cuadriculado (A), hexagonal (B), lineal (C), y densidades: 20% (D), 50% (E) y 100% (F) utilizados por Fernandez-Vicente et al. (2016).	35
Figura 2.18: Orientaciones utilizadas por Hernandez et al. (2016).	35
Figura 2.19: Dimensiones del espécimen utilizado por Torres et al. (2016).	36
Figura 2.20: Orientaciones utilizadas por Zou et al. (2016).	37
Figura 2.21: Orientaciones utilizadas por Cantrell et al. (2017).	38
Figura 2.22: Orientaciones utilizadas por Chacón et al. (2017).	39
Figura 2.23: Orientación de impresión de los especímenes de compresión: horizontal (izquierda) y vertical (derecha) utilizados por Ahn et al. (2002).	40
Figura 2.24: Orientación de las probetas utilizadas por Guessasma et al. (2016).	41
Figura 2.25: Imágenes de mesoestructura utilizadas por Rodríguez et al. (2003).	43
Figura 2.26: Malla realizada por Rodríguez et al. (2003).	43
Figura 2.27: Componente estudiado por Domingo-Espin et al. (2015).	44
Figura 3.1: Máquina de ensayos universal marca Test Resources utilizada en este estudio.	46
Figura 3.2: Mordazas para ensayo de tracción, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).	47
Figura 3.3: Platos para ensayo de compresión, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).	47
Figura 3.4: Apoyos para ensayo de flexión de cuatro puntos, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).	48
Figura 3.5: Dimensiones (en mm) de las probetas de tracción (a), compresión (b) y flexión (c).	49
Figura 3.6: Representación gráfica de probetas de ensayo a tracción impresas en orientación horizontal (H) y vertical (V).	50
Figura 3.7: Probetas de PLA para ensayos de tracción, compresión y flexión impresas en 2 orientaciones.	52
Figura 3.8: Esquema de los apoyos del ensayo de flexión (dimensiones en mm).	53

Figura 3.9: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de ABS a tracción.....	55
Figura 3.10: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de PLA a tracción.....	57
Figura 3.11: Curvas de tensión – deformación de probetas a tracción.	59
Figura 3.12: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a tracción.	60
Figura 3.13: Gráfico de los valores de la tensión de fluencia para probetas a tracción. ..	61
Figura 3.14: Gráfico de los valores de la tensión máxima para probetas a tracción.	62
Figura 3.15: Esquema de corte transversal de probetas de tracción construidas en orientación horizontal (izquierda) y vertical (derecha).	63
Figura 3.16: Probetas de PLA horizontales (izquierda) y verticales (derecha) después de la ruptura a tracción.	64
Figura 3.17: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de ABS a compresión.	66
Figura 3.18: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de PLA a compresión.	68
Figura 3.19: Curvas de tensión – deformación de probetas a compresión.....	70
Figura 3.20: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a compresión.	71
Figura 3.21: Gráfico de los valores de la tensión de fluencia para probetas a compresión.	71
Figura 3.22: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a compresión.	72
Figura 3.23: Esquema de corte transversal de probetas de compresión construidas en orientación horizontal (izquierda) y vertical (derecha).	73
Figura 3.24: Curvas de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión de ABS.....	74
Figura 3.25: Curvas de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión de PLA.	75
Figura 3.26: Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión.....	76
Figura 3.27: Gráfico de los valores de la relación de rigidez para probetas a flexión.	77
Figura 3.28: Probetas de ABS después de ser ensayadas a flexión.	78

Figura 3.29: Esquema de corte transversal de probetas de flexión construidas en orientación horizontal (arriba) y vertical (abajo).	79
Figura 4.1: Esquema de sección de material bimodular bajo fuerzas de flexión.	84
Figura 4.2. Diagrama de flujo implementación modelo constitutivo.....	87
Figura 5.1. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS horizontal.....	88
Figura 5.2. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS vertical.	89
Figura 5.3. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA horizontal.	90
Figura 5.4. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA vertical.	91
Figura 5.5. Curva experimental, analítica y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS horizontal.....	92
Figura 5.6. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS vertical.	93
Figura 5.7. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA horizontal.	93
Figura 5.8. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA vertical.	94
Figura 7.1. Dimensiones estándar de probetas de tracción tipo I a) y compresión b). Dimensiones en mm.	106
Figura 7.2. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a tracción.....	108
Figura 7.3. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar de la resistencia máxima para probetas a tracción.	109
Figura 7.4. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a compresión.	111

Figura 7.5. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a compresión.....	112
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros de fabricación utilizados para cada impresora.	51
Tabla 3.2: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción de ABS.	56
Tabla 3.3: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción de PLA.....	58
Tabla 3.4: Resultados promedio del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción.	59
Tabla 3.5: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión de ABS.	67
Tabla 3.6: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión de PLA.....	69
Tabla 3.7: Resultados promedio del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión.	69
Tabla 3.8: Resultados de la relación de rigidez en el ensayo de flexión para ambos plásticos.....	76
Tabla 5.1. Valores de módulos elásticos utilizados en la solución numérica.	92
Tabla 7.1. Resultados obtenidos del ensayo de tracción con variación de infill y orientación.....	107
Tabla 7.2. Resultados ensayo de compresión con variación de relleno y orientación. ..	110

RESUMEN

La manufactura aditiva o impresión 3D ha ganado gran popularidad y su uso continúa creciendo en diversas áreas de la industria. Esto se debe a su principal característica de fabricar objetos con geometrías complejas, algunas son imposibles de crear mediante la manufactura tradicional. El proceso de fabricación por adición de capas sucesivas genera, propiedades mecánicas dependientes de los parámetros de impresión. La orientación dentro de la cámara de construcción es uno de los factores más relevantes. La respuesta mecánica de estas piezas aún no ha sido totalmente caracterizada.

El objetivo de este estudio, que formó parte del proyecto FONDECYT INICIO N° 11170957, es caracterizar el comportamiento mecánico en el rango elástico de piezas de ABS y PLA fabricadas mediante impresión 3D en dos orientaciones ortogonales. Utilizando una impresora de escritorio de bajo costo se fabricaron probetas en dos orientaciones: horizontal y vertical. Luego, se realizaron ensayos de tracción, compresión y flexión para determinar la respuesta de las muestras impresas, se determinó el módulo de Young, el esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo máximo. Se definió e implementó un modelo constitutivo que fue alimentado con los datos experimentales y que, finalmente se verificó con el ensayo de flexión de 4 puntos.

La orientación vertical mostró peor desempeño mecánico en las pruebas de tracción. Sin embargo, en las pruebas de compresión no existe una diferencia importante causada por las orientaciones estudiadas. Se encontraron valores distintos de módulo de Young y resistencia máxima entre los ensayos de tracción y compresión para un mismo material y orientación. Un modelo bimodular lineal e isótropo representa de manera adecuada el comportamiento en el rango elástico de probetas sometidas a flexión de 4 puntos.

ABSTRACT

Additive manufacturing or 3D printing has gained great popularity and its use continues to grow in various areas of the industry. This is due to its main feature of manufacturing objects with complex geometries, some are impossible to create by traditional manufacturing. The building process by adding successive layers generates, mechanical properties dependent on the printing parameters. The orientation inside the printing chamber is one of the most relevant factors. The mechanical response of these pieces has not yet been fully characterized.

The aim of this study, that was part of the project FONDECYT INICIO N° 11170957, is to characterize the mechanical behavior in the elastic range of ABS and PLA parts manufactured by 3D printing in two orthogonal orientations. Using a low-cost desktop printer, specimens were manufactured in two orientations: flat and up-right. Then, tensile, compression and bending tests were performed to determine the response of the printed samples, Young's modulus, yield stress and maximum stress were determined. A constitutive model was defined and implemented, which was fed with the experimental data and finally verified with the 4-point bending test.

In the tensile test, the printed samples with vertical orientation showed lower values in the mechanical properties evaluated. However, in compression tests there is no significant difference caused by the print orientations studied. Different values of Young's modulus and maximum strength were found between tensile and compression tests for the same material and orientation. A linear and isotropic bimodular model adequately represents the behavior in the elastic range of samples subjected to 4-point bending.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La manufactura aditiva o impresión 3D es un conjunto de tecnologías de fabricación, en las que se crea un objeto tridimensional mediante la superposición sucesiva de capas de material. Este proceso nació en la década de los 80s como la evolución de las impresoras de tinta, pero fue en los últimos años en los que se popularizó debido a los avances tecnológicos y a la reducción del su costo. A pesar de que su valor aun no es similar al de un objeto doméstico masivo, logra ser más barata que otras tecnologías de fabricación de pequeñas cantidades (Gómez Reyes, 2017; Riveiro, 2015).

Esta tecnología está en plena efervescencia y su éxito se debe principalmente a la capacidad de generar objetos con geometrías complejas y con una gran cantidad de detalles en corto tiempo y a bajo costo, relativos a otras tecnologías de fabricación. La manufactura aditiva (MA) presenta una nueva manera de producir, impactando en el diseño y proceso de creación de productos, incluso se la ha llamado la tercera revolución industrial. Un ingeniero o diseñador que debía esperar la fabricación de una pieza para probarla y realizar ajustes ahora puede hacerlo él mismo en un tiempo mucho menor. Además, abre las puertas a nuevos diseños que antes eran imposibles o muy costosos de fabricar. Estas características, junto a la optimización de formas con inteligencia artificial, abren una nueva forma de concebir objetos, ya no guiadas por la factibilidad de fabricación sino por el desempeño de la pieza.

Dentro de las principales ventajas que presenta este tipo de manufactura se encuentran la capacidad de crear geometrías complejas y de alto nivel de detalle sin aumentar el costo de fabricación, genera menos material residual, las piezas se pueden utilizar inmediatamente después de su fabricación y entrega un alto grado de personalización. Sus principales desventajas son la vulnerabilidad de los derechos de autor y la dificultad para fabricar grandes volúmenes.

Las importantes ventajas de la tecnología de las impresoras 3D la han hecho evolucionar rápidamente en las últimas décadas y éstas han sido incluidas en diversos campos de investigación desde entonces, tales como:

Automotriz: La impresión 3D permite fabricar piezas de vehículos, desde accesorios estéticos a componentes fundamentales y funcionales. Un ejemplo es la empresa de automóviles superdeportivos Koenigsegg, que en su modelo *One* incluyen un turbo variable fabricado con impresión 3D en metal. Esta es una pieza técnica muy especial, con el nivel de prueba y error que significó terminarla hubiese sido prohibitivamente cara de fabricar con otra tecnología. No existe una economía de escala para empresas de este tipo y la impresión 3D entrega un nuevo camino. Además, el automóvil tiene al menos 300 piezas de fibra de carbono que en el proceso de diseño fueron impresas en plástico y probadas hasta la versión final (Von Koenigsegg, 2014).

Alimentación: El proceso de la impresión 3D se puede llevar a materiales comestibles en forma líquida o en polvo tales como azúcar, queso o salsas. La empresa catalana Natural Machines ha creado la primera impresora 3D de alimentos llamada Foodini.

Medicina: Este es un campo muy interesante debido a la gran demanda de piezas a medida que requiere. Cualquier órgano de tejido blando, como una oreja, dedo o riñón podría ser producido en impresión 3D gracias al uso de células madres. La impresión 3D ha sido ampliamente aplicada para la fabricación de audífonos, prótesis, articulaciones artificiales, cirugía ortopédica e implantes dentales. Además, se han fabricado implantes metálicos de cadera, cráneo y mandíbula. La empresa belga Materialise fabrica implantes impresos diseñados para adaptarse de forma precisa al paciente (“Materialise” recuperado de www.materialise.com/en/medical/3d-printed-implants).

Aeroespacial: Se puede utilizar la impresión 3D para producir componentes que forman parte de aeronaves. También puede ayudar a acelerar la construcción de piezas para la estación espacial internacional. La asociación entre Made In Space con el centro Marshall de vuelos espaciales de la NASA, permitió lanzar la primera impresora 3D en el espacio.

Puede fabricar piezas en gravedad cero y se espera hacer las misiones espaciales más autosuficientes.

Arte y diseño: Las impresoras 3D como una forma de producir objetos también afecta al arte y el diseño. Ya existen expositores de esta temática con esculturas, vestidos y accesorios impresos que han sido mostrados en el Printshow y el 3D print fashion show.

Arquitectura: La impresión 3D tiene la capacidad de incluso afectar en la construcción de edificios, ya sea con la impresión de componentes y maquetas o llevando esta tecnología a imprimir estructuras. La empresa holandesa DUS Architects construyó una pequeña casa junto a un canal de Ámsterdam y la empresa MX3D construyó mediante 2 robots autónomos un puente peatonal.

La manufactura aditiva continúa creciendo como una técnica de fabricación avanzada. En un reporte de Wohlers and Associates se indica que la MA representó 1.600 millones de dólares en ingresos en 2012 (Wohlers & Wohlers Associates., 2012) y se espera que para 2022 crezca a \$10.000M. El mercado de materiales de la MA tuvo ingresos de \$470M en 2013 y se cree que puede llegar a superar los \$16.000M en 2028 (ASD Reports, como se citó en Forster, 2015). Un reporte de IDTechEx en *The Guardian* indica que se espera que el mercado dental y médico crezcan a \$867M en 2025, incluir la manufactura de órganos y tejidos puede tener un potencial de \$6.000M para ese mismo año (“Medical implants and printable body parts to drive 3D printer growth | Business | The Guardian,” n.d., como se citó en Forster, 2015).

Entre todos los materiales disponibles, los polímeros son críticos porque representan la mayor penetración de mercado y accesibilidad al usuario (Bourell, Leu, & Rosen, 2009, <http://reprap.org/>, <http://makerspace.com/>, como se citó en Forster, 2015). Los equipos de sinterizado láser aun no son fáciles de obtener debido a su costo y a la dificultad en el manejo del polvo metálico. Y aunque propiedades mecánicas como el módulo elástico o la resistencia máxima de los polímeros estén por debajo de los metales, el potencial de este mercado es mucho mayor (“3D Printing Materials 2018-2028: Technology and Market Analysis: IDTechEx,” n.d.).

A pesar de la capacidad de la MA de producir piezas complejas, las propiedades mecánicas aún son difíciles de predecir debido a su dependencia de una gran variedad de parámetros de impresión como el grosor de la capa, la velocidad de avance y la orientación, entre otras (Chacón, Caminero, García-Plaza, & Núñez, 2017; Fernandez-Vicente, Calle, Ferrandiz, & Conejero, 2016; Khuong et al., 2014; Zou et al., 2016). En definitiva, la relación “proceso-estructura-propiedad” ha causado que la mayoría de las piezas impresas sean destinadas para prototipado y prueba de concepto, sin embargo, el mayor potencial está en fabricar piezas finales. Es por esto que las propiedades mecánicas y los materiales son el tema más estudiado de la MA, no obstante, los estudios realizados se centran en un solo tipo de sollicitación y han utilizado en general modelos elásticos simples que no describen de manera satisfactoria el comportamiento del material sometido a distintas sollicitaciones.

1.1. Hipótesis

La hipótesis de este trabajo es que mediante la información obtenida en ensayos de tracción y compresión es posible definir e implementar un modelo constitutivo que describa el comportamiento mecánico en el rango elástico de piezas de ABS y PLA fabricadas con impresión 3D.

1.2. Objetivo general

Esta tesis busca presentar un marco para caracterizar las respuestas mecánicas en el rango elástico de probetas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico (PLA) fabricadas mediante modelado por deposición fundida (FDM). A partir de datos generados por ensayos de tracción y compresión definir un modelo constitutivo que pueda representar el comportamiento elástico de las piezas sometidas a flexión e implementarlo computacionalmente.

1.3. Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar probetas según las normas específicas para ensayos de tracción, compresión y flexión de 4 puntos.
- Ensayar las probetas y obtener propiedades mecánicas para cada prueba.
- Seleccionar e implementar el modelo constitutivo a utilizar.
- Verificar la implementación del modelo y validar su alcance a pruebas experimentales de flexión.

1.4. Metodología

Se diseñará en Inventor de Autodesk (Inventor profesional, 2016) probetas para los ensayos de tracción, compresión y flexión siguiendo las especificaciones de las normas para plásticos de cada uno de estos ensayos. Se construirán mediante impresión 3D con filamentos de ABS y PLA en dos orientaciones: horizontal y vertical. Luego, las impresiones serán testeadas en una máquina de ensayo universal, que entrega los datos de fuerza y desplazamiento que se utilizan para calcular las curvas de esfuerzo-deformación unitaria. De estas curvas se obtiene el módulo de elasticidad, el esfuerzo a fluencia y el esfuerzo último para tracción y compresión de cada una de las 4 configuraciones. Con estos datos se estudiará el comportamiento mecánico del material y se establecerá un modelo constitutivo para éste. Posteriormente, se estudiará analíticamente y se implementará computacionalmente, se crearán simulaciones mediante elementos finitos para el ensayo de flexión para finalmente discutir y validar los resultados numéricos con los analíticos y experimentales correspondientes a cada ensayo.

2. ANTECEDENTES

2.1. Tipos de impresión 3D

Los procesos de manufactura por adición (MA), que más tarde serán llamados de impresión 3D, son aquéllos que construyen piezas capa por capa a partir de un modelo CAD. Las principales ventajas de esta tecnología de fabricación son:

- Versatilidad: Una sola impresora puede realizar un sinnúmero de productos distintos, si el producto cambia la máquina puede fabricarlo sin ninguna modificación.
- Fabricación de geometrías complejas: La impresión 3D presenta pocos límites en la fabricación de objetos, la complejidad del diseño no es una limitante ni tiene mayor implicancia en los costos. Se pueden fabricar objetos que son imposible de hacer con otros tipos de manufactura.
- Reducción de costo: El material y el proceso de fabricación son baratos, la complejidad de la geometría no aumenta el costo de producción. Para piezas únicas o pequeños volúmenes de producción es más económico que otros procesos de manufactura.
- Personalización: Se pueden modificar los objetos con mucha facilidad.
- Menos material residual: El proceso puede crear objetos con el mínimo desperdicio de material.
- Disminución de tiempos en el proceso de diseño: El tiempo que transcurre entre el diseño y la fabricación es mucho menor a cualquier proceso tradicional, se puede observar el producto rápidamente y sin importar su complejidad. Además, no es necesario diseñar herramientas o moldes.

Entre sus principales desventajas se encuentran:

- Imposibilidad de controlar lo que se imprime: Se han registrado modelos para imprimir armas de fuego. Aunque son básicas y de un solo tiro, son totalmente peligrosas.

-Vulneración de derechos de autor: Al poder imprimir en casa, sin regulación y con la existencia de escáneres 3D, se pone en riesgo la propiedad intelectual.

-Pequeñas cantidades de impresión: Para grandes volúmenes de producción esta tecnología no resulta apropiada debido al tiempo de fabricación y gasto energético.

-Calidad de terminación: Si bien la calidad de las piezas es buena, para las que requieren alta precisión es aún inferior a la obtenida por métodos tradicionales. Con algunos tipos de impresión 3D puede ser inviable obtenerla o necesitar procesos posteriores.

-Tamaño limitado de los productos: El producto estará limitado por el tamaño de la impresora.

-Repetibilidad: Entre las piezas producidas mediante MA hay variación dimensional entre las diferentes partidas, tanto como en otras tecnologías.

Dentro de la manufactura aditiva existe una gran variedad de impresoras, que se pueden clasificar según la tecnología que utilizan y el tipo de materia prima inicial, siendo éstos líquido, sólido o polvo. Las principales tecnologías de impresión 3D se describen a continuación clasificadas según el tipo de materia prima inicial.

Base líquida: La materia prima inicial es líquida y se solidifica en un proceso de curado.

-Estereolitografía (*Stereolithography*. SLA): Se basa en una base sumergida en un contenedor con monómeros líquidos que es polimerizado a través de un láser ultravioleta. La base baja para solidificar cada nueva capa. Esta es la tercera tecnología más utilizada a nivel mundial (Columbus, 2017). En la figura 2.1 se muestra un esquema con este tipo de impresión.

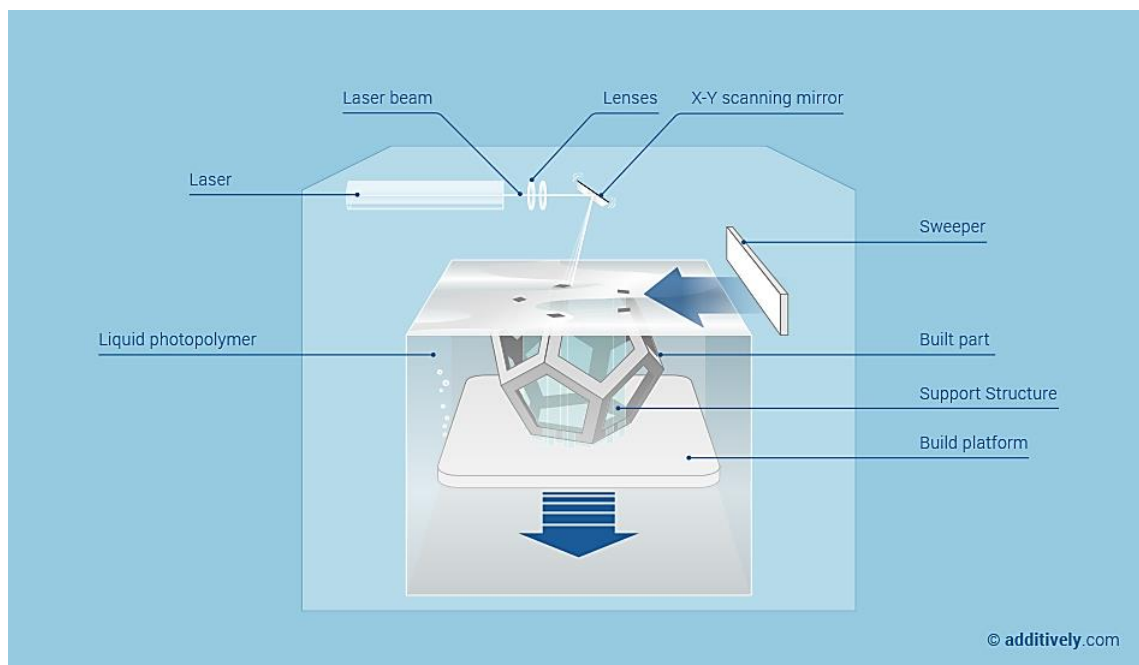


Figura 2.1: Esquema de impresión 3D por SLA (recuperado de www.additively.com).

Ventajas:

- Puede realizarse sin supervisión.
- Gran nivel de detalle y precisión.
- Se pueden pegar piezas construidas por separado.
- Se pueden crear paredes muy finas.
- Muy buenas propiedades mecánicas y acabado superficial.

Desventajas:

- Necesita curado posterior.
 - El costo de la materia prima es alto
 - Generalmente se necesitan soportes en la fabricación.
 - Se requiere mucho tiempo para cambiar el tipo de resina.
- Curado enmascarado de lámpara UV (*Solid ground curing*. SGC): Toda la superficie del líquido es polimerizada por una lámpara UV cubierta por una máscara cuya forma cambia

capa por capa. Una vez que la capa es curada el líquido original se reemplaza por cera para obtener una base sólida para la siguiente capa. En la figura 2.2 se muestra un esquema de este tipo de impresión 3D.

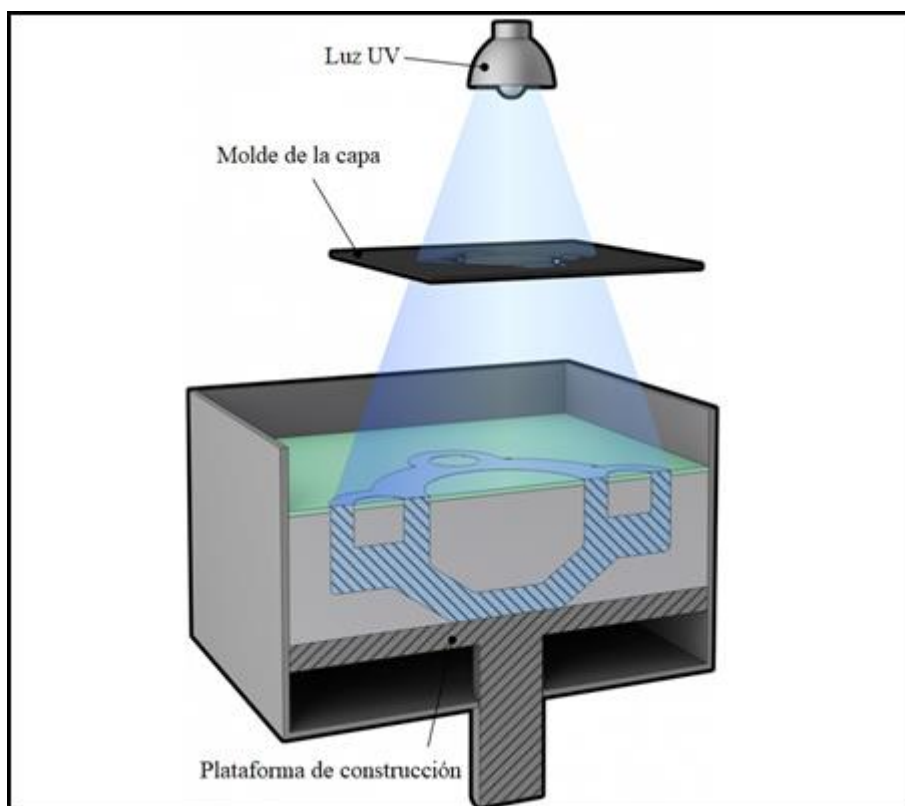


Figura 2.2: Esquema de impresión 3D por SGC (“Manufacturing Guide recuperado de www.manufacturingguide.com)

Ventajas:

- Rápido.
- No requiere elementos de soporte auxiliares.
- Muy preciso en la dirección Z.

Desventajas:

- Alto costo debido a que la cera debe posteriormente retirarse.
- Genera desechos.

-Impresión por chorro (*jet printing, photopolymer jetting. PJ*): Los objetos son construidos a través de un chorro de fotopolímero líquido que sale de un cabezal, mientras es curado por una luz ultravioleta que lo solidifica. Se pueden imprimir varios materiales o colores a la vez. Se obtienen piezas con buena terminación, pero baja resistencia mecánica y durabilidad. En la figura 2.3 se muestra un esquema de este tipo de impresión 3D.

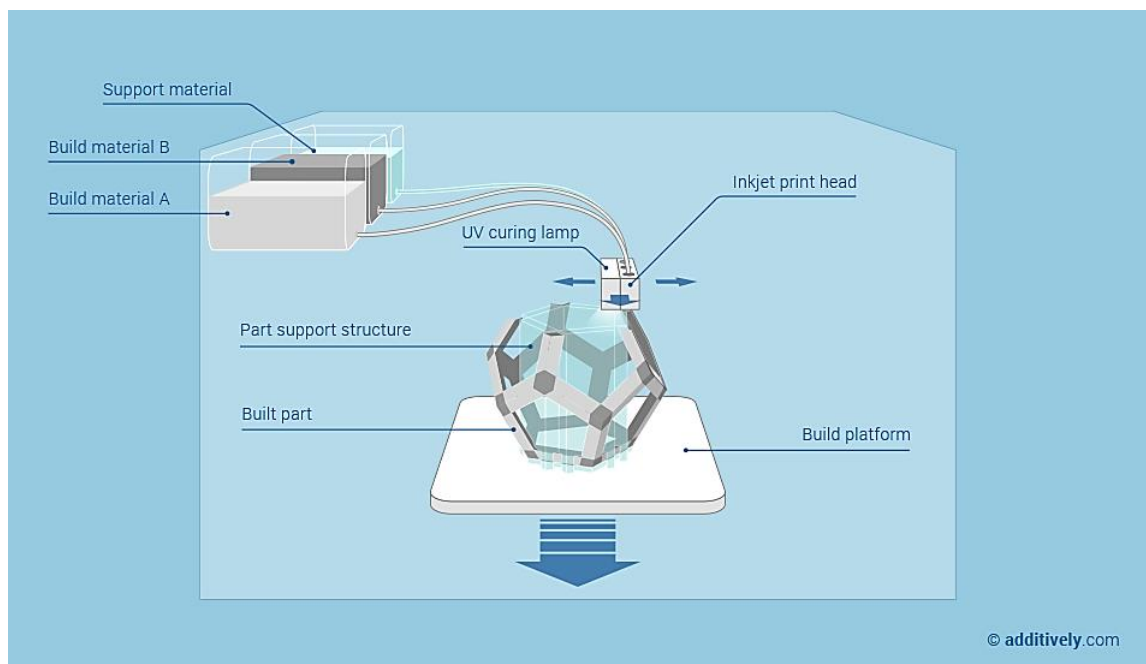


Figura 2.3: Esquema de impresión 3D por PJ (recuperado de www.additively.com).

Ventajas:

- Después de la construcción, la estructura de soporte se puede eliminar con agua.
- Buen acabado superficial y precisión.
- Puede utilizar varios materiales a la vez, como también varios colores.

Desventajas:

- Las piezas multimateriales y multicolores deben planificarse especialmente de antemano.
- Piezas con bajas propiedades mecánicas.

Sólida: La materia prima es sólida y luego es cortada o fundida para crear el objeto.

-Laminada (*Laminated object manufacturing*. LOM): Las capas son cortadas y luego pegadas. Esta tecnología tiene gran precisión, pero es lenta y genera desechos. En la figura 2.4 se muestra un esquema de este tipo de impresión.

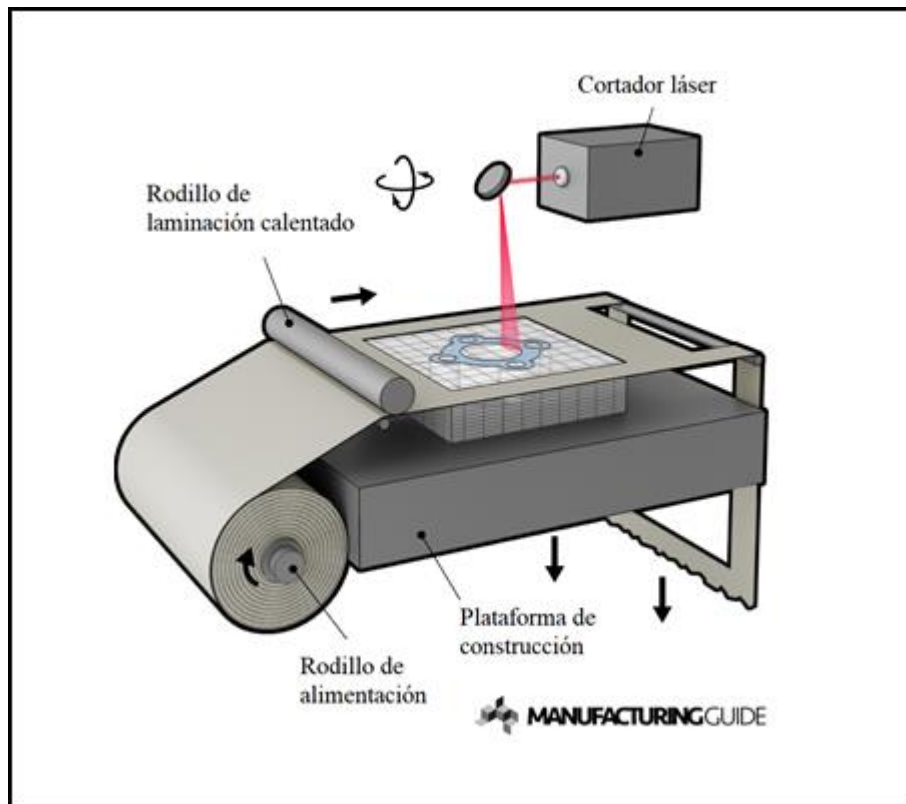


Figura 2.4: Esquema de impresión 3D por laminado (recuperado de www.manufacturingguide.com).

Ventajas:

- No son necesarios soportes auxiliares.
- Buena precisión.
- Puede producir modelos de mayor escala.

Desventajas:

- Deficiente acabado superficial.
- Alta dificultad para producir piezas huecas.
- Dificultad para lograr buenos enlaces entre las capas.

-Modelado por deposición fundida (*Fused deposition modeling*. FDM): En este proceso una cabeza extrusora cuelga de un puente que se mueve en dos direcciones principales sobre una mesa, la que puede subir y bajar. La materia prima se calienta hasta fluir y luego es extruida por una pequeña boquilla que recorre una trayectoria predeterminada sobre la mesa hasta terminar la primera capa, luego la mesa baja para seguir con la siguiente. El objeto es construido capa tras capa, al aplicar una capa el material solidifica para aceptar a la siguiente, conformando el objeto final. Se utilizan materiales termoplásticos como el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico). Este método es el más utilizado a nivel mundial (Columbus, 2017). En la figura 2.5 se muestra un esquema de este tipo de impresión.

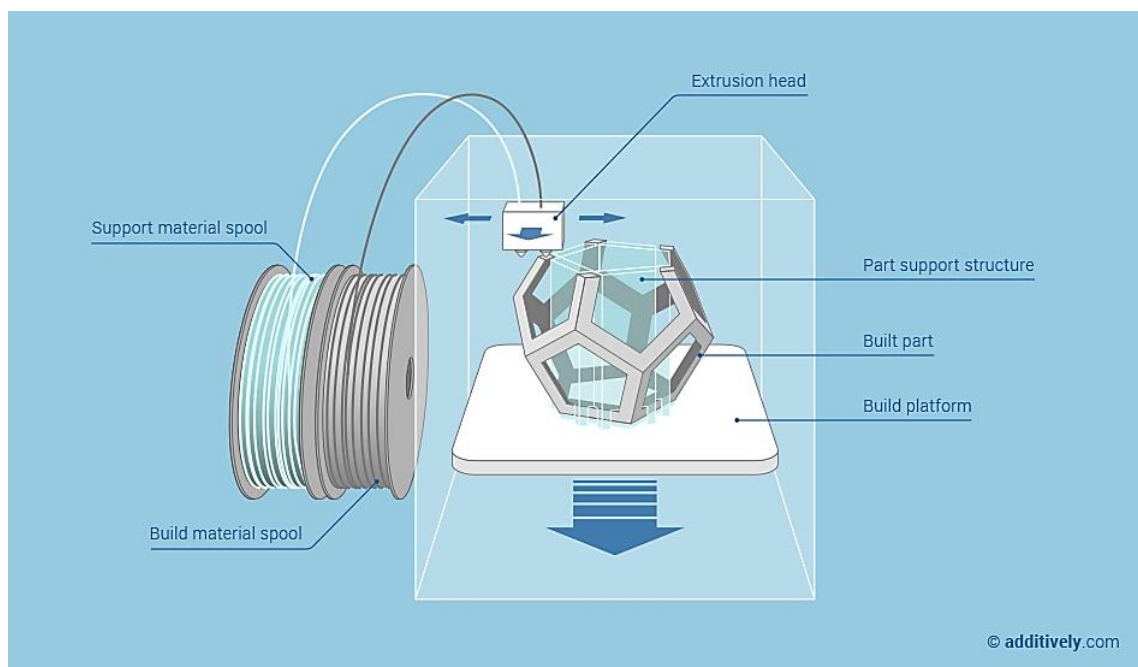


Figura 2.5: Esquema de impresión 3D por FDM (recuperado de www.additively.com).

Ventajas:

- Alta velocidad.
- Fácil de utilizar.
- Bajo costo de la materia prima.
- Puede fabricar geometrías complejas.
- No requiere curado luego de la fabricación.
- Amplia variedad de materiales y colores.

Desventajas:

- Pequeño tamaño de las piezas.
- Acabado superficial rugoso.
- No se puede hacer paredes muy delgadas.
- Lento para piezas muy voluminosas.

Polvo: La materia prima es un polvo con una granulometría controlada que se sinteriza a través de un calentamiento selectivo o mediante la adición de aglutinante.

-Sinterización por láser selectiva (*Selective laser sintering*. SLS): Los objetos son contruidos mediante el sinterizado de una delgada capa de polvo calentada con láser, que luego de finalizar una capa es nuevamente alimentado de polvo para volver a solidificarlo. Este método es el segundo más utilizado a nivel mundial (Columbus, 2017). En la figura 2.6 se muestra un esquema de este tipo de impresión.

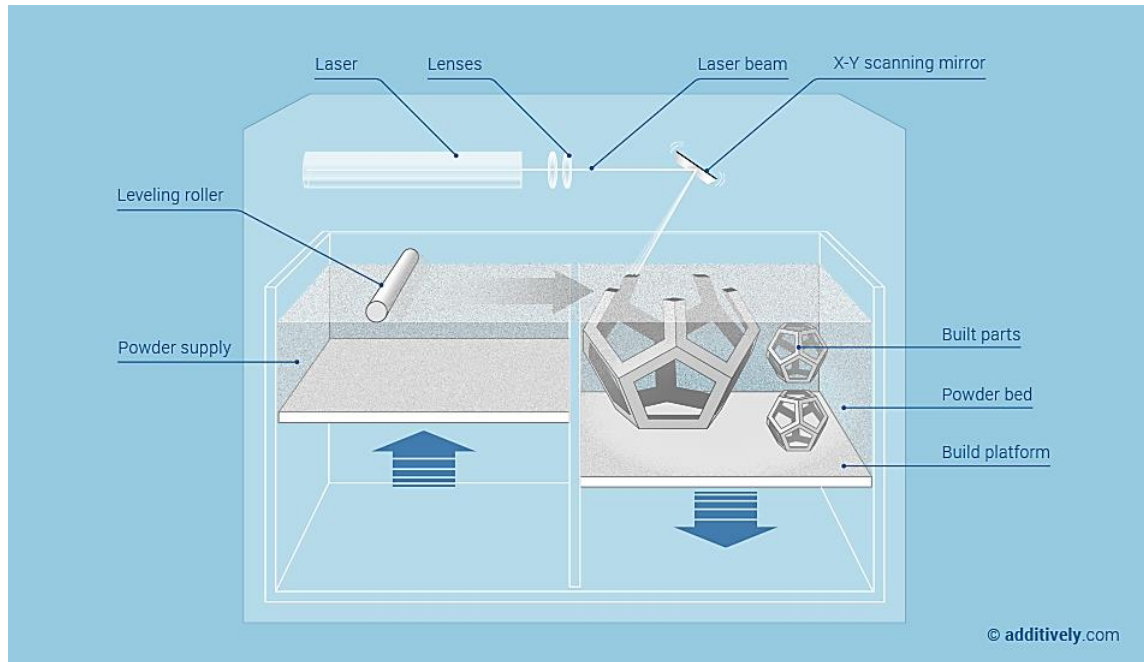


Figura 2.6: Esquema de impresión 3D por SLS (recuperado de www.additively.com).

Ventajas:

- Se crean piezas estructurales y funcionales.
- Objetos soportan humedad y moderadamente altas temperaturas (180°C) sin variar demasiado sus dimensiones ni propiedades del material.
- Es posible unir piezas.
- Material resistente a ataques químicos.
- No utiliza elementos de soporte auxiliares.
- No requiere curación.

Desventajas:

- Acabado superficial rugoso.
- Es difícil cambiar el material.
- Tolerancia dimensional variable según el tamaño de la pieza.

- Velocidad de fabricación media.
- Metal en polvo difícil de manipular.

-Inyección ligante o goteo en cama (*Binder jetting*. BJ): Los objetos se crean mediante la inyección gota a gota de aglutinante sobre polvo. En la figura 2.7 se muestra un esquema de este tipo de impresión 3D.

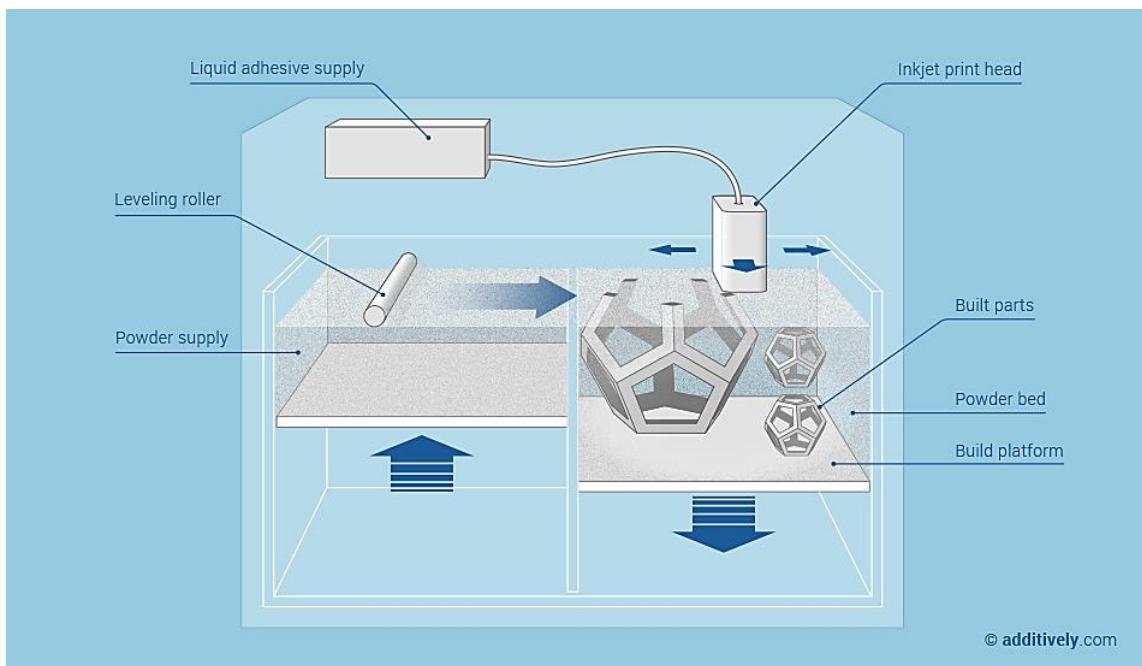


Figura 2.7: Esquema de impresión 3D por BJ (recuperada de www.additively.com).

Ventajas:

- Proceso rápido y económico.
- Se puede usar una variedad de colores y materiales con diferentes aglutinantes (cerámica, metales y polímeros).
- No necesita soportes auxiliares.

Desventajas:

- Piezas con muy baja densidad y resistencia mecánica.
- Sinterizado por haz de electrones (*Electron beam melting*, EBM): Una fina capa de polvo metálico es fundido por un haz de electrones es similar al sinterizado por láser. Cuando se genera una capa la base baja y agrega una nueva capa de polvo del material. En la figura 2.8 se puede ver un esquema de este tipo de impresión 3D.

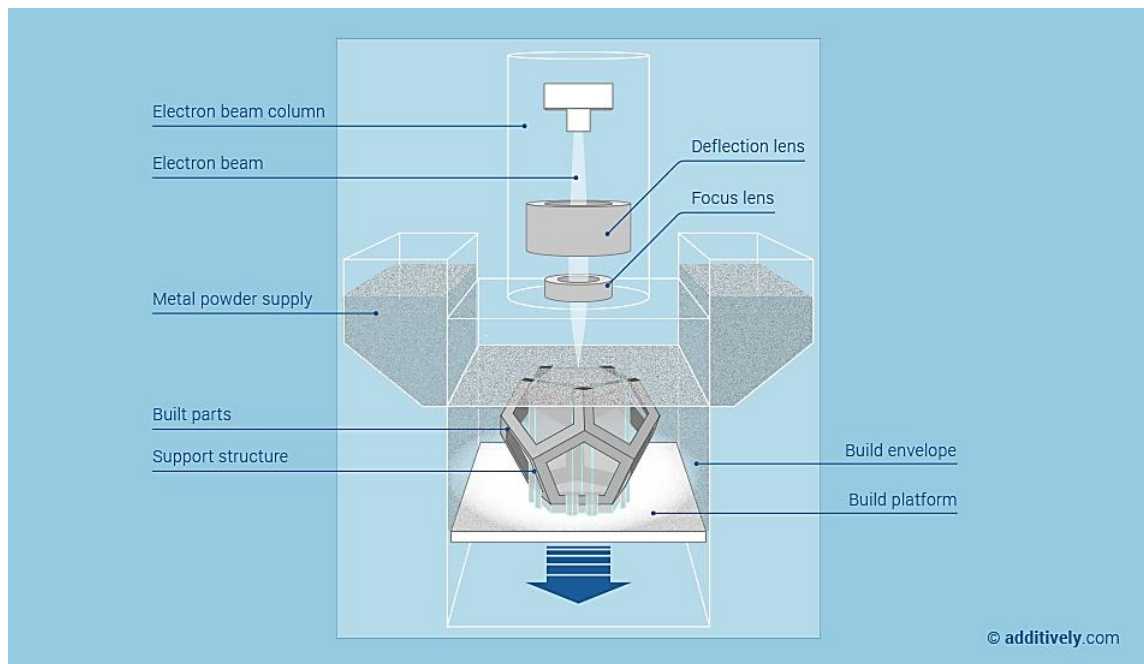


Figura 2.8: Esquema de impresión 3D por sinterizado por haz de electrones
(www.additively.com).

Ventajas:

- Piezas metálicas de alta densidad y buenas propiedades mecánicas, comparables con los métodos tradicionales.

Desventajas:

- Es un proceso lento y costoso.
- Las piezas generalmente requieren un procesamiento posterior.

2.2. Materiales de impresión: ABS y PLA

El proceso de fabricación por deposición fundida utiliza polímeros termoplásticos, los cuales se caracterizan por su capacidad de ser fundidos y solidificados varias veces. En la actualidad las impresoras de deposición fundida utilizan una gran variedad de materiales siendo el ABS y el PLA los más utilizados (Cortés, 2016; Ortiz Chimbo, Luna Aveiga, Medina Moreira, & Tumbaco Soledispa, 2016; Riveiro, 2015).

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un plástico importante en el diseño y fabricación de piezas debido a su resistencia mecánica, resistencia al impacto, resistencia química y facilidad para realizar procesos de mecanizado post fabricación. Las características presentes en este plástico se deben a las propiedades de cada uno de sus componentes. El acrilonitrilo le otorga rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno entrega tenacidad y resistencia al impacto. El estireno ofrece resistencia mecánica, facilidad de procesado, rigidez y brillo.

El ABS se debe calentar a una temperatura entre los 230°C y 245°C para poder ser extruido, a esta temperatura se desprenden gases tóxicos que sin ventilación pueden ser nocivos. La base en donde se imprimirá debe precalentarse y mantenerse entre 100°C y 110°C debido a que el ABS presenta una alta contracción térmica. Se utiliza extensivamente en los procesos de fabricación actuales, como en piezas de Lego, carcasas de electrodomésticos y componentes de automóvil, entre otros. Además, es posible reciclarlo.

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable y bioactivo que se fabrica a partir de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de mandioca, trigo y caña de azúcar. Debido a que es biocompatible actualmente se le utiliza en aplicaciones

biomédicas. Además, es usado para fabricar envases de alimentos y utensilios desechable, como vasos, platos o cubiertos. Por el momento no es reciclable.

El PLA tiene una temperatura de extrusión entre 190°C hasta 200°C, esta temperatura varía debido a la composición del termoplástico. Presenta una menor contracción térmica que el ABS y no es necesario utilizar una base caliente para la impresión, aunque los fabricantes recomiendan hacerlo con temperaturas entre 60°C y 80°C. Es frágil y duro, lo que lo hace más difícil de mecanizar luego de la impresión y debido a su baja temperatura de fusión, no resiste bien las altas temperaturas. Los gases emitidos en la fusión no son tóxicos.

2.3. Teoría de los ensayos cuasi estáticos aplicados a probetas impresas

En el área de pruebas mecánicas de materiales, la tasa de carga se utiliza como un criterio de clasificación. Existiendo ensayos estáticos y dinámicos. Se consideran ensayos estáticos a aquellos en los que la carga incrementa lentamente, específicamente con tasas de deformación entre 10^{-5} y 10^{-1} s^{-1} . Además, existen los ensayos denominados destructivos, en los cuales los especímenes son cargados hasta la fractura. Los resultados proporcionan importante información para la caracterización de un material. Algunos ensayos de este tipo son los de tracción, compresión y flexión cuyas características principales se describen a continuación.

Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción es fundamental para determinar las propiedades mecánicas de un material. Las mediciones de este ensayo sirven para determinar propiedades como el módulo elástico, el endurecimiento por deformación, el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo y la elongación hasta la rotura. Este ensayo se realiza en una máquina de ensayos universal, la cual tiene dos travesaños, uno fijo y otro móvil, una celda de carga que mide la fuerza en el espécimen y mordazas que sostienen la muestra durante el ensayo. Las probetas para este tipo ensayos tienen sus extremos preparados para ser tomados y entre

ellos una sección transversal constante. Las probetas suelen ser cilíndricas sólidas, aunque también hay de hoja plana y tubulares.

Para obtener valores útiles se deben realizar suposiciones fundamentales de las condiciones del ensayo y la muestra. La carga debe incrementar sin impactos, lenta y continuamente hasta la ruptura o carga límite, en la muestra no existen imperfecciones geométricas como muescas o bultos y no debe haber interferencias mientras se realiza el ensayo. Bajo estas condiciones se genera un estado de esfuerzo uniaxial homogéneo donde los esfuerzos normales estén igualmente distribuidos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

De este ensayo se obtiene la fuerza y elongación de la probeta. La máquina de ensayos mide la fuerza F y la variación en el largo Δl que se mide como el desplazamiento transversal de las mordazas, también se puede medir con un extensómetro. Con estos valores se calcula el esfuerzo y la deformación. La relación entre la fuerza F y el área transversal inicial A_0 define el valor del esfuerzo ingenieril (σ) de la siguiente forma.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

La deformación ingenieril (ε) se define como:

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Donde l_0 es la longitud inicial y l es la longitud instantánea de la probeta.

Para pequeñas deformaciones el valor del esfuerzo y deformación ingenieril no presentan grandes diferencias con el valor del esfuerzo y deformación reales.

Al graficar estos valores se obtienen la curva de esfuerzo-deformación. Al comienzo de ésta al aplicar la carga se puede ver un comportamiento elástico lineal, donde la elongación de la probeta es proporcional a la carga aplicada. Si se retira la carga la probeta regresa a su forma y longitud inicial. Conforme aumenta la carga la muestra comienza a sufrir deformación permanente o plástica y ésta ya no es proporcional a la carga. El esfuerzo al

cual ocurre este fenómeno se llama esfuerzo de cedencia o fluencia. En la figura 2.9 se muestra una curva típica de esfuerzo-deformación obtenida del ensayo de tracción.

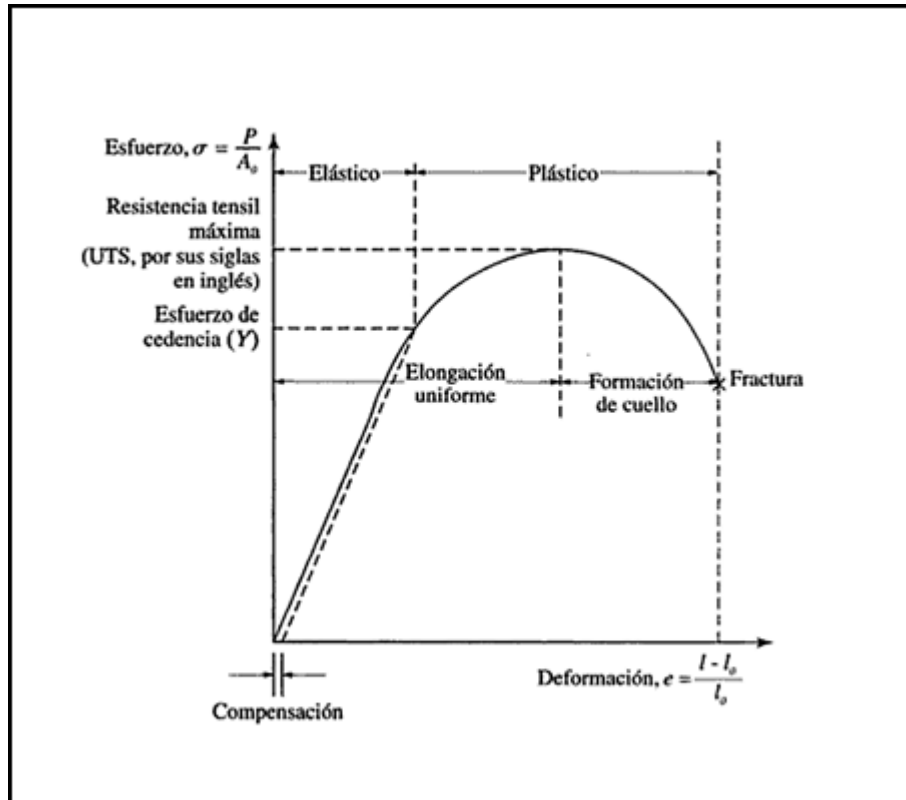


Figura 2.9: Curva de esfuerzo-deformación típica obtenida de un ensayo de tracción (Kalpakjian & Schmid, 2002).

El cociente entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica se conoce como el módulo de elasticidad o módulo de Young E , el cual es una medida de la rigidez de un material. Esta relación se conoce como la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Ensayo de compresión

El ensayo de compresión es muy similar al de tracción, se utiliza la misma máquina, pero el movimiento es opuesto por lo que la probeta se contrae en la dirección de la fuerza. Las mordazas son reemplazadas por dos platos que comprimen la muestra y las probetas son de sección transversal constante, prismas rectangulares, cilindros o tubos. Análogamente al ensayo de tracción, los supuestos fundamentales realizados son válidos para la compresión estandarizada con velocidad constante de carga. Las muestras no deben tener muescas o bultos, la carga debe incrementar lentamente hasta la ruptura o la carga límite y no debe haber influencias mientras se realiza la prueba. Considerando estas condiciones y bajo la carga de compresión, se genera un estado de tensiones uniaxial y homogéneo, normal a la sección transversal.

En este ensayo se obtienen los mismos datos que en tracción, la fuerza aplicada en la probeta y su diferencia de elongación. De la misma manera se obtienen curvas de esfuerzo-deformación y se puede calcular el módulo de elasticidad en la zona elástica de la curva.

Ensayo de flexión.

El ensayo de flexión se utiliza para estudiar la capacidad de un material de resistir cargas que generen momentos flectores en su sección transversal. Por lo general, se utilizan especímenes de sección transversal rectangular, apoyado en sus extremos y la carga se aplica en uno o dos puntos entre ellos. Estos ensayos se conocen como flexión de tres y cuatro puntos respectivamente. En la probeta se generan esfuerzos longitudinales de tracción y compresión. En la figura 2.10 se muestra un esquema del ensayo de flexión de 3 y 4 puntos.

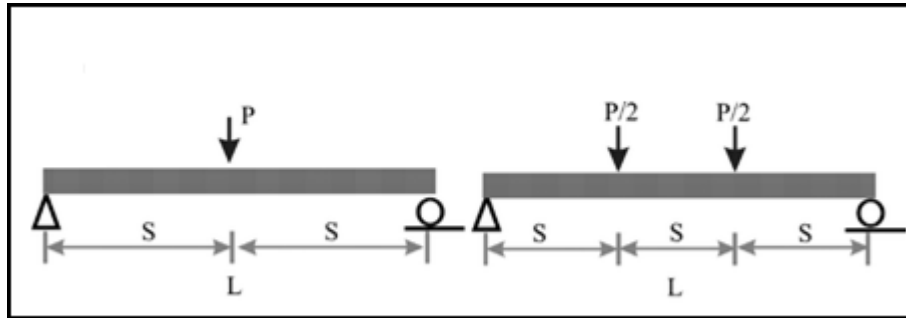


Figura 2.10: Esquema del ensayo de flexión de 3 (izquierda) y 4 (derecha) puntos (Soranakom & Mobasher, 2007).

En este ensayo se obtiene la fuerza medida y el desplazamiento o deflexión de la viga en el punzón. Con estos valores es posible calcular la relación de rigidez, el módulo elástico de flexión, el esfuerzo y la deformación, utilizando supuestos adecuados según la geometría de la probeta. Para este ensayo se han desarrollado ecuaciones que lo representan, estas consideran el comportamiento de la probeta en el rango elástico y de pequeñas deformaciones.

Para el ensayo de tres puntos el momento flector máximo es representado por la siguiente expresión.

$$M_{max} = \frac{P L}{4} \quad (4)$$

Dónde P es la fuerza del punzón y L es la separación entre los apoyos. Para calcular el esfuerzo y la deformación en flexión se utilizan las siguientes expresiones.

$$\sigma = \frac{3 P L}{2 w h^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{6 \delta h}{L^2} \quad (6)$$

Dónde δ es la deflexión de la viga medida en el punzón, w es el ancho y h el espesor de la probeta. Luego, para el módulo de elasticidad para flexión se tiene.

$$E = \frac{L^3 m}{4 w h^3} \quad (7)$$

Dónde m es la pendiente en la zona elástica de la curva fuerza-desplazamiento.

Para el ensayo de flexión de 4 puntos se tiene que el momento máximo es representado por la siguiente expresión.

$$M_{max} = \frac{P L}{6} \quad (8)$$

Para calcular el esfuerzo y la deformación en flexión se utilizan las siguientes expresiones.

$$\sigma = \frac{P L}{w h^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{27 \delta h}{5 L^2} \quad (10)$$

Luego, para el módulo de elasticidad para flexión de 4 puntos se tiene.

$$E = \frac{5 L^3 m}{27 w h^3} \quad (11)$$

2.4. Normas para ensayos de tracción, compresión y flexión aplicadas a MA

Las normas nacen de la necesidad de mediciones estandarizadas de las propiedades mecánicas de los materiales. Los ingenieros utilizan este conocimiento para tomar decisiones importantes tanto en diseños críticos como no críticos para la seguridad. Estas propiedades se determinan utilizando estándares de medición aceptados, bases de datos certificadas o materiales de referencia. Los estándares de prueba aplicables se determinan en función del uso final del material, la debilidad inherente en el diseño, los requisitos de durabilidad y los factores de seguridad.

Los procesos de manufactura aditiva difieren del procesamiento tradicional de fabricación de polímeros en el que todo el material se funde y se homogeneiza. El proceso de MA de depositar capas de material polimérico da como resultado piezas con propiedades anisótropas y presencia de esfuerzo residual. Esto hace que el uso de las normas existentes para polímeros, no sean aplicables directamente.

La organización ISO, es una organización internacional de normalización conformada por diferentes organismos de estandarización del mundo. Entre los mayores contribuyentes técnicos del ISO está el estándar ASTM (*American Society of Testing and Materials*) que incluye métodos y procedimientos para probar polímeros y compuestos. ASTM internacional provee un foro global para el desarrollo y publicación de estándares y métodos de testeo. Los estándares que provee esta organización son aceptados en las áreas de investigación y desarrollo, pruebas de productos y sistemas de calidad.

Forster realizó para el instituto nacional de estándares y tecnología de Estados Unidos (NIST), una investigación en 2015 sobre cuáles normas pueden ser utilizadas y adaptadas para piezas fabricadas por manufactura aditiva, el estudio se realizó para cada ensayo y sus normas específicas.

Para el ensayo de tracción los estándares ASTM están clasificados para plásticos (ASTM D638, ISO 527-2) y compuestos (ASTM D3039, ISO 527-4). Los estándares utilizan muestras con forma de hueso de perro o rectos cuya geometría se basa en el grosor de la muestra o el tipo de compuesto, las formas utilizadas son como las que se muestran en la figura 2.11.

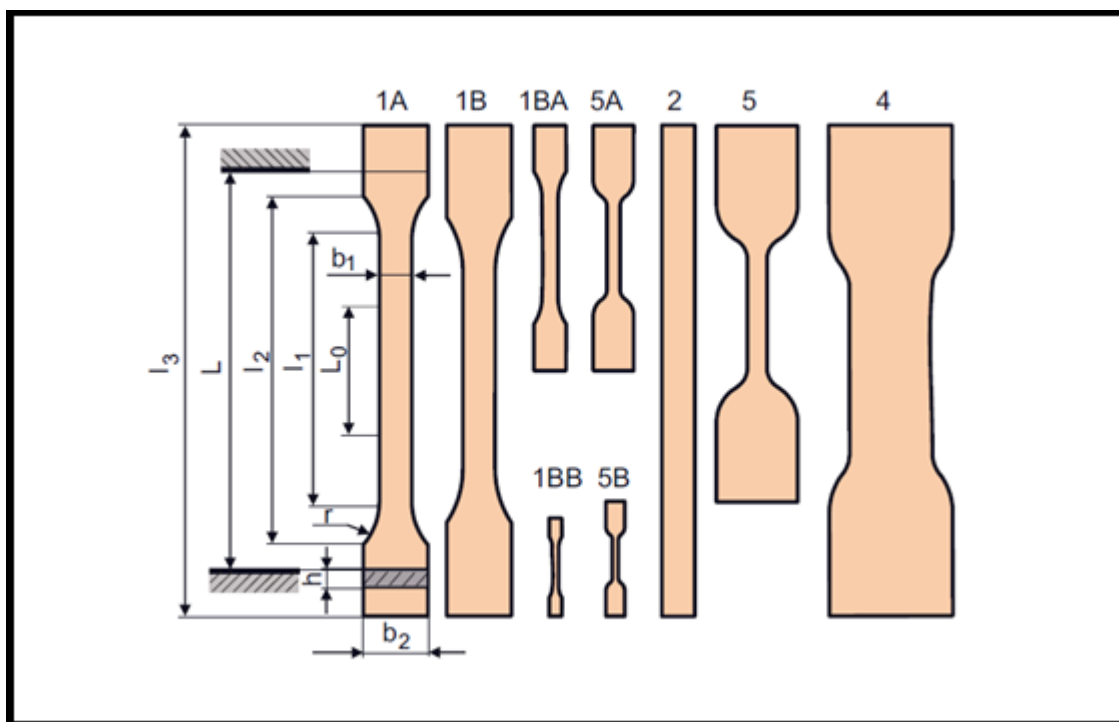


Figura 2.11: Especímenes para ensayo de tracción según la norma ISO 527 (Grellmann & Seidler, 2013).

Los estándares para materiales compuestos abordan la orientación de las fibras dentro de un material compuesto, pero la aplicabilidad de dichos estándares a los materiales de MA no se ha descrito exhaustivamente en la literatura.

Los estándares aplicables para las mediciones de compresión son ASTM D695 e ISO 604. ASTM D3410 e ISO 14126 son específicos para la compresión de una dirección en probetas compuestas de fibra reforzada en el plano. Los estándares proporcionan la medición del módulo de compresión, el límite elástico de compresión, la resistencia a la compresión en caso de falla y la deformación por compresión en caso de falla. Hay restricciones geométricas para el diámetro y la altura de la muestra.

ASTM D790 e ISO 178 son estándares equivalentes que utilizan un método de flexión de tres puntos para medir el módulo de flexión, la resistencia a la flexión, el esfuerzo de

flexión y la deformación a la rotura dentro de un límite de tensión del 5%. ASTM D6272 es un método de flexión de cuatro puntos que se usa para aumentar las posibilidades de lograr una medición de falla. Esta prueba reduce la concentración de tensión asociada con el rodillo central en una prueba de tres puntos. Estos estándares son aplicables para materiales no reforzados y reforzados. Para materiales compuestos que contienen fibras de alto módulo, se debe usar ASTM D7264 para la prueba. La norma no aborda los desafíos específicos para los materiales de MA que pueden tener propiedades anisótropas.

Los estándares fueron evaluados por el NIST para determinar su adaptabilidad a la manufactura aditiva. Se clasificaron en tres grupos:

Sí: los estándares son aplicables para la MA con muy mínimas o sin modificaciones.

Sí con guía: el estándar es en general aplicable para la MA, pero puede haber límites en su aplicabilidad, y es posible que se necesiten algunas modificaciones o consideraciones adicionales. Esto incluye:

- Límites geométricos en especímenes de prueba.
- Post procesamiento requerido de manera que los especímenes contruidos mediante fabricación aditiva cumplan con los requisitos de la norma. Esto generalmente incluye el acabado superficial o requisitos dimensionales.
- Requisitos de isotropía del material. Los especímenes de MA a menudo tienen anisotropía inherente. Los métodos de medición que especifican la aplicabilidad de los materiales isótropos aún pueden funcionar, pero los resultados medidos pueden tener incertidumbres más grandes.
- Consideraciones específicas de la aplicación, como temperaturas de prueba elevadas o entornos de inmersión.

No: El estándar requiere especímenes que no pueden construirse a través de MA. Incluso modificaciones importantes pueden no ser adecuadas, otro método es más adecuado para la medición o simplemente la medición no es aplicable.

Para el ensayo de tracción las normas mencionadas fueron clasificadas como “sí con guía” a excepción de la norma ISO 527-5 que no es aplicable a especímenes fabricados con MA porque es específica para compuestos reforzados con fibra unidireccional, lo que no es aplicable dadas las tecnologías actuales de MA.

Para el ensayo de compresión las normas mencionadas fueron clasificadas como “sí con guía” a excepción de las normas ISO 14126 y ASTM D3410/D3410M que no son aplicables a la MA porque miden las propiedades bajo compresión de probetas reforzadas con fibra.

Para el ensayo de flexión se clasificaron las normas como “sí con guía” a excepción de la norma ASTM D7264 que es específica para compuestos reforzados con fibra continua, no aplicable a las tecnologías de MA actuales.

Las normas que no son adaptables, en general, son las específicas para compuestos reforzados con fibra. Los métodos de prueba básicos de tracción, compresión y flexión son aplicables para probetas fabricadas mediante deposición fundida (Forster, 2015).

2.5. Trabajos previos

Costabile, Fera, Fruggiero, Lambiase y Pham (2016) examinaron el número de artículos publicados sobre MA anualmente y los temas a los que se dirigieron. Encontraron que en 2005 se publicaron aproximadamente 1000 artículos sobre varios temas de MA, de los cuales 500 trataban sobre propiedades y materiales mecánicos. El total anual creció a aproximadamente 4400 publicaciones en 2015 con 2600 orientadas a propiedades mecánicas y materiales. De estas publicaciones las que estudian específicamente probetas fabricadas por deposición fundida, simuladas o ensayadas por tracción, compresión y flexión se muestran a continuación.

2.5.1. Tracción

Como se mencionó anteriormente, el ensayo de tracción es el más común de los experimentos usados para obtener propiedades mecánicas de un material. Se presenta una breve descripción de algunos de los trabajos realizados con este ensayo en piezas fabricadas por deposición fundida.

Bertoldi, Yardimci, Pistor, Guceri y Sala (1998) realizaron el ensayo de tracción a probetas de ABS y midieron el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y el coeficiente de Poisson. Los especímenes fueron diseñados de acuerdo a la norma ASTM D 5937 e impresos en seis orientaciones distintas, como se muestra en la figura 2.12. Los parámetros de impresión no fueron variados.

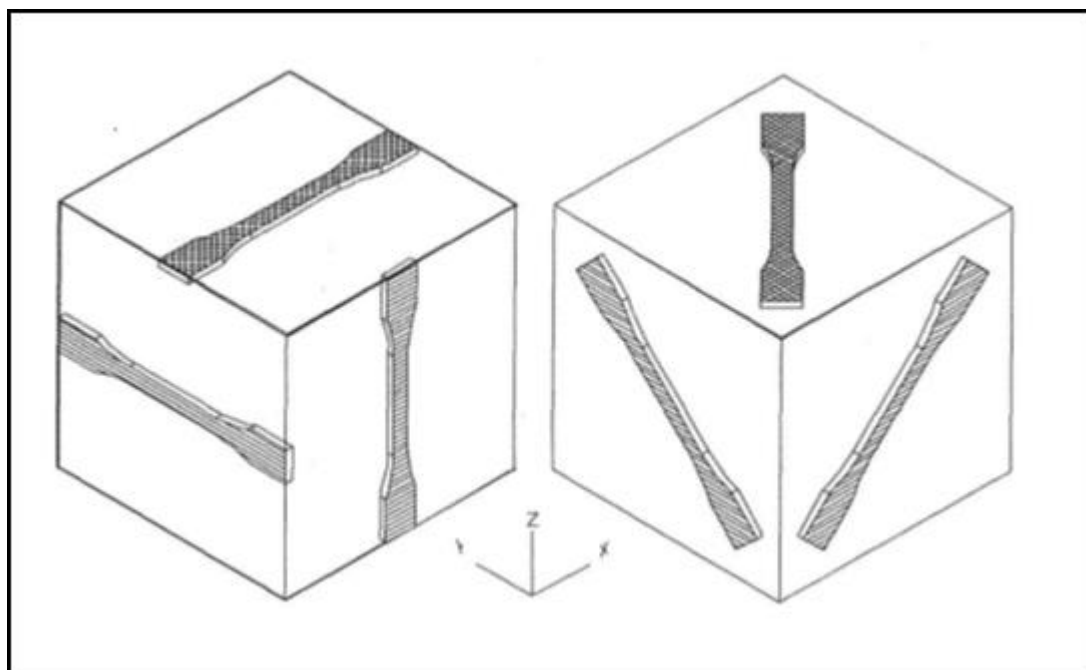


Figura 2.12: Orientaciones de las probetas utilizadas por Bertoldi et al. (1998).

Rodríguez, Thomas y Renaud (1999, 2001) realizaron diversas publicaciones relacionadas con el ABS fabricado por deposición fundida, de los cuales dos se relacionan con ensayos de tracción. La fabricación de las probetas se realizó siguiendo la norma ASTM D3039, destinada a compuestos de matriz polimérica. El tipo de espécimen y sus dimensiones se pueden ver en la figura 2.13. De acuerdo a la norma, se produce una placa plana y se pegan dos lengüetas metálicas en los extremos como soporte.

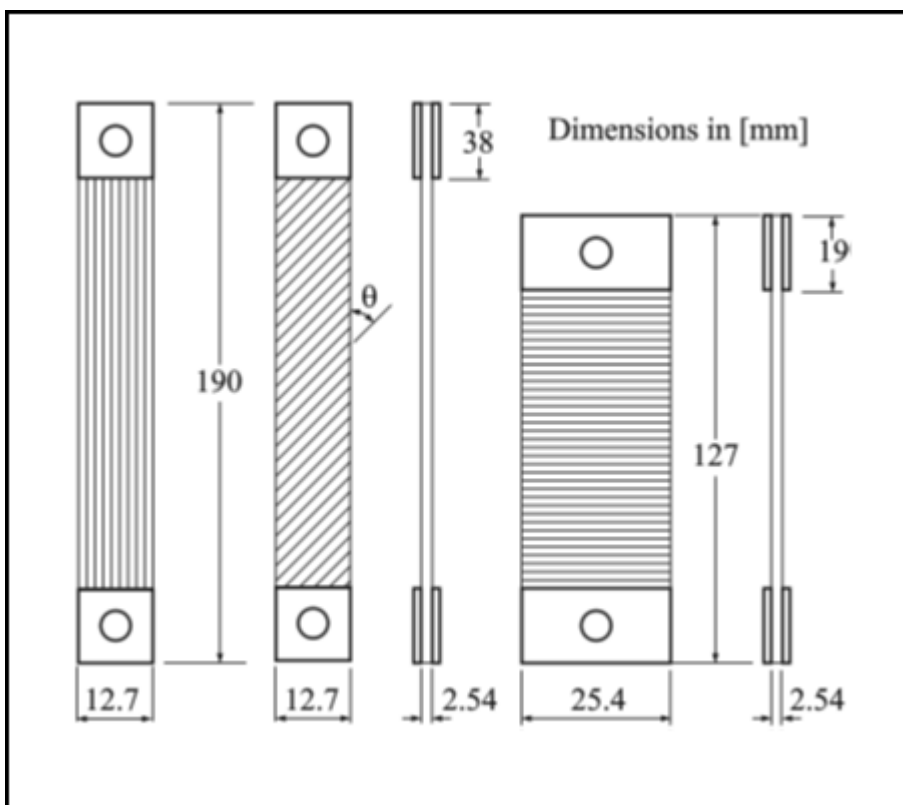


Figura 2.13: Probetas de tracción con 0°, θ ° y 90° según norma ASTM D3039 (Rodríguez et al., 2001).

Se imprimieron probetas con cuatro orientaciones distintas: 0°, 15°, 45° y 90°. Se midió la resistencia a tracción y el módulo elástico, con el fin de encontrar una relación entre

algunos parámetros de fabricación, como la temperatura de extrusión y de la base, y el desempeño mecánico. Rodríguez y los coautores centraron su trabajo en la mesoestructura de las piezas impresas uniaxialmente. Mediante cortes y microscopía de las muestras, los autores caracterizaron la mesoestructura.

Es-Said et al. (2000) realizaron ensayos de tracción con probetas de ABS impresas en cinco direcciones distintas. El diseño fue similar al de la norma ASTM D638. Sin embargo, los especímenes no tienen dimensiones estándar. Se reportó la tensión máxima y el límite elástico.

Montero, Roundy y Odell (2001) midieron el efecto del color del filamento, ancho de línea, temperatura de impresión y espacio entre los filamentos en probetas a tracción. En un comienzo se utilizaron las dimensiones del espécimen tipo I de la norma ASTM D638, pero éste presentó problemas debido a la ruptura prematura de las muestras por lo que continuaron con la norma ASTM D3039. Se reportaron valores de tensión máxima y módulo elástico.

Li, Sun, Bellehumeur y Gu (2002) midieron el módulo elástico, el efecto del espacio entre filamentos y el coeficiente de Poisson de probetas de ABS. Realizaron el ensayo de tracción siguiendo el estándar ASTM D3039, imprimieron uniaxialmente en el plano XY a 0° , 45° y 90° . También midieron el módulo elástico en probetas impresas ortogonalmente con ángulos $0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/-60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$ y $15^\circ/-75^\circ$.

Sood, Ohdar y Mahapatra (2010) estudiaron el efecto de la altura de capa, ancho de línea, espacio entre filamentos, ángulo de los filamentos y orientación de impresión en muestras de ABS, siguiendo el estándar ISO R527:1966. Se midió la resistencia a tracción. Se utilizaron orientaciones de 0° , 15° y 30° en el plano XY y se utilizaron ángulos de trama de 0° , 30° y 60° con respecto al eje X.

Croccolo, De Agostinis y Olmi (2013) estudiaron el efecto del ancho del contorno en probetas de ABS. Se comenzó el estudio utilizando dimensiones de la probeta tipo I siguiendo la norma ASTM D638. Sin embargo, en el radio se generaba una concentración

de esfuerzos que generaba una ruptura fuera de la zona esperada. Se continuó el ensayo con probetas modificadas con un radio mucho mayor, ambas probetas se muestran en la figura 2.14.

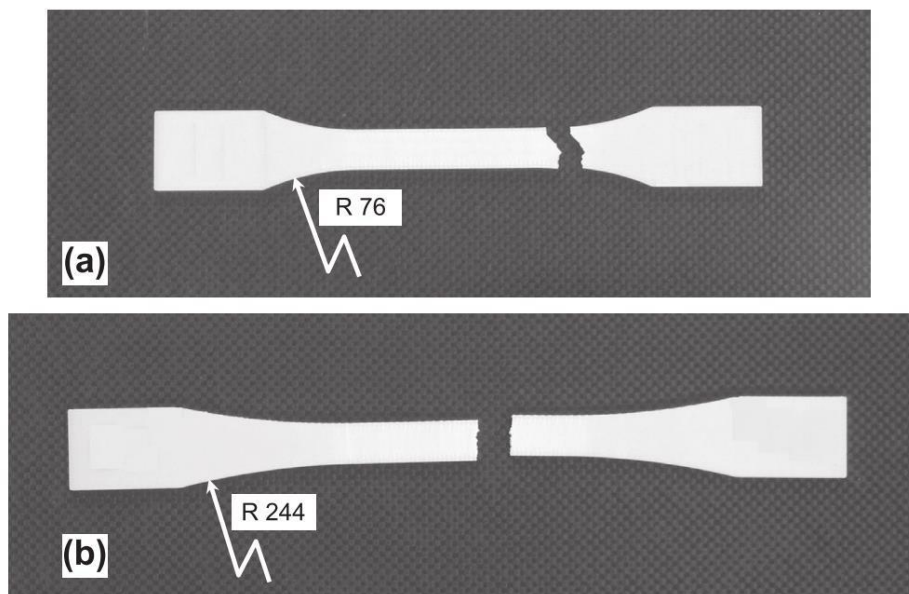


Figura 2.14: Espécimen con 76 mm de radio (a) y con 244 mm de radio (b) (Croccolo et al., 2013).

Se midió la resistencia a la tracción y la rigidez de las muestras. Se tomaron cuatro anchos de contorno distintos y dos ángulos de filamentos, 45° y -45° .

Hill y Haghi (2014) midieron la resistencia a la tracción, el límite de fluencia, el módulo elástico y la elongación a la ruptura de probetas de ABS. Siguiendo la norma ASTM D638 se imprimieron probetas tipo I de ABS con 7 orientaciones distintas, desde 0° hasta 90° incrementando de 15° . Desarrollaron un criterio de fallas dependiente de la dirección de impresión.

Khuong et al. (2014) midieron la resistencia a la tracción siguiendo el estándar ISO 527, utilizaron probetas de ABS en 3 direcciones distintas como se muestra la figura 2.15.

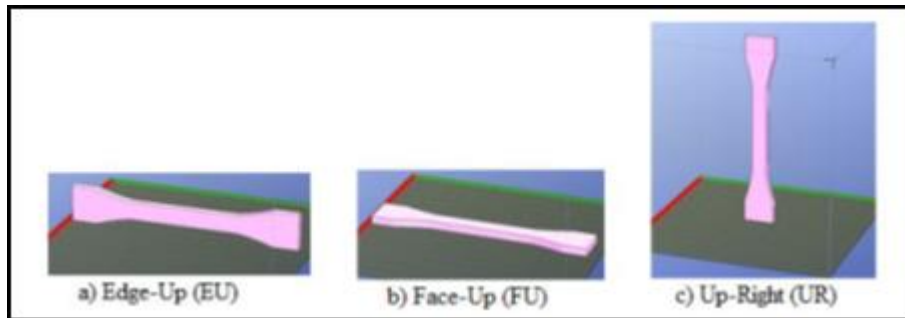


Figura 2.15: Orientaciones de las probetas: borde arriba (a), frente (b) y vertical (c) (Khuong et al., 2014).

Domingo-Espin et al. (2015) midieron el módulo elástico, la resistencia a tracción, límite elástico y coeficiente de Poisson de probetas de policarbonato fabricadas con un ángulo de filamentos de 45° y -45° , siguiendo la norma ASTM D638. Los resultados fueron utilizados para determinar una matriz de rigidez de un material ortotrópico equivalente.

Lanzotti, Grasso, Staiano y Martorelli (2015) estudiaron el efecto de variar el espesor de la capa, el ángulo de los filamentos y el número de capas del perímetro en probetas de PLA. Los especímenes se diseñaron a partir de la norma ASTM D638, se utilizó un radio mayor para evitar la ruptura adelantada, las dimensiones se muestran en la figura 2.16. Se midió el esfuerzo máximo y la elongación a la ruptura, los ángulos utilizados fueron 0° , 18° , 45° , 72° y 90° medidos desde el eje de carga.

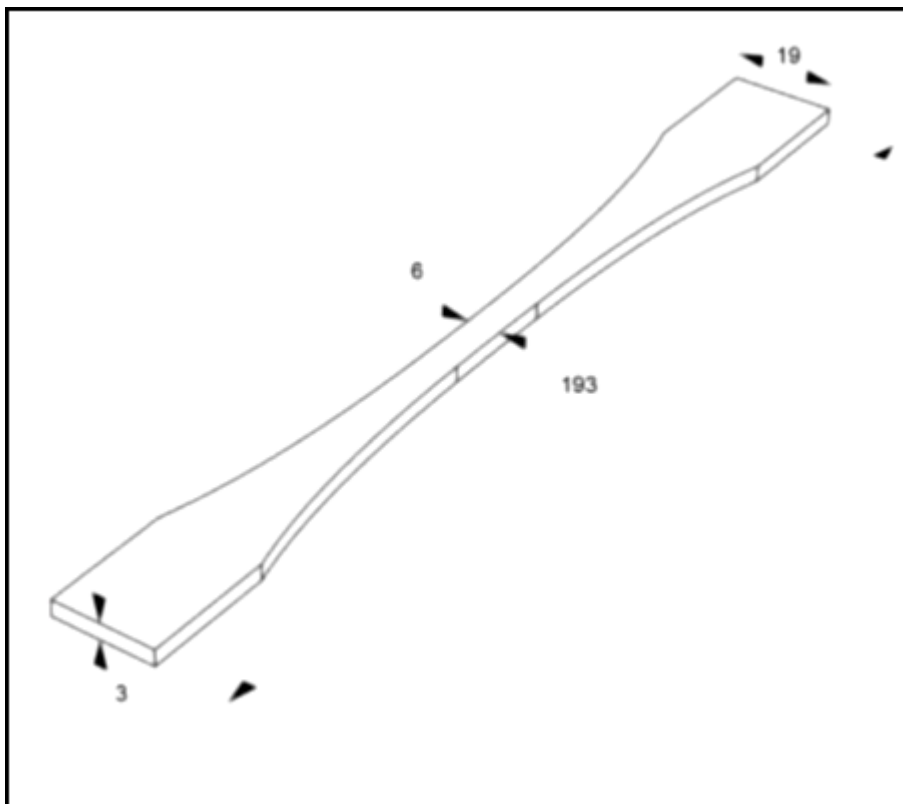


Figura 2.16: Espécimen modificado utilizado por Lanzotti et al. (2015) (dimensiones en mm).

Torrado y Roberson (2016) estudiaron el efecto de la geometría del espécimen y la orientación de impresión. Se compararon probetas tipo I, IV y V de la norma ASTM D638, impresas en ABS con orientación horizontal (0°) y vertical (90°), se midió el esfuerzo máximo y la elongación a la ruptura. El estudio mostró que las distintas geometrías tenían distintos resultados de las propiedades medidas.

Fernandez-Vicente et al. (2016) estudiaron el efecto del patrón y densidad del relleno en las propiedades mecánicas de probetas de ABS de acuerdo al estándar ISO 527, se midió el módulo elástico y el esfuerzo máximo en tracción. Utilizaron patrones cuadrado, hexagonal y lineal, y densidades de 10%, 50% y 100% como se muestra en la figura 2.17.

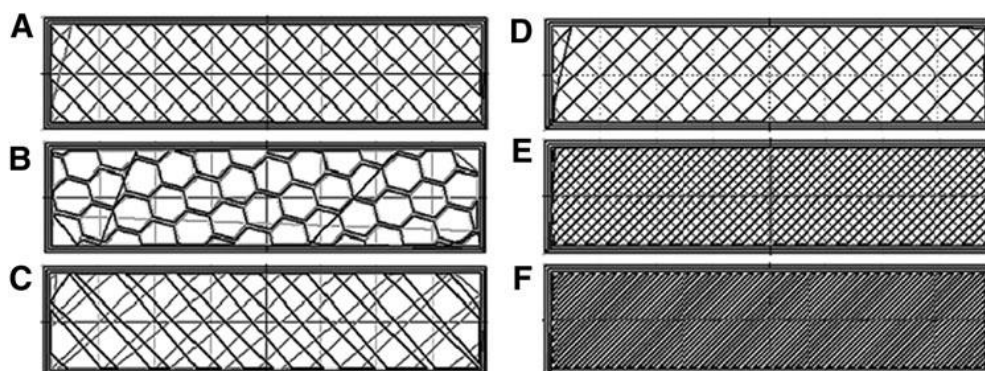


Figura 2.17: Patrones de relleno: cuadrículado (A), hexagonal (B), lineal (C), y densidades: 20% (D), 50% (E) y 100% (F) utilizados por Fernandez-Vicente et al. (2016).

Hernandez, Slaughter, Whaley, Tate, y Asiabanpour (2016) midieron el esfuerzo máximo y el límite de fluencia de probetas de ABS siguiendo el estándar ASTM D638, las probetas de tipo I fueron impresas en 5 orientaciones distintas como se muestra en la figura 2.18.

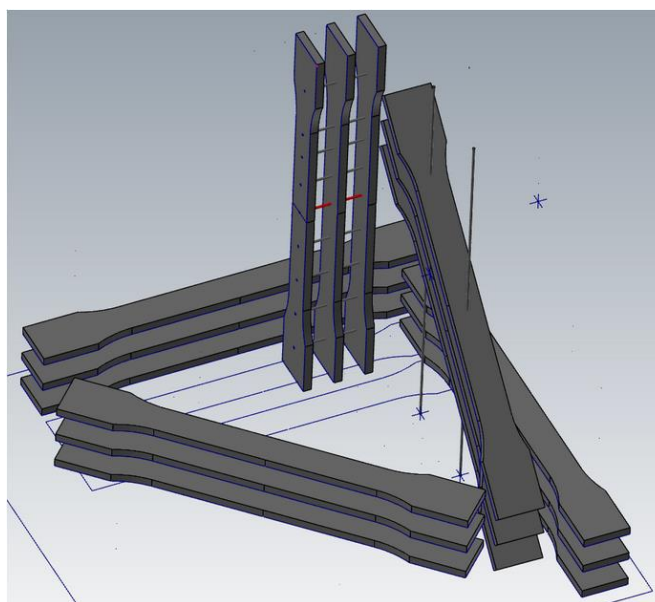


Figura 2.18: Orientaciones utilizadas por Hernandez et al. (2016).

Torres, Cole, Owji, DeMastry y Gordon (2016) estudiaron el efecto de cambiar la temperatura de impresión, la orientación de los filamentos, la densidad de relleno, la velocidad de impresión, la altura de la capa y el uso de capas exteriores o de perímetro en las propiedades mecánicas. Las probetas de PLA se imprimieron con orientación de frente, en el borde y vertical, de la misma manera que en el estudio de Khuong et al. Se utilizó el estándar ASTM D638, se midió el módulo elástico, el esfuerzo máximo a tracción y el límite de fluencia. En la figura 2.19 se muestran las dimensiones utilizadas.

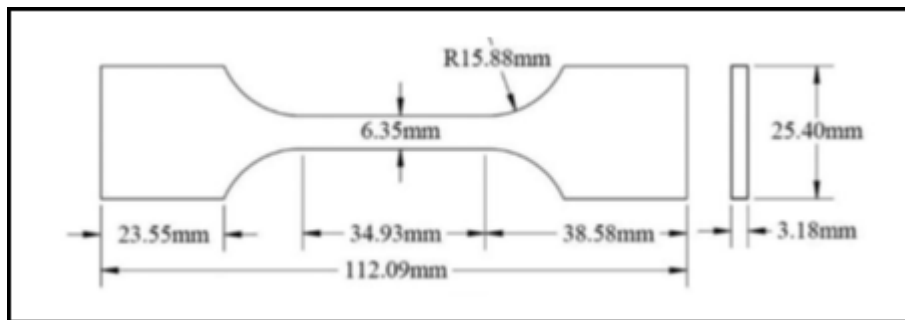


Figura 2.19: Dimensiones del espécimen utilizado por Torres et al. (2016).

Zou et al. (2016) estudiaron especímenes de ABS orientados en 0° , 30° , 45° , 60° y 90° medidos a partir de la dirección de carga, como se muestra en la figura 2.20. Se utilizó la norma ISO 527-2 y se midió el esfuerzo máximo, módulo elástico y coeficiente de Poisson.

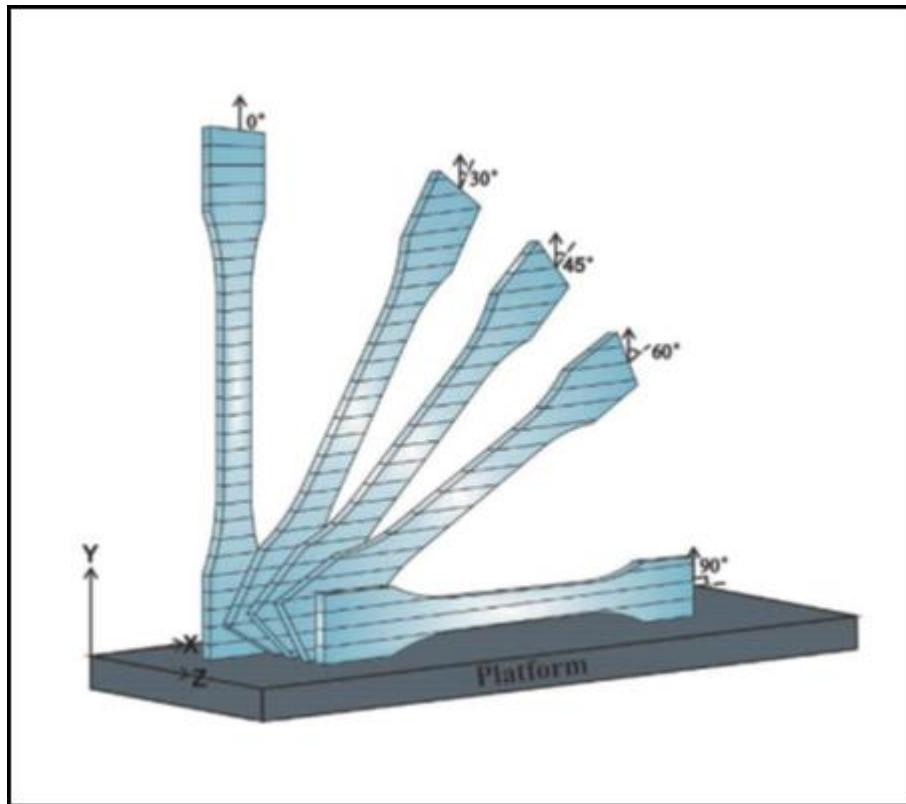


Figura 2.20: Orientaciones utilizadas por Zou et al. (2016).

Cantrell et al. (2017) realizaron un estudio de probetas de ABS y PC (policarbonato) con distintos ángulos de relleno y orientaciones de impresión. Las probetas fueron impresas de frente, con el borde arriba y verticales, los ángulos utilizados fueron $0^{\circ}/90^{\circ}$, $15^{\circ}/-75^{\circ}$, $30^{\circ}/-60^{\circ}$ y $45^{\circ}/-45^{\circ}$, la figura 2.21 muestra una ilustración con las orientaciones.

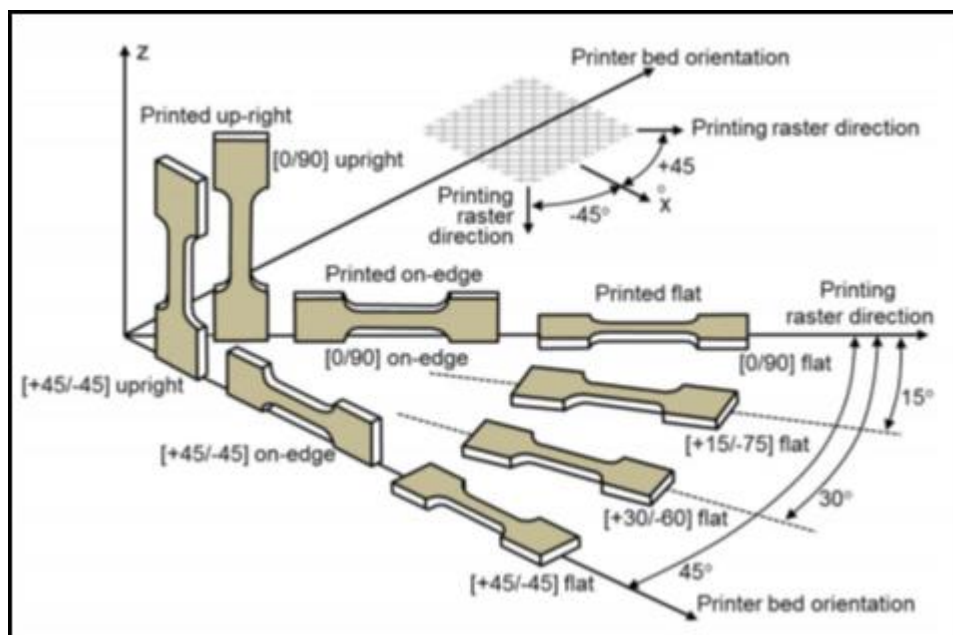


Figura 2.21: Orientaciones utilizadas por Cantrell et al. (2017).

Para el ensayo se siguió el estándar ASTM D638, se midió el coeficiente de Poisson, módulo elástico, esfuerzo máximo, límite elástico y elongación de ruptura.

Chacón et al. (2017) estudiaron el efecto de la orientación de impresión, el espesor de capa y la tasa de extrusión en el desempeño de probetas de PLA. El ensayo de tracción se llevó a cabo siguiendo el estándar ASTM D638. Se midió el módulo elástico, el esfuerzo máximo y la elongación a la ruptura. Las probetas se imprimieron de frente, con el borde hacia arriba y en vertical como se muestra en la figura 2.22.

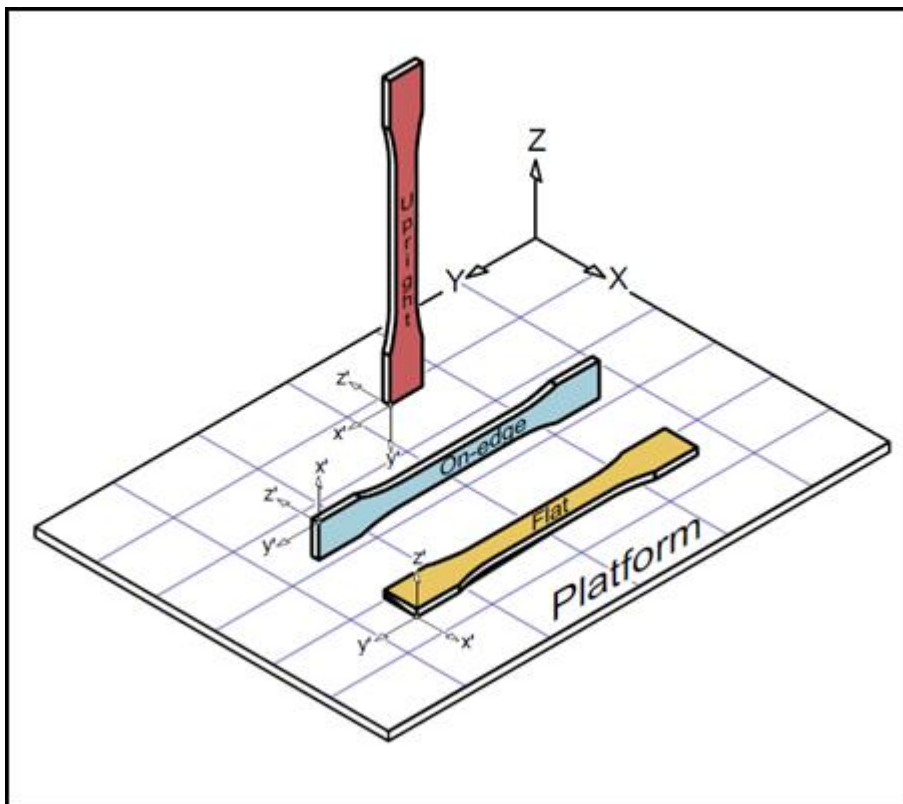


Figura 2.22: Orientaciones utilizadas por Chacón et al. (2017).

2.5.2. Compresión

El ensayo de compresión también es uno de los más importantes para determinar las propiedades mecánicas de un material. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los trabajos realizados con este ensayo con muestras fabricadas por deposición fundida.

Ahn, Montero, Odell, Roundy, y Wright (2002) fueron los primeros en estudiar el comportamiento mecánico de probetas fabricadas mediante deposición fundida bajo cargas de compresión. El ensayo se llevó a cabo siguiendo el estándar ASTM D695, según el cual las dimensiones son de 25,4 mm de alto y 12,7 mm de diámetro. Las muestras se imprimieron en dos orientaciones: horizontal y vertical. En la figura 2.23 se muestran los

especímenes testeados y sus orientaciones de impresión. El estudio reportó la resistencia a compresión y se encontró que las resistencias a tracción y compresión son distintas.

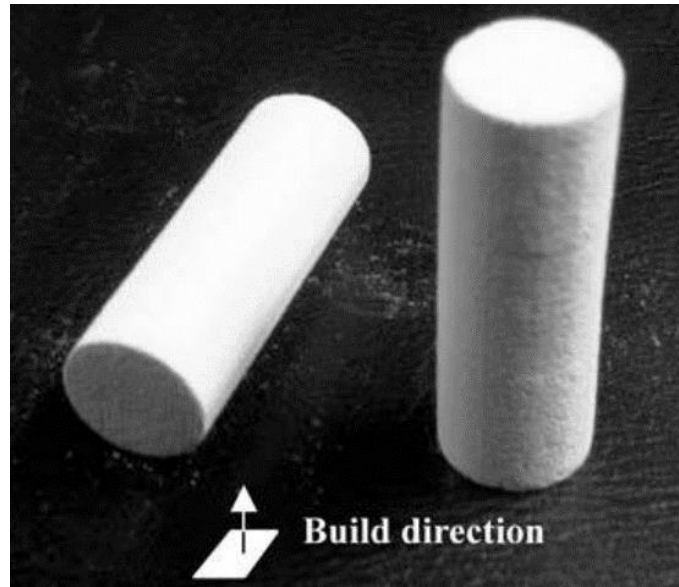


Figura 2.23: Orientación de impresión de los especímenes de compresión: horizontal (izquierda) y vertical (derecha) utilizados por Ahn et al. (2002).

Lee, Kim, Kim, y Ahn (2007) estudiaron probetas a compresión fabricadas por tres métodos distintos de impresión 3D, deposición fundida, sinterización por láser selectiva y sistema de deposición de nanocompuestos (NCDS) que fue desarrollado por ellos. Las dimensiones de los especímenes fueron acorde a la norma ASTM D695, las probetas fueron fabricadas en dos orientaciones: horizontal y vertical.

Sood, Ohdar, y Mahapatra (2012) realizaron ensayos para optimizar las configuraciones de impresión con el fin de maximizar la resistencia a compresión. Para lograr esto, crearon una matriz de prueba que consta de ajustes alto, medio y bajo para la orientación de impresión, el ancho de la capa, el ángulo de los filamentos, el ancho de la línea de filamento y la distancia entre líneas de filamento. Se probaron muestras impresas con 0° , 15° y 30° medidos desde base de impresión. Y con ángulos de la trama de filamentosas

de 0° , 30° y 60° . Todos los ensayos se realizaron con muestras cuadradas prismáticas con una dimensión de 10 mm de lado y 30 mm de alto, utilizando el estándar ISO 604-1973.

Guessasma, Belhabib, Nouri, y Ben Hassana (2016) estudiaron la resistencia de cubos de ABS a compresión. Se imprimieron cubos de 30 mm de lado utilizando un relleno ortogonal intercalado. Los cubos se imprimieron en orientación girada de 0° , 30° , 45° y 60° alrededor del eje z de la impresora como se muestra en la figura 2.24. No se utilizó ningún estándar de prueba durante los experimentos. Se midió el límite elástico y el módulo elástico. Se realizó el estudio de las probetas mediante imágenes de rayos X. Esto dio una mirada profunda a los huecos y grietas en múltiples secciones transversales de los cubos ensayados.

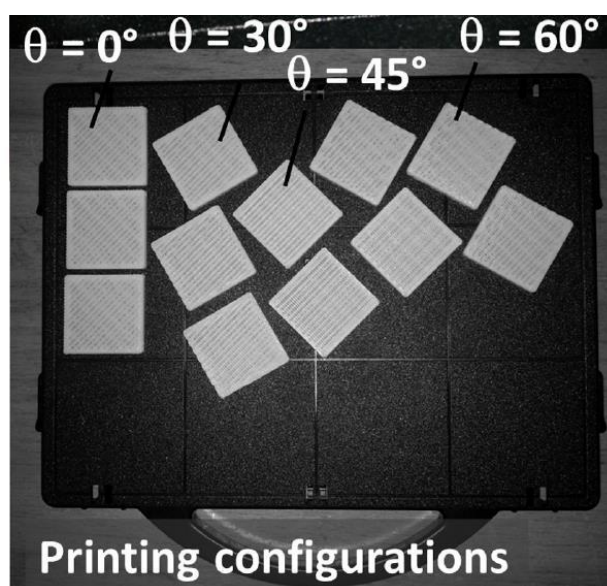


Figura 2.24: Orientación de las probetas utilizadas por Guessasma et al. (2016).

Hernandez et al. (2016) midieron el módulo elástico y el esfuerzo máximo en probetas de compresión siguiendo la norma ASTM D695. Las muestras de ABS fueron impresas en 5 orientaciones distintas, de la misma manera que el ensayo de tracción realizado en este estudio, las orientaciones se muestran en la figura 2.18 (pág. 35).

2.5.3. Flexión

Es-Said et al. (2000) midieron el esfuerzo máximo de probetas de ABS en un ensayo de flexión de 3 puntos. Las muestras fueron impresas con 5 ángulos distintos de la trama del filamento, el ensayo se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM D790.

Sood et al. (2010) estudiaron el efecto de la altura de capa, ancho de línea, espacio entre filamentos, ángulo de los filamentos y orientación de impresión en muestras de ABS, siguiendo el estándar ISO R178:1975. Se midió la resistencia a la flexión en un ensayo de flexión de 3 puntos. Se utilizaron orientaciones de 0° , 15° y 30° en el plano de la base (XY) y se utilizaron ángulos de trama de 0° , 30° y 60° con respecto al eje X.

Hernandez et al. (2016) midieron el módulo de flexión para comparar distintas orientaciones de impresión. Realizaron el ensayo de flexión de 4 puntos siguieron la norma ASTM D790. Las muestras de ABS fueron impresas en 5 orientaciones distintas, de la misma manera que el ensayo de tracción realizado en este estudio, las orientaciones se muestran en la figura 2.18.

Chacón et al. (2017) estudiaron el efecto de la orientación de impresión, el espesor de capa y la tasa de extrusión en el desempeño de probetas de PLA. El ensayo de flexión de 3 puntos se llevó a cabo siguiendo el estándar ASTM D790, se calculó el módulo elástico. Las probetas se imprimieron de frente, con el borde hacia arriba y en vertical, de manera similar al ensayo de tracción como se muestra en la figura 2.22.

2.5.4. Modelamiento

Bertoldi et al. (1998) utilizaron resultados de trabajos experimentales previos en piezas fabricadas por deposición fundida de ABS, para determinar la matriz de rigidez y los coeficientes de expansión térmica para un material ortotrópico equivalente. De manera similar a una matriz estándar de un compuesto polimérico, asumieron que las partes impresas pueden ser lineales, elásticas y ortotrópicas.

Li et al. (2002) realizaron un análisis teórico y experimental para establecer un modelo constitutivo elástico. Se trató al material como un compuesto laminado, encontrando propiedades para cada lámina de 0° o 90° y luego construyendo la matriz de rigidez con ellas. El modelo fue evaluado con experimentos unidireccionales y ortogonales.

Rodríguez, Thomas, y Renaud (2003) centraron su estudio en la mesoestructura y el comportamiento de las piezas finales, buscando una macroestructura con una respuesta equivalente promedio. Las muestras unidireccionales se modelarán como un material homogéneo, ortotrópico y elástico lineal. En la figura 2.25 se muestran imágenes de la mesoestructura de las muestras y en la figura 2.26 una malla utilizada para el modelamiento.

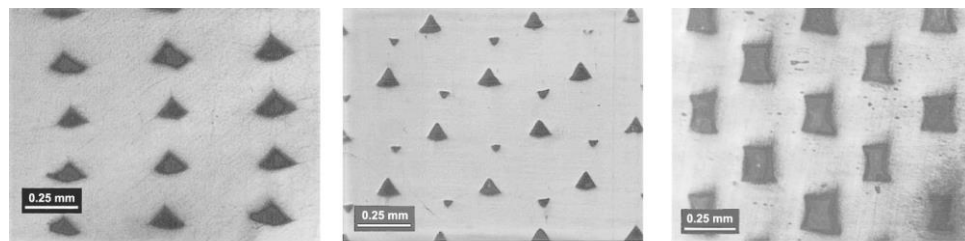


Figura 2.25: Imágenes de mesoestructura utilizadas por Rodríguez et al. (2003).

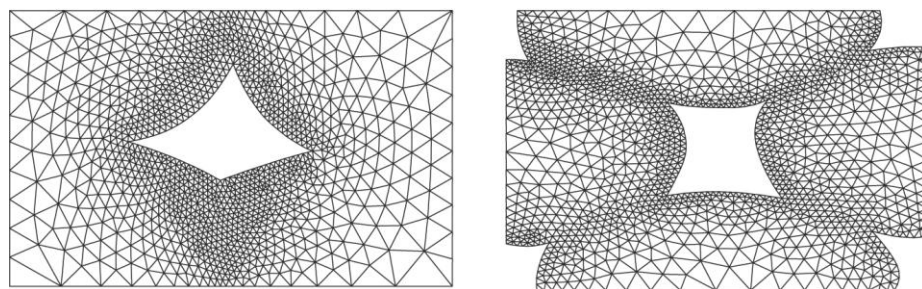


Figura 2.26: Malla realizada por Rodríguez et al. (2003).

Domingo-Espin et al. (2015) realizaron ensayos de tracción de probetas de policarbonato impresas en distintas direcciones para determinar constantes mecánicas que definen una matriz de rigidez, basada en el modelo elástico de material ortótropo unimodular. Luego, utilizaron el modelo para simular una viga en forma de L, como se muestra en la figura 2.27.

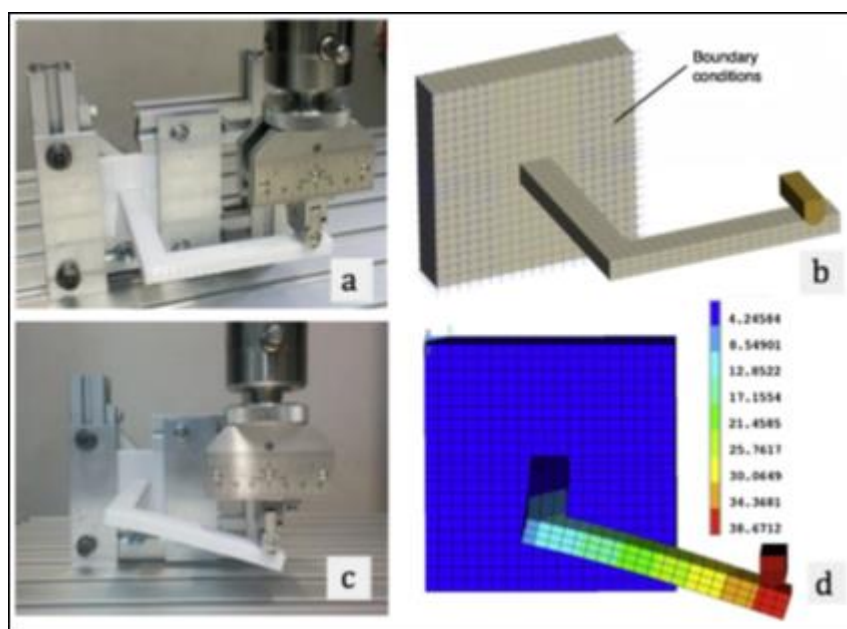


Figura 2.27: Componente estudiado por Domingo-Espin et al. (2015).

Garg y Bhattacharya (2017) realizaron un análisis de elementos finitos (EF) en profundidad sobre el comportamiento de las piezas de ABS impresas con ángulos de relleno de 0° , 90° y alternados entre 0° y 90° y con tres diferentes alturas de capa. Para su validación experimental, realizaron ensayos de tracción. Utilizaron el estándar ASTM D638. No se informaron propiedades mecánicas específicas. Los mecanismos de falla predichos por la simulación de EF se compararon con los mecanismos de falla observados.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el fin de definir e implementar un modelo que describa el comportamiento mecánico en el rango elástico de piezas fabricadas mediante impresión 3D, se han llevado a cabo ensayos de tracción, compresión y flexión de probetas construidas por este método. A continuación, se describen los elementos utilizados y el proceso de modelado, fabricación y ensayo de las muestras.

3.1. Impresora y materiales

La fabricación de las piezas se realizó mediante impresión 3D, con la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). Dentro de este tipo de impresión existe una gran variedad de impresoras. En este trabajo se utilizaron dos, la Makerbot modelo Replicator 2X y la Mbot modelo GridII, ambas son impresoras de bajo costo de tipo doméstico.

Los materiales utilizados en este estudio fueron el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y el PLA (ácido poliláctico). Estos materiales son los más comunes en la impresión por deposición fundida no industrial. El ABS es el plástico más utilizado en la impresión 3D, presenta gran resistencia, suele encontrarse en electrodomésticos y juguetes. No es biodegradable y durante la extrusión emite vapores tóxicos. Su temperatura de trabajo va entre 230°C y 245°C, además presenta gran contracción térmica por lo que es recomendable utilizar una superficie caliente al imprimir. El PLA es un termoplástico bioactivo y biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de mandioca y caña de azúcar. Su temperatura de impresión esta entre los 190°C y los 200°C.

3.2. Pruebas mecánicas

En este trabajo se realizaron ensayos de tracción, compresión y flexión. Éstos fueron realizados en una máquina de pruebas universal de la marca Test Resources, la cual se

muestra en la figura 3.1, se encuentra ubicada en el Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad Adolfo Ibáñez, en la ciudad de Viña del Mar. Esta máquina posee una celda de carga con una capacidad máxima de 8800 N para ensayos estáticos y 5000N para ensayos de fatiga.

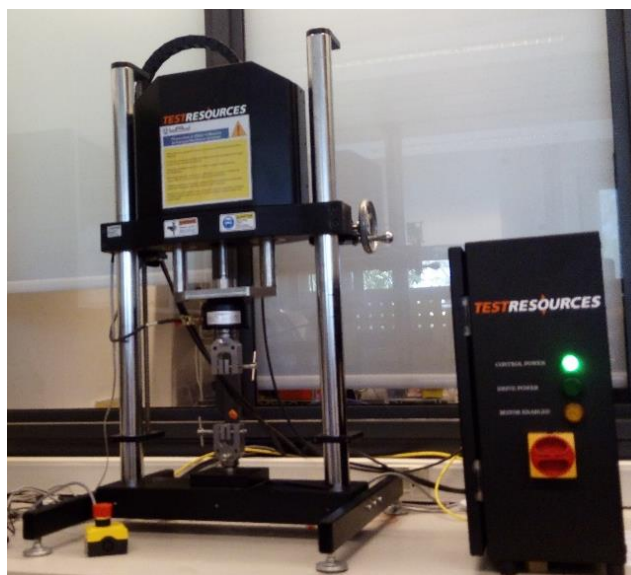


Figura 3.1: Máquina de ensayos universal marca Test Resources utilizada en este estudio.

Para cada ensayo se dispuso de dispositivos específicos en los actuadores de la máquina: mordazas para tracción, platos para compresión y dispositivo con apoyos ajustables para flexión de 4 puntos, estos dispositivos se muestran en las imágenes a continuación.

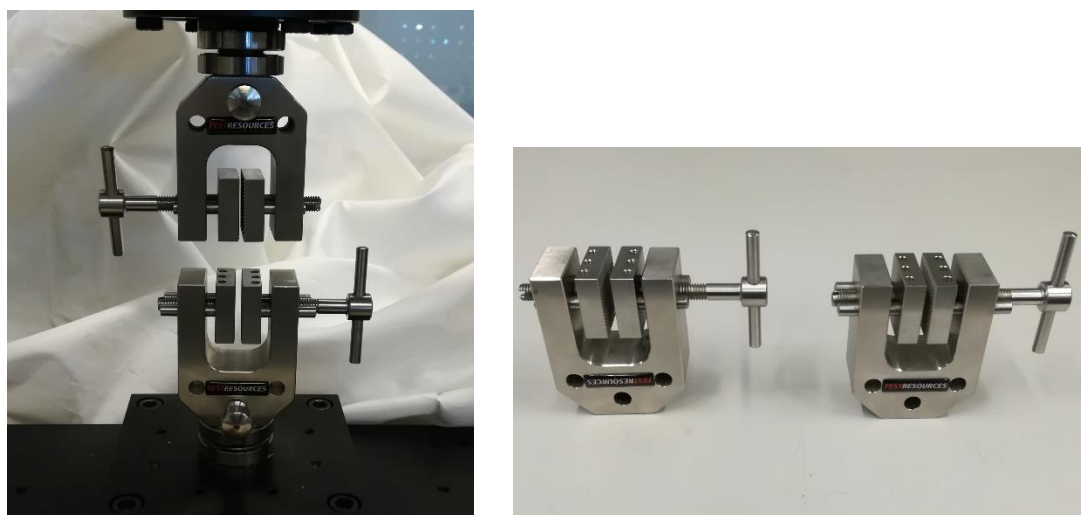


Figura 3.2: Mordazas para ensayo de tracción, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).

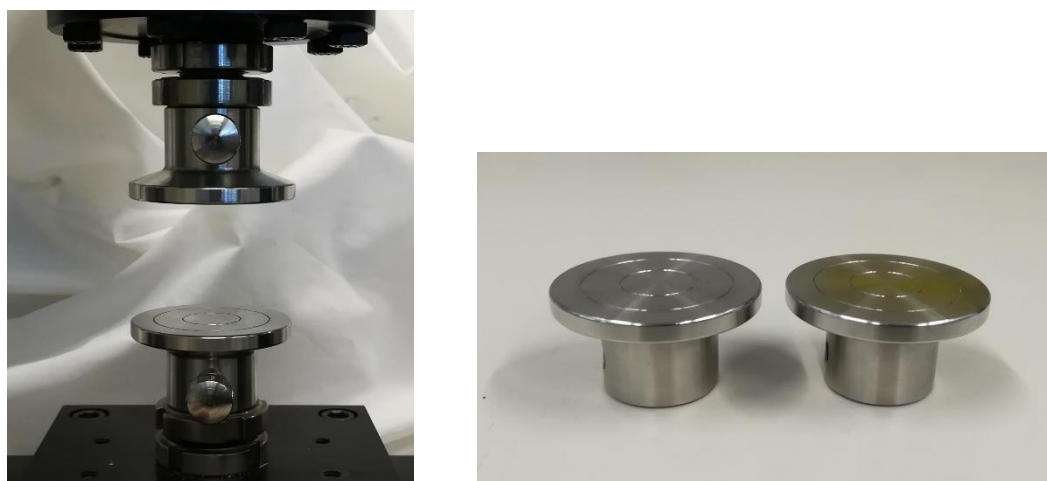


Figura 3.3: Platos para ensayo de compresión, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).



Figura 3.4: Apoyos para ensayo de flexión de cuatro puntos, ajustados a la máquina (izquierda) y separados (derecha).

Se midió la fuerza y el desplazamiento efectuados en cada ensayo. Debido a la dificultad para fijar el extensómetro disponible a las probetas, este registro se llevó a cabo con los datos entregados por la máquina, que corresponden al desplazamiento del cabezal. Además, se supone que para estos materiales por ser considerados poco rígidos en comparación con los de la máquina de ensayo, se puede evaluar la deformación de manera precisa con el desplazamiento de los cabezales de la máquina. El ensayo de compresión se realizó sin utilizar lubricante en los apoyos.

3.3. Modelado, fabricación y ensayo

Para crear el modelo 3D de las probetas para los tres ensayos se utilizó el programa Inventor de Autodesk (Inventor profesional, 2016). Las geometrías creadas fueron determinadas siguiendo las especificaciones de las normas ASTM D638 para tracción, ASTM D695 para compresión y ASTM D6272 para flexión, las cuales pueden ser utilizadas para especímenes fabricados por deposición fundida (Forster, 2015). Para tracción se utilizó la probeta tipo V ya que en la literatura se reportaron fallas prematuras y concentración de tensiones en el cuello de la probeta de tipo I. Las dimensiones se muestran en la figura 3.5.

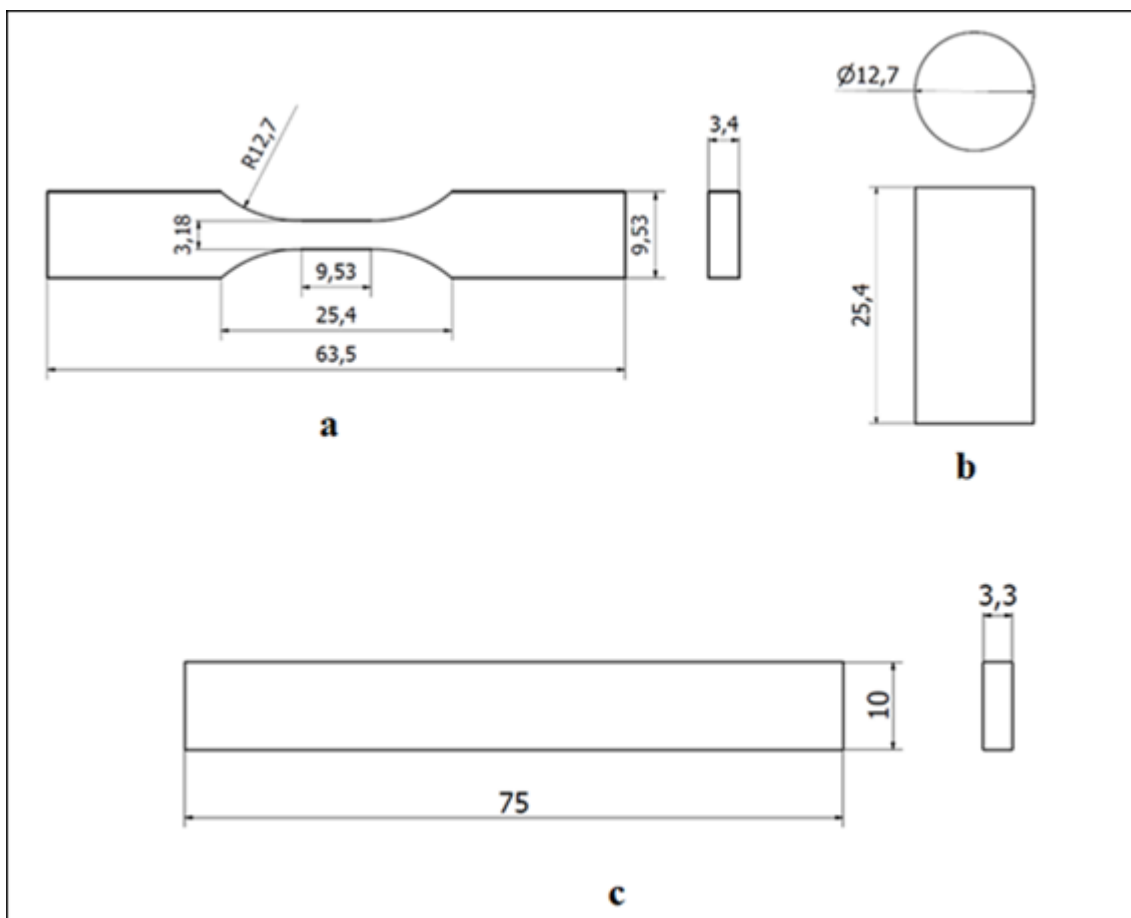


Figura 3.5: Dimensiones (en mm) de las probetas de tracción (a), compresión (b) y flexión (c).

Los objetos 3D se exportan en formato STL (*Standard Triangle Language*) que guarda únicamente la geometría del modelo y es el utilizado por los controladores de cada impresora. En éstos se abre el objeto, se posiciona virtualmente en el espacio de construcción y se establecen todos los parámetros de la impresión. Luego el programa genera el código con la configuración seleccionada y divide el objeto 3D en capas finas, creando la ruta para construirlo capa por capa. Diversos estudios han demostrado que los parámetros de impresión afectan las propiedades mecánicas de la pieza final, y

especialmente la orientación en la que se imprime el objeto (Chacón et al., 2017; Fernandez-Vicente et al., 2016; Khuong et al., 2014; Zou et al., 2016). En este trabajo se mantuvieron los parámetros de impresión predefinidos por el fabricante y se utilizó un relleno de 100% para poder estudiar el material en su mayor densidad. También se hizo un estudio previo con probetas de 15% que se puede ver en el anexo A. Se estudió la orientación de la impresión variando dos direcciones: 0° horizontal y 90° vertical, como se muestra en la figura 3.6. Los parámetros utilizados y sus valores se muestran en la tabla 3.1.

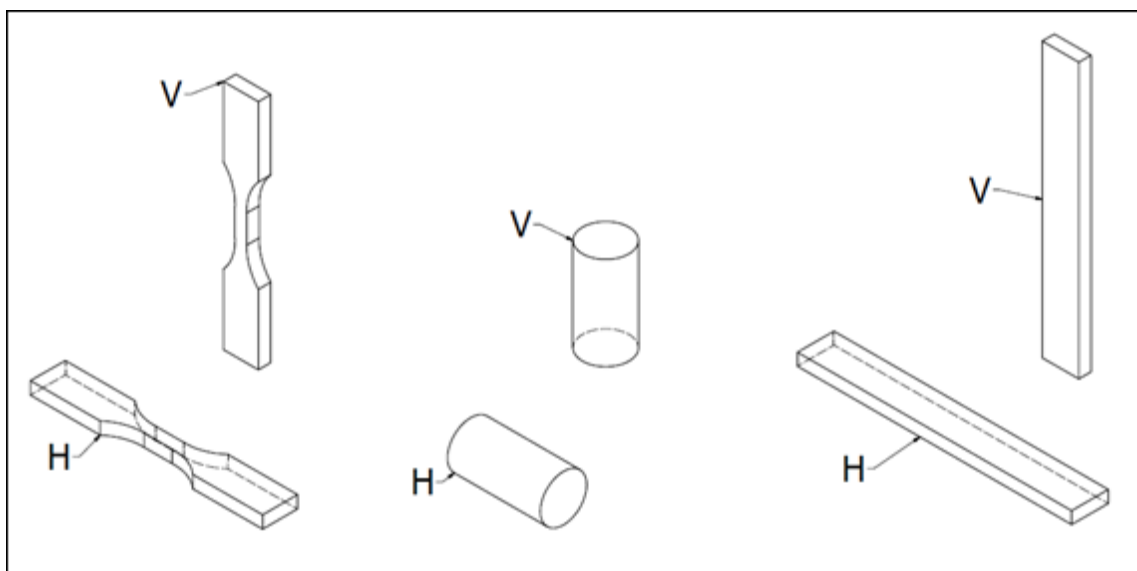


Figura 3.6: Representación gráfica de probetas de ensayo a tracción impresas en orientación horizontal (H) y vertical (V).

Tabla 3.1: Parámetros de fabricación utilizados para cada impresora.

Parámetro	Impresora ABS	Impresora PLA
Altura de la capa de relleno	0,15 mm	0,15 mm
Densidad de relleno	100%	100%
Patrón de relleno	Hexagonal	Hexagonal
Diámetro del filamento	1,75 mm	1,75 mm
Número de capas de revestimientos	2	2
Velocidad de impresión	90 mm/s	100 mm/s
Temperatura de la plataforma	110°C	Temperatura ambiente (23°C)
Temperatura del extrusor	230°C	210°C

En la fabricación de las probetas se utilizaron dos impresoras, una para cada material estudiado. Para los objetos de ABS se utilizó la impresora marca Makerbot cuyo programa es el Makerbot desktop, para el PLA se utilizó la marca Mbot cuyo programa es el Mprint. Para ambas impresoras se usaron filamentos de 1,75 mm de la marca MCI electronics. Con estos programas se genera el código con los parámetros y la orientación del objeto y se guarda en una memoria externa SD que luego se inserta en la impresora. El número de muestras fabricadas establecido por el estándar ASTM para cada ensayo es de 5 por cada configuración. En la que se distinguen tres ensayos, dos materiales y dos orientaciones, es decir, se tendrá un total de 60 probetas. Las 30 probetas impresas en PLA se muestran en la figura 3.7.

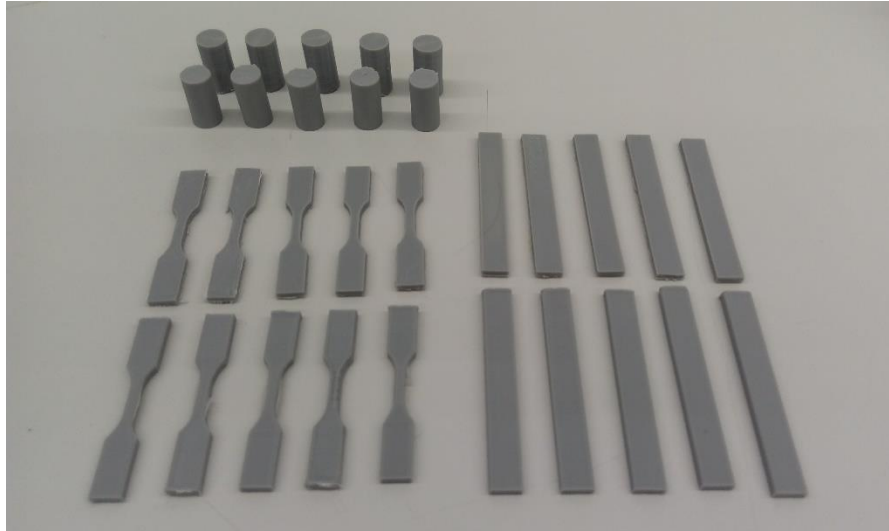


Figura 3.7: Probetas de PLA para ensayos de tracción, compresión y flexión impresas en 2 orientaciones.

Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente y con las tasas de carga definidas de acuerdo a la norma respectiva de cada ensayo, siendo de $5 \frac{mm}{min}$ para tracción, $1,3 \frac{mm}{min}$ para compresión y $2 \frac{mm}{min}$ para flexión. Para el cálculo de la tasa de carga del ensayo de flexión se utilizó la siguiente fórmula dispuesta en la norma ASTM D6272.

$$R = 0,185 \frac{ZL^2}{d} \quad (12)$$

Donde $Z = 0,01$, L es la distancia entre los soportes inferiores (60mm) y d el espesor de la probeta (3,3 mm). Además, para la flexión se ajustaron las distancias de los apoyos del cabezal siguiendo el estándar de la norma, como se muestra en el esquema de la figura 3.8.

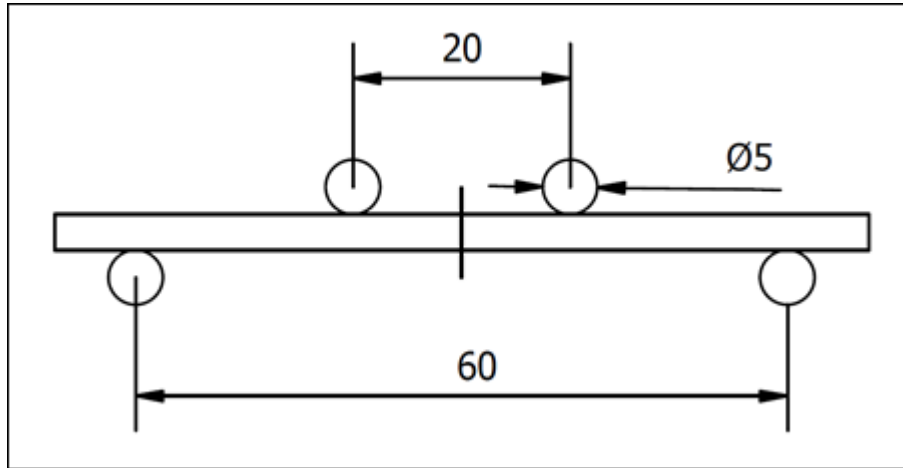


Figura 3.8: Esquema de los apoyos del ensayo de flexión (dimensiones en mm).

3.4. Resultados

Con las mediciones de carga y desplazamiento de los ensayos de tracción y compresión se calcularon las curvas de esfuerzo-deformación ingenieril, de donde se obtuvo el módulo de elasticidad y las tensiones de fluencia y máxima para cada probeta, para el ensayo de flexión se calculó la relación de rigidez. Las deformaciones que presentaron las muestras fueron pequeñas por lo que la deformación real e ingenieril son muy similares. Se consideró al esfuerzo de fluencia a aquel en el cual se aprecia un cambio importante en la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación desde la zona de deformaciones elásticas.

El promedio de los datos de cada propiedad se calculó con la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (13)$$

Para la estimación de la desviación estándar s , se utilizó la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} \quad (14)$$

Luego, para verificar la significancia de resultados similares o con gran desviación estándar se calculó el intervalo de confianza con un nivel de confianza de 95% mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{x} \pm \frac{t_{0,975}}{\sqrt{n}} s \quad (15)$$

El valor de $t_{0,975}$ referido en la ISO 2854 de interpretación estadística de resultados para 5 especímenes es $t_{0,975} = 2,776$.

3.4.1. Tracción

A partir de las mediciones de carga y desplazamiento del ensayo de tracción se calcularon las curvas de esfuerzo-deformación, de donde se obtuvo el módulo de elasticidad y las tensiones de fluencia y máxima para cada probeta.

Para obtener el valor del módulo de elasticidad en tracción se calculó la pendiente del gráfico de esfuerzo-deformación en la zona elástica lineal. Ésta se consideró en la parte más recta de la curva. Para la tensión de fluencia se consideró el esfuerzo en el cual se aprecia un cambio notorio en la pendiente de la curva luego de la zona de deformaciones elásticas, se utilizó este criterio debido a que al comienzo de la curva existe una zona no lineal de acomodamiento

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de tracción del ABS y PLA. En Figura 3.9, se muestran las curvas de esfuerzo-deformación del plástico ABS, para probetas horizontales (H) y verticales (V). En tabla 3.2 se muestran los valores obtenidos de estas curvas para el ABS a tracción.

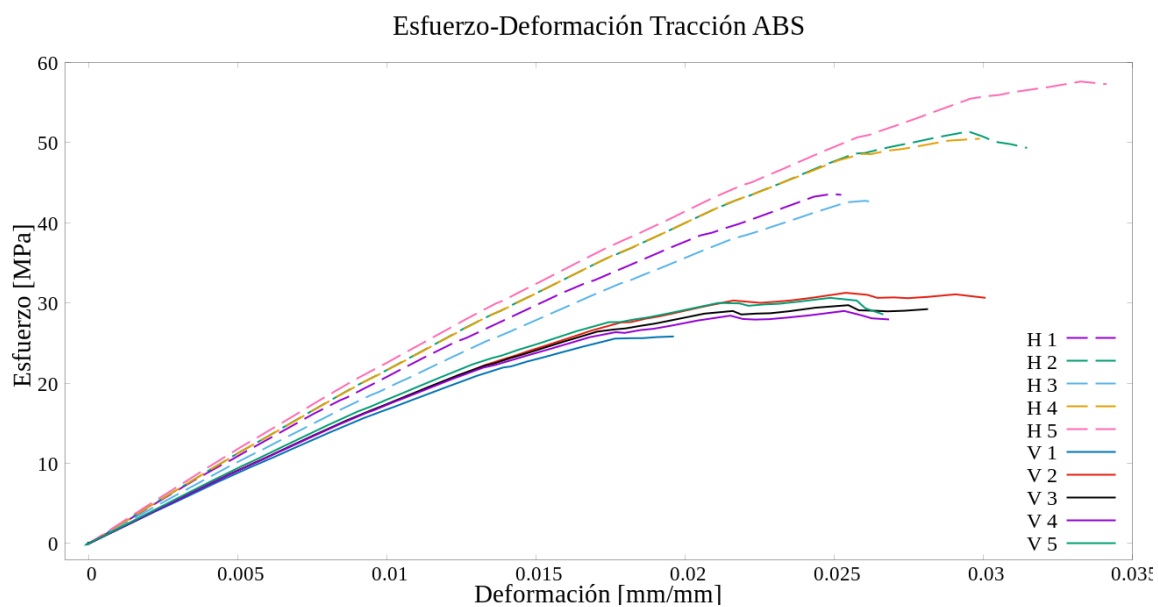


Figura 3.9: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de ABS a tracción.

Tabla 3.2: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción de ABS.

ABS				
Orientación	Probeta	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
H	1	2122,7	31,52	44,3
	2	2186,1	36,3	51,4
	3	1942,7	33,01	42,7
	4	2187,7	35,86	50,5
	5	2226,8	32,25	57,6
	Promedio	2133,2	33,8	49,3
	<i>s</i>	112,8	2,2	6,0
V	1	1772,6	16,2	25,8
	2	1789,4	17,45	31,3
	3	1825,4	16,23	29,7
	4	1776,7	15,9	29
	5	1860,7	16,88	30,6
	Promedio	1804,9	16,5	29,3
	<i>s</i>	37,5	0,6	2,1

A continuación, se muestran las curvas de esfuerzo-deformación para el plástico PLA, para probetas horizontales y verticales. En la tabla 3.3 se muestran los valores obtenidos de estas curvas para el PLA.

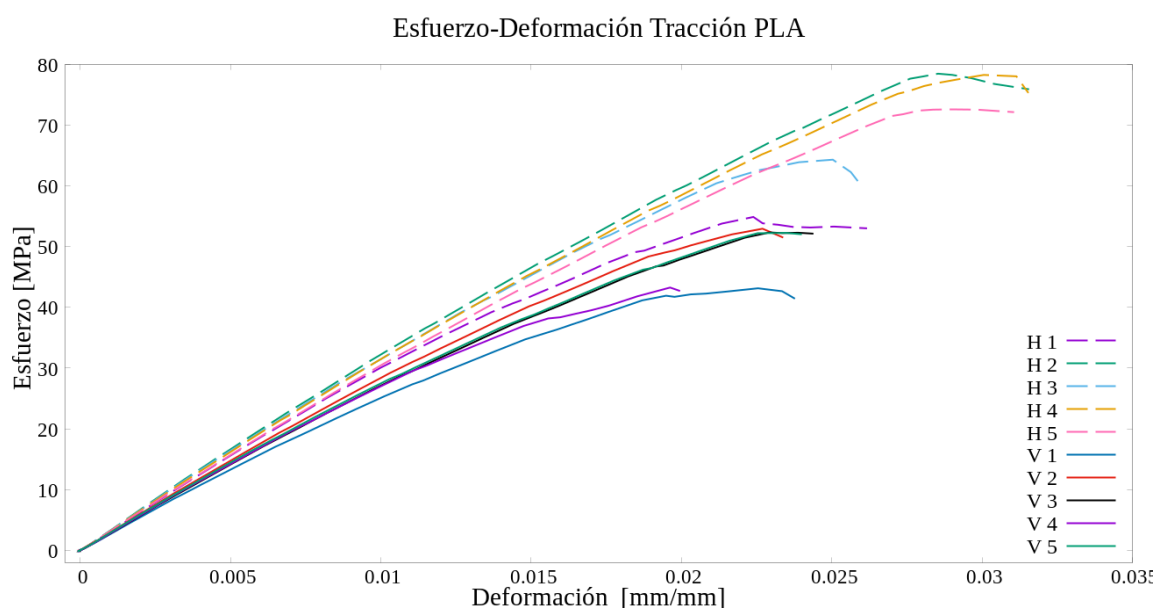


Figura 3.10: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de PLA a tracción.

Tabla 3.3: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción de PLA.

PLA				
Orientación	Probeta	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
H	1	2969,0	31,6	46,1
	2	3220,1	50,5	78,5
	3	3207,9	49,1	64,3
	4	3167,5	53,2	78,3
	5	3029,6	54,2	72,6
	Promedio	3118,8	47,7	68,0
	s	112,9	9,2	13,5
V	1	2661,8	29,3	43,1
	2	2839,5	33,0	53,0
	3	2774,0	32,0	52,3
	4	2775,1	30,5	55,8
	5	2828,1	31,5	52,3
	Promedio	2775,7	31,3	51,3
	s	70,4	1,4	4,8

En la tabla 3.4 y figura 3.11 podemos ver los resultados promedio obtenidos para ambos materiales y orientaciones en el ensayo de tracción.

Tabla 3.4: Resultados promedio del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a tracción.

Material	Orientación	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
ABS	Horizontal	$2133 \pm 140,0$	$33,8 \pm 2,7$	$49,3 \pm 7,4$
	Vertical	$1805 \pm 46,5$	$16,5 \pm 0,8$	$29,3 \pm 2,6$
PLA	Horizontal	$3119 \pm 140,1$	$47,7 \pm 11,5$	$68,0 \pm 16,8$
	Vertical	$2776 \pm 87,3$	$31,3 \pm 1,8$	$51,3 \pm 5,9$

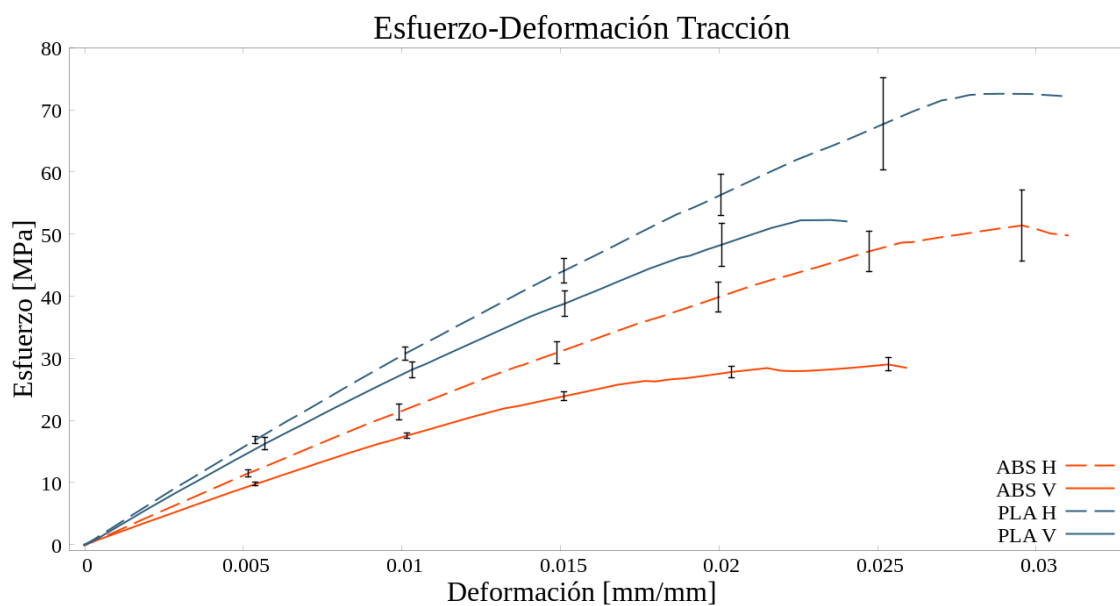


Figura 3.11: Curvas de tensión – deformación de probetas a tracción.

A continuación, se muestra la comparación de los resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima para los dos plásticos y para cada orientación.

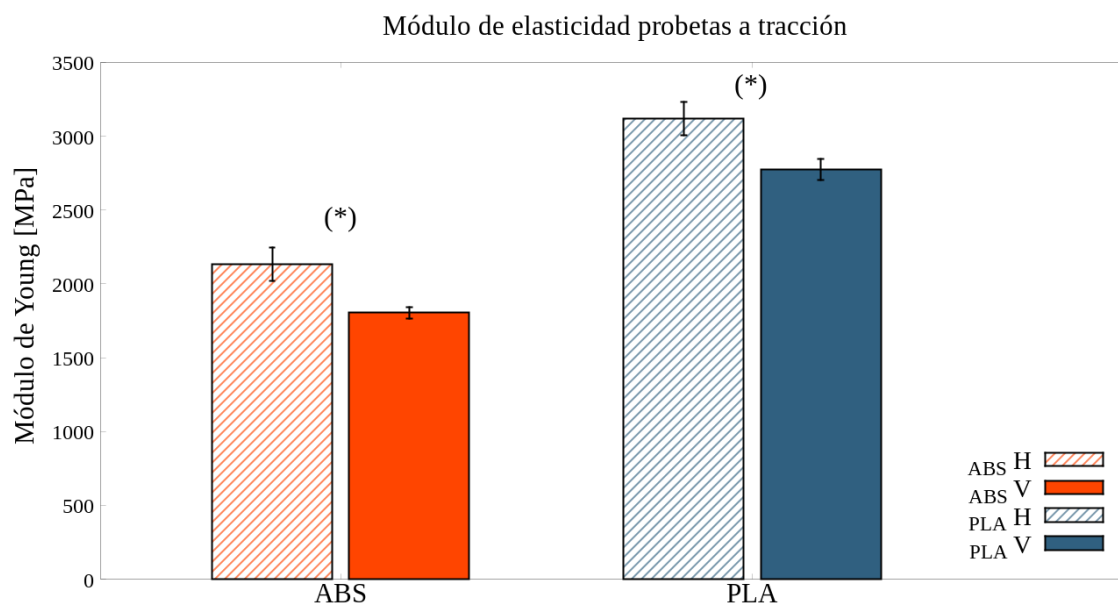


Figura 3.12: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a tracción.

(*) p-valor < 0,05.

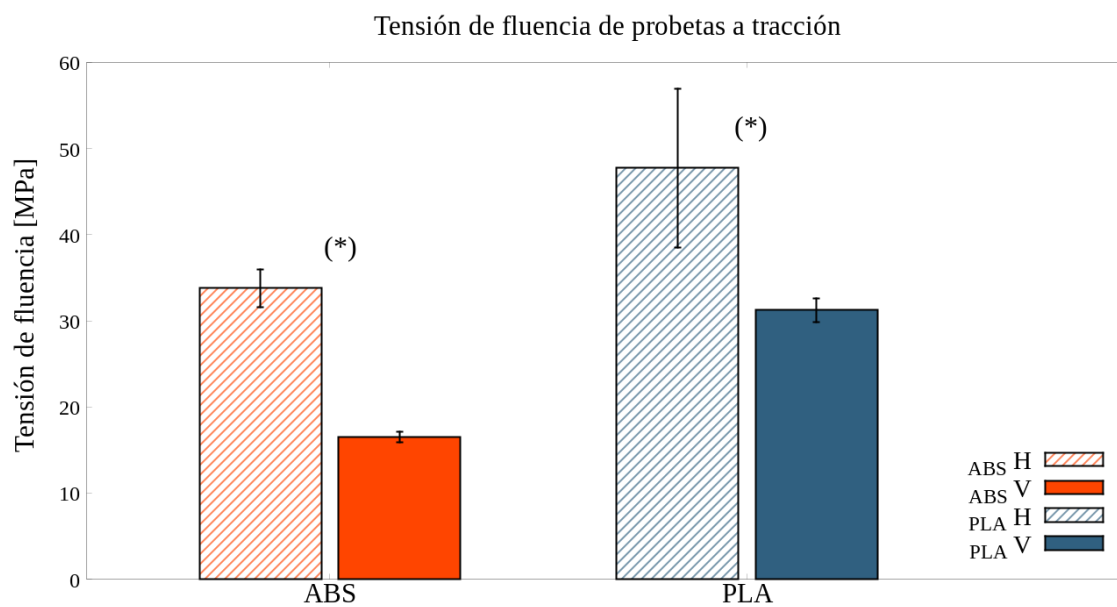


Figura 3.13: Gráfico de los valores de la tensión de fluencia para probetas a tracción.

(*) p-valor < 0,05.

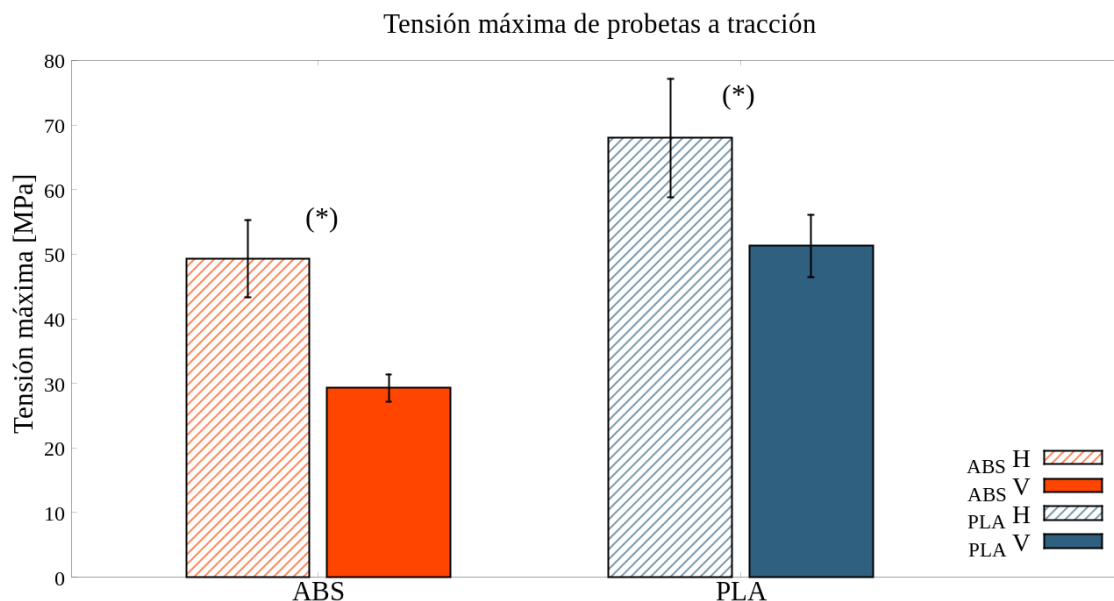


Figura 3.14: Gráfico de los valores de la tensión máxima para probetas a tracción.

(*) p-valor < 0,05.

En estos resultados se puede ver que la orientación tiene un efecto importante y marcado en el desempeño de las probetas a tracción y que ambos materiales tienen distinto comportamiento mecánico. Además, para la orientación de las probetas impresas horizontalmente tuvieron un valor mayor de módulo de Young, límite de fluencia y resistencia máxima. El módulo elástico para las probetas horizontales fue mayor en un 18% para el ABS y en un 12% para el PLA, el límite de fluencia fue mayor en un 104,4% para el ABS y en un 52,7% para el PLA y la resistencia máxima fue mayor en un 68,4% para el ABS y en un 32,4% para el PLA. Podemos ver que la orientación de las probetas afecta más al plástico ABS, que tuvo mayores diferencias para todos los parámetros. El origen de las diferencias tan notoria entre las orientaciones de impresión se encuentra en la forma en que se fabrican los objetos por deposición fundida. En el proceso se generan 2 tipos de uniones: la que existe en el mismo filamento que sale del extrusor y la que se produce entre cada uno de ellos. Se supone que la unión entre capa y capa es más débil que la que hay dentro de un mismo hilo de plástico debido a que en la primera, la capa

antigua ya está sólida cuando se agrega la siguiente y entre ellas existen singularidades y porosidad, mientras que un mismo filamento solidifica continuamente y es homogéneo. En las probetas horizontales los filamentos quedan intercalados en diagonal a la dirección de carga, por lo que reciben la mayor parte de ésta, mientras que en las verticales los filamentos quedan perpendiculares y la carga la reciben los filamentos radialmente y la unión entre ellos. Estas uniones sirven como un camino para la propagación de grietas que acelera la ruptura. En la figura 3.15 se muestra un esquema del corte transversal de probetas a tracción.

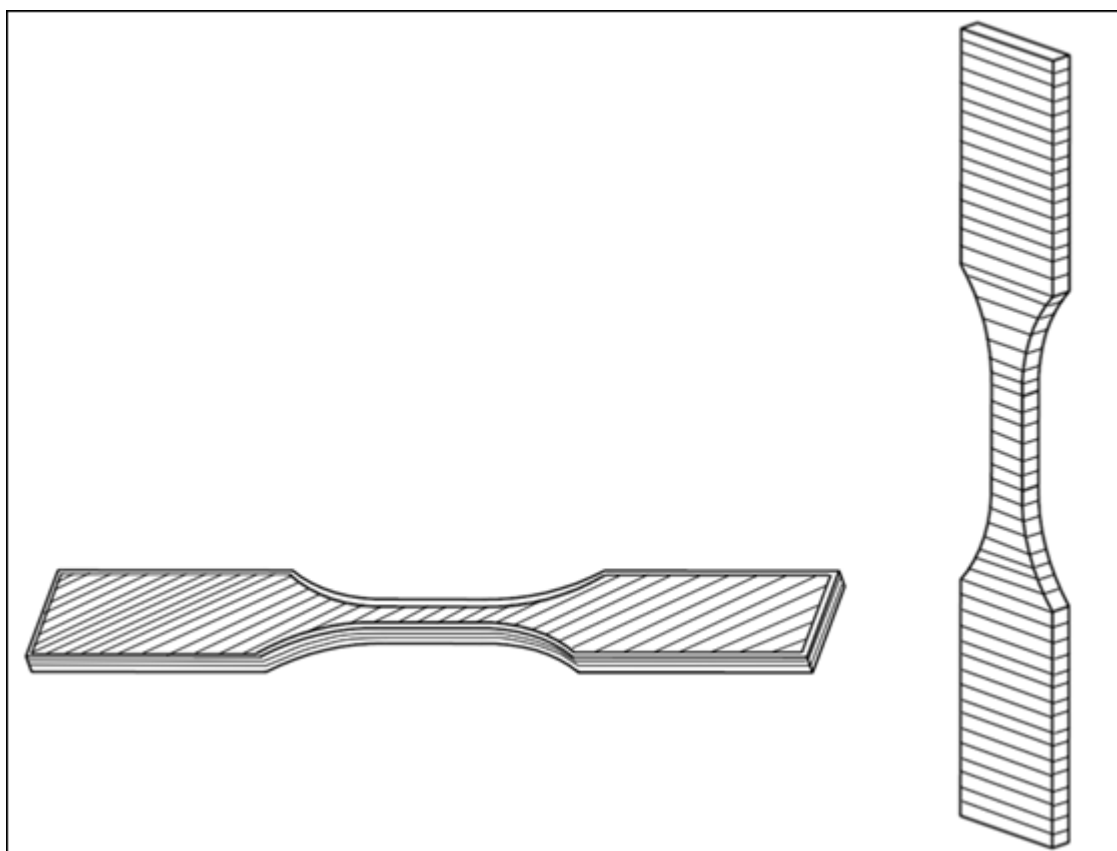


Figura 3.15: Esquema de corte transversal de probetas de tracción construidas en orientación horizontal (izquierda) y vertical (derecha).

Podemos ver señales del comportamiento descrito en el siguiente conjunto de imágenes, en la figura 3.16. En éstas se ven probetas de PLA horizontales y verticales luego de la ruptura. Las probetas de ABS tienen la misma estructura y presentaron el mismo tipo de ruptura, pero debido a su color negro no se pudo obtener buenas imágenes para las probetas de tracción.

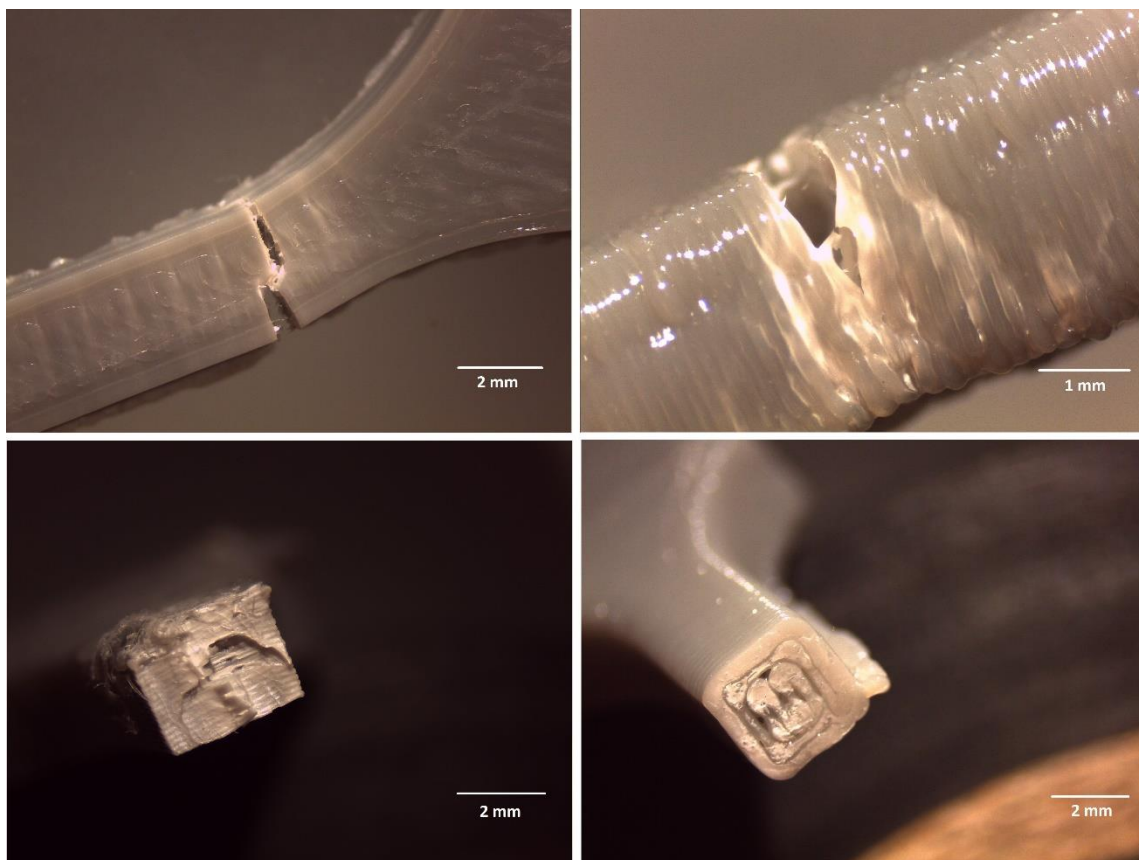


Figura 3.16: Probetas de PLA horizontales (izquierda) y verticales (derecha) después de la ruptura a tracción.

Podemos ver que, en las probetas horizontales, a la izquierda, el plástico parece desgarrado, en la imagen superior izquierda se ve que la ruptura no es plana, mientras que en las verticales, a la derecha, se pueden ver claramente las capas separadas.

Esta característica de la fabricación por deposición fundida puede afectar más al ABS debido a su mayor temperatura de trabajo, ya que existe una mayor diferencia de temperatura entre la nueva capa y la antigua, generando una peor unión entre ellas. Se observa que el PLA resulta más rígido y más resistente que el ABS, con valores mayores para ambas orientaciones.

3.4.2. Compresión

Con las mediciones de carga y desplazamiento del ensayo de compresión se calcularon las curvas de esfuerzo-deformación, de donde se obtuvo el módulo de elasticidad y las tensiones de fluencia y máxima para cada probeta. Los desplazamientos fueron pequeños y no se apreció abarilamiento en las probetas.

Para obtener el valor del módulo de elasticidad en compresión se calculó la pendiente del gráfico de esfuerzo y deformación en la zona elástica. Esta al igual que en tracción se consideró en la parte más recta de la curva, ya que en el comienzo la curva crece lentamente. Para la tensión de fluencia se consideró el esfuerzo en el cual se aprecia un cambio notorio en la pendiente de la curva luego de la zona de deformaciones elásticas, se utilizó este criterio debido a que al comienzo de la curva existe una zona no lineal de acomodamiento.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de compresión del ABS y PLA. En Figura 3.17 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación del plástico ABS a compresión. En la tabla 3.5 se muestran los valores obtenidos de estas curvas para el ABS.

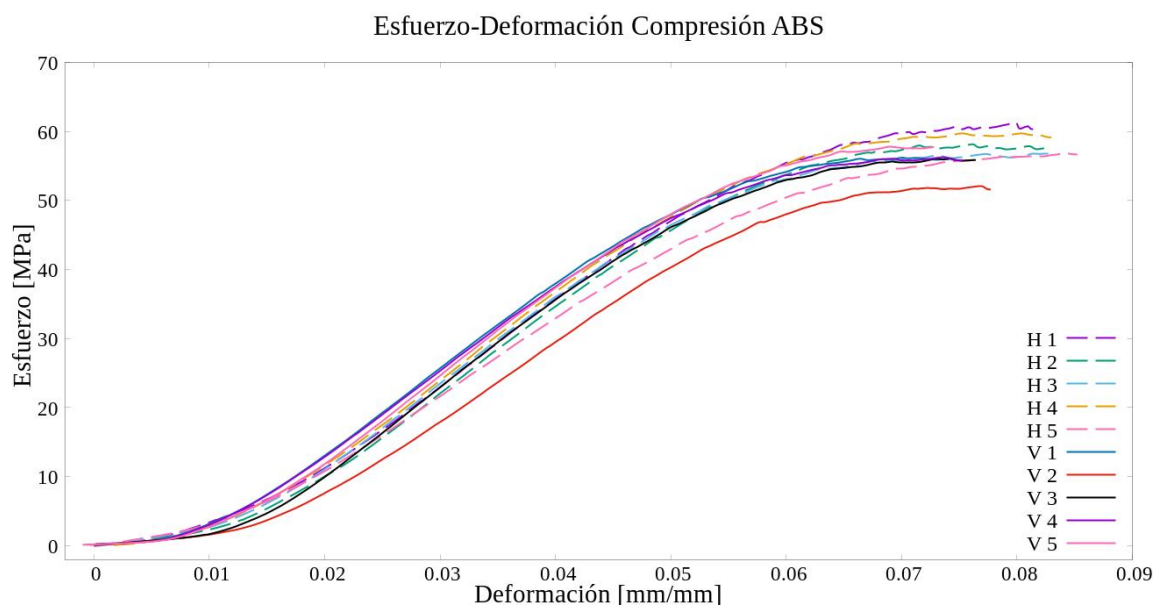


Figura 3.17: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de ABS a compresión.

Tabla 3.5: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión de ABS.

ABS				
Orientación	Probeta	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
H	1	1258	39,7	61,3
	2	1284	37,1	58,2
	3	1279	41,0	63,1
	4	1305	43,0	62,0
	5	1117	41,7	62,5
	Promedio	1249	40,5	61,4
	<i>s</i>	75,4	2,3	1,9
V	1	1285	38,1	56,2
	2	1128	40,1	54,3
	3	1313	33,2	56,3
	4	1221	34,8	56,2
	5	1262	39,4	57,8
	Promedio	1242	37,1	56,1
	<i>s</i>	72,1	3,0	1,2

Se presentan a continuación los resultados para el plástico PLA, en la figura 3.18 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación a compresión para ambas orientaciones. En la tabla 3.6 se muestran los valores obtenidos de estas curvas para el PLA.

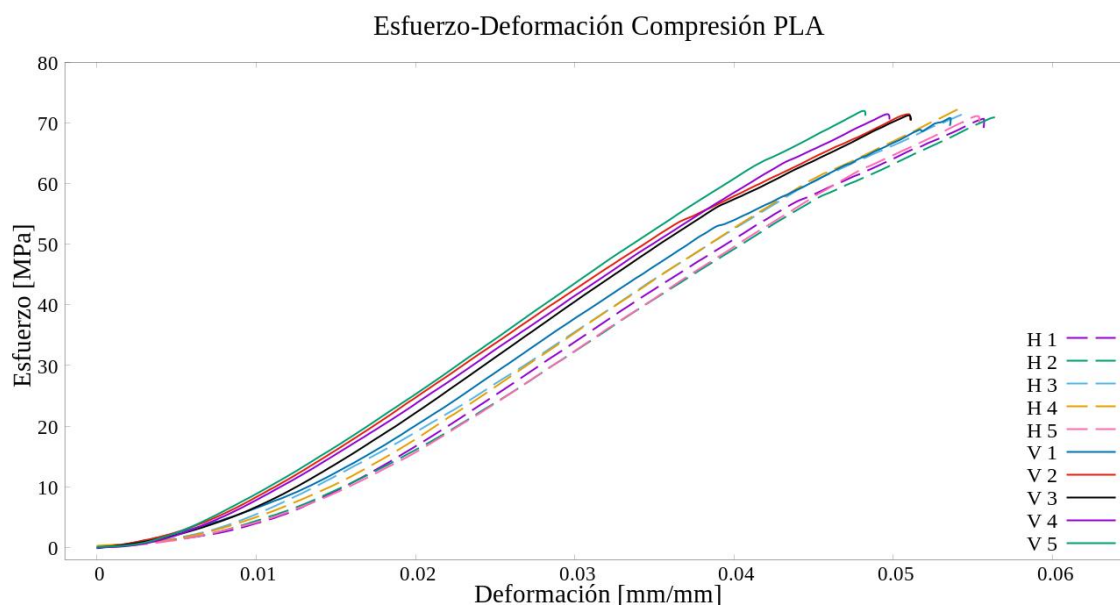


Figura 3.18: Gráfico de curvas esfuerzo-deformación de ensayo de PLA a compresión.

Tabla 3.6: Resultados del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión de PLA.

PLA				
Orientación	Probeta	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
H	1	1723,0	55,0	71
	2	1721,0	47,5	71
	3	1721,3	55,8	71
	4	1776,7	50,4	71
	5	1743,0	50,0	71
	Promedio	1737,0	51,7	71
	<i>s</i>	24,0	3,5	0
V	1	1780,0	48,0	71
	2	1789,8	54,0	71
	3	1823,5	55,0	71
	4	1745,3	53,2	71
	5	1721,5	53,2	71
	Promedio	1772,0	52,7	71
	<i>s</i>	39,7	2,7	0

En la tabla 3.7 y figura 3.19 se muestran los resultados promedio obtenidos para el ensayo de compresión para ambos materiales y orientaciones.

Tabla 3.7: Resultados promedio del módulo de elasticidad, tensión de fluencia y tensión máxima a compresión.

Material	Orientación	Módulo elástico MPa	Tensión de fluencia MPa	Tensión máxima MPa
ABS	Horizontal	1248 ± 93,7	40,5 ± 2,8	61,4 ± 2,4
	Vertical	1241 ± 89,5	37,1 ± 3,7	56,1 ± 1,5
PLA	Horizontal	1737 ± 29,8	51,7 ± 4,4	71,0
	Vertical	1772 ± 49,3	52,7 ± 3,4	71,0

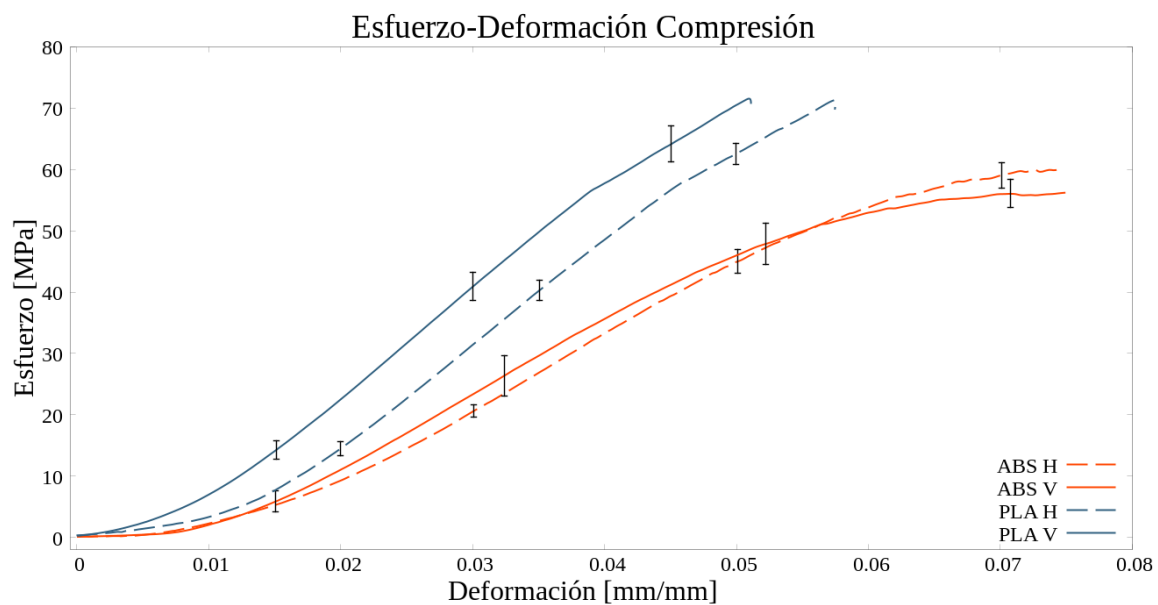


Figura 3.19: Curvas de tensión – deformación de probetas a compresión.

En las figuras a continuación se muestra la comparación de estos resultados para compresión.

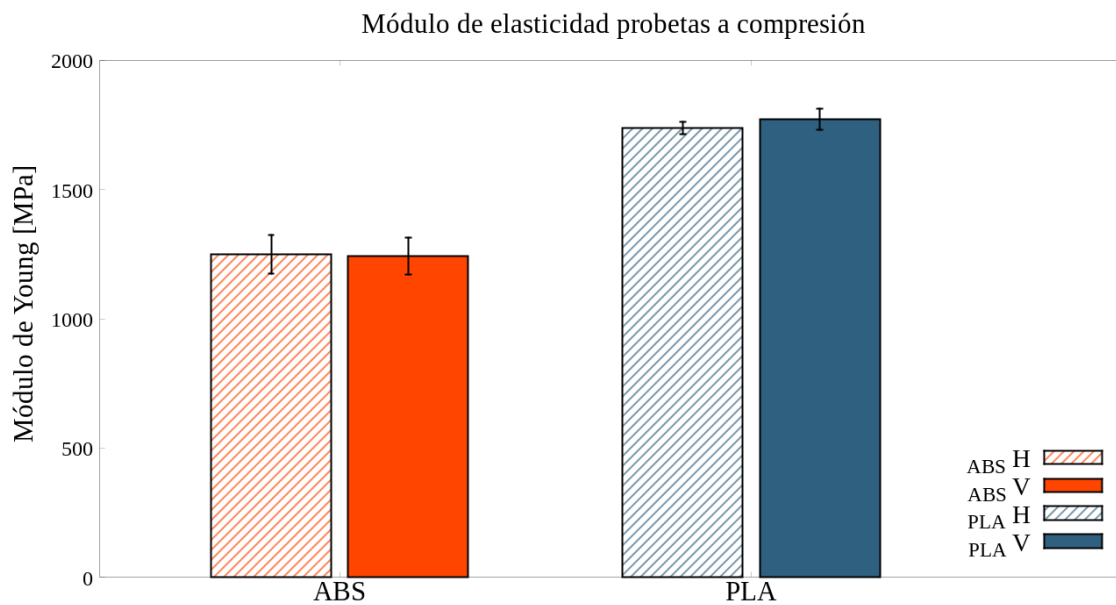


Figura 3.20: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a compresión.

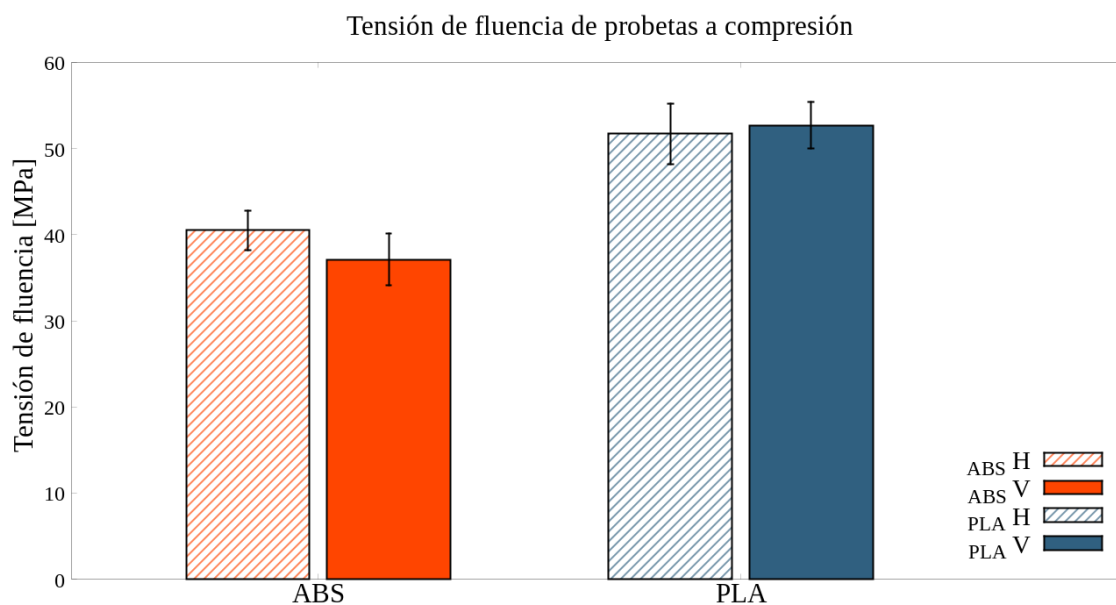


Figura 3.21: Gráfico de los valores de la tensión de fluencia para probetas a compresión.

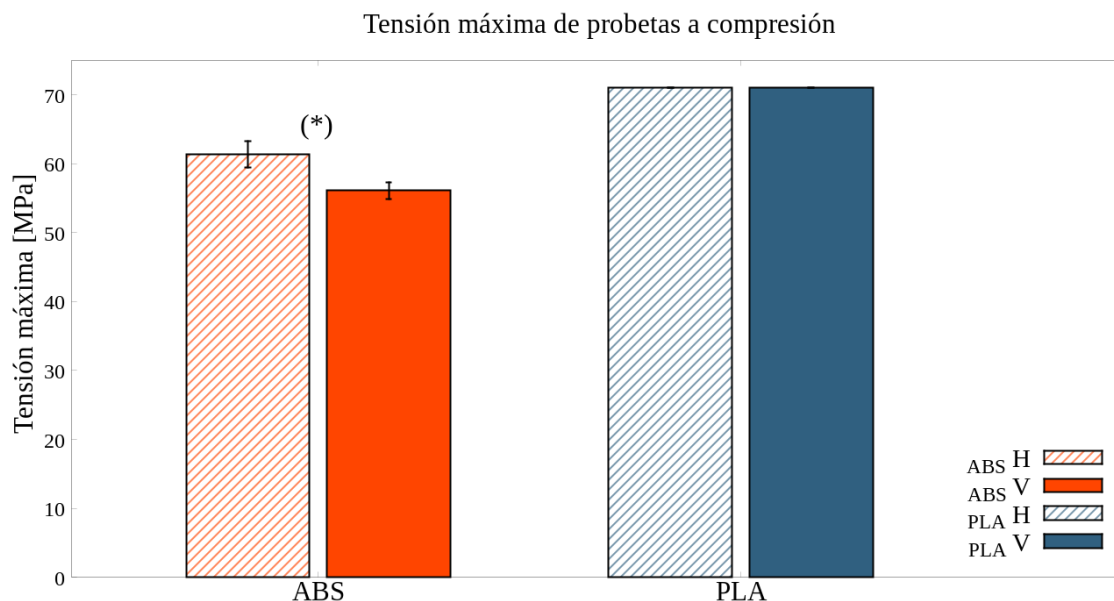


Figura 3.22: Gráfico de los valores del módulo de elasticidad para probetas a compresión. (*) p-valor <0,05.

En estos resultados se puede ver que, a diferencia de las probetas a tracción, la orientación de impresión no tiene un efecto importante en el desempeño de las probetas en compresión. El módulo elástico para las probetas horizontales fue mayor en un 0,56% para el ABS y menor en un 4,63% para el PLA, el límite de fluencia fue mayor en un 9,16% para el ABS y menor en un 1,9% para el PLA y la resistencia máxima fue mayor en un 9,4% para el ABS, el PLA llegó a la máxima capacidad de la máquina antes de fallar por lo que no fue posible conocer el efecto de la orientación en su esfuerzo máximo. Aun cuando se aprecia una pequeña diferencia en los resultados, estos con un nivel de confianza de 95% no pueden ser considerados significativos. Por lo que no se puede decir que la orientación tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas de probetas a compresión para orientaciones de impresión de 0° y 90° con una densidad de relleno de 100%. Con la variación de otros parámetros este resultado podría variar.

En el ensayo de compresión las fuerzas que mantienen al cilindro sin fallar son las de unión entre filamentos, ya que el grupo de filamentos solos no opone resistencia a la

compresión. Esta fuerza es muy similar para los cilindros en ambas orientaciones y es por esto que las diferencias son tan menores en comparación con el comportamiento a tracción. Las diferencias vienen dadas por la geometría en que se imprimen, en la figura 3.23 se muestra un esquema de ambas probetas en corte que explica cómo son en su interior.

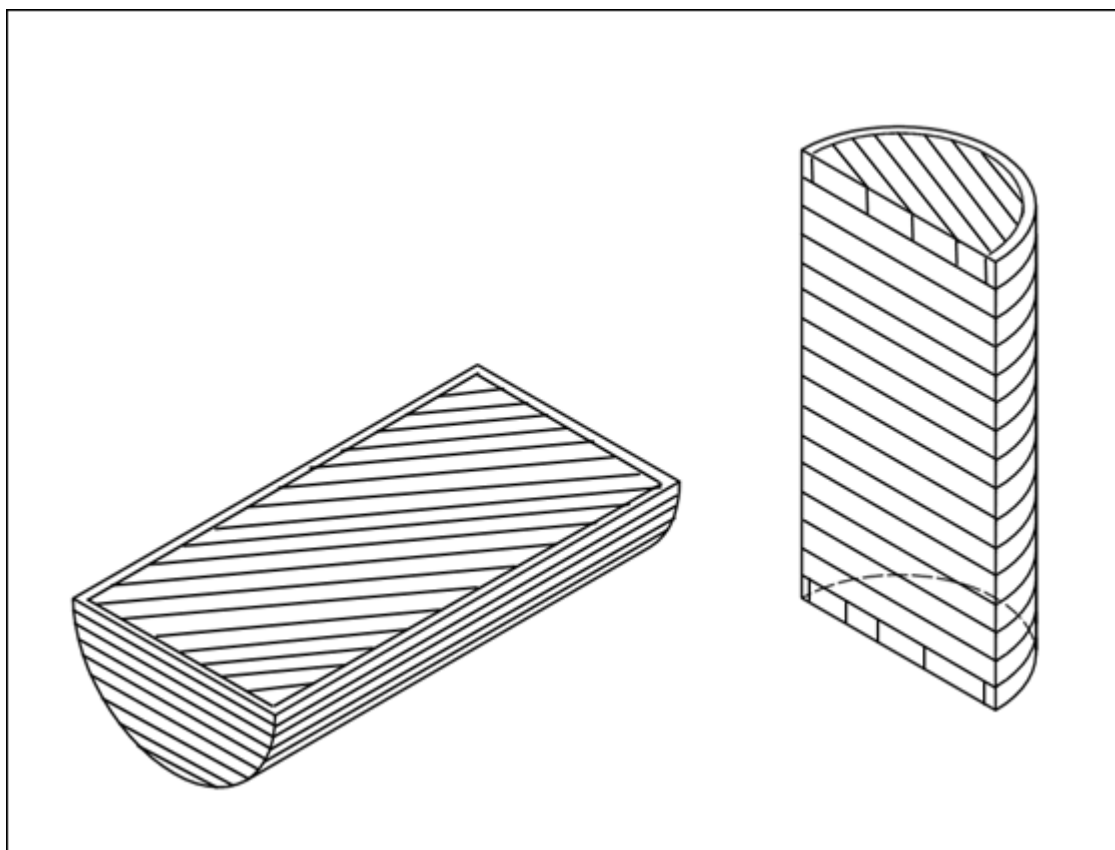


Figura 3.23: Esquema de corte transversal de probetas de compresión construidas en orientación horizontal (izquierda) y vertical (derecha).

Como se puede ver en la figura 3.23, los filamentos están dispuestos en distinta geometría para ambas direcciones, lo que explicaría las diferencias encontradas. Sin embargo, como el volumen es completamente de plástico y las fuerzas que trabajan son las mismas estas diferencias son muy menores.

El PLA tuvo valores mayores para el módulo elástico, tensión de fluencia y tensión máxima, aunque no se conoce su valor.

3.4.3. Flexión

Se graficaron las mediciones de carga y desplazamiento del punzón medio del ensayo de flexión y se calculó la relación de rigidez como la pendiente en la zona elástica de la curva de fuerza-desplazamiento, es decir, la relación $\frac{F}{d}$. En la figura 3.24 se muestran las curvas de carga-desplazamiento para el ABS.

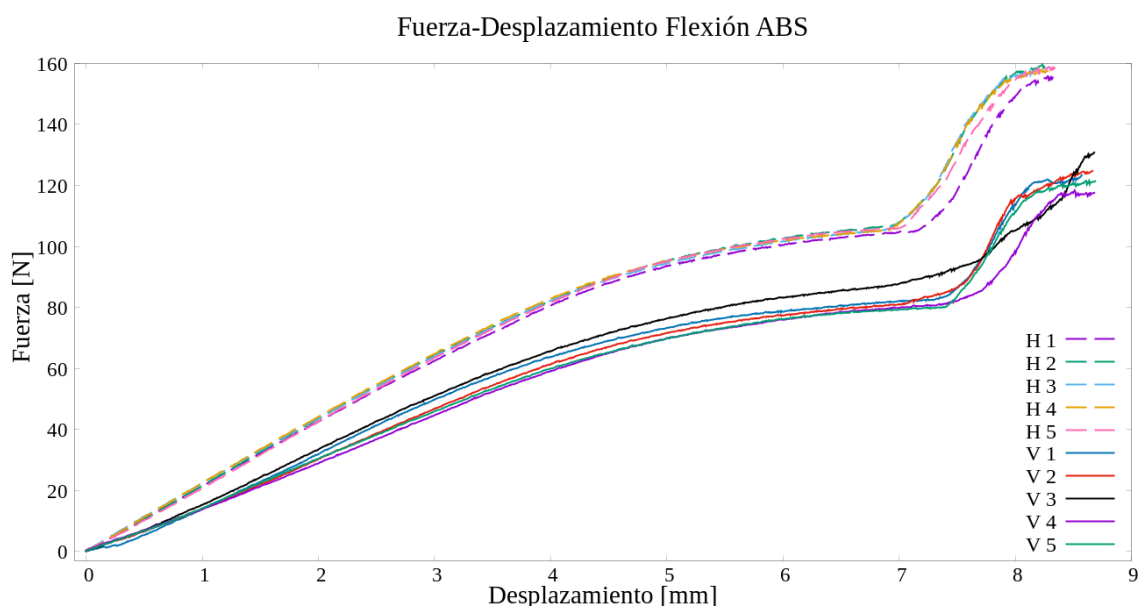


Figura 3.24: Curvas de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión de ABS.

A continuación, en la figura 3.25 se muestran las curvas para el PLA.

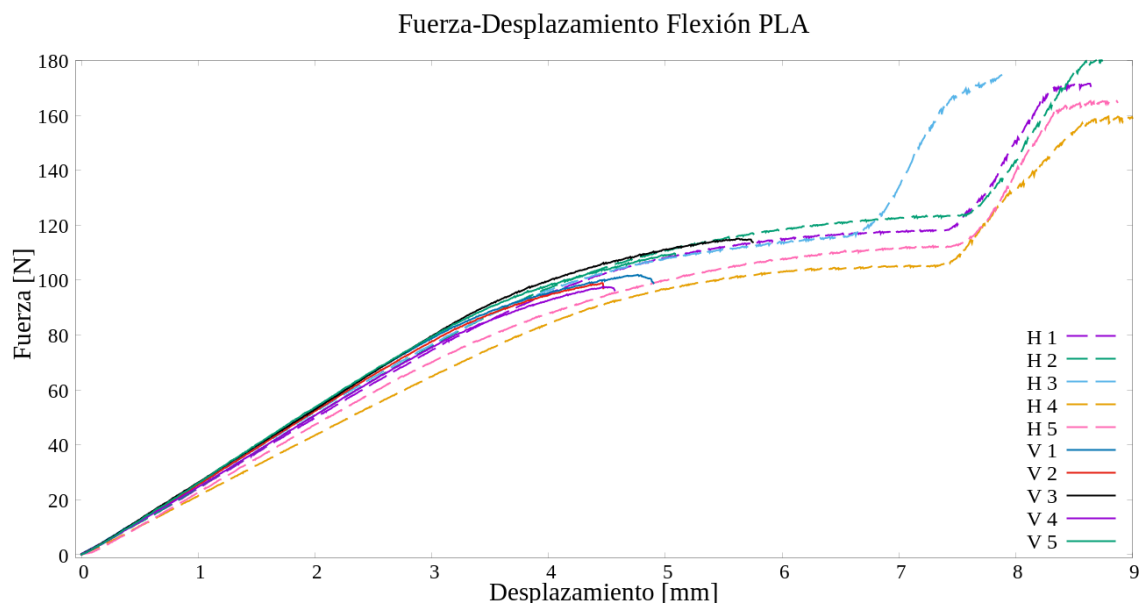


Figura 3.25: Curvas de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión de PLA.

En la tabla 3.8, se muestran los resultados de la relación de rigidez obtenidos para ambos materiales y orientaciones. En la figura 3.26 se muestran las curvas promedio para los 4 casos.

Tabla 3.8: Resultados de la relación de rigidez en el ensayo de flexión para ambos plásticos.

Orientación	Probeta	ABS	PLA
H	1	20,9	25,8
	2	21,9	26,5
	3	21,3	26,7
	4	21,8	22,1
	5	21,9	24,7
	Promedio	21,6	25,2
	s	0,4	1,9
V	1	18,2	27,0
	2	16,7	26,9
	3	18,4	26,7
	4	15,4	26,1
	5	15,9	27,9
	Promedio	16,9	26,9
	s	1,4	0,6

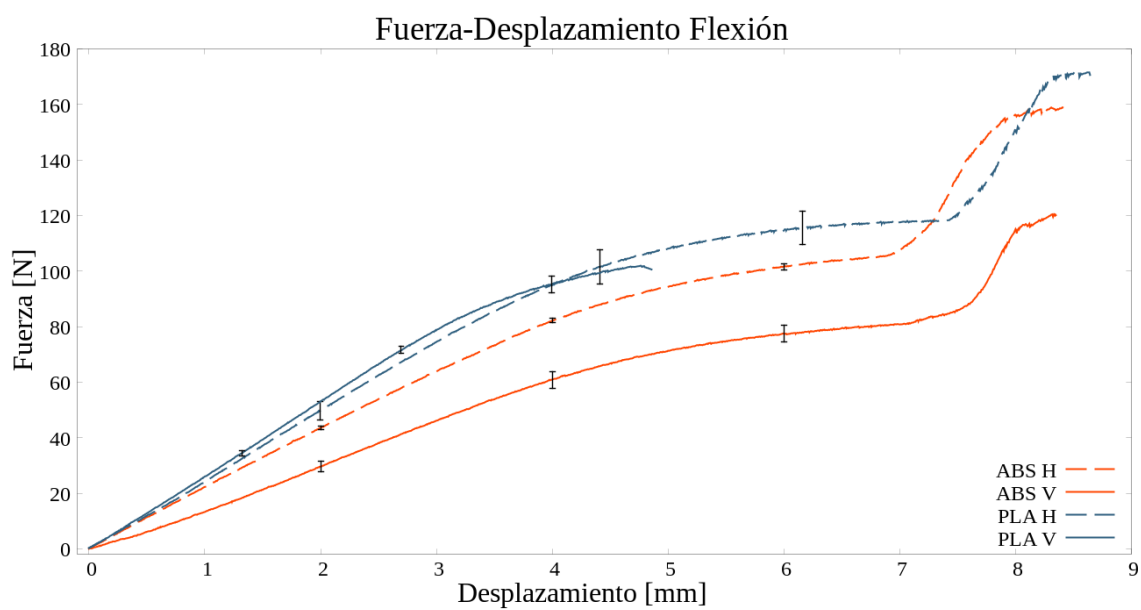


Figura 3.26: Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de flexión.

En la figura 3.27 se muestra la comparación de los resultados de la relación de rigidez para flexión.

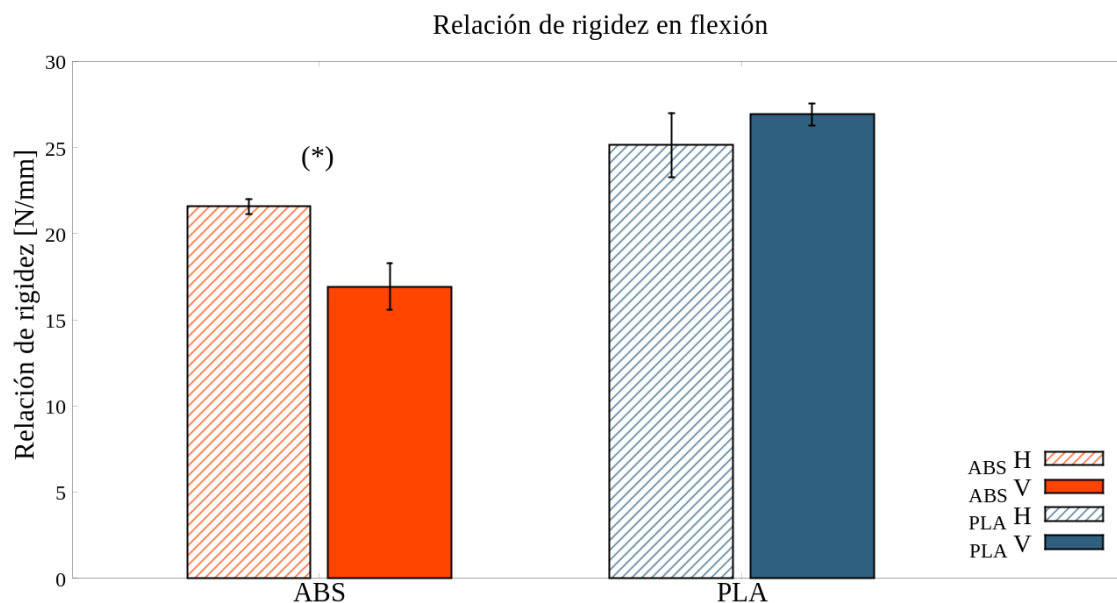


Figura 3.27: Gráfico de los valores de la relación de rigidez para probetas a flexión.

(*) $p\text{-valor} < 0,05$.

Estos resultados indican que no hay una relación absoluta entre las orientaciones y la rigidez. Para el ABS fue mayor en las probetas horizontales y para el PLA en las verticales. Sin embargo, la diferencia entre los valores fue mayor en el ABS, siguiendo la tendencia vista en el ensayo de tracción. Además, se puede apreciar que el PLA tuvo valores mayores tal como en los ensayos de tracción y compresión.

En la figura 3.26 se observa que para probetas de ABS verticales se tiene un comportamiento similar al de las horizontales, sin embargo, para las verticales de PLA se tiene un comportamiento muy frágil en comparación con las horizontales.

Las diferencias en este ensayo con respecto a los dos anteriores es que en éste se presentan las tensiones de manera más compleja. En la flexión se tiene un eje de tensiones neutro,

sobre él los esfuerzos son de compresión y bajo él son de tracción. En la siguiente figura se muestra una probeta de ABS luego de ser ensayada a flexión.

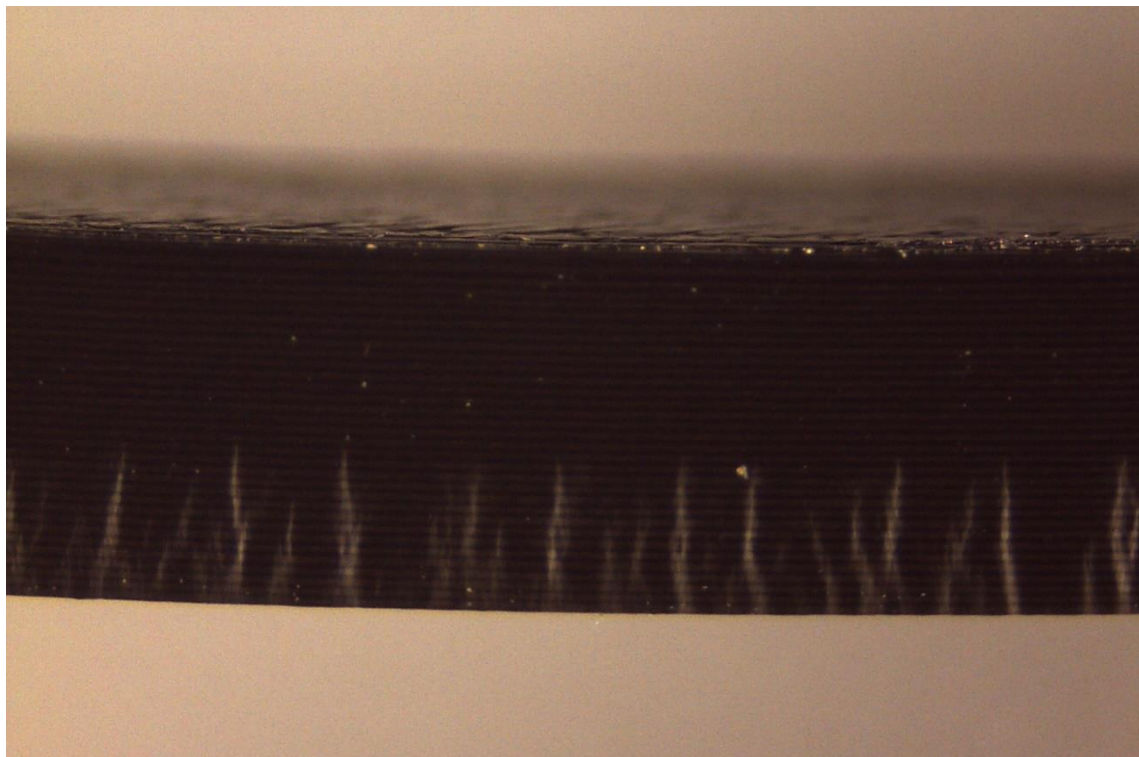


Figura 3.28: Probetas de ABS después de ser ensayadas a flexión.

En la figura 3.28 se puede distinguir en la parte inferior marcas blancas producidas por la plastificación del material, esta zona corresponde a la que se encuentra bajo esfuerzos de tracción.

En la figura 3.29, se muestra un esquema de las probetas de flexión en corte donde se muestra su estructura interna.

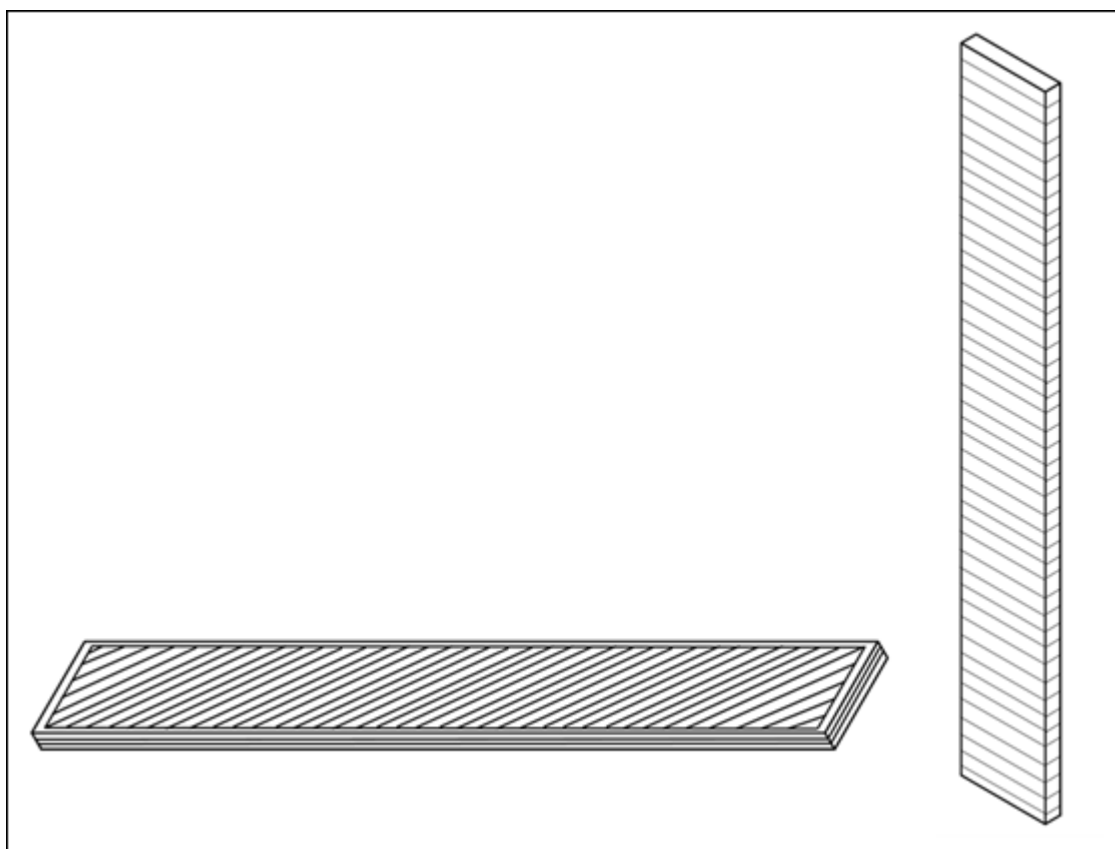


Figura 3.29: Esquema de corte transversal de probetas de flexión construidas en orientación horizontal (arriba) y vertical (abajo).

4. MODELAMIENTO

4.1. Modelo constitutivo

Con el fin de definir e implementar un modelo que describa el comportamiento mecánico en el rango de deformaciones elásticas de piezas fabricadas mediante impresión 3D, se realizaron los experimentos de tracción, compresión y flexión. El estudio está centrado en las deformaciones elásticas debido a que este es el rango de trabajo de piezas fabricadas por impresión 3D y además se considera como el primer acercamiento para avanzar hacia modelos de falla, ya sea por rotura o plasticidad.

La relación que gobierna el comportamiento elástico lineal de un material isótropo viene dada por la ley de Hooke, que determina que la relación entre el esfuerzo y las pequeñas deformaciones es linealmente proporcional, de la siguiente manera:

$$\varepsilon = C^{-1} \sigma \quad (16)$$

Donde C es la matriz de rigidez, que depende de parámetros del material como el módulo elástico y coeficiente de Poisson. Para las direcciones principales se tendrá:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

El valor de las variables de la matriz depende del modelo constitutivo, que se relaciona con el comportamiento del material. Para el caso unimodular, linealmente elástico e isótropo se tiene que las variables son:

$$a_{\alpha\alpha} = \frac{1}{E} \quad (18)$$

$$a_{\alpha\beta} = -\frac{\nu}{E} \quad (19)$$

Siendo C^{-1} ,

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Este modelo utiliza la información de dos parámetros del material, el coeficiente de Poisson ν y el módulo elástico E . Existen materiales que no pueden ser modelados con una ley constitutiva tradicional debido a diferencias en su respuesta frente a tracción y a compresión, como la descrita por las probetas de ABS y PLA. A los materiales que presentan esta respuesta se les llama bimodulares, con este término se denomina a aquellos en que su comportamiento uniaxial es distinto a tracción y a compresión, teniendo diferentes módulos elásticos. La definición se extiende a materiales que muestran esta disimilitud incluso en el campo de pequeñas deformaciones. Esta idea ha sido utilizada para modelar materiales isótropos como también anisótropos. Estos materiales no son poco comunes en la naturaleza, se tiene por ejemplo, al cartílago y la madera. Además, casi todos los materiales presentan un pequeño grado de bimodularidad. Para materiales bimodulares se pueden expresar las variables de la matriz de rigidez como:

$$a_{\alpha\alpha} = \begin{cases} \frac{1}{E^+} & \text{si } \sigma_\alpha > 0 \\ \frac{1}{E^-} & \text{si } \sigma_\alpha < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$a_{\alpha\beta} = \begin{cases} -\frac{\nu^+}{E^+} & \text{si } \sigma_\beta > 0 \\ -\frac{\nu^-}{E^-} & \text{si } \sigma_\beta < 0 \end{cases} \quad (22)$$

Donde el signo + representa al material en tracción y el signo – en compresión, de esta manera E^+ es el módulo elástico a tracción y E^- el módulo elástico a compresión.

Además, de acuerdo con el trabajo de Ambartsumyan (Sun, Zhu, Qin, Yang, & He, 2010), se puede suponer que:

$$\frac{\nu^+}{E^+} = \frac{\nu^-}{E^-} \quad (23)$$

Es decir,

$$\nu^- = \frac{E^-}{E^+} \nu^+ \quad (24)$$

Este modelo utiliza tres parámetros del material, E^+ , E^- y ν^+ . El valor de las variables depende de la dirección de la tensión, de esta manera la matriz de rigidez no es invariable como sería en un material isótropo unimodular. Para este modelo se considera el componente de corte desarrollado por Liu y Zhang (2000), en el cual:

$$\frac{1}{G} = \frac{\eta}{G^+} + \frac{1-\eta}{G^-} \quad (25)$$

Dónde,

$$G^+ = \frac{E^+}{2(1 + \nu^+)} \quad (26)$$

$$G^- = \frac{E^-}{2(1 + \nu^-)} \quad (27)$$

$$\eta = \frac{\sum \langle \sigma_\alpha \rangle}{\sum |\sigma_\alpha|} \quad (28)$$

Dónde η es un factor que indica la importancia de los esfuerzos de tracción. La sumatoria del denominador entrega la magnitud total de los esfuerzos y la sumatoria del numerador con los paréntesis de Macaulay que entregan:

$$\langle \sigma_\alpha \rangle = \begin{cases} \sigma_\alpha & \text{si } \sigma_\alpha > 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_\alpha < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Determina la suma de los esfuerzos a tracción, de esa manera para un estado de tracción pura se tiene $\eta = 1$ y para un estado de compresión pura $\eta = 0$, luego esos son los casos unimodulares.

Finalmente, la inversa de la matriz de rigidez completa será:

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \quad (30)$$

Con $a_{\alpha\alpha}$ y $a_{\alpha\beta}$ función de los esfuerzos como es especificó en las ecuaciones número 18 y 19. Este modelo fue implementado en elementos finitos para representar los materiales estudiados. Un diagrama de flujo del proceso que realiza el programa se puede ver en la sección 4.3.

4.2. Solución analítica del ensayo de flexión

El análisis de la deformación en el ensayo de flexión se realizó utilizando el teorema de Castigliano. En este, para un cuerpo elástico sobre el cual actúa un conjunto de fuerzas $F_1, \dots, F_n$ aplicadas puntualmente en $A_1, \dots, A_n$, se llama $U(F_1, \dots, F_n)$ a la energía potencial elástica o energía de deformación. Entonces se define el desplazamiento del punto A_i como:

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (31)$$

La energía de deformación para vigas rectas a flexión se define como:

$$U = \int_V \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad (32)$$

Donde V es el volumen de la viga a flexión, σ es la tensión en la viga y E es el módulo elástico del material. Luego para utilizarlo en una viga de material bimodular se debe definir el eje neutro, en el cual no hay esfuerzos normales. Este separa la zona de compresión y tracción de la viga como se muestra en la figura 4.1.

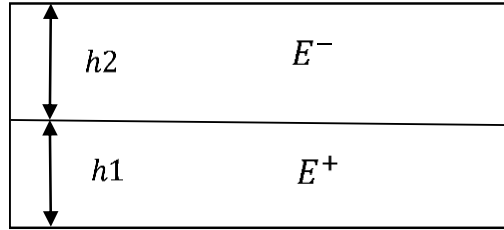


Figura 4.1: Esquema de sección de material bimodular bajo fuerzas de flexión.

Considerando el espesor $h = h_1 + h_2$, podemos obtener:

$$h_1 = \frac{\sqrt{E^-}}{\sqrt{E^+} + \sqrt{E^-}} h \quad (33)$$

$$h_2 = \frac{\sqrt{E^+}}{\sqrt{E^+} + \sqrt{E^-}} h \quad (34)$$

Dónde h_1 es la altura de la sección a tracción y h_2 la altura de la sección a compresión. Luego se define la rigidez a la flexión, tal que:

$$D = \frac{w}{3} (E^- h_2^3 + E^+ h_1^3) \quad (35)$$

Donde w es el ancho de la probeta. Luego, en el caso de pequeñas deflexiones, la ecuación para los esfuerzos en una viga de material bimodular en flexión pura puede expresarse como:

$$\sigma_x^+ = \frac{E^+}{D} M_z y \quad -h_1 < y < 0 \quad (36)$$

$$\sigma_x^- = \frac{E^-}{D} M_z y \quad 0 < y < h_2 \quad (37)$$

Siendo y la distancia desde el eje neutro a un punto y M el momento flector en el mismo punto. Luego, la energía de deformación es:

$$U = \int_{V^+} \frac{\sigma^{+2}}{2E^+} dV^+ + \int_{V^-} \frac{\sigma^{-2}}{2E^-} dV^- \quad (38)$$

Reemplazando las expresiones se obtiene:

$$U = \int_{V^+} \frac{E^{+2} M_z^2 y^2}{2D^2 E^+} dV^+ + \int_{V^-} \frac{E^{-2} M_z^2 y^2}{2D^2 E^-} dV^- \quad (39)$$

Resolviendo $\frac{\partial U}{\partial F}$ se obtiene la relación entre la fuerza y el desplazamiento en el punto en el que actúa el punzón para flexión de 4 puntos. Reordenando se tiene:

$$F = \frac{972 D^2 d}{5 w L^3 (E^+ h_1^3 + E^- h_2^3)} \quad (40)$$

Ahora vemos que para el caso de un material unimodular se tiene que $E^+ = E^-$, luego $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$. La expresión de fuerza se simplifica quedando con la forma tradicional de la ecuación de vigas, equivalente a la ecuación 11:

$$F = \frac{27 w h^3 E d}{5 L^3} \quad (41)$$

4.3. Implementación computacional

El modelo constitutivo se implementó en el programa Vulcan, el siguiente diagrama representa el proceso que realiza el programa. Dónde α representa el estado de tensiones principales, $\underline{T}$ es la matriz de transformación cuyas columnas son los vectores principales de $\underline{\sigma}_\alpha$, tensiones principales. El diagrama se muestra en la figura 4.2.

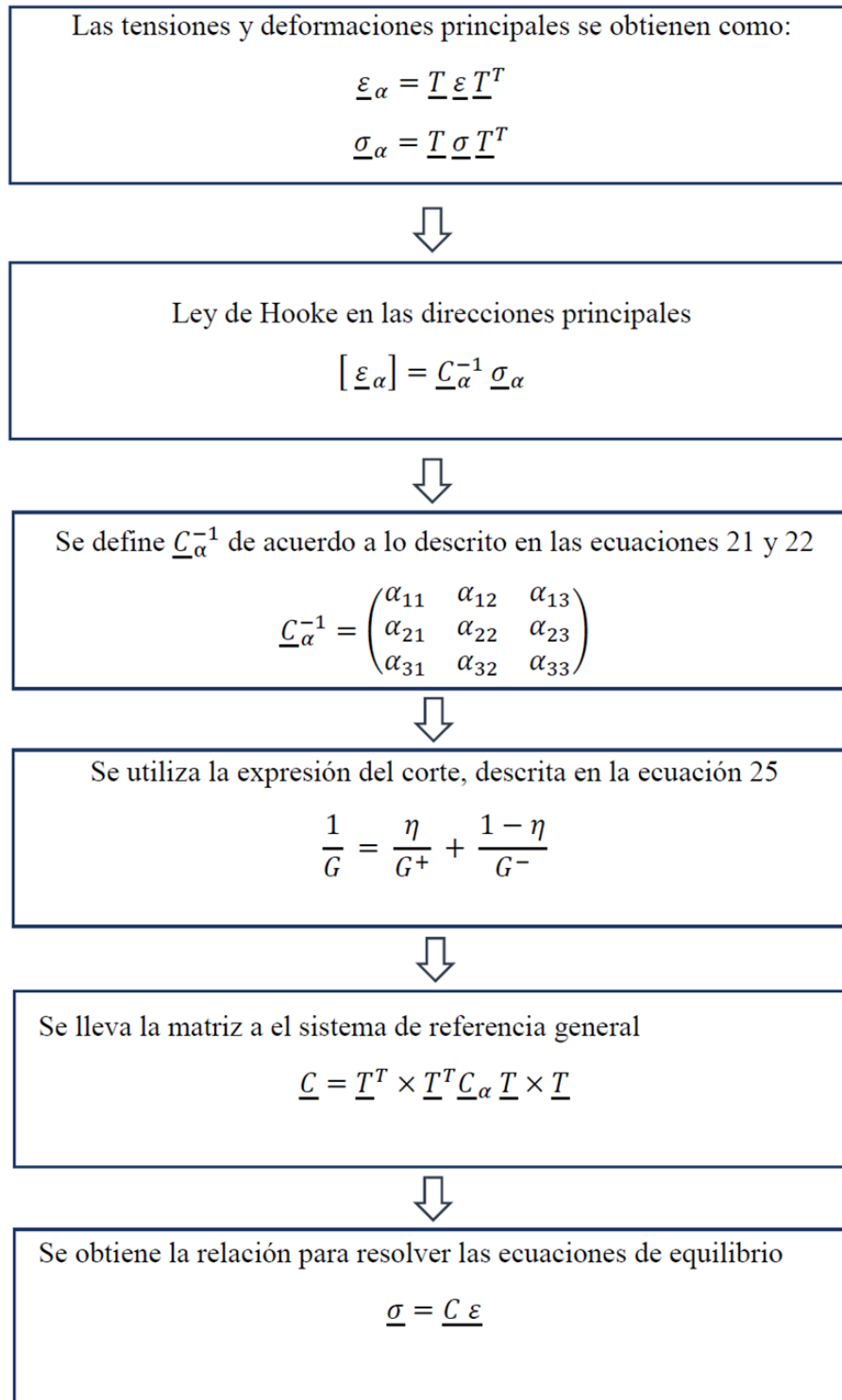


Figura 4.2. Diagrama de flujo implementación modelo constitutivo.

5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

5.1. Solución analítica

Se calculó el desplazamiento del punzón en las probetas de flexión mediante la solución analítica descrita en la ecuación 35. Las curvas de fuerza-desplazamiento se calcularon utilizando los módulos de elasticidad encontrados para tracción y compresión en cada orientación y material. Se consideró la solución unimodular con cada uno de los módulos E^+ para tracción y E^- para compresión y el modelo bimodular que considera a ambos. En las figuras a continuación se muestran los resultados analíticos y experimentales para cada caso.

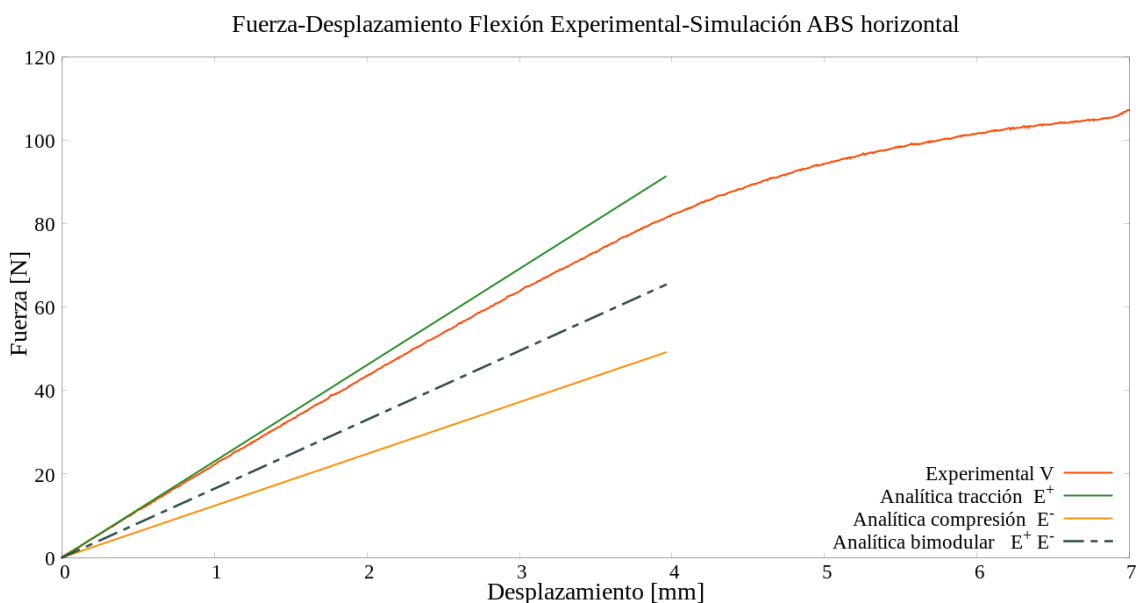


Figura 5.1. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS horizontal.

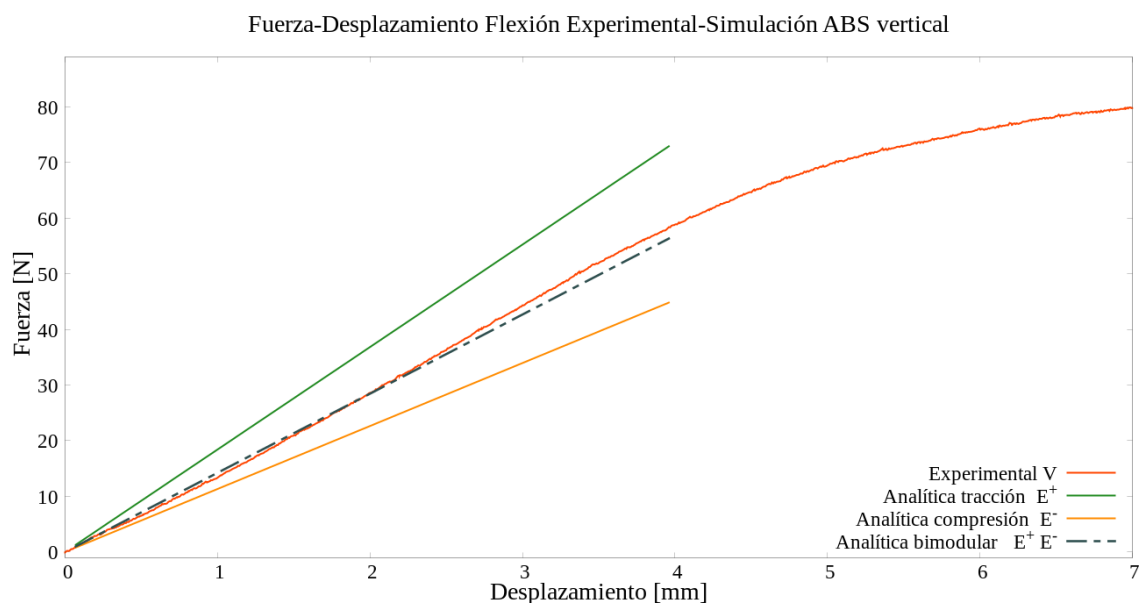


Figura 5.2. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS vertical.

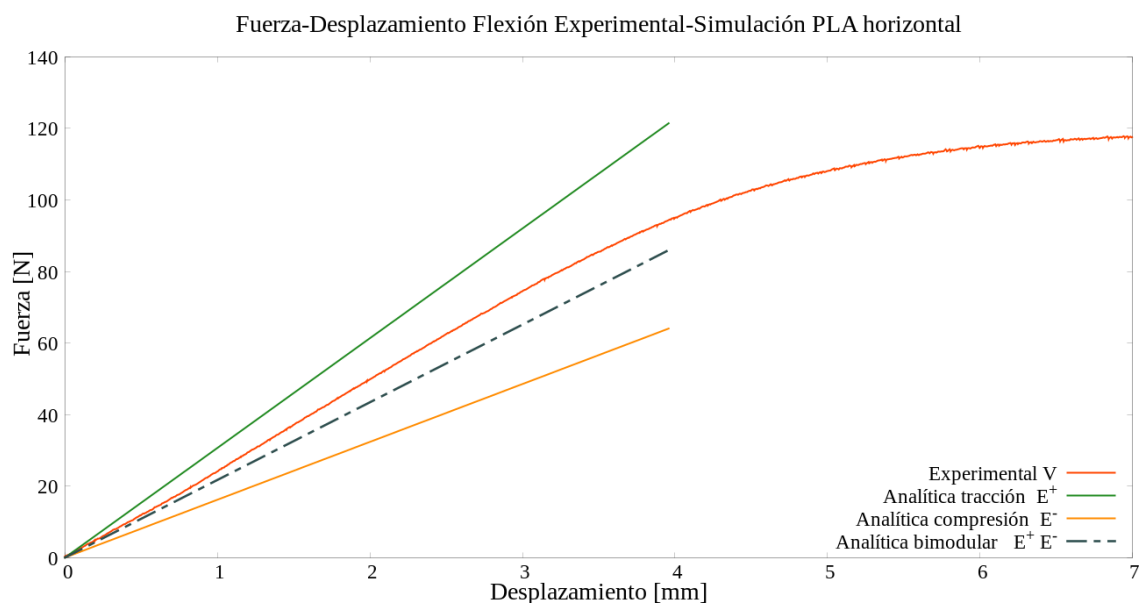


Figura 5.3. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA horizontal.

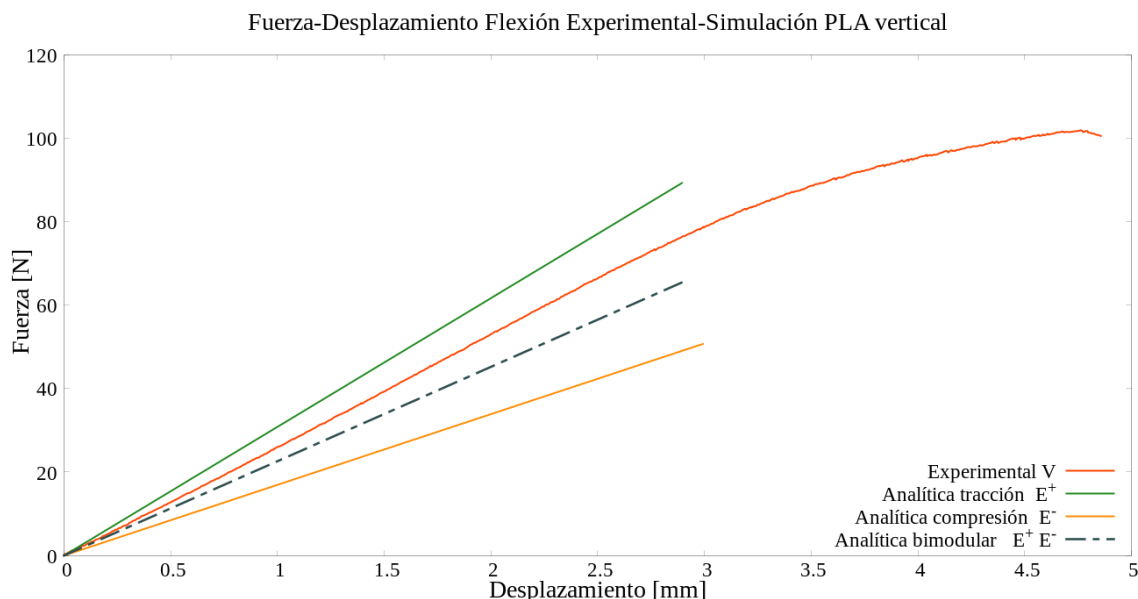


Figura 5.4. Curva experimental y analítica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA vertical.

De estos gráficos se desprende que la solución analítica bimodular se acerca al comportamiento observado experimentalmente más que utilizando cada módulo por separado.

5.2. Solución numérica

Se compararon los resultados de las simulaciones para el ensayo de flexión de 4 puntos en 2D y 3D para tensiones y deformaciones planas y las diferencias fueron despreciables. Es por esto que se utilizó la malla para el ensayo de flexión en 2D. Considerando que no existe un efecto 3D marcado. Además, se resolvió utilizando deformaciones planas, que es lo más adecuado debido a la geometría de la viga. Se realizaron las configuraciones de las condiciones de borde, de simetría y de contacto para los punzones. Los parámetros ingresados en el modelo fueron obtenidos de los experimentos de tracción y compresión, en la tabla 5.1 se muestran los valores utilizados.

Tabla 5.1. Valores de módulos elásticos utilizados en la solución numérica en MPa.

Ensayo	Orientación	E ABS	E PLA
Tracción	H	2133,2	3118,8
	V	1804,9	2775,7
Compresión	H	1248,0	1737,0
	V	1241,0	1772,0

Para el módulo de Poisson positivo ν^+ se utilizó un valor estimado de 0,2, luego el valor de ν^- viene dado por la ecuación 24. Los resultados de la simulación bimodular y la solución analítica bimodular se muestran en las figuras a continuación.

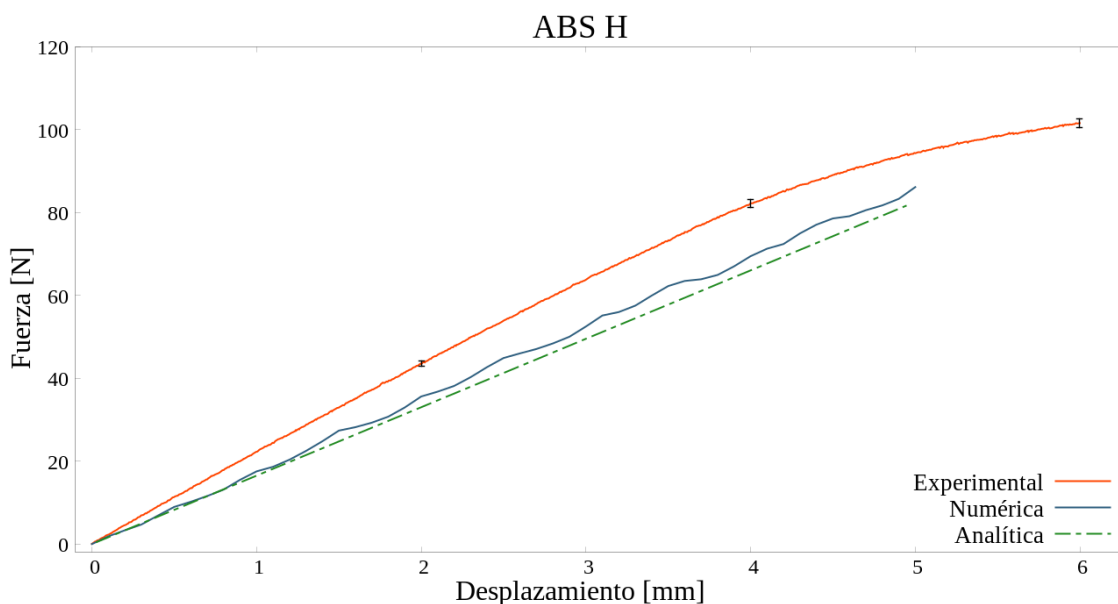


Figura 5.5. Curva experimental, analítica y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS horizontal.

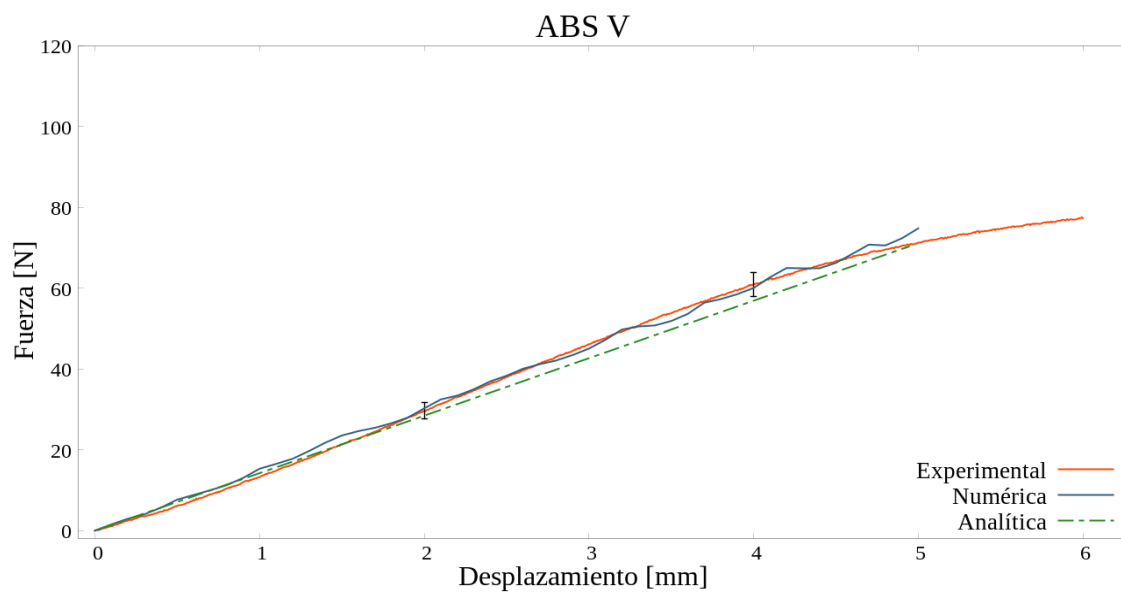


Figura 5.6. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de ABS vertical.

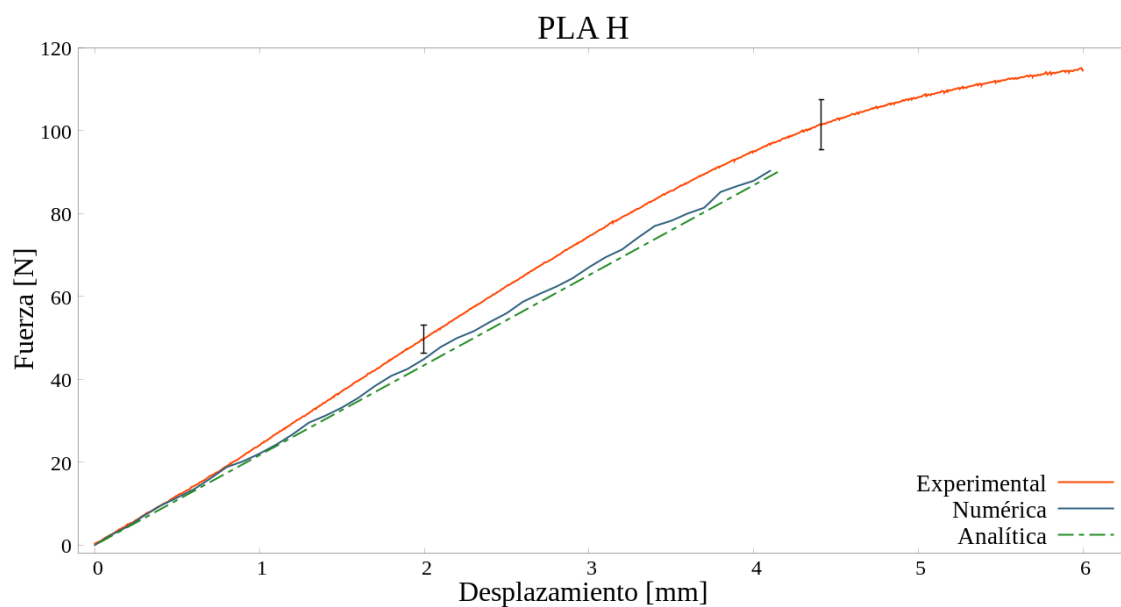


Figura 5.7. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA horizontal.

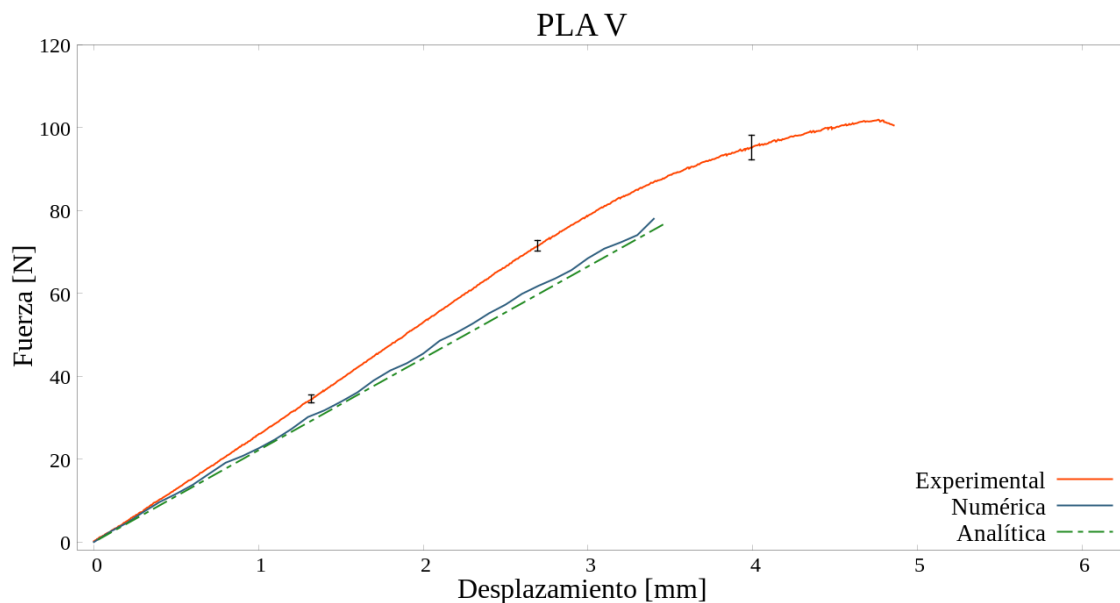


Figura 5.8. Curva experimental y numérica de fuerza-desplazamiento para ensayo de flexión de PLA vertical.

En estos gráficos se observa que la solución analítica bimodular es muy similar al resultado obtenido con la simulación utilizando el modelo bimodular. Este resultado indica que la teoría de vigas funciona bien para este caso. Además, se observa que la simulación para el ensayo de flexión de 4 puntos utilizando el modelo bimodular es buena para la zona de deformaciones elásticas, para ambos materiales y orientaciones de impresión.

6. CONCLUSIONES

Considerando las ventajas, la popularidad y la inversión en manufactura aditiva en los últimos años podemos concluir que continuará revolucionando el proceso de fabricación en los siguientes años. Su capacidad de crear piezas con complejas geometrías alienta la innovación y cambiará la forma de diseñar. Aunque para poder utilizar plenamente su capacidad se deben continuar los estudios en las propiedades mecánicas y el efecto de sus parámetros de impresión, para que las piezas producidas mediante manufactura aditiva puedan ser confiables y calificadas.

6.1. Conclusiones

Considerando los resultados de esta investigación se puede concluir lo siguiente:

La orientación del objeto dentro de la cámara de impresión tiene efectos en sus propiedades mecánicas, dependiendo de las solicitaciones que se presenten. Para ambos materiales estudiados se tiene que el efecto de la orientación es muy importante en estados de tracción pura. Las probetas impresas horizontalmente, con los filamentos paralelos a la dirección de carga, presentan un mejor desempeño que las probetas verticales cuyos filamentos son perpendiculares a la dirección de carga y que, además, tienen un comportamiento frágil. En estados de compresión pura no existe un efecto marcado causado por la orientación en la impresión, para los casos estudiados. Bajo cargas de flexión la orientación afecta de manera distinta a las probetas de ambos materiales. Las de ABS se ven afectadas en su relación de rigidez, siendo mayor el valor de las probetas horizontales. Mientras que las de PLA tienen valores muy similares pero las impresas verticalmente tienen un comportamiento frágil.

Existen diferencias en el comportamiento a tracción y compresión para ambos materiales. Los valores medidos de módulo elástico, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último son

distintos para un mismo material y orientación en tracción y compresión. A un material con esta propiedad se lo conoce como bimodular.

Un modelo bimodular e isótropo representa de manera adecuada el comportamiento de las probetas de ABS y PLA para el rango de deformaciones elásticas para las orientaciones utilizadas en el ensayo de flexión de 4 puntos. La solución analítica bimodular es similar a la solución numérica para un ensayo de flexión de 4 puntos y por lo tanto también es una buena representación para el caso experimental en el rango de deformaciones elásticas. El modelo estudiado se podría mejorar incorporando otros parámetros de impresión y para un modelo más completo se debe incluir el efecto de la anisotropía presente en estados de tracción.

La anisotropía y el desempeño de piezas creadas por manufactura aditiva se ven afectados por más parámetros que la orientación de impresión, como el diámetro del filamento, la densidad y forma del relleno, la altura de la capa y la temperatura de impresión por lo que las propiedades mecánicas reportadas deben ser utilizadas cuidadosamente.

6.2. Trabajos futuros

La investigación realizada en este trabajo tiene diversas direcciones en las que se puede profundizar.

En cuanto a los parámetros de fabricación y condiciones de trabajo de las probetas, se puede realizar un estudio similar considerando el efecto de otros parámetros propios de la fabricación como la temperatura de impresión, la altura de capa, la velocidad de impresión, la tasa de alimentación del extrusor, etc. Como también incluir parámetros posteriores a la fabricación como la humedad en la que se guardan o trabajan las piezas, la exposición al sol e intemperie, la temperatura ambiental de trabajo, etc.

Los ensayos realizados se pueden mejorar con instrumentos de medición más precisos y se pueden realizar ensayos de fatiga, como también realizar ensayos variando la tasa de carga para caracterizar la respuesta frente a distintas sollicitaciones.

Para la simulación con el modelo constitutivo seleccionado se puede delimitar mejor su alcance utilizando geometrías más complejas y con distintas sollicitaciones. Se puede utilizar para simular biomateriales con comportamiento similar al del ABS y PLA como el cemento óseo de polimetilmetacrilato (PMMA) utilizado para prótesis de cadera, entre otros usos.

Mejorar el modelo utilizado incluyendo la variación en el desempeño mecánico del material dependiendo de la orientación. Domingo-Espin et al. (2015) utilizó únicamente probetas ensayadas a tracción para obtener datos para su modelo. Se puede combinar el comportamiento bimodular con la anisotropía en la fabricación. También se puede mejorar la caracterización analizando criterios de falla, ya sea considerando rotura o plasticidad.

BIBLIOGRAFÍA

3D Printing Materials 2018-2028: Technology and Market Analysis: IDTechEx. (n.d.). Retrieved August 18, 2018, from <https://www.idtechex.com/research/reports/3d-printing-materials-2018-2028-technology-and-market-analysis-000583.asp>

Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>

Autodesk Inventor (Profesional) [Software]. (2016). Recuperado de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>

Bertoldi, M., Yardimci, M. a, Pistor, C. M., Guceri, S. I., & Sala, G. (1998). Mechanical characterization of parts processed via fused deposition. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 557–565.

Bourell, D. L. (The U. of T. at A.), Leu, M. C. (Missouri U. of S. and T.), & Rosen, D. W. (Georgia I. of T.). (2009). Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing 2009. *Rapid Prototyping Journal*, 92. <https://doi.org/10.1108/13552549910295514>

Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., ... Ifju, P. G. (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 811–824. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042>

Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>

Columbus, L. (2017). The State Of 3D Printing 2017. Retrieved August 18, 2018, from <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2017/05/23/the-state-of-3d-printing-2017/#a53d4e357ebf>

Cortés, A. (2016). Caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3D. Retrieved from <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/23751>

Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., & Pham, D. (2016). Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), 263–282. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2016.9.001>

Croccolo, D., De Agostinis, M., & Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, 79, 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041>

Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A. A., Llumà, J., Borros, S., & Reyes, G. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials and Design*, 83, 670–677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>

Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregger, B. A. (2000). Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1), 107–122. <https://doi.org/10.1080/10426910008912976>

Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>

Forster, A. M. (2015). Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability. *National Institute of Standards and Technology U.S.* <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8059>

Garg, A., & Bhattacharya, A. (2017). An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study. *International Journal of Mechanical Sciences*, 120, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.032>

Gómez Reyes, L. (2017). Análisis Documental De Los Inconvenientes De La Impresión 3D. *3C Tecnología_Glosas de Innovación Aplicadas a La Pyme*, 6(3), 48–53. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2017.v6n3e23.48-53>

Grellmann, W., & Seidler, S. (2013). *Polymer Testing*. <https://doi.org/10.3139/9781569905494>

Guessasma, S., Belhabib, S., Nouri, H., & Ben Hassana, O. (2016). Anisotropic damage inferred to 3D printed polymers using fused deposition modelling and subject to severe compression. *European Polymer Journal*, 85, 324–340. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.10.030>

Hernandez, R., Slaughter, D., Whaley, D., Tate, J., & Asiabanpour, B. (2016). Analyzing the Tensile, Compressive, and Flexural Properties of 3D Printed ABS P430 Plastic Based on Printing Orientation Using Fused Deposition Modeling. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 939–950.

Hill, N., & Haghi, M. (2014). Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 221–227. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2013-0039>

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). Manufactura, ingeniería y tecnología. Retrieved from

[https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=gilYI9_KKAoC&oi=fnd&pg=PR19&dq=Kalpakjian,+S.,+%26+Schmid,+S.+R.+\(2002\).+Manufactura,+ingeniería+y+tecnología.+Pearson+Educación.&ots=mp6OzTvqKF&sig=A_iGlmx4jM3agtwyQEgKdhRn50c](https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=gilYI9_KKAoC&oi=fnd&pg=PR19&dq=Kalpakjian,+S.,+%26+Schmid,+S.+R.+(2002).+Manufactura,+ingeniería+y+tecnología.+Pearson+Educación.&ots=mp6OzTvqKF&sig=A_iGlmx4jM3agtwyQEgKdhRn50c)

Khuong, T. L., Zhao, G., Farid, M., Yu, R., Sun, Z. Z., & Rizwan, M. (2014). Tensile Strength and Flexural Strength Testing of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Materials for Biomimetic Robotic Applications. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 20, 11–21. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.20.11>

Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., & Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604–617. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>

Lee, C. S., Kim, S. G., Kim, H. J., & Ahn, S. H. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 627–630. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095>

Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P. (2002). Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2), 129–141. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(02\)70139-4](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(02)70139-4)

Liu, X. B., & Zhang, Y. Z. (2000). Modulus of elasticity in shear and accelerate convergence of different extension-compression elastic modulus finite element method. *JOURNAL-DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*. Retrieved from https://scholar.google.cl/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Modulus+of+elasticity+in+shear+and+accelerate+convergence+of+different+extension-compression+elastic+modulus+finite+element+method%2C+Journal+of+Dalian+University+of+Technology&btnG=

Manufacturing Guide | Find suppliers, processes & material. (n.d.). Retrieved August 18, 2018, from https://www.manufacturingguide.com/en/search/process?f%5B0%5D=field_process_params%3A1022

Materials, E. I. (n.d.-a). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM D695. *Insulating Standards, Annual Book of ASTM*.

Materials, E. I. (n.d.-b). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638. *Insulating Standards, Annual Book of ASTM*.

Materials, E. I. (2010). Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. ASTM D6272. *Annual Book of ASTM Standards*, 08(June), 1–8. <https://doi.org/10.1520/D6272-10.1>

Medical implants and printable body parts to drive 3D printer growth | Business | The Guardian. (n.d.). Retrieved August 18, 2018, from <https://www.theguardian.com/business/2014/aug/24/medical-implants-drive-3d-printer-growth>

Montero, M., Roundy, S., & Odell, D. (2001). Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Society of Manufacturing Engineers.*, 1–21.

Ortiz Chimbo, K. M., Luna Aveiga, H., Medina Moreira, J., & Tumbaco Soledispa, R. L. (2016). Los beneficios de las impresoras 3d como herramienta de innovación en la medicina. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 15.

Overview over 3D printing technologies - Additively. (n.d.). Retrieved August 18, 2018, from <https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>.

Patient-Specific Implants (n.d.). Recuperado el 18 de Agosto, 2018 de <https://www.materialise.com/en/medical/3d-printed-implants>.

Riveiro, L. (2015). Impresión 3D.

Rodríguez, J., Thomas, J., & Renaud, J. (1999). Maximizing the strength of fused-deposition ABS plastic parts. *10th Solid Freeform ...*, 335–342. Retrieved from <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/1999/1999-039-Rodriguez.pdf>

Rodríguez, J., Thomas, J., & Renaud, J. (2001). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 219–230. <https://doi.org/10.1108/13552540310489604>

Rodríguez, J., Thomas, J., & Renaud, J. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 219–230. <https://doi.org/10.1108/13552540310489604>

Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials and Design*, 31(1), 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>

Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>

Soranakom, C., & Mobasher, B. (2007). Closed-Form Solutions for Flexural Response of Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(7), 933–941. [https://doi.org/DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:8\(933\)](https://doi.org/DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:8(933))

Sun, J. yi, Zhu, H. qiao, Qin, S. hong, Yang, D. lin, & He, X. ting. (2010). A review on the research of mechanical problems with different moduli in tension and compression. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(9), 1845–1854. <https://doi.org/10.1007/s12206-010-0601-3>

Torrado, A. R., & Roberson, D. A. (2016). Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(1), 154–164. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0067-4>

Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. P. (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via

design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 387–404.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2014-0083>

Von Koenigsegg, C. (2014). One:1 - Koenigsegg | Koenigsegg. Retrieved August 17, 2018, from <https://www.koenigsegg.com/one1/>

Wohlers, T. T., & Wohlers Associates. (2012). *Wohlers report 2012: additive manufacturing and 3D printing state of the industry*. Fort Collins Col.: Wohlers Associates. Retrieved from <http://www.worldcat.org/title/wohlers-report-2012-additive-manufacturing-and-3d-printing-state-of-the-industry-annual-worldwide-progress-report/oclc/813219114>

Zou, R., Xia, Y., Liu, S., Hu, P., Hou, W., Hu, Q., & Shan, C. (2016). Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites Part B: Engineering*, 99, 506–513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>

ANEXOS

Anexo A. Variación de porcentaje de relleno en probetas de ABS

Se realizó un estudio de probetas de ABS en ensayos de tracción y compresión, donde se obtuvo el módulo de elasticidad y la resistencia máxima. Las probetas fueron impresas en dos orientaciones: 0° horizontal y 90° vertical. Además, se utilizaron dos valores de densidad de relleno: 15% y 100%. Otros parámetros como el número de capas exteriores, el grosor de capa y la tasa de alimentación se mantuvieron fijos utilizando el predeterminado por la impresora.

Las probetas fueron impresas siguiendo las normas ASTM D638 para tracción y ASTM D695 para compresión. Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 7.1.

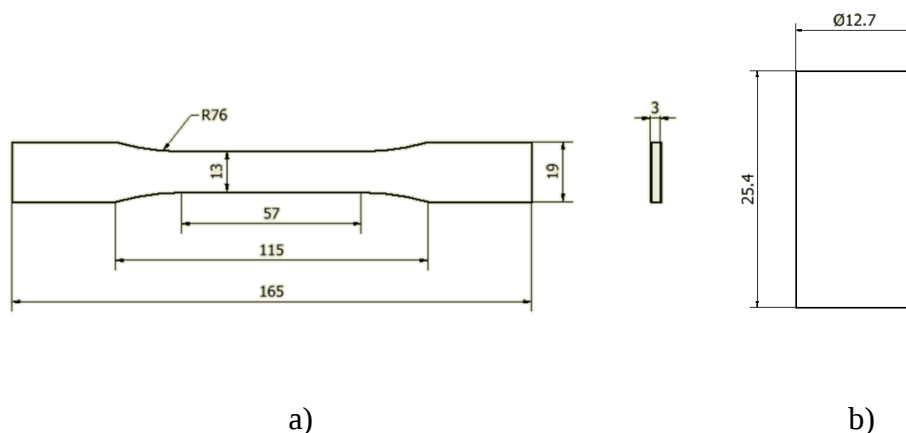


Figura 0.1. Dimensiones estándar de probetas de tracción tipo I a) y compresión b).

Dimensiones en mm.

La tasa de carga utilizada para los ensayos fue definida de acuerdo a su respectiva norma, siendo de $5 \frac{mm}{min}$ para tracción y $1,3 \frac{mm}{min}$ para compresión. Los ensayos fueron realizados en una máquina de ensayos universal de la marca Test Resources ubicada en el laboratorio de Bioingeniería de la Universidad Adolfo Ibáñez de Viña del Mar.

Tracción.

Los valores obtenidos del módulo de elasticidad y tensión máxima para el ensayo de tracción se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 0.1. Resultados obtenidos del ensayo de tracción con variación de infill y orientación.

	Relleno 15%		Relleno 100%	
Probeta	Módulo elástico MPa	Tensión máxima MPa	Módulo elástico MPa	Tensión máxima MPa
1	620,5	11,2	2571,4	49,6
2	929,7	19,5	2442,1	58,1
3	809,0	14,9	2116,6	52,1
4	802,2	16,3	2426,0	51,5
5	799,4	13,4	2453,5	57,0
Promedio	792,1	15,1	2401,9	53,7
DS	110,5	3,1	169,5	3,7
1	836,1	7,9	1998,6	28,4
2	765,2	7,0	2062,2	37,8
3	765,3	6,6	2112,5	39,5
4	827,7	8,9	2058,0	30,1
5	820,1	7,5	1992,2	34,0
Promedio	802,9	7,6	2044,7	34,0
DS	34,8	0,9	49,9	4,8

En la figura 7.2 se muestra la comparación de los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas a tracción.

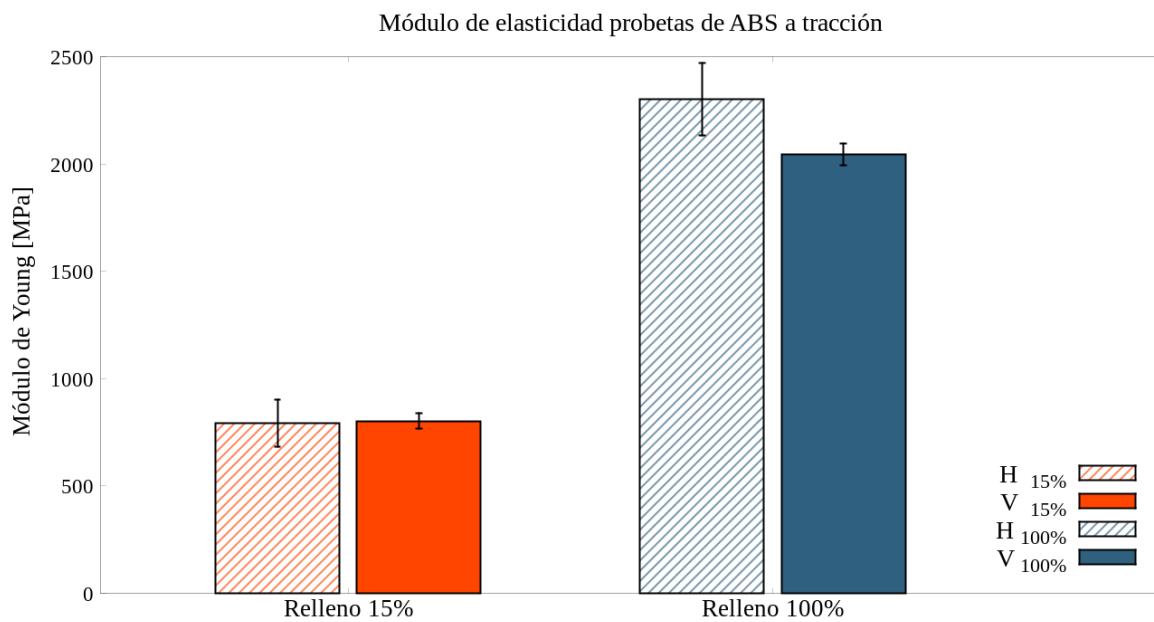


Figura 0.2. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a tracción.

En la figura 7.3 se muestra la comparación de la resistencia máxima de las probetas ensayadas a tracción.

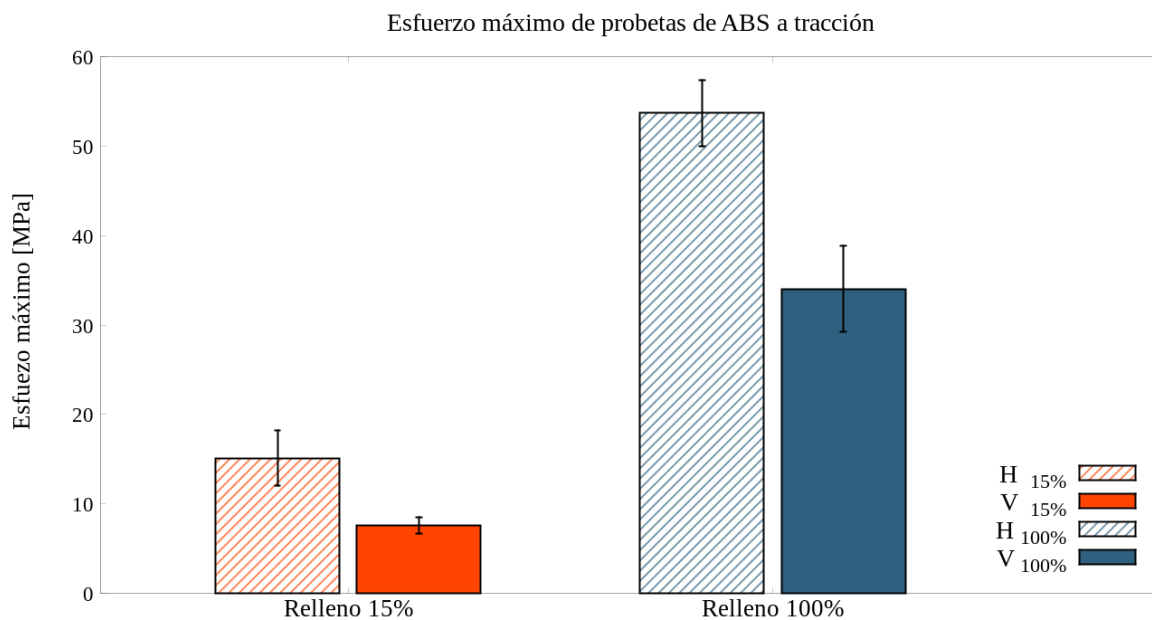


Figura 0.3. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar de la resistencia máxima para probetas a tracción.

En los resultados podemos apreciar que el relleno y la orientación en la fabricación afectan el desempeño a tracción de las probetas. En el caso de la orientación vemos que el módulo de Young para los casos de relleno 15% no presenta gran variación. Para el caso de relleno 100% presenta un valor mayor para las probetas horizontales. En la resistencia máxima las probetas impresas horizontalmente tienen, para ambos valores de relleno, un mayor valor. Para el caso del relleno el resultado es el esperado y existe una clara diferencia entre las probetas de 15% y 100%, mostrando estas últimas valores mayores del módulo elástico y resistencia máxima.

Compresión.

Los valores del módulo de elasticidad y tensión máxima para el ensayo de compresión se muestran en la tabla 7.2.

Tabla 0.2. Resultados ensayo de compresión con variación de relleno y orientación.

Orientación	Probeta	Relleno 15%		Relleno 100%	
		Módulo elástico MPa	Tensión máxima MPa	Módulo elástico MPa	Tensión máxima MPa
H	1	302,9	14,1	901,7	45,1
	2	294,3	13,4	1098,5	44,6
	3	305,6	13,9	1023,2	45,9
	4	298,2	13,5	1013,6	45,1
	5	303,7	14,1	992,2	44,8
	Promedio	300,9	13,8	1005,8	45,1
	DS	4,6	0,4	70,6	0,5
V	1	292,1	12,5	805,3	43,9
	2	294,8	12,5	1163,0	45,4
	3	229,4	12,4	1074,2	43,5
	4	257,0	12,4	976,4	42,9
	5	288,1	12,6	1051,1	45,5
	Promedio	272,3	12,5	1014,0	44,2
	DS	28,4	0,1	134,3	1,2

En la figura 7.4 se muestra la comparación de los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas a compresión.

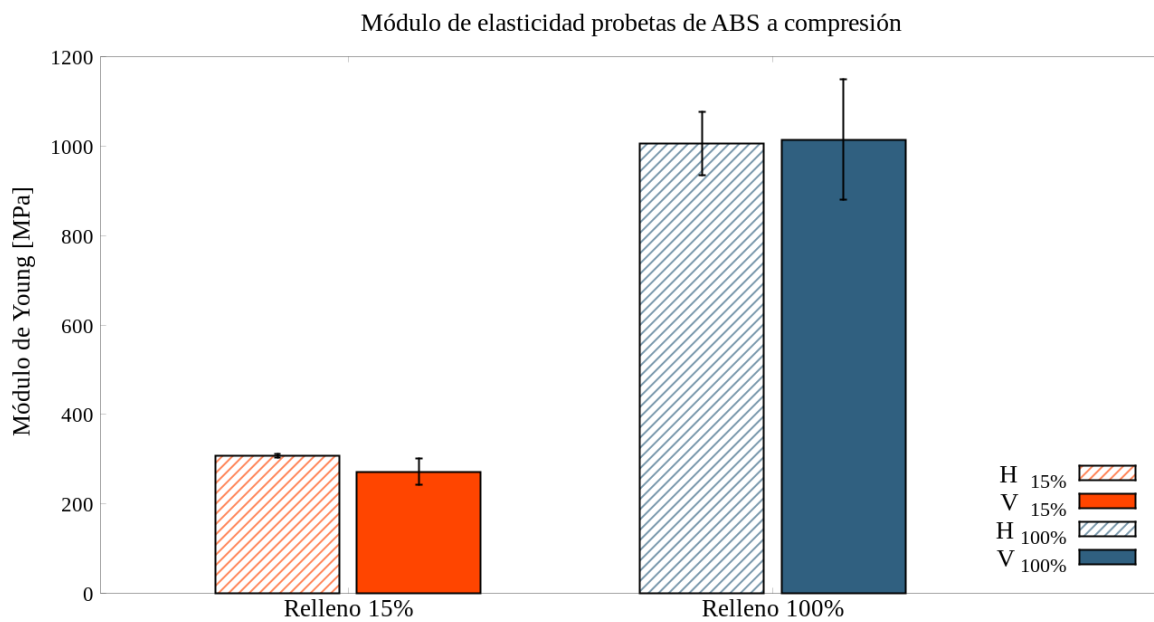


Figura 0.4. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a compresión.

En la figura 7.5 se muestra la comparación de la resistencia máxima de las probetas ensayadas a tracción.

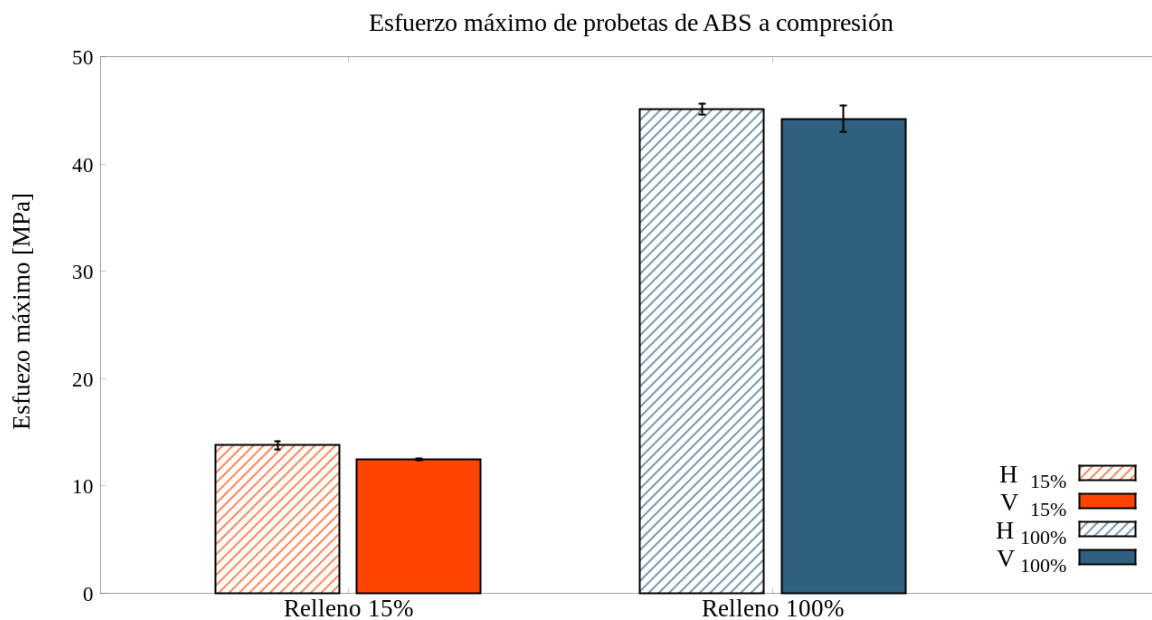


Figura 0.5. Gráfico de los valores promedio y desviación estándar del módulo de elasticidad para probetas a compresión.

En estos resultados podemos apreciar que para las probetas de compresión, la orientación no afecta de manera importante las propiedades mecánicas. Se observa que para el caso del relleno 15% tanto el módulo de elasticidad como la resistencia máxima son mayores para las probetas impresas horizontalmente, pero para las de relleno de 100% el módulo de elasticidad es mayor para las verticales y la resistencia máxima es casi igual para ambos casos. La densidad de relleno afecta a las probetas de compresión de manera similar a las probetas de tracción. Existe una clara diferencia entre las probetas de 15% y 100%, mostrando estas últimas valores mayores del módulo elástico y resistencia máxima.

La densidad del relleno es un parámetro fundamental en la impresión 3D que afecta significativamente las propiedades mecánicas de los objetos creados. La variación de este parámetro hace que el material de la pieza creada cambie convirtiéndose en un compuesto de aire y polímero.

La orientación de impresión también afecta las propiedades mecánicas de la pieza final. Aunque, el efecto es diferente dependiendo del esfuerzo aplicado y de otros parámetros como la densidad de relleno. En el caso de la tracción pura el desempeño es mejor para probetas impresas horizontalmente, para el caso de compresión pura la variación no es significativa entre las dos orientaciones estudiadas.