

Validación de la aplicación de normas para determinar propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica con métodos numéricos (MEF)

Edwar David Garzón Bello, Iván Felipe Sierra Nossa

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico

Director

Octavio Andrés González Estrada, PhD.

Ingeniería Mecánica

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Acosta

Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2019

Agradecimientos.

La vida esta llena de momentos hermosos y lo mejor de esos momentos es poder compartirlos con otros, en mi vida he tenido la fortuna de conocer grandes personas, que de alguna forma me han ayudado a realizar varios de mis sueños y metas, por eso en esta ocasión quiero agradecer a las personas más importantes en de mi vida que me apoyaron en este logro, primero a mi angelito y madre Nidia que fue un apoyo muy importante en mi vida con ese amor de madre que nunca olvidare y siempre llevare presente, a mi padre Heber por apoyarme en todo este proceso y creer en mí, a mi hermano Oscar por todas experiencias que hemos compartido juntos, a mi hermana Laura por los consejos y momentos felices que me brinda, a mi hermana Juliana por todo el amor y cariño, a Tatiana una linda persona que me llena de felicidad y amor.

A la Universidad Industrial de Santander, mis amigos y profesores que me ayudaron a crecer profesionalmente.

EDWAR DAVID GARZÓN BELLO

Agradecimientos.

Primeramente, quiero expresar mi gratitud a Dios, por sus innumerables bendiciones que me ha dado desde el primer día que puse pie en la universidad y a pesar de tantas dificultades nunca me dejó solo, gracias a Él estoy aquí culminando este trabajo.

A mi familia, empezando por mis padres, Orlando y Patricia, infinitas gracias por su sacrificio y confianza en mí, por brindarme la oportunidad de estudiar, a mi madre quien le dedico este trabajo, porque su apoyo moral y espiritual me permitieron nunca rendirme a cumplir mis metas, este logro también es de ella. A mis hermanos Sara y Juan, por sus valiosos consejos, por último, a mi Abuela Armira y a mi tía Astrid, quienes siempre se preocuparon por mi y velaron por mi bienestar.

Un especial agradecimiento a Valentina, quien desde que la conocí fue el mejor apoyo emocional que nunca había tenido, es una gran persona, una bendición para mí, porque siempre me dio el apoyo que necesité y siempre me ayudó a encontrar la solución aun cuando lo creía todo perdido.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería mecánica, por sus valiosos conocimientos, por sus excelentes docentes, a todos y cada uno de ellos por sus consejos y paciencia, por incentivarnos en la búsqueda de conocimientos e investigación.

IVAN FELIPE SIERRA NOSSA

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo general	20
1.2 Objetivos específicos.....	20
2. Marco Metodológico	21
2.1 Dimensiones geométricas de las probetas	22
2.2 Parámetros de diseño.....	24
2.3 Parámetros de ensayo	25
2.4 Propiedades mecánicas.....	27
2.5 Micromecánica de las láminas de refuerzo	28
2.6 Modelo computacional.....	29
3. Resultados y Discusión	31
3.1 Resultados de pruebas experimentales.....	31
3.2 Resultados numéricos.....	34

3.3	Comparación del modelo computacional contra modelos experimentales	34
3.4	Criterio de fallo	36
4.	Conclusiones	39
	Referencias Bibliográficas	40
	Apéndices	

Lista de Tablas

Tabla 1. Selección de normas.....	22
Tabla 2. Dimesión de las probetas según noma ASTM D3039M.....	23
Tabla 3. Dimesión de las probetas según noma ISO 527 - 4	23
Tabla 4. Párametros de diseño de las probetas para cada norma	24
Tabla 5. Propiedades de los materiales	29
Tabla 6. Resultados de pruebas experimentales.....	31
Tabla 7. Resultados simulación.....	34
Tabla 8. Comparación modelo experimental vs modelo computacional	34
Tabla 9. Tensiones maximas vs tensiones de falla	37

Lista de Figuras

Figura 1. Geometría de las muestras de ensayo -----	23
Figura 2. Fotografía de las probetas.-----	24
Figura 3. Representación de la estructura por capas de las probetas ISO.-----	25
Figura 4. Representación estructura por capas de la probeta. -----	25
Figura 5. Maquina universal de ensayos.-----	26
Figura 6. Convergencia de los esfuerzos -----	30
Figura 7. Ensayo a tracción para diferentes tipos de normas -----	33
Figura 8. (a) Fotografía de la muestra en máquina de ensayo. (b) Fotografía de la fractura de la muestra.-----	33
Figura 9. Comparación de modelos experimentales contra modelos computacionales -----	35
Figura 10. Criterio de fallo probeta ISO-----	36
Figura 11. Criterios de falla probeta ASTM -----	36
Figura 12. Esfuerzo capa de refuerzo -----	37
Figura 13. Esfuerzo capa de refuerzo. -----	38
Figura 14. Esfuerzo máximo todo el material -----	38
Figura 15. Deformación máxima todo el material -----	38

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos en el CD, también pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Apéndice A: Resultados del ensayo a tracción para las probetas ASTM

Apéndice B. Resultados del ensayo a tracción para las probetas ISO

Apéndice C: Representación de las probetas

Apéndice D: Resultados del modelo computacional para el ensayo a tracción

Apéndice E: Ilustración de la muestra en software ANSYS

Resumen

TÍTULO: Comparación de propiedades mecánicas a tracción obtenidas mediante ensayos experimentales y un modelo numérico de la micromecánica de material compuesto de fibra larga fabricado por manufactura aditiva*

AUTORES: Edwar David Garzón Bello, Iván Felipe Sierra Nossa**

PALABRAS CLAVES: Compuesto, Manufactura aditiva, CAD, Estándares, Ensayo tracción.

DESCRIPCIÓN: Los materiales compuestos son cada días más demandados por parte de los ingenieros para diversas aplicaciones, gracias a su alta resistencia y baja densidad que los caracteriza, una de las maneras de obtener estos materiales es a través de la tecnología de manufactura aditiva la cual está emergiendo como un proceso capaz de materializar un modelo de diseño asistido por computadora para construir piezas en materiales compuestos adicionando material por capas y en fibras continuas, una técnica muy útil que está implementada con éxito como nueva alternativa para los procesos de fabricación de prototipos y piezas fundamentales de diseño mecánico en la industria, teniendo en cuenta que este tipo de tecnología se utilizada solo para la creación de prototipos y que en la actualidad se pueden obtener piezas funcionales con una alta complejidad geométrica, el objetivo de esta investigación es conocer el alcance de la investigación, adicionalmente se prevé crear un modelo matemático de la micromecánica del material para modelarlo por medio de elementos finitos (MEF) para analizar su comportamiento y obtener sus propiedades mercancías cuando es sometido a una fuerza de tracción ; de este modo crear un marco comparativo entre un modelo experimental basado en las diferentes normas que

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica. Director: Ing. Octavio Andrés González Estrada

permitan caracterizar dicho material y su respectivo modelo matemático para determinar cuál de estas presenta una mayor afinidad.

Abstract

TITLE: Compare of tensile mechanical properties obtained by experimental tests and a numerical model of the long-fiber composite micromechanics manufactured by additive manufacturing*

AUTHORS: Edwar David Garzón Bello, Iván Felipe Sierra Nossa**

KEYWORDS: Composites, Additive Manufacturing, Continuous Fiber, polymers, micromechanics, finite elements.

DESCRIPTION: The composite materials are every days more demanded on the part of the engineers for diverse applications, thanks to its high resistance and low density they are characterized them, one of the ways of obtaining these materials is across the technology of additive manufacture which is emerging as a process capable of materializing a computer-assisted design model to construct pieces in composite materials by adding material by layers and in continuous fibers, a very useful technique that is successfully implemented like new alternative for the production processes of prototypes and fundamental pieces of mechanical design in the industry, bearing in mind that this type of technology was used for mainly for the creation of prototypes and that at present functional pieces can be obtained with a high geometric complexity, the target of this investigation is to know the scope of the investigation, additionally it is foreseen to create a mathematical model of the micromechanics of the material to model it by means of finite elements (FEM) to analyze its behavior and to obtain its mechanical properties when it is submitted to a

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Mechanical Engineering Director: Ing Octavio Andrés González Estrada

tractive force; this way to create a comparative frame between an experimental model based on the different norms that allow to characterize the above mentioned material and its respective mathematical model to determine which of these presents a major affinity

Introducción

Los materiales compuestos han captado el interés de nuevas investigaciones científicas e industriales, la unión de dos o varios materiales permiten obtener propiedades únicas, como alta resistencia mecánica con respecto a su densidad, alta resistencia a la corrosión y flexibilidad de diseño (Hern & Barluenga, 2014), estas ventajas se aprecian en el desarrollo de la industria automotriz, aplicado en la fabricación de componentes de automoción donde se han realizado estudios de nuevos materiales como los compuestos de fibra de carbono y fibras naturales (CFN) (Borrachero, 2016; Paredes Salinas, Pérez Salinas, & Castro Miniguano, 2017). Con fines de producción ecológica y reutilizable, además de la tendencia a reemplazar los compuestos convencionales por compuestos reforzados por CFN, estos compuestos verdes (Pickering, Efendy, & Le, 2016) han demostrado que se pueden adaptar a aplicaciones de industrias como la construcción (Pérez, Paredes, Lalaleo, Arroba, & Núñez, 2017).

Diversas investigaciones se han realizado en paralelo con los materiales de CFN, como el estudio de los nanocompuestos, estos han captado un enorme interés científico debido a sus grandes propiedades que se presentan en la síntesis y morfología de adición de micropartículas de polímeros (Ajayan, Schadler, & Braun, 2003), además se ha indagado en nuevos tipos de matrices elastoméricas que han logrado resultados en sus propiedades, mejores que el negro de carbono y sílice (Carretero-González, Verdejo, Arroyo, & Lopez-manchado, 2009).

Según la tendencia de reemplazar los compuestos convencionales, en los últimos años también se ha desarrollado una tendencia a sustituir los métodos de manufactura convencionales; las tecnología de impresión tridimensional (3D) ha acogido un nuevo modelo para el diseño y materialización de piezas funcionales (Bogue, 2013), la impresión 3D, también denominada como una de las tres tecnologías fundamentales de la manufactura, catalogada como tecnología de manufactura aditiva (AM) o de prototipado rápido, consiste en crear un objeto uniendo capa por capa, además que esté altamente optimizados utilizando herramientas CAD/CAE de gran avance (Gebhardt, 2012); en la actualidad se utiliza mucho en la industria automotriz (Borrachero, 2016; Paredes Salinas, Pérez Salinas, & Castro Miniguano, 2017), aeroespacial (Gebhardt, 2012), medica, dental y de educación (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018). La AM ha aumentado en los últimos años y se ha utilizado con éxito para producir materiales compuestos en matrices metálicas o poliméricas (Martínez, González-Estrada, & Martínez, 2017), lo que permite fabricar piezas complejas para sectores de diferentes industrias (Ning, Cong, Qiu, Wei, & Wang, 2015).

Los paradigmas de diseño están cambiando y, en la actualidad, no existen limitaciones por restricciones geométricas, como las que se consiguen de los procesos tradicionales para fabricar materiales compuestos (Gebhardt, 2012). Recientemente, se ha desarrollado una técnica de modelado por deposición fundida (FDM) que permite el uso de filamento de fibra continuo (Baumann et al., 2017), y se ha propuesto una investigación sobre la caracterización mecánica de las piezas producidas por esta tecnología (Melenka, Cheung, Schofield, Dawson, & Carey, 2016) para producir materiales por AM.

Las máquinas comerciales disponibles en el mercado son limitadas, los equipos Markforged son capaces de construir compuestos con fibras continuas (Yasa & Ersoy, 2018), la Mark Two, es una

impresora de primera línea de la empresa Markforged, y es capaz de imprimir materiales compuestos resistentes como el aluminio, ofrece piezas de alto rendimiento como nylon reforzado con fibra de vidrio, fibra de carbono, etc. desde la plataforma de impresión por medio de un software de diseño CAD, con la confiabilidad de la fuerza de trabajo para obtener piezas resistentes y variables como una impresora industrial 3D, en versión de escritorio (Markforged Inc., n.d.).

Para incursionar en este tipo de tecnología, se necesita investigar el comportamiento de estos materiales fabricados para entender mejor su respuesta frente a diversas condiciones de ensayos y parámetros, como la resistencia a la tracción; se han realizado varias investigaciones para caracterizar el comportamiento de materiales compuestos tipo FDM con fabricación continua de filamentos CFF de AM, en nylon, fibras de vidrio y carbono (Beltrán, 2017; González, Pertuz, & Quiroga Mendez, 2018), se demostró que variando la orientación de la fibra y usando patrones de diseño, se logró aumentar la resistencia en patrones de matrices tipo triangular de igual manera para el módulo de elasticidad.

Además de los modelos experimentales para definir las propiedades mecánicas de los materiales, se pueden utilizar las teorías de elementos finitos (MEF), esta se puede desarrollar para estructuras multicapas e isotrópicas de placas por medio de una interfaz de modelado computacionales, con el fin de predecir el comportamiento del material, sus diferentes criterios de falla y así definir sus propiedades; varios autores han estudiado materiales compuestos en conjunto con métodos MEF en estructuras anisotrópicas basados en fibras continuas CFF (Carrera, 2002), principios de la mecánica de daños para problemas de tensión en laminados de epoxi-grafito (Whitcomb, Raju, & Goree, 2002) y medir la respuesta mecánica de un poste endodóntico reforzado con fibra de vidrio (Pegoretti, Fambri, Zappini, & Bianchetti, 2002).

En esta investigación, la respuesta mecánica a las cargas tensionales para un material compuesto será fundamental para crear un marco comparativo entre un modelo experimental y un modelo de ensayo computacional determinado por métodos de elementos finitos, utilizando un material compuesto reforzado con fibra larga de vidrio y una matriz polimérica de nylon, fabricado por una impresora 3D tipo Markforged Mark Two; se estableció seleccionar y comparar que tipo de norma para caracterizar materiales compuestos se adecua para estos materiales fabricados por AM y comparar cual norma cumple mayor afinidad y proximidad con el modelo computacional.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar la norma para ensayos a tracción en materiales compuestos de fibra larga reforzado con fibra fabricados por manufactura aditiva (AM), que presente una mayor proximidad y afinidad a un modelo numérico de la micromecánica, contribuyendo con la misión de la universidad industrial de Santander y de la escuela de ingeniería mecánica en la generación y adecuación de conocimiento mediante la investigación.

1.2 Objetivos específicos

- Hallar las normas que se utilizan para determinar las propiedades en tracción de un material compuesto de matriz polimérica tipo nylon reforzado con fibra de vidrio y fabricado mediante manufactura aditiva.
- Realizar los ensayos de tracción a un material compuesto de matriz tipo nylon reforzado con fibra de vidrio y fabricado mediante manufactura aditiva, bajo los parámetros establecidos por cada norma.
- Diseñar un material compuesto de matriz de nylon reforzado con fibra de vidrio, con un modelo matemático aplicado en simulación por medio del software ANSYS de acuerdo con las propiedades intrínsecas que componen el material.
- Comparar la simulación con respecto a los métodos experimentales realizados por cada norma para analizar cuál de estas presenta una mejor afinidad.

2. Marco Metodológico

La validación de los ensayos a tracción entre las probetas de nylon con refuerzo de fibra continua y el modelo numérico de la micromecánica del material, se basaron en dos etapas, la primera desarrollo experimental y la segunda el desarrollo del modelo computacional.

Selección de normas.

Con el fin de obtener una aproximación ordenada, en común existen los diferentes tipos de estándares internacionales para aplicar y formular normativas en diferentes áreas científicas, además de facilitar especificaciones técnicas como parámetros establecidos para pruebas experimentales de laboratorio, asegurando resultados certificados.

Actualmente existen diferentes organizaciones de estándares, entre las cuales se destacan en el campo de la ingeniería como ASTM e ISO entre otras; para establecer un modelo práctico, se analizaron dos criterios fundamentales en la selección de las normativas adecuadas, teniendo presente el tipo de ensayo y el material a usar en específico. En Tabla 1 se muestra los estándares más concernientes de lo que podría ser un modelo compatible con el objeto esta investigación.

Tabla 1

Selección de normas

NORMAS	UNE-EN- ISO 527-1	UNE-EN-ISO 527-2	UNE-EN- ISO 527-3	UNE-EN- ISO 527-4	UNE-EN- ISO 294-1	ASTM D 3039M-17	ASTM D 638
Compuesto de fibra continua	χ	χ	χ	✓	χ	✓	χ
Ensayo a tracción	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Resultado Compatible	χ	χ	χ	✓	χ	✓	χ

Se seleccionaron ASTM D3039M – 17 (International, 2014) e ISO 527 – 4 (ISO-UNE, 2012), este par de estándares cumplen con éxito las características adecuadas para caracterizar un material compuesto de fibra continua en un ensayo a tracción.

2.1 Dimensiones geométricas de las probetas

A modo de compatibilidad se seleccionó la probeta tipo II de la norma ASTM y la probeta tipo 2B de la norma ISO, una probeta de forma rectangular plana (ver Figura 1), sin taladrados ni refuerzos en sus talones extremos. Las medidas fueron imprescindibles para encontrar el área transversal que determina la resistencia del material. El número de muestras de prueba también se determinó con el valor mínimo estipulado en las normas. Los resultados de las dimensiones recomendadas para cada muestra se encuentran en Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2

Dimensiones de las probetas según la norma ASTM D3039M

	Medida nominal (mm)	Medida promedio de la probeta (mm)	% Diferencia
Longitud total (lt)	250	248,89	0,44
Ancho (w)	25	25,21	0,84
Espesor (t)	2,5	2,65	6

Tabla 3

Dimensiones de las probetas según la norma ISO 527 – 4.

	Medida nominal (mm)	Medida promedio de la probeta (mm)	% Diferencia
Longitud total (lt)	240,9	240,97	0,02
Ancho (w)	12,7	12,86	1,25
Espesor (t)	2	2,13	6,5

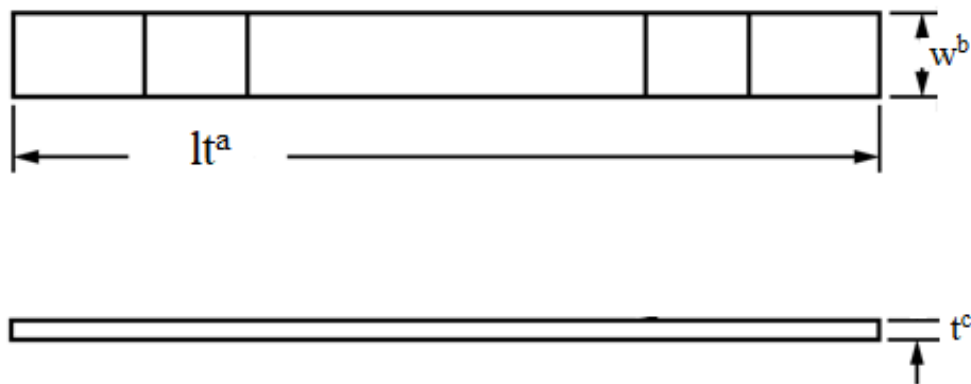


Figura 1. Geometría de las muestras de ensayo, (a) lt : longitud total. (b) w : anchura de las muestras de ensayo. (c) t : espesor de las muestras de ensayo.

2.2 Parámetros de diseño

Las muestras de ensayo se conformaron en una máquina de fabricación aditiva tipo Markforged edición Mark Two, este equipo es capaz de imprimir en filamentos de fibra continua en nylon, fibra de carbono, kevlar y fibra de vidrio(Dickson, Barry, McDonnell, & Dowling, 2017); en la Tabla 4, se aprecia los parámetros que se estipularon para estructurar la composición de cada probeta.

Tabla 4

Parámetros de diseño de las probetas para cada norma

Probeta	Matriz	Refuerzo	Capas de Nylon	Capas de fibra	Capa de relleno triangular	Angulo de fibra
ISO 527	Nylon	Fibra vidrio	12	8	0	0°
ASTM D3039M	Nylon	Fibra vidrio	13	8	4	0°



Figura 2. Fotografía de las probetas.

Las probetas fabricadas por AM con una matriz de nylon y reforzado con fibra de vidrio se establecieron con una configuración de patrón de relleno tipo triangular, para dirigir la concentración de tensiones en las pruebas de tracción; las capas sólidas están hechas de nylon y orientadas a 0 °, con el fin de situar las fibras en la misma orientación en la cual se aplica la tensión con respecto al eje longitudinal, estas mismas capas de relleno están orientadas de acuerdo con un patrón seleccionado como se ilustra en la Figura 3 y Figura 4.

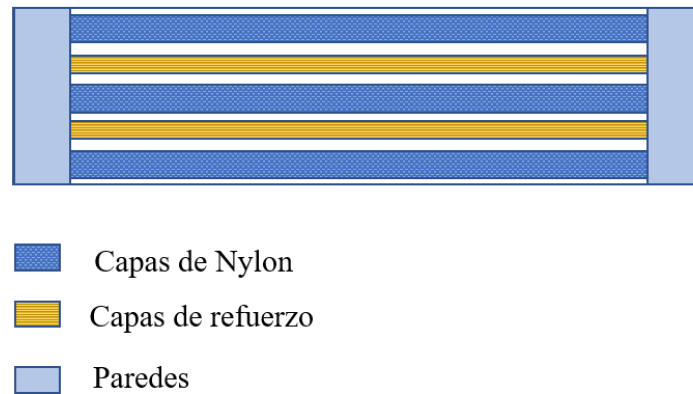


Figura 3. Representación de la estructura por capas de las probetas ISO.

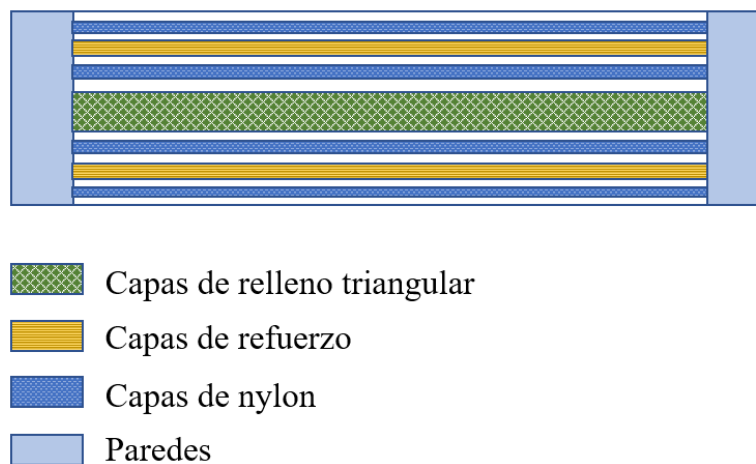


Figura 4. Representación estructura por capas de la probeta ASTM

2.3 Parámetros de ensayo

Existen diferentes modelos de máquinas universales de ensayos, entre ellos se encuentran los de: una sola columna, doble columna, de suelo, serie Satec, de automatización, entre otras, con el mismo principio de una prensa, estos miden las propiedades de los materiales sometiéndolos a ensayos de compresión y tracción (Montalvo Paspuezan, 2018), tienen como función comprobar

las resistencia de diferentes materiales, por esta razón posee un sistema para aplicar carga controlada a una probeta, midiendo gráficamente la deformación y la carga máxima al momento de su ruptura (Huang & Young, 2014).

Las muestras fueron evaluadas en la máquina de banco de pruebas a tracción modelo de mesa Bionix 370 de MTS, (ver en la Figura 5, la presión se logra mediante mandíbulas accionadas por un sistema hidráulico, cuenta con una celda de carga de 25 KN; la deformación longitudinal y la contracción de la sección transversal se midieron utilizando el LVDT de la máquina y el láser extensómetro LX500, respectivamente; para corresponder las normas se especificó que este trabaje a una velocidad de 2 mm/min.



Figura 5. Máquina universal de ensayos.

2.4 Propiedades mecánicas

El esfuerzo se calculó dividiendo la fuerza última o fuerza de ruptura promedio medida en newton (N) entre el área transversal promedio de las muestras, medido en milímetros cuadrados (mm^2). La tensión media (σ) se expresa en mega pascuales (MPa).

La deformación ε se evalúa en función del impulso de la distancia entre las mordazas y el eje inicial entre ellas utilizando el extensómetro de la maquina universal de ensayos; se expresa como una relación adimensional entre la longitud de referencia L_o medida en milímetros (mm) y la relación entre longitud de las probetas con la marca de referencia ΔL_o medida en milímetros (mm).

EL esfuerzo se evaluó cómo la relación entre la diferencia de tensiones $\Delta\sigma$ medido en mega pascuales (MPa) y una diferencia de valor de deformaciones $\Delta\varepsilon$ medido en un punto nominal, según las normas ASTM D3039M e ISO 527 este punto nominal corresponde a una regresión estadística para evaluar un material compuesto en su etapa de elasticidad y corresponde a $0.001 < \varepsilon < 0.003$ para σ_1 y σ_2 respectivamente. El módulo de elasticidad Et se midió en mega pascuales (MPa).

El coeficiente de Poisson ν se evaluó como la relación entre la deformación unitaria de la sección transversal promedio $\Delta\varepsilon_n$, entre el aumento de la deformación unitaria promedio de la sección longitudinal de las muestras. $\Delta\varepsilon_l$ coeficiente de Poisson ν es una función adimensional.

2.5 Micromecánica de las láminas de refuerzo

La micromecánica se utiliza para comprobar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos dependiendo de las propiedades de la fibra y de la matriz, a partir de las interacciones microscópicas que se presentan en los elementos que componen el material; para determinar el comportamiento de una lámina de refuerzo es fundamental considerar que se trata de una lámina de fibra continua. Este análisis depende de varios factores como una perfecta unión entre la capa de fibra y matriz, la orientación y que estas sean isótropas (Sánchez Cepillo, 2011).

Según la propuesta de mezclas de Voigt (Fombuena, Boronat, Sánchez-Nácher, García-Sanoguera, & Balart, 2017), se aplica el modelo de homogenización constituido de la suma de un volumen de fibra y matriz, de igual forma para la composición de la masa y la densidad.

El cálculo del módulo de Young se realiza considerando la acción de una fuerza dirigida en la dirección de las fibras en un área transversal homogénea, una parte de esta fuerza es transmitida a la fibra y otra a la matriz, donde E_f y E_m corresponden al módulo de Young de la fibra y de la matriz correspondientemente, V_f y V_m equivalen al volumen de fibra y matriz correspondientemente.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f E_m + E_m V_f} \quad (2)$$

2.6 Modelo computacional

El análisis y modelado se realizaron mediante el método de elementos finitos utilizando el software ANSYS, con los módulos de análisis estructural y ACP (Ansys Composite Prepost). Primero se definieron los datos de los materiales, utilizando los recursos de las librerías existentes, los datos suministrados por el fabricante de la impresora Markforged (Markforged Inc., 2016) y las ecuaciones (1) y (2).

Tabla 5
Propiedades de los materiales.

MATERIAL	Ex (MPa)	Ey (MPa)	Ez (MPa)	vxy	vyz	vxz	Densidad (g/cm ³)
Nylon	940	/	/	0,39	/	/	1,1
Epoxy E-Glass	19895	7434,8	7434,7	0,28	0,36	0,28	1,47
Relleno triangular	1	1	255	0,49	0,001	0,001	0,08

Después se desarrolló un modelo de elemento lineal tipo SHELL 181 para el mallado, se realizaron diferentes pruebas a fin de analizar la convergencia de la solución, variando el número de elementos de la malla hasta obtener una variación de un 1% en el esfuerzo máximo, estos resultados se observan en la Figura 6.

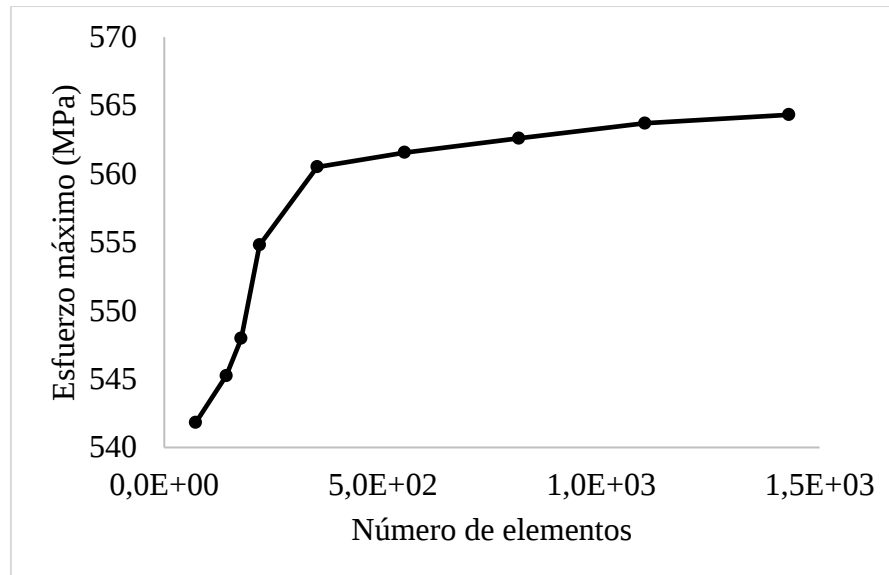


Figura 6. Convergencia de los esfuerzos

Para la construcción del material compuesto, se empezó seleccionando los materiales a utilizar en las capas, después se realizó la generación de capa por capa especificando el ángulo de las fibras, teniendo en cuenta las direcciones a las cuales las fibras se fabricaron, después se introdujeron las capas en orden ascendente.

Se aplicaron tres condiciones de contorno, una restricción tipo soporte de fijación en la cara frontal, una restricción tipo desplazamiento en la cara superior para evitar deformaciones en el eje Z, se aplicó igualmente una fuerza con los datos obtenidos en las pruebas experimentales en la cara trasera.

Se establece un criterio para definir que la falla de un material se producirá cuando el esfuerzo normal máximo en las muestras es igual o mayor al esfuerzo normal máximo de una probeta sometida al ensayo de tracción en el momento que se produce la ruptura. La teoría del criterio de

máximo esfuerzo normal es válida para materiales tanto dúctiles como frágiles (Beer, Russell Johnston Jr, DeWolf, & Mazurek, 2009), los materiales compuestos son considerados como frágiles, hecho que se debe a la poca deformación plástica que se presenta antes de su ruptura (Leon Becerra, 2018). Siendo $\sigma_1 > \sigma_{max}$ y $\sigma_{max} \geq S_{ut}$ para el esfuerzo último a tensión; $\varepsilon_1 > \varepsilon_{max}$ para el valor correspondiente en la deformación del punto de ruptura en σ_{max} .

3. Resultados y Discusión

Los resultados y los criterios a analizar se componen de dos etapas diferentes, la primera etapa consta del desarrollo experimental de los ensayos mecánicos a tracción siguiendo los parámetros indicados en la norma ASTM D3039M y la norma ISO 527; la segunda etapa del desarrollo de la investigación consta de los resultados mediante el modelo matemático.

3.1 Resultados de pruebas experimentales.

Tabla 6
Resultados pruebas experimentales

ESTÁNDAR	A (mm ²)	F(N)	σ (Mpa)	ε	E_t (Mpa)	ν
ASTM D3039M	66,80	13715,19	220,31	0,0611	6494,51	0,223
ISO 527-4	27,39	6409,50	234,00	0,0290	8495,28	0,312

Con la finalidad de alcanzar el objetivo de realizar los ensayos destructivos, para determinar las propiedades a tracción del material compuesto de fibra continua, primero se realizó un marco

comparativo para determinar cuál norma presenta un comportamiento óptimo. A partir de estos resultados experimentales para una composición fija del material, es decir donde los parámetros de diseño permanecieron iguales para los dos tipos de probetas, se determinó que el patrón de relleno tipo triangular produce una alta resistencia específica del material a referencia de diferentes tipos de compuestos reforzados con otros tipos de fibras, en investigaciones semejantes (González-Estrada et al., 2018).

En la figura 7 se representa una gráfica de la comparación del esfuerzo contra la deformación para cada norma, se destaca que los resultados obtenidos para las probetas de la norma ISO 527, se deforman proporcionalmente, dando cumplimiento a la ley de Hooke (Del Río Merino, Hernández Olivares, & Comino Almenara, 2008) y la rotura se genera sin presentar fluencia previa, alcanzando una resistencia hasta de 234 (MPa).

Los primeros resultados para la probeta de la norma ASTM D3039M, se observa cómo el material presenta una deformación elástica similar en comparación con la otra norma; en un rango entre los 30 y 40 MPa se alcanza un punto de inflexión, cabe resaltar que por este punto y siguiendo la norma para caracterizar en modulo de elasticidad implica un alto contraste de este resultado, con se encuentra en la Tabla 6, después de este punto, se muestra un material resistente y frágil que presenta una deformación plástica hasta alcanzar en punto de ruptura,

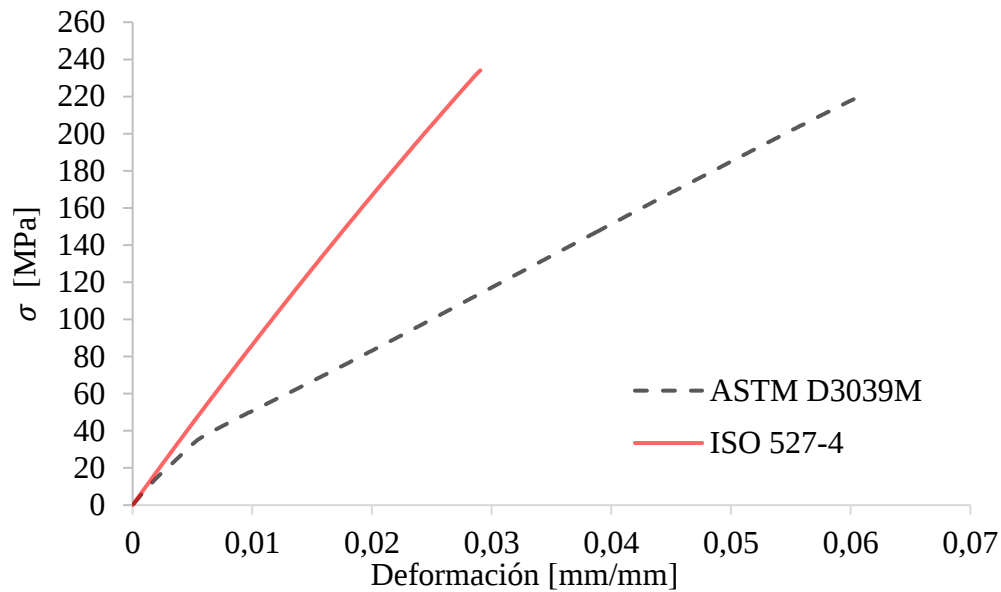


Figura 7. Ensayo a tracción para diferentes tipos de normas

Comparando los resultados experimentales entre sí, un modelo más aproximado para caracterizar una muestra de material compuesto de fibra continua fabricado por AM es el que presenta el estándar ISO 527, ya que destaca una mayor resistencia a la tracción que la norma ASTM D3039M contra una menor deformación longitudinal.



Figura 8. (a) Fotografía de la muestra en máquina de ensayo. (b) Fotografía de la fractura de la muestra.

3.2 Resultados numéricos

Los valores presentados en la Tabla 7 corresponden a los resultados del método computacional, donde se presenta el esfuerzo promedio, la deformación máxima y el desplazamiento máximo, estos valores obtenidos a la fuerza máxima registrada en el modelo experimental.

Tabla 7.
Resultados simulación

ESTÁNDAR	F(N)	σ (MPa)	ϵ	Desplazamiento máximo
ISO 527	6400	221,35	0,035	7,81
ASTM D3039	14050	196,06	0,052	10,2

3.3 Comparación del modelo computacional contra modelos experimentales

Para comparar los dos modelos se tuvieron en cuenta los siguientes dos criterios: el esfuerzo y la deformación. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8.
Comparación modelo experimental vs modelo computacional.

	σ Exp (MPa)	σ Teórico (MPa)	Error (%)	ϵ Exp	ϵ Teórico	Error (%)
ISO	234,00	221.35	5,71	0,0332	0,0357	7
ASTM	220,31	196,06	12,36	0,0611	0,0524	16,61

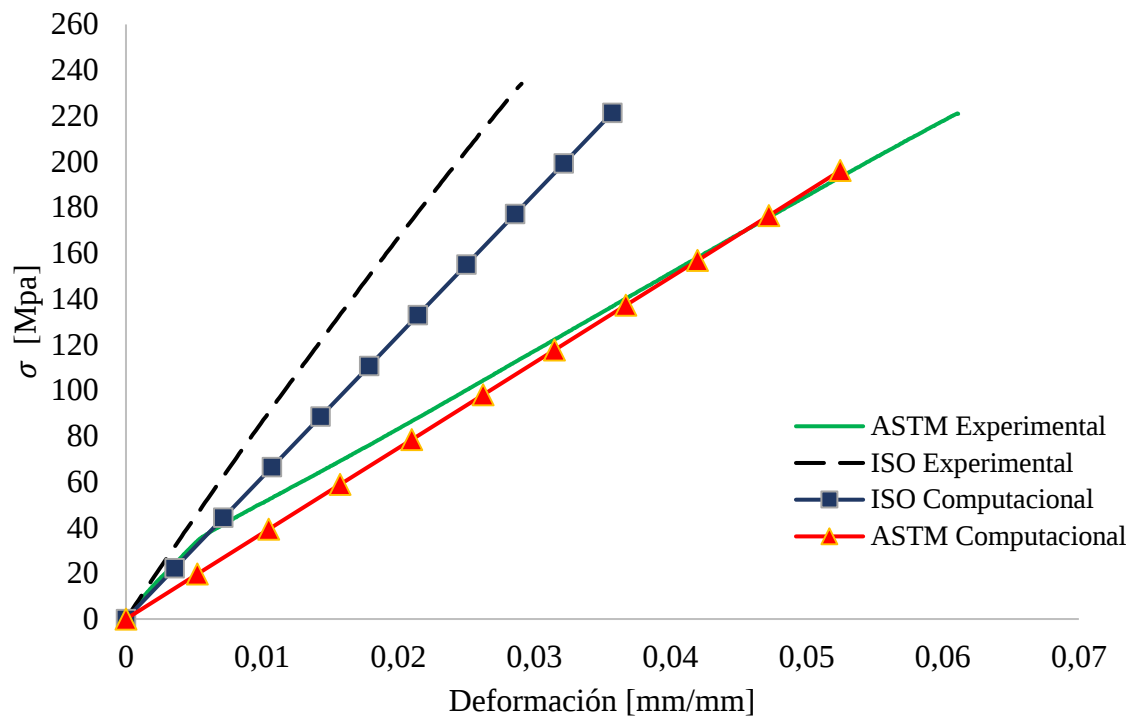


Figura 9. Comparación de modelos experimentales contra modelos computacionales

Comparando los resultados de las pruebas experimentales contra el modelo computacional de las muestras tipo ISO, se determinó un comportamiento para un material de gran resistencia; se destaca un contraste del 5,71% de error en criterios de resistencia y del 7% en criterios de deformación; valores significativamente altos teniendo en cuenta que se optó por conseguir las mejores condiciones para comparar los modelos experimentales con los modelos computacionales, también se destaca que las muestras experimentales tiende a presentar mejores resultados dado que se obtiene una mayor resistencia a la tracción, contra una menor deformación longitudinal.

El valor último registrado en la prueba experimental bajo la norma ASTM como se aprecia en la Figura 9, alcanza un valor máximo de 0,0611 y un esfuerzo máximo de 220,31 (MPa), diferentes a los de la simulación donde su deformación máxima y esfuerzo máximo alcanza un valor de 196,06

y 0,0524, presentado un error más alto en comparación a los modelos bajo la norma ISO debido a que para la simulación se tuvieron en cuentas los valores últimos del modelo experimental.

3.4 Criterio de fallo

Se analizó el factor de seguridad mediante el criterio de falla de máxima deformación y máximo esfuerzo. En la Figura 10 y 11 se muestra un valor de $e1t$ en la zona de falla, la e representa un fallo por deformación, el 1 que se presento en una sola dirección y por último la t que esta sometidas a tensión.



Figura 10. Criterio de fallo probeta ISO



Figura 11. Criterios de falla probeta ASTM

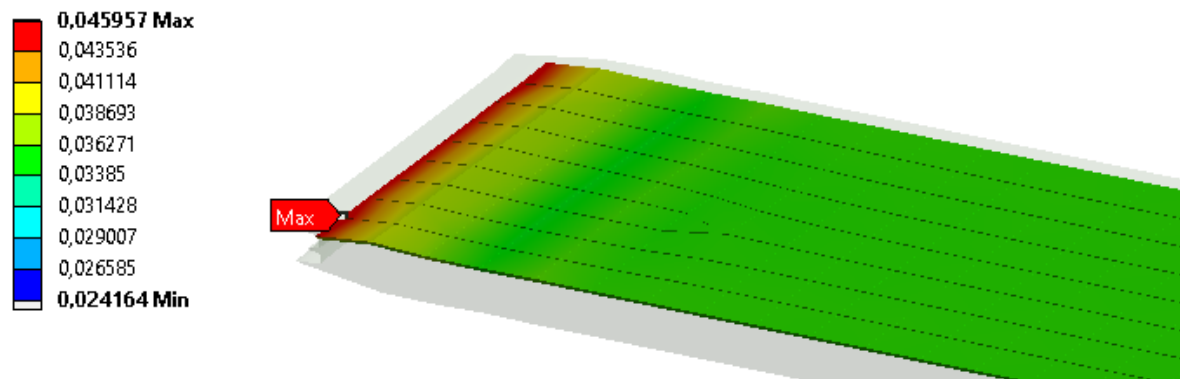
En la Tabla 9 se presentan las tensiones máximas comparadas con las tensiones de fallo

Tabla 9.

Tensiones máximas vs Tensiones de fallo

	ISO		ASTM	
	Tensión máxima	Tensión fallo	Tensión máxima	Tensión fallo
Matriz	165,18	116,4	105,82	83,04
Refuerzo	683,43	481,6	726,69	465,64
Relleno triangular	/	/	59,04	37,92

Se puede observar que la falla ocurre primero en las capas de refuerzo y después en la matriz, en la Figura 12 y Figura 13 podemos observar los esfuerzos en las capas más críticas a la fuerza máxima, estos datos son de la probeta ISO debido a que las dos probetas presentan el mismo comportamiento solo se ilustran los resultados de una.

*Figura 12. Esfuerzo capa de refuerzo*

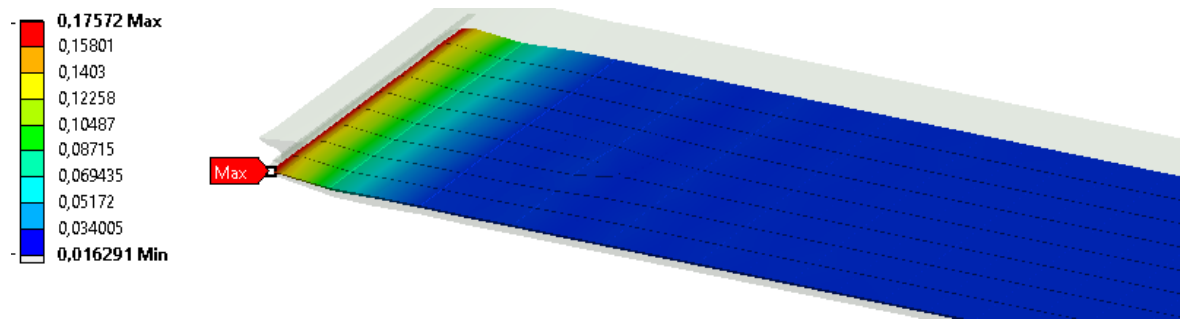


Figura 13. Esfuerzo capa de nylon.

Por último, en la Figura 14 se puede apreciar la distribución de esfuerzos en las capas de la probeta, y en la Figura 15 su deformación.

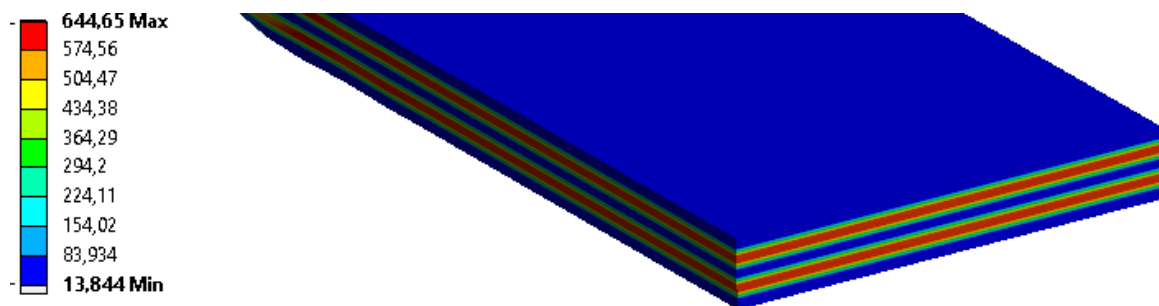


Figura 14. Esfuerzo máximo todo el material

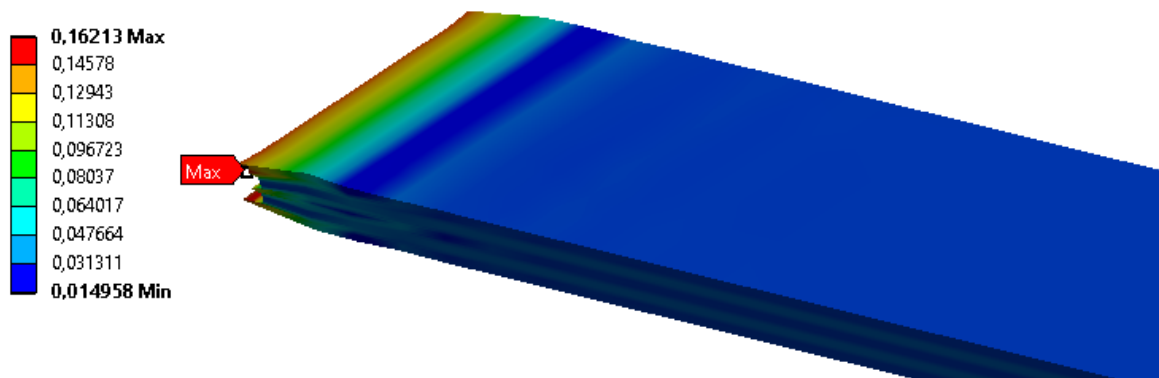


Figura 15. Deformación máxima todo el material

4. Conclusiones

Se determinó que para caracterizar un material fabricado por manufactura aditiva resultó más conveniente utilizar la norma ISO 527-4, según el marco comparativo para las pruebas experimentales, las probetas de esta norma presentaron una mayor resistencia a la tensión y una mayor rigidez.

Analizando los criterios tomados para realizar las comparaciones podemos apreciar que los porcentajes de error calculados son valores que se encuentran por debajo de 16 por ciento y los modelos teóricos presentan valores inferiores, una ventaja a la hora de realizar el diseño para diferentes aplicaciones funcionales utilizando únicamente un modelo matemático.

Se comprobó en esta investigación que es posible realizar la aproximación de elementos finitos para un material compuesto del cual se conozcan sus propiedades mediante ensayos previos, pudiendo así dimensionar componentes reales con materiales nuevos.

Se puede apreciar al comparar los resultados de los modelos experimentales con sus modelos numéricos que las pruebas elaboradas bajo la norma ISO presentan un porcentaje de error que no supera el 7 por ciento, por lo tanto esta presenta una mayor afinidad y permite validar los parámetros utilizados para realizar el modelo computacional.

Referencias Bibliográficas

- Ajayan, P. M. Schadler, L. S., & Braun, P. V. (2003). Nanocomposite Science and Technology. In *Materials Today* (6th ed.). doi:10.1016/S1369.7021.01
- Baumann, S. Ulmer, B. Lang, M., Hochrein, T., Bastian, M., Körber, G. (2017). TPS for extrusion-based 3D printing - A new material class for the most widely used additive manufacturing process. *TPE Magazine International*, 8(4), 232–234.
- Beer, F. P. Russell J. Jr, De Wolf, J. T., & Mazurek, D. F. (6th ed.). (2009). *Mecánica de Materiales* - Beer, Johnston. NY, USA: Mc Grow Hill
- Beltrán, S. (2017). *Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3D con refuerzo de fibras*. (Pregrado Tesis), Escuela Ingeniería Mecánica, UIS, Bucaramanga, Colombia.
- Bogue, R. (2013). 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, 33(4), 307–311. doi:10.1108/2013.06.055
- Borrachero, B. (2016). *Caracterización de materiales compuestos de fibras de carbono y naturales aplicados para la fabricación de componentes de automoción*. (M.S. Tesis), Dep. Ing. Mecánica y Materiales., UPV, Valencia, España.
- Carrera, E. (2002). Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 87–140. doi:10.1007/BF02736649

- Carretero, J., Verdejo, R., Arroyo, M., & Lopez-manchado, M. Á. (2009). Nuevos avances en el desarrollo de nanocompuestos elastoméricos. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales* (2), 33–34.
- Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F., & Comino Almenara, P. (2008). State of the art of the physical-mechanical performance of fibreglass-E reinforced plaster. *Informes de La Construcción*, 56(493), 33–37. doi:10.3989/2004.3.43
- Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152. doi:10.1016/2017.06.004
- Fombuena, V., Boronat, T., Sánchez-Nácher, L., García-Sanoguera, D., & Balart, R. (2017). Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 137. doi:10.4995/2017.6315
- Gebhardt, A. (2012). Understanding Additive Manufacturing. *Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG*, 1, 1–9. doi:10.3139/9783446431
- González, O. A., Pertuz, A., & Quiroga Mendez, J. E. (2018). Evaluation of Tensile Properties and Damage of Continuous Fibre Reinforced 3D-Printed Parts. *Key Engineering Materials*, 774, 161–166. doi:10.4028/774.161
- Hern, F., & Barluenga, G. (2014). *Generación Y Materiales* (M.S. Tesis), Dep. Arq., UAH, Alcalá, España. Recuperado de <http://www.archdaily.com/490141/centre->

- Huang, Y., & Young, B. (2014). The art of coupon tests. *Journal of Constructional Steel Research*, 96(1), 159–175. doi:10.1016/2014.01.010
- International, A. (2014). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. ASTM D3039M
- ISO-UNE. (2012). *Plastics Determination of tensile properties*. ISO 527
- Leon Becerra, J. S. (2018). *Damage modelling of unidirectional fiber reinforced composite pipes*. (Master Thesis)., Industrial Engineering Department, University of Salerno, Salerno, Italy.
- Markforged Inc. (n.d.). Mark Two Desktop Professional Desktop Printer Technical Specifications. Recuperado de <https://markforged.com/about/>
- Markforged Inc. (2016). *Data Sheet Markforged Mark Two*.
- Martínez, E., González, O. A., & Martínez, A. (2017). Evaluación de las propiedades tribológicas de materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) procesados por técnicas de fabricación aditiva con haz láser (SLM). *Revista UIS Ingenierías*, 16(1), 101–114. doi: 10.18273/2017.010
- Melenka, G. W., Cheung, B. K. O., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016). Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*, 153, 866–875. doi:/10.1016/2016.07.018
- Montalvo Paspuezan, A. A. (2018). *Máquina universal de ensayos destructivos: sistema de control y supervisión de datos*. (Pregrado Tesis). Dep. Ingeniería Mecatrónica., Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive

- manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. doi:10.1016/2018.02.012
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369–378 doi:10.1016/2015.06.013
- Paredes Salinas, J. G., Pérez Salinas, C. F., & Castro Miniguano, C. B. (2017). Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz. *Enfoque UTE*, 8(3), 1. doi:10.29019/.163
- Pegoretti, A., Fambri, L., Zappini, G., & Bianchetti, M. (2002). Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials*, 23(13), 2667–2682. doi:/10.1016/S0142-9612(01)00407-0
- Pérez, C., Paredes, J., Lalaleo, E., Arroba, C., & Núñez, D. (2017). Numerical / Experimental Analysis of the Mechanical Properties of the Matrix Compound Reinforced Polyester With Rice Knock. *Ciencia*, 19(4), 503–515.
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 83, pp. 98–112. doi:/10.1016/2015.08.038
- Sánchez Cepillo, D. I. (2011). *Diseño Óptimo de Laminados en Materiales Compuestos. Aplicación del MEF y el Método de las Superficies de Respuesta* (Máster Tesis, Dep. Ing. Materiales., Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Sevilla, España). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Portada.pdf>
- Whitcomb, J. D., Raju, I. S., & Goree, J. G. (2002). Reliability of the finite element method for

calculating free edge stresses in composite laminates. *Computers and Structures*, 15(1), 23–37. doi:/10.1016/0045-7949(82)90030-X

Yasa, E., & Ersoy, K. (2018). Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites. *Aircraft Technology*, 7(1), 1–3. doi:/10.5772/75628