



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



**FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**

Estudio del comportamiento estructural de componentes fabricados mediante Modelado por Deposición Fundida

TESIS

Para obtener el grado de
**DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA CON ORIENTACIÓN
TERMINAL EN MECATRÓNICA Y SISTEMAS MECÁNICOS (MSM)**

Presenta

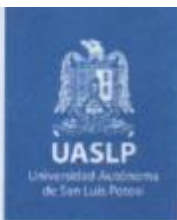
M.I. Steffany Noemí Cerda Avila

Asesor

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

San Luis Potosí, S.L.P.

Febrero 2022



FACULTAD DE
INGENIERÍA

16 de diciembre de 2021

**M.I. STEFFANY NOEMÍ CERDA AVILA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Doctora en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de diciembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Estudio del comportamiento estructural de componentes fabricados mediante Modelado por Deposición Fundida"

1. Introducción.
 2. Antecedentes teóricos
 3. Pruebas experimentales de probetas FDM
 4. Modelos de predicción del comportamiento estructural
 5. Comportamiento a la fatiga de probetas FDM
 6. Análisis de casos de estudio de piezas fabricadas por FDM
 7. Conclusiones
- Bibliografía

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN,
DIRECTOR.**

DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Nava II
Zona Universitaria • CP 26200
San Luis Potosí, S.L.P.
Tel: (444) 826 2330 al 39
Fax: (444) 826 2336

RESUMEN

La Manufactura Aditiva (AM) ha evolucionado extraordinariamente en las últimas tres décadas. El uso y aplicación de las tecnologías AM también ha sufrido una gran transformación, pasando de los modelos y prototipos a la producción rápida de herramientas y productos para uso final. Sin embargo, no todas las piezas son técnicamente o económicamente factibles de ser producidas mediante las tecnologías AM. La falta de conocimientos y metodologías de diseño de componentes a ser fabricados por este tipo de tecnologías, ha limitado su uso y penetración en la industria. Por lo anterior existe la necesidad de desarrollar conocimientos de diseño para manufactura en sistemas AM que permitan potencializar el uso de estas tecnologías en la industria.

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo general la generación de conocimiento a través de modelos, lineamientos, y/o metodologías para el análisis de Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM). En particular el proyecto se enfoca en evaluar el comportamiento estructural efectivo, a nivel macro, de los componentes fabricados mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM), así como estudiar la influencia que los diferentes parámetros del proceso tienen sobre estas propiedades mecánicas resultantes efectivas. Las propiedades estructurales consideradas dentro del estudio son la resistencia última a la tensión (UTS), el módulo de Young (E), la elongación y la resistencia a la fatiga. El proyecto está enfocado en tres áreas principales: el desarrollo de una metodología experimental, el desarrollo de modelos analíticos/numéricos, basados en pruebas experimentales, para predecir las propiedades mecánicas de las partes fabricadas mediante AM, y la validación de dichos modelos mediante casos de estudio.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron ensayos experimentales a tensión y a la fatiga de probetas fabricadas mediante FDM, con diferentes parámetros de proceso como son el porcentaje de relleno, la orientación de fabricación y el número de capas de perímetro de las piezas. Una metodología experimental fue desarrollada y, posteriormente se implementaron y desarrollaron modelos analíticos y numéricos para la predicción de propiedades basados en los resultados experimentales. Finalmente, se validaron los modelos analíticos con mejor precisión mediante la fabricación y ensayos a casos de estudio de partes con geometrías complejas.

En general, se puede decir que los resultados obtenidos del comportamiento mecánico de piezas FDM contribuyen al desarrollo de conocimiento en el área de DfAM, apoyando el proceso de toma de decisiones durante el diseño estructural de componentes a ser fabricados mediante AM.

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has evolved extraordinarily in the last three decades. The use of AM technologies has also undergone a major transformation, from models and prototypes to the rapid tooling production and end-use products. However, not all parts are technically or economically feasible to be produced using AM technologies. The lack of knowledge and design methodologies for this type of technologies has limited its use and penetration in the industry. Therefore, there is a need to develop knowledge of Design for Manufacturing that allow to potentiate the use of such technologies on the industry.

The general objective of this PhD project is the generation of knowledge through models, guidelines, and/ or methodologies for the analysis of DfAM. In particular, the project focuses on evaluating the effective structural behavior at a macro level of the components manufactured by Fused Deposition Modelling (FDM), as well as studying the influence that different process parameters have on these structural mechanical effective properties. The structural properties considered within the study are Ultimate Tensile Stress (UTS), the Young's Modulus (E), the elongation, and the fatigue strength. The project focuses on three main areas: the development of an experimental methodology, the development of analytical/numerical models based on experimental tests to predict mechanical properties of manufactured AM parts, and the validation of said models through case of studies.

During the development of this work, experimental tensile and fatigue tests were carried out on FDM specimens, with different process parameters such as infill percentage, manufacturing orientation and number of perimeter layers. An experimental methodology was developed and, subsequently, analytical and numerical models for properties prediction based on the experimental results were implemented and developed. Finally, the most accurate analytical models were validated by manufacturing and testing cases of study with complex geometries.

In general, it can be said that the results obtained from the mechanical behavior of FDM parts contribute to the development of knowledge in the DfAM area supporting the decision-making process during the structural design of components manufactured by AM technologies.

Agradecimientos

Agradezco a mi esposo Roberto Carlos Juárez Mitre por todo el amor, comprensión y paciencia que me brinda día con día, por estar a mi lado en todo momento, por su apoyo incondicional y por siempre escucharme, impulsarme y motivarme a cumplir todas mis metas y ser mejor cada día.

A mis padres Irma Noemí Avila Martínez y Benjamín Cerda Alanís que siempre me han brindado todo su amor incondicional, que me han guiado e impulsado hacia el cumplimiento de todo lo que me propongo, que han estado a mi lado apoyándome sin condición en todas las etapas de mi vida y que gracias a sus consejos me han ayudado y motivado a alcanzar mis metas.

A mi asesor de tesis Dr. Hugo Iván Medellín Castillo, por todos sus comentarios, asesoría, consejos, apoyo, paciencia, comprensión y dedicación para que pudiera desarrollar este proyecto de la mejor manera posible, además agradezco todo el tiempo que con gran profesionalismo y calidad humana dedicó a este trabajo de tesis para hacer de mi estadía en el doctorado una experiencia única y gratificante.

Al Laboratorio de Materiales de la UASLP y al Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY) en donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales, ya que sin su apoyo y colaboración no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico durante mis estudios.

Al Comité Académico del Posgrado en Ingeniería Mecánica por su contribución a mi formación académica.

A la Facultad de Ingeniería por haberme dado una formación integral y por brindarme los elementos necesarios para crecer profesionalmente y como persona.

Fanny

PUBLICACIONES OBTENIDAS

Cerda-Avila S.N., Medellín-Castillo H.I., de Lange D.F., (2019), **“Analysis and numerical simulation of the mechanical performance of FDM samples with variable infill values”**, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 141, Issue 2, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1115/1.4041854>.

Cerda-Avila S.N., Medellín-Castillo H.I., Lim T., (2020), **“An experimental methodology to analyse the structural behaviour of FDM parts with variable process parameters”**, Rapid Prototyping Journal, Vol. 26, No. 9, pp. 1615-1625. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2019-0312>.

Cerda-Avila S.N., Medellín-Castillo H.I., Lim T., (2021), **“Analytical models to estimate the structural behavior of fused deposition modelling components”**, Rapid Prototyping Journal, Vol. 27, No. 4, pp. 658-670. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0145>.

Cerda-Avila S.N., Medellín-Castillo H.I., (2020), **“Comportamiento estructural de probetas de PLA fabricadas por el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM)”**. Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Año 6, Núm. 1, Tema A2b Manufactura: Manufactura Aditiva. 21 al 23 de octubre de 2020. Formato virtual. pp. 1-9. ISSN: 2448-5551.

CONTENIDO	Página
Resumen.....	i
Agradecimientos.....	iii
Publicaciones obtenidas	iv
Contenido.....	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tablas.....	xi
Nomenclatura	xiv
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	4
1.2. Objetivo general.....	4
1.3. Objetivos particulares.....	5
1.4. Organización de la tesis.....	6
Capítulo 2: Antecedentes teóricos	7
2.1. Manufactura aditiva	7
2.1.1. Procesos de manufactura aditiva	8
2.1.2. Capacidades y limitantes de los procesos AM	8
2.2. Modelado por Deposición Fundida (FDM)	12
2.3. Comportamiento estructural de FDM	13
2.4. Comportamiento a la fatiga de componentes FDM	17
2.5. Diseño para manufactura aditiva (DfAM)	19
2.6. Modelos de predicción de propiedades estructurales	28
2.6.1. Modelos numéricos	28
2.6.2. Modelos analíticos	29
2.6.3. Modelos analíticos de la micromecánica	31
2.7. Redes neuronales	33
2.7.1. Inteligencia artificial/Redes neuronales	34
Capítulo 3: Pruebas experimentales de probetas FDM	39
3.1. Metodología general	39
3.1.1. Caracterización del filamento	39
3.1.2. Selección de parámetros	41
3.1.3. Fabricación de probetas	41
3.1.4. Medición dimensional	43
3.1.5. Medición de relleno	45
3.1.6. Ensayo a tensión	46
3.1.7. Normalización de resultados	47
3.2. Resultados experimentales de ensayos a tensión	48
3.3. Comparación de resultados	51
3.4. Ensayos a tensión de probetas con orientación no ortogonal	54
Capítulo 4: Modelos de predicción del comportamiento estructural	60
4.1. Metodología de evaluación de modelos de predicción	60
4.2. Modelos analíticos	62

4.2.1. Modelos lineales	62
4.2.2. Modelos exponenciales	65
4.3. Modelos analíticos propuestos	71
4.3.1. Modelo variante Duckworth	72
4.3.2. Modelo Exponencial	72
4.4. Comparación cuantitativa de los modelos analíticos	75
4.5. Modelo GRNN	79
4.5.1. Desarrollo de red GRNN	79
4.5.2. Análisis y comparación de los resultados del modelo GRNN	82
4.6. Análisis comparativo de modelos	83
4.7. Predicción de propiedades para cualquier orientación	89
4.7.1. Modelo elipsoidal propuesto	89
4.7.2. Evaluación del modelo propuesto	91
Capítulo 5: Comportamiento a la fatiga de probetas FDM	95
5.1. Metodología experimental	95
5.1.1. Caracterización del filamento	95
5.1.2. Selección de parámetros de proceso	96
5.1.3. Fabricación de probetas para ensayos a tensión y fatiga	98
5.1.4. Medición de dimensiones y peso	100
5.1.5. Ensayos a tensión	100
5.1.6. Selección de características del ensayo de fatiga	101
5.1.7. Ensayos de fatiga	101
5.1.8. Análisis de datos	103
5.1.9. Normalización de resultados	106
5.2. Ensayos de fatiga complementarios	107
5.3. Resultados a la fatiga	108
5.4. Análisis y discusión de resultados	110
5.4.1. Comparación de resultados	110
5.4.2. Modelado del comportamiento a la fatiga	112
Capítulo 6: Análisis de casos de estudio de piezas fabricadas por FDM	116
6.1. Selección de casos de estudio	116
6.2. Metodología general	120
6.2.1. Caracterización del filamento	121
6.2.2. Fabricación de casos de estudio	121
6.2.3. Medición del porcentaje de relleno real	123
6.2.4. Ensayos a tensión de casos de estudio	124
6.2.5. Estimación de propiedades con modelos de predicción	128
6.2.5.1. Gancho	129
6.2.5.2. Conector	130
6.2.6. Análisis de resultados	132
Capítulo 7: Conclusiones	135
Referencias	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1.1. Relación complejidad de la pieza vs. costo de manufactura [1].	2
Figura 1.2. Esquema del proceso FDM.	3
Figura 2.1. Comparación entre manufactura convencional y manufactura aditiva.	7
Figura 2.2. Parámetros principales con influencia en propiedades mecánicas de componentes FDM [11].	12
Figura 2.3. Parámetros del proceso FDM seleccionados.	13
Figura 2.4. Costo unitario para diferentes tamaños de lote y procesos de manufactura [4].	20
Figura 2.5. Análisis de dependencia de reglas de diseño en la orientación de la pieza [42].	22
Figura 2.6. Proceso para definir la orientación de la pieza en la etapa de diseño inicial [42].	22
Figura 2.7. Rediseño de pieza [45].	26
Figura 2.8. Metodología de optimización multifuncional [46].	27
Figura 2.9. Metodología propuesta para el rediseño de partes para AM [47].	28
Figura 2.10. Una célula, una neurona [70].	35
Figura 2.11. Topología de red neuronal simple [71].	35
Figura 2.12. Arquitectura de la red GRNN [72].	36
Figura 3.1. Metodología experimental.	39
Figura 3.2. Dimensiones probeta Tipo I [80].	41
Figura 3.3. Fabricación de probetas: a) Direcciones de fabricación, b) Creality CR-10S Pro.	42
Figura 3.4. Ángulo de relleno de $\pm 45^\circ$ y orientación plana de las probetas.	43
Figura 3.5. Orientación en el borde de probetas y soportes.	43
Figura 3.6. Medición en ZEISS VISTA CMM: a) Configuración, b) proceso de medición, y c) cálculo de distancia.	44
Figura 3.7. Probeta pesada.	45
Figura 3.8. Ensayo de tensión probeta: a) preparación de la probeta, b) durante el ensayo (INSTRON), c) durante el ensayo (SHIMADZU) y d) después de ensayo.	47
Figura 3.9. Curva esfuerzo-deformación del conjunto de probetas 100y245.	48
Figura 3.10. Módulo elástico normalizado vs. Porcentaje de relleno.	50
Figura 3.11. UTS normalizado vs. Porcentaje de relleno.	51

Figura 3.12. Elongación normalizada vs. Porcentaje de relleno.	51
Figura 3.13. Comparación de resultados experimentales con resultados reportados: a) módulo elástico, b) UTS y c) elongación.	53
Figura 3.14. Ángulos de rotación Θ y Φ .	54
Figura 3.15. Dimensiones utilizadas de probetas con orientación variable [38].	55
Figura 3.16 Soportes de probetas: a) $\Phi = 30^\circ$, b) $\Phi = 60^\circ$.	55
Figura 3.17. Comportamiento de probetas cuando $\Phi = 0^\circ$: a) módulo y UTS normalizados y b) elongación normalizada.	59
Figura 4.1. Metodología para evaluación de modelos de predicción.	60
Figura 4.2. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.	62
Figura 4.3. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.	63
Figura 4.4. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.	63
Figura 4.5. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Spriggs, Rice y Hasselman.	67
Figura 4.6. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Duckwoth, Rice y Hasselman.	67
Figura 4.7. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Sriggs, Rice y Hasselman.	68
Figura 4.8. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.	73
Figura 4.9. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.	73
Figura 4.10. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.	74
Figura 4.11. Arquitectura GRNN utilizada.	79
Figura 4.12. Resultados del modelo GRNN con 80% y 20% de la red: a) Módulo elástico, MSE = 0.0095, b) UTS, MSE = 0.0074	80
Figura 4.13. Valores de spread y MSE.	81
Figura 4.14. Resultados generales GRNN vs experimentales para el módulo elástico.	82
Figura 4.15. Resultados generales GRNN vs experimentales para el UTS.	83

Figura 4.16. Comparación de resultados para el módulo elástico: a) orientación plana, b) orientación en el borde, c) orientación vertical.	85
Figura 4.17. Comparación de resultados para el UTS: a) orientación plana, b) orientación en el borde, c) orientación vertical.	87
Figura 4.18. Esquema del modelo elipsoidal para cualquier orientación: a) orientación con respecto al eje x, b) orientación con respecto al plano XY.	90
Figura 5.1. Metodología para ensayos a fatiga.	96
Figura 5.2. Orientaciones de fabricación seleccionadas para ensayo a fatiga.	98
Figura 5.3. Dimensiones utilizadas para probetas a fatiga [38].	99
Figura 5.4. Equipo de ensayo de fatiga MTS Landmark 370.35.	102
Figura 5.5. Ensayo de fatiga: a) probeta durante ensayo, b) interface de la máquina, c) probetas ensayadas.	103
Figura 5.6. Gráfica de resultados obtenidos del ensayo: a) Fuerza axial y b) Desplazamiento axial.	104
Figura 5.7. Gráfico delimitado de fuerza axial.	105
Figura 5.8. Valores máximos y mínimos: a) Fuerza axial y b) Desplazamiento axial	106
Figura 5.9. Resultados ensayos de fatiga: Amplitud del esfuerzo vs Número de ciclos	110
Figura 5.10. Comparación de resultados: a) amplitud de esfuerzo vs números de ciclos completo y b) acercamiento a la zona de bajo ciclaje (hasta 4000 ciclos).	112
Figura 5.11. Diagrama de fatiga de probetas de 5% relleno teórico.	114
Figura 5.12. Diagrama de fatiga de probetas de 10% relleno teórico.	114
Figura 5.13. Diagrama de fatiga de probetas de 100% relleno teórico.	115
Figura 6.1. Gancho de izaje: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista lateral.	119
Figura 6.2. Conector [53]: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista lateral.	119
Figura 6.3. Metodología experimental para casos de estudio.	120
Figura 6.4. Configuración y utillaje para el ensayo a tensión del: a) gancho y b) conector	125
Figura 6.5. Ganchos ensayados.	126
Figura 6.6. Conectores ensayados.	127
Figura 6.7. Modelo MEF del gancho: a) mallado, b) mallado con cargas.	129
Figura 6.8. Análisis del gancho con 40% relleno teórico y orientación en el borde (XZ): a) carga experimental, b) carga para alcanzar la resistencia a la tensión estimada por el modelo analítico.	130
Figura 6.9. Modelo MEF del Conector: a) mallado, b) mallado con cargas.	131

Figura 6.10. Análisis del conector con orientación en el borde (XZ) y 40% de relleno teórico:
a) carga experimental, b) zoom de la zona de concentración de esfuerzos

131

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 2.1. Principios de funcionamiento y características de los procesos AM [7].	9
Tabla 2.2. Parámetros FDM estudiados en la literatura.	14
Tabla 2.3. Reglas de diseño para manufactura aditiva [43].	23
Tabla 2.3. Extracto del catálogo de reglas de diseño. Continuación [43].	24
Tabla 3.1. Resultados promedio de los ensayos a tensión de los filamentos PLA.	40
Tabla 3.2. Valores de parámetros del proceso utilizados.	41
Tabla 3.3. Valores de parámetros restantes.	42
Tabla 3.4. Dimensiones promedio de orientaciones plana, en el borde y vertical.	44
Tabla 3.5. Dimensiones promedio de orientación vertical escaladas.	45
Tabla 3.6. Porcentajes de relleno real.	46
Tabla 3.7. Resultados de ensayos para esfuerzo y deformación.	49
Tabla 3.8. Resultados experimentales normalizados y agrupados.	49
Tabla 3.9. Propiedades de la materia prima para el caso de probetas con orientación variable.	54
Tabla 3.10. Valores utilizados para la fabricación de probetas con orientación variable.	55
Tabla 3.11. Dimensiones promedio de orientación no ortogonal.	56
Tabla 3.12. Porcentaje de relleno real promedio de las probetas con orientación variable.	57
Tabla 3.13. Resultados normalizados de probetas con orientación variable.	58
Tabla 4.1. Valores de α obtenidos.	62
Tabla 4.2. Error de predicción de los modelos de Mezcla y de Eficiencia.	65
Tabla 4.3. Valores de los parámetros de los modelos exponenciales.	66
Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales.	69
Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales (Cont.)	70
Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales (Cont.)	71
Tabla 4.5. Valores de los parámetros de los modelos propuestos.	72
Tabla 4.6. Error de predicción de los modelos propuestos.	75
Tabla 4.7. Error de predicción promedio de los modelos para el módulo elástico.	76
Tabla 4.8. Error de predicción promedio de los modelos para el UTS.	76

Tabla 4.9. Error de predicción promedio de los modelos para elongación.	77
Tabla 4.10. Ranking general por orientación y global.	78
Tabla 4.11. Valores de MSE promedio mínimos.	81
Tabla 4.12. Error promedio de la red GRNN vs resultados experimentales.	83
Tabla 4.13. Resultados de errores de estimación para el módulo elástico.	88
Tabla 4.14. Resultados de errores de estimación para el UTS.	88
Tabla 4.15. Comparación de resultados del modelo elipsoidal para el módulo elástico.	92
Tabla 4.16. Comparación de resultados del modelo elipsoidal para el UTS.	93
Tabla 5.1. Propiedades de la materia prima.	95
Tabla 5.2. Parámetros FDM y características de ensayos de fatiga reportados en la literatura.	97
Tabla 5.2. Parámetros FDM y características de ensayos de fatiga reportados en la literatura (cont.).	98
Tabla 5.3. Valores de parámetros FDM seleccionados.	98
Tabla 5.4. Factores seleccionados con sus niveles.	99
Tabla 5.5. Arreglo ortogonal de Taguchi L9.	99
Tabla 5.6. Porcentaje de relleno real promedio de probetas a fatiga.	100
Tabla 5.7. Resultados normalizados de ensayos a tensión estática de las probetas.	101
Tabla 5.8. Características de ensayo a fatiga de probetas FDM.	101
Tabla 5.9. Condiciones de prueba para ensayos de fatiga de probetas FDM.	101
Tabla 5.10. Condiciones de prueba para las pruebas de fatiga complementarias.	107
Tabla 5.11. Resultados las pruebas de fatiga.	109
Tabla 5.12. Valores de parámetros de ajuste seleccionados.	113
Tabla 5.13. Parámetros estimados para los diferentes porcentajes de relleno teórico.	113
Tabla 6.1. Casos de estudio reportados en la literatura.	117
Tabla 6.1. Casos de estudio reportados en la literatura (cont.).	118
Tabla 6.2. Parámetros del proceso seleccionados para la fabricación de componentes.	120
Tabla 6.3. Propiedades promedio de materia prima.	121
Tabla 6.4. Orientación, relleno y tiempo de fabricación para el gancho.	122

Tabla 6.5. Orientación, relleno y tiempo de fabricación para el conector.	123
Tabla 6.6. Porcentaje de relleno real de casos de estudio.	124
Tabla 6.7. Resultados de los ensayos a tensión de los casos de estudio.	127
Tabla 6.8. Valores de constantes experimentales Gibson & Ashby.	128
Tabla 6.9. Resultados de fuerza máxima para el gancho.	133
Tabla 6.10. Resultados de fuerza máxima para el conector.	134

NOMENCLATURA

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AI	Inteligencia Artificial
AM	Manufactura Aditiva
ANOVA	Análisis de varianza
CAD	Diseño asistido por computadora
CLT	Teoría clásica de laminación
CMM	Máquina de coordenadas
DfAM	Diseño para manufactura aditiva
DfMA	Diseño para manufactura y ensamble
DOE	Diseño de experimentos
E	Módulo elástico
EB	Elongación a la ruptura
FDM	Modelado por Deposición Fundida
GRNN	Red neuronal de regresión general
MEF	Método de elemento finito
MSE	Error medio cuadrático
NN	Red neuronal
PLA	Poliácido láctico
PP	Polipropileno
SLM	Fundición selectiva por láser
SLS	Sinterizado selectivo por láser
UTS	Resistencia última a la tensión

1. Introducción

Las tecnologías de Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés) surgieron a finales de la década de 1980, y desde entonces han adquirido un desarrollo importante tanto de equipos, software y materiales, así como de calidad y precisión dimensional de las piezas elaboradas con dichas tecnologías. La AM permite la creación de partes a partir de un modelo CAD (Computer-Aided Design), un objeto tridimensional (ingeniería inversa), y hasta de imágenes médicas 2D como la tomografía computarizada (CT). En el procedimiento de fabricación AM, el modelo 3D (usualmente en formato *.stl) de la pieza a fabricar se discretiza o divide en capas mediante el software específico para cada tipo de tecnología AM. La información del modelo discretizado se envía al equipo AM para su fabricación, mediante la deposición de material capa por capa hasta completar el modelo. Por tanto, los procesos AM se pueden definir como “un proceso de unión de materiales para fabricar objetos a partir de datos de un modelo 3D, generalmente capa sobre capa, al contrario de las metodologías de manufactura sustractiva” [1].

Algunos de los beneficios que ofrecen los sistemas AM son: la reducción de residuos de material al fabricar una pieza, reducción de costos de producción por no requerir herramientas, capacidad de fabricar formas complejas y personalizadas con diversos materiales, además de la facilidad de optimización del diseño y conceptualización de la pieza, ya que de un modelo computarizado se puede fabricar la pieza final. Por lo anterior, se espera que las tecnologías AM tengan un crecimiento y penetración importante en la industria gracias a sus atractivas y novedosas capacidades, dentro de las que destacan la “complejidad libre o ilimitada” de fabricación en comparación con los procesos de manufactura convencional, como se muestra en la Figura 1.1 [1]. En esta figura se puede observar que las tecnologías AM ofrecen una mayor complejidad en el diseño, a un costo menor comparado con la manufactura convencional, ya que si se fabricara la pieza con geometría compleja mediante procesos sustractivos, el costo de fabricación incrementaría considerablemente.

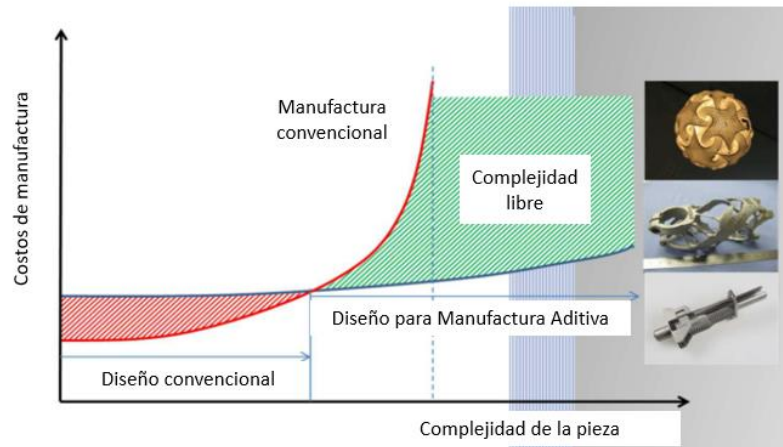


Figura 1.1. Relación complejidad de la pieza vs. costo de manufactura [1].

Una de las tecnologías AM más utilizadas es la técnica FDM (Modelado por Deposición Fundida), la cual ofrece muchas ventajas entre las que sobresalen el bajo costo del equipo y materiales, bajo costo de mantenimiento, amplia gama de materiales disponibles, uso en ambiente de oficina, entre otras [2]. En el proceso FDM, un filamento termoplástico, usualmente ABS, PLA, Nylon, etc., es calentado hasta un estado semilíquido por encima de su temperatura de fusión. Posteriormente, el material es depositado sobre una plataforma, la cual también se encuentra a una temperatura elevada. La boquilla deposita la capa para crear la sección transversal de la pieza a fabricar ya que ésta se mueve en el plano X-Y, luego, la plataforma se mueve en el eje Z hacia abajo para que se deposite la siguiente capa. El proceso continúa de esta manera hasta terminar la pieza, Figura 1.2. Una segunda boquilla se puede utilizar para extruir un material diferente a fin de construir estructuras de apoyo en donde sean necesarias para soportar la pieza. Una vez que la pieza está terminada las estructuras de apoyo se remueven.

Pese a las ventajas que ofrecen las tecnologías AM, para muchas aplicaciones el uso de éstas se considera una excepción, debido a la falta de estándares y lineamientos de diseño enfocados a cada una de las diferentes categorías de los procesos AM. Además, la falta de lineamientos de Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM, por sus siglas en inglés) contribuye en mayor medida a la exclusión de estos procesos para el desarrollo y fabricación de partes. Los lineamientos de diseño existentes para manufactura y ensamble (DfMA, por sus siglas en inglés) solo toman en cuenta las características y limitantes de los procesos convencionales de fabricación. Sin embargo, las capacidades de las tecnologías

de manufactura aditiva brindan la oportunidad de replantear el DfMA para aprovechar las capacidades únicas de estas tecnologías [3].

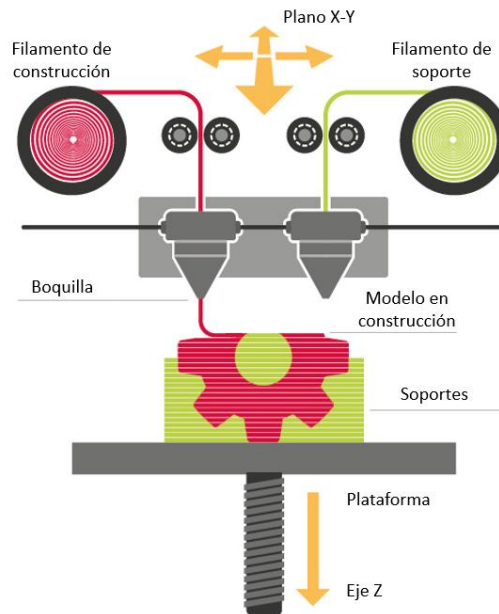


Figura 1.2. Esquema del proceso FDM.

Los ingenieros de diseño y manufactura deben considerar las capacidades y beneficios de la manufactura aditiva para crear un valor agregado para el usuario de su producto [4]. Sin embargo, para aprovechar al máximo los procesos AM, es necesario identificar las capacidades y restricciones específicas de fabricación [5], así como su impacto en el proceso de diseño. Dadas las capacidades y limitantes de dichos procesos, ha surgido la necesidad de crear diferentes tipos de lineamientos, los cuales tienen distintos enfoques y dependen del proceso en particular que se esté analizando. Gibson *et al.* [3] describen que el objetivo del diseño para manufactura aditiva (DfAM) debe ser maximizar el rendimiento del producto mediante la síntesis de formas, tamaños y composiciones de materiales sujetos a las capacidades de las tecnologías AM. Para lograr dicho objetivo, los diseñadores deben tomar en cuenta distintas pautas para diseñar un producto AM, como son la factibilidad del diseño de geometrías complejas, sin incurrir en penalizaciones de tiempo y costo, el uso de geometrías y piezas personalizadas para producción directa y la fabricación de piezas para evitar problemas de ensamblaje. Además de considerar los

parámetros de cada uno de los procesos AM, ya que se ha encontrado que éstos modifican las propiedades mecánicas de los componentes que se desean fabricar.

1.1. Justificación

A pesar de los avances en los procesos AM y en las metodologías de diseño para AM, existe una carencia de conocimientos para que los procesos AM tengan una mayor penetración industrial en el área de diseño y manufactura de productos nuevos y existentes [6]. De manera más específica, en la literatura se observa que actualmente existen muy pocos trabajos enfocados en el desarrollo de modelos para estimar las propiedades mecánicas a nivel macro (propiedades efectivas) de componentes fabricados mediante tecnologías AM, particularmente el proceso FDM. La predicción de propiedades mecánicas de componentes AM es de suma importancia en el proceso de diseño y fabricación, ya que no solo la geometría de una pieza es importante si no también sus propiedades estructurales, las cuales pudieran ser personalizadas de acuerdo a las necesidades estructurales en particular.

Por lo anterior, el presente proyecto de investigación se enfoca en la generación de conocimientos y metodologías de diseño para manufactura aditiva, las cuales contribuyan al desarrollo y crecimiento de las tecnologías AM. En particular se busca desarrollar modelos analíticos, que permitan predecir las propiedades mecánicas efectivas de los componentes fabricados mediante procesos FDM. Lo anterior favorecerá la penetración e inclusión de las tecnologías AM en los procesos industriales de desarrollo y manufactura de productos, al reducir la incertidumbre actual en relación al desempeño estructural de los productos AM. Adicionalmente, los modelos de comportamiento estructural incrementarán la eficiencia del proceso de diseño y fabricación AM, al permitir la configuración de los parámetros de fabricación de acuerdo a las necesidades estructurales particulares de las piezas a ser fabricadas, reduciendo de esta manera los costos y tiempos de diseño, desarrollo y pruebas de los productos.

1.2. Objetivo General

El objetivo general de este proyecto es estudiar y evaluar el comportamiento estructural efectivo de los componentes fabricados mediante el proceso FDM, así como estudiar la influencia que los diferentes parámetros del proceso tienen sobre las propiedades mecánicas efectivas. Las propiedades estructurales consideradas dentro del estudio son la

resistencia última a la tensión (UTS, por sus siglas en inglés), el módulo de Young o módulo elástico (E), la elongación a la ruptura, y la resistencia a la fatiga. Como parte de este objetivo general se contempla el desarrollar modelos que permitan estimar las propiedades estructurales efectivas de componentes fabricados mediante FDM en función de los parámetros del proceso.

1.3. Objetivos Particulares

Para alcanzar el objetivo general del proyecto, se contemplan los siguientes objetivos específicos:

1. Conocer el estado del arte del Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM), así como del comportamiento estructural de componentes fabricados mediante FDM.
2. Identificar características, capacidades y limitaciones del proceso FDM.
3. Conocer los modelos existentes para estimación de propiedades estructurales de partes fabricadas mediante el proceso FDM.
4. Evaluar experimentalmente el desempeño estructural de probetas FDM considerando diferentes parámetros de proceso.
5. Proponer modelos analíticos/numéricos para predicción de propiedades estructurales de probetas/componentes fabricados por FDM.
6. Evaluar el desempeño de los modelos analíticos/numéricos existentes y propuestos con base a los resultados experimentales.
7. Desarrollar un modelo general de predicción para cualquier conjunto de parámetros analizados.
8. Evaluar los modelos analíticos/numéricos mediante casos de estudio de componentes mecánicos.
9. Evaluar experimentalmente el comportamiento bajo condiciones de carga cíclica (fatiga) de probetas FDM.
10. Desarrollar modelos analíticos/numéricos de probetas bajo condiciones de carga cíclica (fatiga).

1.4. Organización de la tesis

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera; en el Capítulo 2 se presentan los antecedentes teóricos de la manufactura aditiva, el comportamiento estructural y comportamiento a la fatiga de piezas fabricadas mediante FDM, así como los modelos de predicción analíticos y/o numéricos existentes de propiedades estructurales. En el Capítulo 3 se describe la metodología experimental propuesta basada en ensayos a tensión con diferentes orientaciones de las piezas. Posteriormente, en el Capítulo 4 se realiza la evaluación de los modelos de predicción de propiedades existentes, basados en los resultados experimentales previamente obtenidos. Además, se proponen nuevos modelos analíticos, modelos basados en inteligencia artificial y un modelo de homogenización general. A continuación, en el Capítulo 5 se presentan los resultados experimentales del comportamiento a la fatiga de piezas fabricadas mediante FDM. En el Capítulo 6 se realiza el análisis de casos de estudio mediante simulaciones y modelos de predicción. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas y se plantea el trabajo futuro.

2. Antecedentes teóricos

2.1. Manufactura aditiva

La Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés) hace referencia al conjunto de tecnologías que permiten la fabricación de objetos a partir de un modelo tridimensional de manera secuencial, mediante la adición de material capa tras capa. En comparación con los sistemas de manufactura convencionales, los cuales generalmente sustraen material para lograr la forma deseada, la manufactura aditiva se centra en la creación de piezas añadiendo material para lograr su forma final, como se muestra en la Figura 2.1.

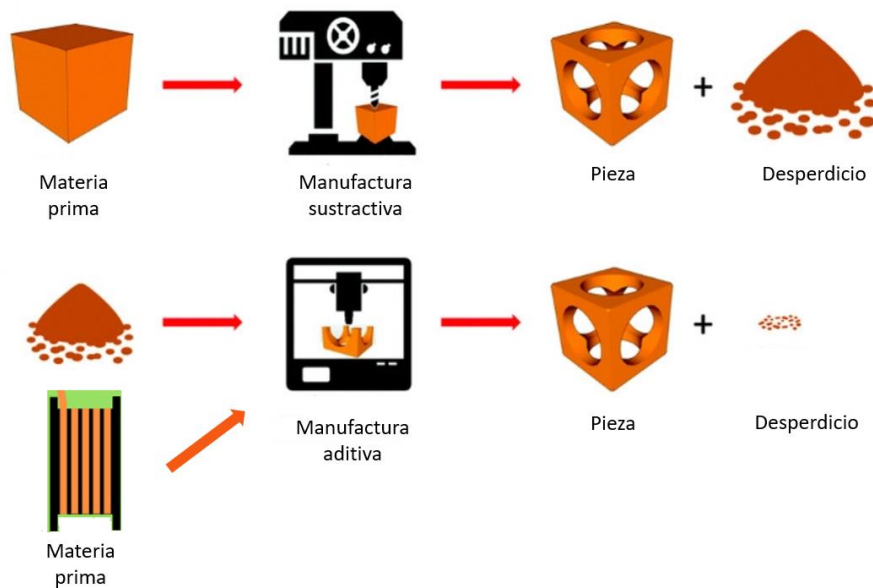


Figura 2.1. Comparación entre manufactura convencional y manufactura aditiva.

Actualmente las tecnologías AM se encuentran en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería, como la mecánica, biomédica, construcción, aeroespacial e industrias alimentarias, así como en la investigación académica [6]. Sus principales aplicaciones son el diseño y modelado, creación de prototipos y producción directa de piezas. Estas tecnologías están cambiando la forma en que las organizaciones diseñan y fabrican productos, ya que, si se utilizan correctamente, pueden ahorrar una cantidad considerable en tiempo de diseño, creación de prototipos y fabricación de piezas para uso final.

2.1.1. Procesos de manufactura aditiva

Existen diversos procesos AM empleados comercialmente, los cuales se pueden clasificar en cuatro categorías según el estado de la materia prima [7]:

- 1) Líquido,
- 2) Filamento/pasta,
- 3) Polvo,
- 4) Hoja sólida.

Los principios de funcionamiento de los procesos AM con los estados de material mencionados anteriormente se presentan en la Tabla 2.1, donde cada grupo de tecnologías tiene distintos principios de operación, características de construcción y tipos de materiales compatibles. Las características de las tecnologías AM afectan el costo, la calidad y la escala de las partes que se pueden producir, y por lo tanto pueden influir sustancialmente en las decisiones del diseño [6]. Estas características han limitado su aplicación, por lo que los productos fabricados se utilizan comúnmente como prototipos, desaprovechando todos los beneficios que los procesos AM pueden brindar al proceso de manufactura de partes funcionales.

2.1.2. Capacidades y limitantes de los procesos AM

Las capacidades únicas de las tecnologías AM permiten oportunidades de personalización, mejoras significativas en el rendimiento del producto, multifuncionalidad y costos menores de fabricación. Estas capacidades únicas de las tecnologías AM incluyen:

- Complejidad de forma. Es posible construir prácticamente cualquier forma.
- Complejidad del material. El material se puede procesar solo una capa a la vez.
- Complejidad funcional. Los ensamblajes y mecanismos totalmente funcionales se pueden fabricar utilizando procesos AM [2].

Tabla 2.1. Principios de funcionamiento y características de los procesos AM [7].

Estado de la materia prima	Proceso	Preparación de material	Técnica de creación de capa	Cambio de fase	Materiales utilizados	Aplicaciones
Líquido	Estereolitografía SLA	Resina líquida en una tina	Escaneo Láser/ Proyección de luz	Foto polimerización	Resina curable por UV, Suspensión cerámica	Prototipos, patrones de fundición, herramental suave
	Modelado por Multichorro MJM	Polímero Líquido en chorro	Impresión de tinta	Enfriamiento y foto polimerización	Plástico acrílico curable por UV, cera	Prototipos, patrones de fundición
	Prototipado rápido por congelamiento RFP	Gotitas de líquido en una boquilla	Deposición de gotas según demanda	Solidificación por congelación	Agua	Prototipos, patrones de fundición
Filamento/ Pasta	Modelado por Deposición Fundida FDM	Filamento fundido en una boquilla	Extrusión continua y deposición	Solidificación por enfriamiento	Termoplásticos, ceras	Prototipos, patrones de fundición
	Robocasting	Pasta en boquilla	Extrusión continua	---	Pasta cerámica	Partes funcionales
	Fabricación de Extrusión de forma congelada FEF	Pasta en boquilla	Extrusión continua	Solidificación por congelación	Pasta cerámica	Partes funcionales
Polvo	Sinterizado Selectivo por Láser SLS	Polvo en cama	Escaneo láser	Fundición parcial	Termoplásticos, ceras, polvo metálico, polvo cerámico	Prototipos, patrones de fundición, metal, preformas de cerámica (para ser sinterizado e infiltrado)
	Fundición Selectiva por Láser SLM	Polvo en cama	Escaneo láser	Fundición completa	Metal	Herramental, partes funcionales
	Fundición por haz de electrones EBM	Polvo en cama	Digitalización de haz de electrones	Fundición completa	Metal	Herramental, partes funcionales
	Deposición de metal fundido por láser LMD	Inyección de polvo a través de una boquilla	Inyección de polvo según demanda y fundición por láser	Fundición completa	Metal	Herramental, parte metálica de reparación, partes funcionales
	Impresión tridimensional 3DP	Polvo en cama	Caída de aglutinante de impresión según demanda	---	Polímeros, metal, cerámica, otros polvos	Prototipos, cáscaras de fundición, partes funcionales
Hoja sólida	Manufactura de objetos laminados LOM	Corte láser	Alimentación y unión de hojas con adhesivos	---	Papel, plásticos, metal	Prototipos, modelos de fundición

Vaneker *et al.* [8] mencionan algunos beneficios potenciales que ofrecen las tecnologías AM, los cuales comprenden:

- Fácil personalización de un producto.
- Reducción de tiempo de lanzamiento de productos al mercado.
- Mayor flexibilidad en el desarrollo del producto.
- Simplificación de la cadena de suministro.
- Uso eficiente de materiales.
- Complejidad libre o ilimitada.
- Integración funcional.

Por otro lado, existen diversas restricciones de los procesos AM. Vayre *et al.* [5] identificaron las limitantes principales de los procesos de fabricación aditiva directa. La primera limitante es la velocidad de deposición del material, la cual depende de la velocidad de la boquilla y de la velocidad del material extruido de la boquilla, lo que provoca variaciones de altura del material depositado debido a aceleraciones y desaceleraciones generadas al momento de la deposición y formación del área transversal de las partes. La segunda restricción es la disipación de calor, ya que se deben utilizar soportes para disipar la energía, y de esta manera evitar la distorsión o colapso del metal fundido cuando se fabrican grandes superficies salientes. Otra limitante es la necesidad de remover el polvo metálico de la pieza una vez que es fabricada mediante el proceso SLM.

Thompson *et al.* [9] encontraron que los diseñadores deben tener en cuenta varios tipos de restricciones; las relacionadas con los sistemas CAD y la digitalización de sus ideas, la discretización digital y física de las partes que se producirán, las características de los procesos AM, las capacidades actuales de los equipos AM, el impacto del procesamiento sobre las propiedades del material, los requisitos para el procesamiento de los materiales utilizando diversas técnicas AM, el control de calidad y factores externos como el entorno regulatorio. Las restricciones de los sistemas CAD se refieren a que los modelos AM tendrán que ser de mayor calidad, y contener mayor información que los que se requieren para otro tipo de tecnología, ya que la información de fabricación se obtiene a partir éstos. Acerca de las características de los procesos, éstas se refieren al método de deposición del material y al principio de la unión, los cuales determinan las materias primas que pueden utilizarse, y el tipo de post-procesamiento que puede realizarse. En relación al control de calidad, los desafíos considerados son la verificación de materiales, geometrías y

superficies, ya que las piezas AM deben inspeccionarse para detectar defectos en el material a granel incluyendo granos indeseables, porosidades y huecos internos grandes. Además, los materiales AM tienen propiedades diferentes que sus contrapartes en masa, por lo que la caracterización de las propiedades mecánicas del material debe ser analizada antes de utilizarse.

De igual manera Vaneker *et al.* [8] mencionan ciertos desafíos técnicos que aún deben ser superados por los sistemas AM, estos son:

- Falta de estándares y certificación.
- La propiedad intelectual de los modelos y diseños digitales, la cual no está claramente definida.
- La complejidad del control del proceso, la cual es alta.
- El control de calidad durante el proceso, que actualmente es deficiente.
- La caracterización de propiedades mecánicas y térmicas de los materiales, ya que no presentan el mismo estándar que las propiedades de los procesos de producción convencionales.
- Las capacidades del software que no son suficientes para alcanzar las capacidades completas de los modelos requeridos para tecnologías AM.
- El uso y eliminación de las estructuras de soporte.

Igualmente, Bourell *et al.* [10] identificaron diversas barreras y obstáculos en el uso de los sistemas AM, los cuales comprenden el costo de los equipos y materiales, además del mantenimiento de los equipos. Describen también que para muchas industrias como la aeroespacial, la falta de materiales es una barrera importante ya que esta industria en específico necesita materiales que puedan soportar altas temperaturas. Además, mencionan que la imposibilidad de garantizar las propiedades de los materiales para cualquier proceso frena la adopción de tecnologías AM, ya que no se tiene la confianza de que las piezas fabricadas tendrán las propiedades mecánicas requeridas para satisfacer las necesidades estructurales específicas. Por otro lado, mencionan que la falta de estándares y certificación de los productos, procesos y materiales ha impedido la adopción de las tecnologías AM en el ámbito industrial.

2.2. Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Como se describió anteriormente, el proceso FDM comienza mediante el calentamiento de un filamento termoplástico, el cual es extruido a través una boquilla y depositado sobre una plataforma, la cual se encuentra a una temperatura elevada. Una vez depositada la capa de la sección transversal de la pieza, la plataforma se mueva hacia abajo para que se deposite la siguiente capa. Dicho proceso se repite, hasta que la pieza se encuentra totalmente fabricada. Cabe mencionar que en ocasiones se necesitan algunos soportes en las piezas, los cuales se realizan al mismo tiempo que la pieza y pueden ser del mismo material de la pieza o de diferente material, el cual se extruye por una segunda boquilla. Al finalizar la manufactura de la pieza, estos soportes serán removidos.

Cada tecnología AM cuenta con diferentes parámetros de proceso, los cuales afectan el comportamiento estructural de las piezas y dependen de la tecnología utilizada. En el caso del proceso FDM, éste involucra varios parámetros que pueden clasificarse en dos grupos principales: (i) parámetros de manufactura y (ii) parámetros estructurales. El primer grupo incluye la temperatura de extrusión, la velocidad de deposición de material, la temperatura de la plataforma, etc. El segundo grupo incluye el porcentaje de relleno, orientación de relleno, orientación de fabricación de la pieza, entre otros. Los parámetros que tiene una influencia potencial en las propiedades mecánicas de piezas FDM se muestran en la Figura 2.2.

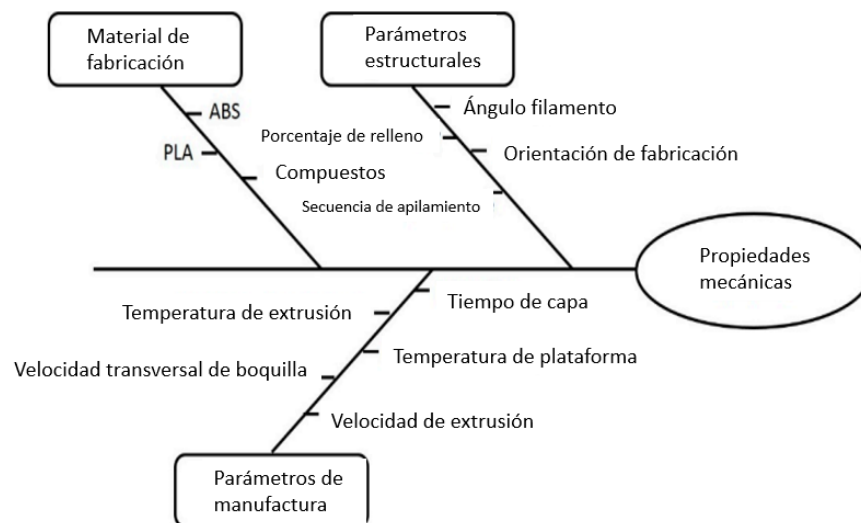


Figura 2.2. Parámetros principales con influencia en propiedades mecánicas de componentes FDM [11].

Con el fin de poder llevar a cabo este proyecto de investigación, se seleccionaron algunos parámetros estructurales basados en un estudio previo [12], considerando solamente los que tienen mayor influencia en el comportamiento estructural de las piezas. Estos parámetros se muestran en la Figura 2.3, los cuales son: orientación de fabricación, el número de capas de contorno y el porcentaje de relleno.

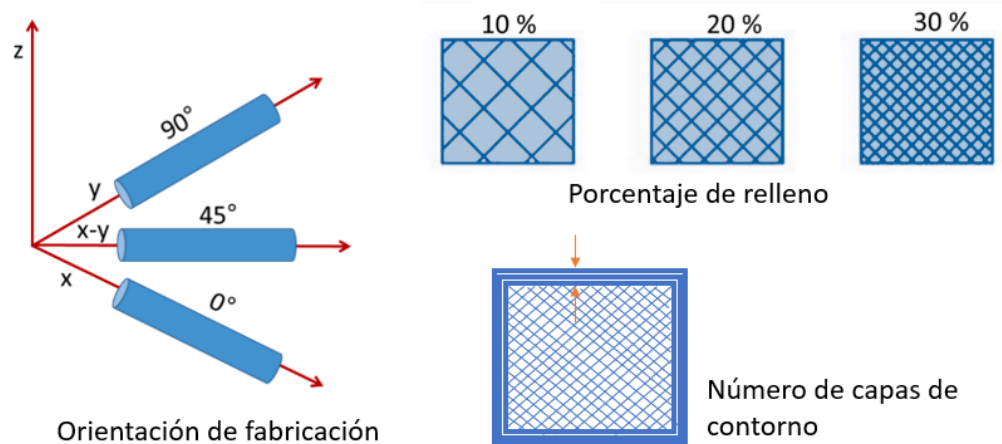


Figura 2.3. Parámetros del proceso FDM seleccionados.

Como se observa en la Figura 2.3, la orientación de fabricación se refiere a la orientación de la pieza en la plataforma de trabajo, el porcentaje de relleno se refiere a la densidad de relleno teórica que tiene la pieza, y el número de capas de contorno se refiere a la cantidad de capas que se depositan en el perímetro de la pieza. Por otro lado, la orientación de relleno se refiere a la orientación de los filamentos depositados en el interior de las piezas fabricadas, la cual puede variar desde 0° hasta 180°. Además, se puede tener capas cruzadas o capas depositadas en la misma dirección. A continuación se describirán algunos estudios acerca del comportamiento estructural de las piezas FDM basados en algunos parámetros del proceso FDM.

2.3. Comportamiento estructural de FDM

Debido a la gran cantidad de trabajos reportados en la literatura acerca del análisis del comportamiento estructural de piezas FDM basados en los parámetros del proceso, se muestra una recopilación resumen en la Tabla 2.2, la cual describe los parámetros utilizados en dichas investigaciones y el material utilizado.

Tabla 2.2. Parámetros FDM estudiados en la literatura.

Referencia	Material	Gap	% Relleno	Orientación de fabricación	Ángulo de relleno	Espesor capa	Velocidad	Temperatura	Ancho filamento	Tasa de flujo	Capas perímetro
Fodran <i>et al.</i> [13]	ABS				x					x	
Bertoldi <i>et al.</i> [14]	ABS			x							
Rodriguez <i>et al.</i> [15]	ABS	x									
Bellini <i>et al.</i> [16]	ABS			x	x						
Raut <i>et al.</i> [17]	ABS			x							
Durgun <i>et al.</i> [2]	ABS			x	x						
Hill <i>et al.</i> [18]	Polícarbonato				x						
Carneiro <i>et al.</i> [19]	Polipropileno		x		x	x					
Lanzotti <i>et al.</i> [20]	PLA				x	x					x
Alvarez <i>et al.</i> [21]	ABS		x								
Torres <i>et al.</i> [22]	PLA		x		x	x	x	X			x
Christiyan <i>et al.</i> [23]	ABS					x	x				
Chacon <i>et al.</i> [24]	PLA			x		x				x	
Kozior <i>et al.</i> [25]	ABS			x							
Cantrell <i>et al.</i> [26]	ABS PC			x	x						
Rodriguez-Panes <i>et al.</i> [27]	ABS PLA		x		x	x					
Liu <i>et al.</i> [28]	PLA PLA+aditivo			x	x						
Fountas <i>et al.</i> [29]	PLA		x	x		x	x				x

ABS-Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno, PLA – Políácido láctico

Fodran *et al.* [13] concluyeron que diferentes tasas de flujo y orientación de relleno influyeron significativamente en la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de las probetas de ABS ensayadas. En cuanto a la orientación de fabricación y de relleno, Bertoldi *et al.* [14] encontraron que hubo diferencias significativas en la resistencia a la tensión promedio, el módulo de elasticidad y el modo de falla de las probetas de ABS en las diferentes orientaciones utilizadas. Igualmente, Rodriguez *et al.* [15] encontraron que la orientación de relleno influyó significativamente en la respuesta esfuerzo-deformación de las probetas ABS sometidas a ensayos de tensión y torsión. De la misma manera, Bellini *et al.* [16] concluyeron que las propiedades mecánicas de piezas de ABS dependen de la orientación de fabricación y orientación de relleno. Raut *et al.* [17] observaron que la orientación de fabricación afectó significativamente la resistencia a la tensión y a la flexión de las probetas ABS. Por otro lado, Durgun *et al.* [2] encontraron que la orientación de fabricación tiene mayor influencia en las propiedades mecánicas y rugosidad de las superficies que la orientación de relleno.

Hill *et al.* [18] realizaron piezas de policarbonato con diferentes orientaciones de relleno, y las sometieron a ensayos de tensión y dureza. Encontraron que las propiedades del material fueron altamente dependientes a la orientación de relleno. Por su parte, Carneiro *et al.* [19] realizaron ensayos a tensión a probetas de polipropileno (PP, por sus siglas en inglés) con varios espesores de capa, porcentaje de relleno y orientación de fabricación. Encontraron que las probetas presentaron mayor rigidez en dirección del filamento, mientras que el espesor de capa tuvo muy poca influencia en el comportamiento mecánico y el porcentaje de relleno presentó un efecto lineal en las propiedades mecánicas.

Por su lado, Alvarez *et al.* [21] se enfocaron en el porcentaje de relleno y encontraron que la resistencia máxima a la tensión y resistencia al impacto fueron obtenidas al 100% de relleno. Además, concluyeron que el equipo FDM y el material del filamento influyen en las propiedades mecánicas. Torres *et al.* [22] realizaron ensayos de torsión a probetas de PLA con diferentes espesores de capa, porcentaje de relleno y post-procesamiento por tratamiento térmico. Encontraron que el espesor de capa y el porcentaje de relleno tuvieron una gran influencia en la resistencia, y que el porcentaje de relleno y el tratamiento térmico afectaron la ductilidad de las probetas.

Recientemente, Rodriguez-Panes *et al.* [27] compararon el comportamiento mecánico a la tensión de probetas de ABS y PLA con espesor de capa variables, diferentes porcentajes

de relleno y orientaciones de fabricación. Observaron que el porcentaje de relleno tuvo una gran influencia en la resistencia a la tensión, especialmente en las probetas de PLA. Por otro lado, Liu *et al.* [28] observaron que piezas compuestas de PLA reforzadas con cerámica, cobre y aluminio presentan propiedades mecánicas superiores que muestras de PLA puro. También encontraron que la máxima resistencia mecánica y el módulo de elasticidad se alcanza con la orientación en el borde y un ángulo de relleno de $\pm 45^\circ$. Por su parte, Fountas *et al.* [29] estudiaron el efecto del espesor de capa, espesor del contorno, porcentaje de relleno, orientación de fabricación, y la velocidad de manufactura en la resistencia a la tensión de probetas de PLA. Además, utilizando un DOE implementaron un modelo de predicción estadístico de dicha propiedad, encontrando que el porcentaje de relleno es un parámetro dominante que afecta la resistencia a la tensión de las probetas PLA. También encontraron que la velocidad de fabricación debe establecerse en niveles medios y altos para evitar deformaciones térmicas de las piezas, que, a su vez, pueden afectar negativamente la resistencia a la tensión. Del mismo modo, concluyeron que el número de capas debe aumentarse, lo que significa que la altura o espesor de capa deben establecerse en niveles bajos.

A partir de esta revisión de literatura se observa que la mayoría de las investigaciones se han enfocado en evaluar el efecto de los parámetros del proceso FDM, en las propiedades estructurales de piezas de ABS y muy pocos se han dirigido a piezas de PLA, el cual es uno de los polímeros más utilizados en la actualidad debido a sus propiedades biodegradables, además de ser empleado como sustituto de termoplásticos tradicionales ya que cuenta con buenas propiedades mecánicas (dureza, rigidez, resistencia al impacto y elasticidad similares al PET) en comparación con dichos materiales, y como material biocompatible en el campo de la medicina. También se observa que los parámetros de proceso más estudiados son la orientación de relleno, orientación de fabricación, espesor de capa y porcentaje de relleno; siendo el porcentaje de relleno uno de los parámetros con mayor influencia en el comportamiento mecánico de piezas FDM. Sin embargo, ninguno de los estudios en la literatura se ha enfocado en la medición y evaluación del porcentaje de relleno resultante en las piezas fabricadas. Además, los resultados existentes dependen del equipo de fabricación y del material utilizado en los experimentos, y por lo tanto no pueden ser comparables con resultados obtenidos en otros sistemas u otros materiales. Adicionalmente, no consideran la evaluación de las diferencias que puedan existir entre los parámetros de procesos seleccionados, y los valores reales obtenidos en la pieza y las diferencias entre las propiedades de la materia prima y las obtenidas en la pieza final.

Existen numerosos trabajos acerca del comportamiento estructural de piezas fabricadas mediante FDM y la influencia que tiene los parámetros de dicho proceso en las mismas; sin embargo, pocos se enfocan en la caracterización de la materia prima.

2.4. Comportamiento a la fatiga de componentes FDM

La mayoría de los componentes de ingeniería funcionan en condiciones de esfuerzos variables o de fatiga. La fatiga se define como un proceso de acumulación cíclica de daño en un material o componente que sufre tensiones y deformaciones fluctuantes. Una característica importante de la fatiga es que la carga no es lo suficientemente grande como para causar una falla inmediata. En cambio, la falla ocurre después de que se han experimentado un cierto número de fluctuaciones de carga, es decir, después de que el daño acumulado haya alcanzado un nivel crítico [30].

Debido a la inserción de las tecnologías AM para la fabricación de componentes de uso final, es necesario conocer el comportamiento bajo carga de fatiga de dichos componentes. En la literatura no se han reportado muchos trabajos de fatiga en piezas fabricadas mediante AM, y la mayoría de éstos se enfocan en piezas metálicas, ya que sus aplicaciones requieren conocer el número de ciclos hasta que llegue la falla. Existen algunos estudios relacionados a componentes creados mediante FDM, de los cuales la mayoría se centra en componentes fabricados de ABS principalmente.

J. Lee *et al.* [31] realizaron ensayos de fatiga a probetas de ABS fabricadas mediante FDM, con niveles de carga al 100%, 80%, 60% y 40% del UTS, y para nueve orientaciones diferentes. De los resultados se observó que las propiedades del material ABS P430 fueron notablemente más isotrópicas que el ABS P400. Además, el ABS P430 se fracturó en el orden de miles de ciclos al 40% de la carga de tensión máxima, mientras que el ABS P400 exhibió los límites de ciclo similares al 60% de su carga máxima. S. Ziemian *et al.* [32] realizaron ensayos de tensión y de fatiga a la tensión, usando probetas de ABS con diferentes orientaciones de relleno y con niveles de carga al 90%, 75%, 60%, 50% y 45% del UTS. Los resultados mostraron que para ambos casos el comportamiento de las probetas fue anisotrópico, y que las orientaciones de los filamentos en dirección longitudinal 0° y +45°/-45° presentaron un mejor desempeño en carga cíclica. Del mismo modo, C.W. Ziemian *et al.* [33] realizaron ensayos a fatiga en tensión de probetas de ABS con diferentes orientaciones de relleno, evaluando el daño a la fatiga y la degradación de la rigidez de las

probetas. Se encontró que los componentes FDM se degradan durante carga cíclica debido a múltiples modos de falla. También se observó que el daño basado en la rigidez de las probetas con capas cruzadas (bidireccionales) tiene una progresión no lineal similar a la de los materiales compuestos; a diferencia de las probetas con capas en dirección longitudinal 0° , las cuales no mostraron el mismo patrón de daño, concluyendo que dichas probetas se ven mayormente influenciadas por el comportamiento de las fibras alineadas.

C. Lee *et al.* [34] realizaron ensayos de fatiga en flexión a probetas de ABS con diferentes valores de espesor de capa, ancho de extrusión, orientación de fabricación, velocidad de avance y distancia entre filamentos depositados. Encontraron que los parámetros con mayor influencia en el desempeño a la fatiga son la orientación de fabricación, espesor de capa y velocidad de avance. Similarmente, M. Frascio *et al.* [35] realizaron seis ensayos de fatiga en flexión a probetas de ABS con distintas orientaciones de fabricación, encontrando que el efecto predominante en el comportamiento a fatiga de las probetas reside en la relación de esfuerzos, y que los detalles de fabricación presentaron un efecto menos importante. De igual manera, M. Domingo-Espin *et al.* [36] estudiaron la respuesta a la fatiga de probetas de ABS fabricadas con diferentes parámetros del proceso como espesor de capa, diámetro de la boquilla, porcentaje de relleno y la velocidad de fabricación. Sus resultados demostraron que el parámetro con mayor influencia en el comportamiento a la fatiga fue el porcentaje de relleno, seguido por la interacción entre el espesor de capa y el diámetro de la boquilla, la cual resultó importante ya que estos parámetros afectaron la continuidad de las piezas. Por otro lado, M.M Padzi *et al.* [37] realizaron una comparación del comportamiento a fatiga en tensión entre probetas de ABS fabricadas mediante FDM, y probetas del mismo material fundidas. Encontraron que las probetas fundidas soportaron mayores ciclos a la fatiga para todos los porcentajes de carga.

Con respecto al comportamiento de piezas fabricadas de PLA, M.F. Afrose *et al.* [38] estudiaron el efecto de las orientaciones de fabricación de probetas sometidas a ensayos de fatiga en tensión. Los resultados demostraron que las probetas en orientación X bajo carga estática presentan una mayor resistencia; sin embargo, bajo carga cíclica las probetas con orientación de fabricación de 45° demostraron una mayor vida a la fatiga que las probetas orientadas en X y Y (0° y 90°), para el mismo porcentaje de carga aplicada. O.H. Ezeh *et al.* [39] investigaron el efecto de la orientación del relleno, y el efecto de esfuerzos medios distintos de cero en probetas de PLA en ensayos a fatiga. Los resultados mostraron que en términos de diseño de ingeniería contra la fatiga, el efecto de la

orientación de relleno se puede despreciar, y al establecer un porcentaje de relleno de 100% el material se puede modelar como homogéneo e isotrópico.

Recientemente, R. Jerez-Mesa *et al.* [40] investigaron la influencia de cinco parámetros de proceso (espesor de capa, diámetro de la boquilla, porcentaje de relleno, velocidad de fabricación y patrón de relleno) en la vida a la fatiga de probetas de PLA. Se realizaron cinco pruebas de fatiga para cada combinación de parámetros. Los resultados mostraron que los factores que tienen mayor influencia en el comportamiento a la fatiga son el porcentaje de relleno, el diámetro de la boquilla y el espesor de capa. Además, se concluyó que el patrón de relleno de panal es el más beneficioso con respecto a la vida a la fatiga. G. Gomez-Gras *et al.* [41] llevaron a cabo pruebas de fatiga en flexión giratoria a probetas de PLA con diferentes parámetros de proceso (espesor de capa, porcentaje de relleno, diámetro de la boquilla y velocidad) mediante el uso de Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) Taguchi. De igual manera se encontró que los parámetros que más influyen en la vida a la fatiga de las probetas son; el porcentaje de relleno seguido por el espesor de capa.

De la revisión anterior, se observa que en la literatura existen varios trabajos relacionados al comportamiento de vida a la fatiga de partes fabricadas mediante FDM. Sin embargo, ninguno de los trabajos mencionados reporta el comportamiento de componentes con diferentes orientaciones de fabricación y porcentajes de relleno, los cuales son los principales parámetros que afectan el desempeño mecánico de las piezas FDM. Además, no relacionan sus resultados con respecto a la materia prima utilizada, y son específicos del equipo FDM utilizado.

2.5. Diseño para manufactura aditiva (DfAM)

En la literatura existen numerosos trabajos acerca de metodologías, lineamientos y consideraciones de diseño para Manufactura Aditiva con el objetivo de colaborar en la adopción industrial de dichas tecnologías. A continuación se presentan algunas de estas investigaciones.

Klahn *et al.* [4] presentaron dos estrategias de diseño para utilizar los beneficios de la manufactura aditiva en el desarrollo de producto. La primera es la estrategia de diseño impulsada por la manufactura, la cual utiliza la AM como tecnología de producción; es decir, el diseñador mantiene un diseño convencional pero se fabrica de manera aditiva y se puede

utilizar especialmente para la personalización masiva de un producto. La segunda es la estrategia de diseño impulsada por la función, la cual explota las características AM para mejorar las funciones de un producto; es decir, utiliza todo el potencial de libertad de diseño que brinda la AM. Generalmente el diseño resultante contiene estructuras internas complejas o estructura integradas que son imposibles de fabricar convencionalmente. Posteriormente se implementaron dos casos de estudio para evaluar las estrategias de diseño. En el primer caso se redujo el tiempo de desarrollo y se construyó un diseño robusto al inicio de la producción en serie, reflejándose en los costos de fabricación como se muestra en la Figura 2.4. El costo de las series piloto fue más barato con AM que con procesos convencionales; sin embargo, en lotes mayores el moldeo por inyección fue más favorable en términos de costos. Para el segundo caso de estudio, se mejoró y optimizó la pieza estudiada, logrado su fabricación mediante AM con poco procesamiento posterior, mientras que el nuevo modelo fue imposible de fabricar convencionalmente. Concluyeron que la estrategia de diseño impulsada por la AM tiene beneficios de costo en formas complejas y tamaños de lotes pequeños, y requiere que el diseñador cumpla con las reglas de diseño de manufactura convencional, para que cuando la demanda aumenta, la producción pueda transferirse a un proceso de fabricación convencional. Además, la estrategia de diseño impulsada por la función, desatiende todas las reglas de diseño convencionales, y diseña la pieza de acuerdo con las funciones del componente y los requisitos del proceso AM. Los beneficios son un mejor rendimiento del producto en términos de peso, eficiencia y cantidad de piezas en el ensamblaje.

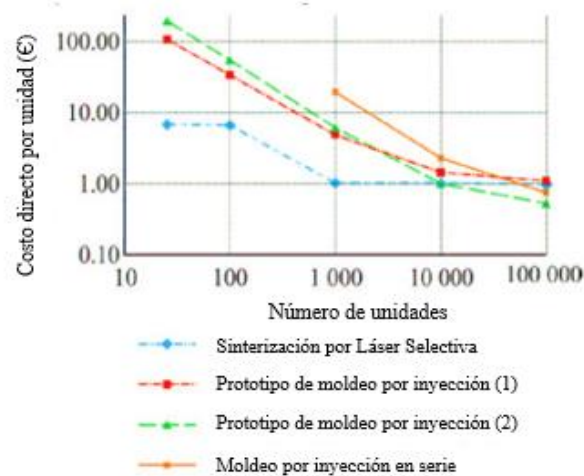


Figura 2.4. Costo unitario para diferentes tamaños de lote y procesos de manufactura [4].

Vayre *et al.* [5] propusieron una metodología de diseño para piezas AM, la cual comprende cuatro pasos. El primero es el análisis de las especificaciones de la parte, luego se proponen una o varias formas aproximadas, Estas formas se optimizan en relación a las especificaciones y limitaciones de fabricación AM y por último, el diseño es validado. El análisis de las especificaciones se refiere al análisis de las superficies funcionales, es decir, las superficies que ayudan a la transmisión de carga mecánica, térmica, etc., o las que ayudan a ensamblar la pieza. También se analiza el volumen de la pieza que ayuda a evitar que la parte colisione con otras partes, y se examina el comportamiento específico que puede ser mecánico, térmico o multifísico, para posteriormente elegir el material que cumpla con el proceso de fabricación y los requerimientos de comportamiento. En cuanto a las formas aproximadas, éstas se obtienen mediante optimización topológica de una forma inicial, la cual debe cumplir con los requisitos previamente especificados y tomando en cuenta las características del proceso AM. Para finalizar se valida la manufacturabilidad de la forma optimizada y se definen el resto de los parámetros de fabricación como la orientación de la parte, etc. Esta validación se logra a través de la fabricación virtual de la pieza que consiste en una simulación de la deposición del material y la simulación térmica. Debido a la falta de simulaciones virtuales, actualmente se valida fabricando las partes y realizando las mediciones pertinentes a cada caso.

Leutenecker-Twelsiek *et al.* [42] crearon una guía de diseño para manufactura aditiva basada en tres áreas: características del proceso, principios de diseño, y reglas de diseño. Las características del diseño describen las características condicionadas por el proceso que tienen impacto en el diseño de componentes AM. Los principios de diseño dan instrucciones para aumentar la calidad de la pieza o reducir los costos de fabricación, y éstos rara vez se encuentran en la literatura ya que a menudo se basan en las experiencias de los diseñadores. En cuanto a las reglas de diseño, éstas dependen del proceso de fabricación elegido, del material, de la máquina y los parámetros de la máquina, y pueden incluir valores como la orientación de la pieza. La guía de diseño se centró específicamente en el parámetro de la orientación de la pieza, ya que éste presenta una gran influencia en las partes AM y tiene mucha dependencia en las reglas de diseño de los procesos AM, como se observa en la Figura 2.5. Por lo anterior, se diseñó un sistema para identificar desde una etapa temprana de diseño la orientación de la pieza. Para ello, el diseño conceptual de la pieza se divide en varios elementos de diseño y se analizan por separado. El análisis consiste en evaluar el efecto de la orientación sobre las características de calidad de los elementos. Posteriormente se evalúa la relevancia del elemento en la pieza, y la

orientación de la pieza se determina en función de la calificación anterior. El proceso utilizado en la guía de diseño se muestra en la Figura 2.6. Posteriormente la guía se aplicó en un caso de estudio en el que se observó su utilidad, ya que se fabricó la pieza con la orientación adecuada, eliminando el uso de soportes y el rediseño de la pieza.

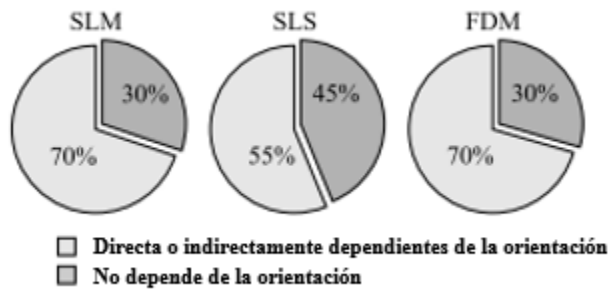


Figura 2.5. Análisis de dependencia de reglas de diseño en la orientación de la pieza [42].



Figura 2.6. Proceso para definir la orientación de la pieza en la etapa de diseño inicial [42].

Adam *et al.* [43] crearon reglas de diseño para AM basadas en tres grupos de elementos: 1) los elementos básicos, los cuales son formas geométricas simples como los cilindros; 2)

las transiciones de elemento, que son áreas en las que los elementos básicos se combinan entre sí, por ejemplo, las juntas; y 3) las estructuras agregadas, las cuales comprenden dos a más elementos básicos y las transiciones de sus elementos, por ejemplo los salientes. A cada uno de estos elementos se le asignaron ciertos atributos, por ejemplo, el radio exterior de un cilindro. De este modo, las reglas de diseño para AM proporcionaron rangos para los valores de los atributos que aseguraran la capacidad de fabricación con alta calidad. Se realizaron diferentes partes con diferentes atributos y configuraciones para tres tecnologías AM: sinterización láser (LS), fusión láser (LM) y modelado por deposición fundida (FDM). De los resultados experimentales se propusieron un conjunto de reglas o lineamientos DfAM, los cuales se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Reglas de diseño para manufactura aditiva [43].

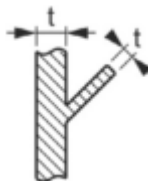
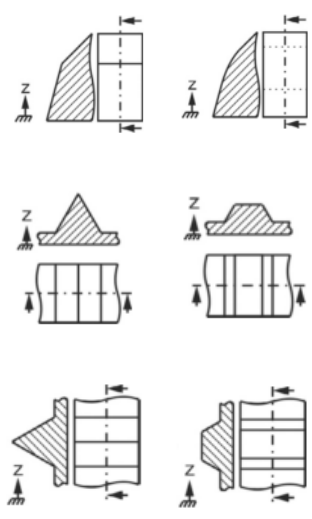
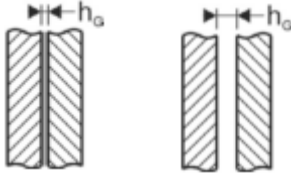
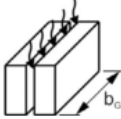
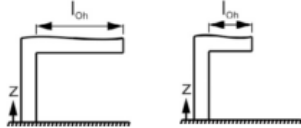
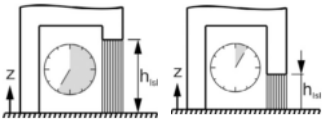
Grupo	Tipo	Atributo	Descripción	Diseño para manufactura		LS	LM	FDM
				Inadecuado	Adecuado			
Elementos	Elementos firmemente unidos	Espesor	Los espesores de las transiciones de los elementos se pueden elegir libremente ya que no influyen en la precisión de las formas del elemento.			X	X	X
		Borde	<p>Deben evitarse los bordes agudos (externos e internos). Para recibir una mejor precisión de forma, los bordes deben redondearse.</p> <p>Los bordes que forman puntos extremos verticales deben ser planos y paralelos al plano de construcción.</p> <p>Los bordes que forman puntos extremos horizontales deben ser planos ortogonalmente al plano de construcción.</p>			X	X	X

Tabla 2.3. Extracto del catálogo de reglas de diseño. Continuación [43].

Grupo	Tipo	Atributo	Descripción	Diseño para manufactura		LS	LM	FDM
				Inadecuado	Adecuado			
Elementos	Elementos no unidos	Altura de separación	Deben mantenerse alturas de separación mínimas para recibir pequeñas desviaciones dimensionales y asegurar la eliminación de estructuras de soporte dispersas. LS: $h_G > 0.6 \text{ mm}$ LM: $h_G > 0.2 \text{ mm}$ FDM: $h_G > 0.4 \text{ mm}$			X	X	X
			Si la accesibilidad a la separación se da a lo largo de todo el ancho, el ancho de separación se puede elegir libremente.		X	X	X	
Estructuras agregadas	Voladizo	Longitud	Las longitudes de voladizos deben ser lo suficientemente cortas como para garantizar una fabricación robusta.				X	X
	Islas	Posiciones iniciales	Deberán ser lo más bajas posibles, ya que las posiciones más altas aumentan el número de interruptores de punta para la creación de estructuras de soporte sólidas, lo que aumenta el tiempo de construcción.					X

Por otra parte, Klahn *et al.* [44] describieron cuatro criterios para identificar componentes que pueden ser rediseñados para ser fabricados mediante SLS y SLM. Consideran que al contar con libertad de diseño en las tecnologías AM, los diseñadores deben enfocarse en mejorar la función del sistema, lo cual representa un desafío para los diseñadores que no estén familiarizados con dichas tecnologías de fabricación. Los criterios de selección para el rediseño de piezas son el *diseño integrado*, cuyo objetivo es identificar grupos de partes o ensamblajes que puedan ser rediseñados en un solo componente; la *individualización*, cuyo deseo es satisfacer las diferentes necesidades de los clientes, por lo que existirán más variaciones de diseño y tamaños de lotes más pequeños. Partes complejas con una alta

variabilidad cumplen con el criterio de individualización. El tercer criterio es el *diseño liviano* dado que un peso reducido mejora el rendimiento de un producto. Las tecnologías AM, permiten situar material únicamente en lugares donde se necesita por lo que se reduce el material y peso, lo que a su vez reduce el tiempo de fabricación y costos. Y por último el cuarto criterio es el *diseño eficiente*, el cual tiene como objetivo mejorar la eficiencia del producto en funcionamiento. Este objetivo se puede lograr con un mayor rendimiento del componente o reduciendo pérdidas en el producto durante la operación. Una vez identificados los criterios de selección, se aplicaron a cuatro casos de estudio. Como resultado se llegó a la conclusión de que los criterios utilizados fueron exitosos ya que mejoraron el rendimiento y los requisitos económicos de dichas partes.

Hällgren *et al.* [45] presentaron estrategias de diseño para AM clasificándolas en dos clases: *conformación de piezas por proceso y por diseñador*. La *conformación de piezas por proceso* utiliza la optimización topológica para la reducción de masa. Ésta se centra en reducir la interacción manual con un diseñador para reducir el tiempo de diseño y mejorar el rendimiento del mismo. La *conformación de piezas por diseñador* utiliza lattices (estructuras regulares de rejillas) para reducir la masa y el tiempo de fabricación al hacer que la estructura sea autosuficiente. En ésta, el objetivo es reducir el costo de la parte utilizando el conocimiento del diseñador sobre el método de fabricación AM elegido. Posteriormente, Hällgren *et al.* [45] realizaron un rediseño de una pieza aplicando y combinando las dos estrategias propuestas. Los resultados se muestran en la Figura 2.7, en donde se observa el diseño final para cada una de éstas. De los resultados se concluyó que la estrategia de conformación de pieza por proceso aumenta el rendimiento de la pieza, mientras que la conformada por el diseñador reduce el tiempo de fabricación, sin embargo las redes lattice no son fáciles de analizar para el rendimiento debido a su complejidad geométrica. Además, los rediseños fueron 30 veces más costosos que el diseño original, lo que sugirieron una necesidad de hacer estimaciones de costos preliminares, y seleccionar piezas para rediseñar y saber si un aumento en el rendimiento llevará a un mayor costo de fabricación.

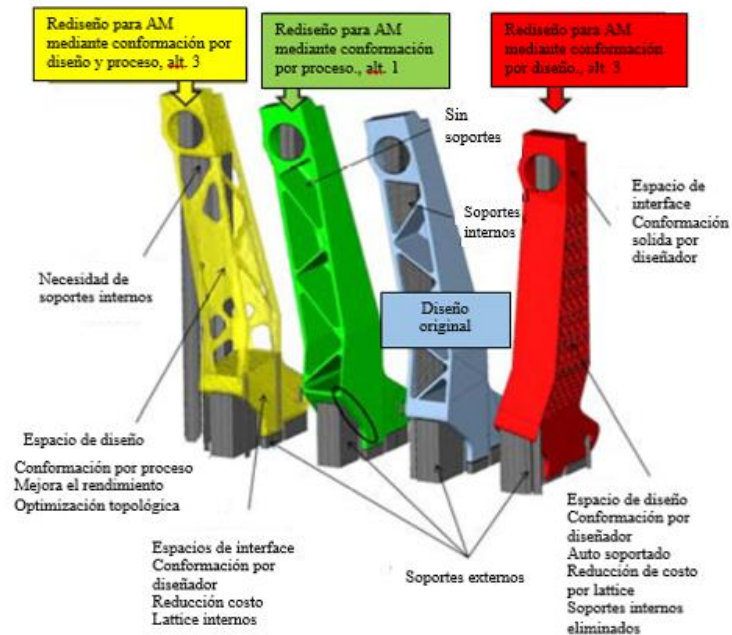


Figura 2.7. Rediseño de pieza [45].

Por otro lado, Orqu era *et. al.* [46], describieron una metodología para diseñar una pieza o un sistema mecánico (MS) independientemente de la tecnología AM utilizada. Esta metodología consiste en tres etapas con once pasos, empezando por los requerimientos y finalizando con la preparación para la fabricación como se muestra en la Figura 2.8. Se analizó un caso de estudio, concluyendo que la metodología propuesta permite mejorar las características de una pieza, aunque faltaron pruebas para tener los datos de características completos. De igual manera, Salonitis *et al.* [47] propusieron una metodología de rediseño aplicada a AM para convertir una parte existente en un diseño optimizado adecuado para AM. Esta metodología comprende cinco pasos principales y se muestra en la Figura 2.9. Se implementó dicha tecnología a un caso de estudio y se concluyó que a partir de las características de la tecnología AM elegida, y las especificaciones funcionales del componente a rediseñar, se puede encontrar la geometría optimizada del mismo. Además, el análisis de decisión multicriterio (MCDA) que se basa en la identificación de objetivos, identificación de criterios para comparar los conceptos finales validados y la toma de decisiones, ayudó a los diseñadores a elegir el diseño final a partir de los diseños optimizados. El análisis MCDA dependió de criterios predefinidos que se recopilaron del cliente como son: la resistencia mecánica, el peso, la calidad superficial y el costo de fabricación.

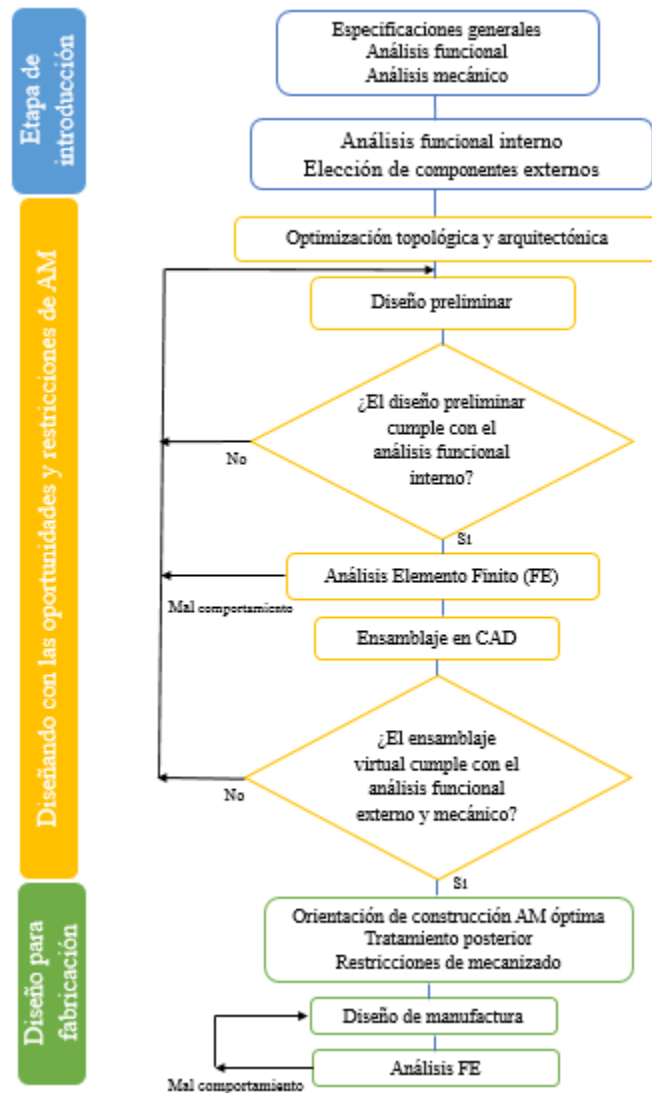
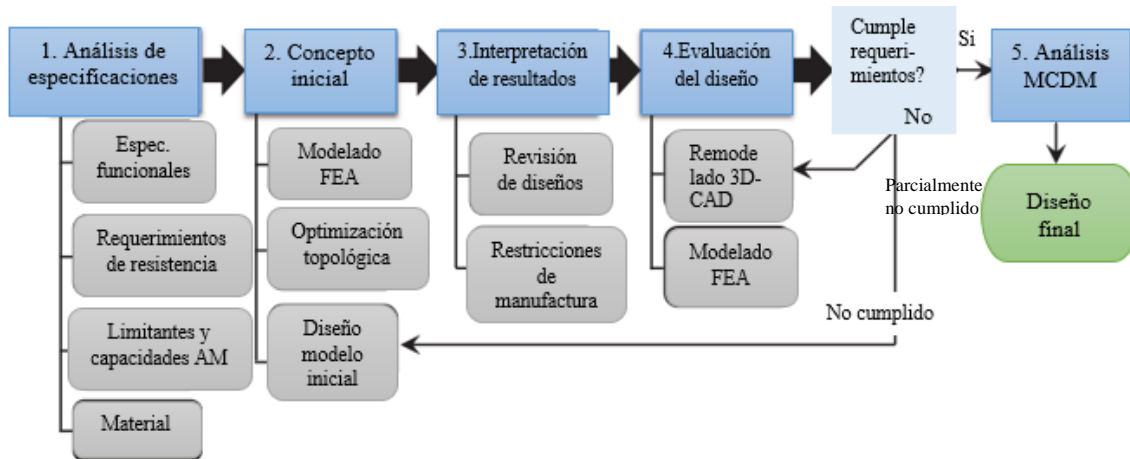


Figura 2.8. Metodología de optimización multifuncional [46].

De igual manera, Ponche *et al.* [48] propusieron una nueva metodología de diseño para AM que permite balancear los requerimientos de las especificaciones funcionales y las especificaciones del proceso AM elegido. La metodología consta de tres pasos. El primer paso consiste en determinar las posiciones de superficies funcionales para poder determinar la orientación de la pieza. El segundo paso consiste en definir la geometría óptima de la pieza con respecto a los objetivos funcionales. Dicha geometría será la geometría de la pieza inicial adaptada al proceso de fabricación AM elegido. El último paso permite desde la geometría inicial determinar las rutas de fabricación óptimas con respecto a las características del proceso AM. A partir de dichas rutas, el programa de fabricación se

genera en paralelo con el modelo CAD de la parte final. Este método de optimización se puede aplicar a todos los procesos metalicos AM.



*MCDM: Toma de decisiones multicriterio.

Figura 2.9. Metodología propuesta para el rediseño de partes para AM [47].

Como se puede observar las metodologías de diseño para AM desarrolladas actualmente no consideran el comportamiento estructural de las piezas fabricadas mediante AM, por lo que están limitadas al diseño de prototipos o partes conceptuales. Sin embargo, actualmente se han presentado algunos reportes acerca del uso de modelos de predicción con el fin de poder incrementar el uso de las mismas. Dichas investigaciones se presentan a continuación.

2.6. Modelos de predicción de propiedades estructurales

El desarrollo de modelos para determinar el comportamiento y propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante AM, se basa en diversos enfoques que incluyen los parámetros de fabricación.

2.6.1. Modelos numéricos

Algunos trabajos de investigación han utilizado modelos numéricos para analizar y evaluar el desempeño mecánico de piezas fabricadas mediante FDM. Zhang *et al.* [49] propusieron un modelo de elemento finito (MEF) termo-mecánico para simular la deposición del filamento. Los resultados mostraron que una trayectoria corta conduce a un mayor esfuerzo residual en comparación con patrones de trayectorias largos y alternados, a pesar de que ambos tienen distribuciones de esfuerzos y características de distorsión similares. Por otro

lado, Hambali *et al.* [50] presentaron tres modelos MEF de un soporte con tres orientaciones de construcción y una condición de carga. Se realizaron pruebas experimentales de los soportes, y los resultados mostraron una tendencia no lineal mientras que los resultados MEF siguieron un comportamiento lineal. Lo anterior indica que un modelo MEF dinámico y no lineal podría ser más adecuado. Por su parte, Rezayat *et al.* [51] presentaron un modelo MEF simplificado de una pieza bajo cargas de tensión, con diferentes ángulos de relleno y espacio entre filamentos. Sugirieron que las propiedades mecánicas de las piezas FDM podrían mejorar potencialmente si los patrones de contorno actuales fueran rediseñados.

Górski *et al.* [52] compararon un modelo numérico MEF con pruebas experimentales. Aunque los resultados fueron muy similares en condiciones de flexión, la predicción de los esfuerzos internos no fue concluyente y el tiempo de cálculo requerido fue muy grande. Igualmente, Somireddy *et al.* [53] presentaron un modelo MEF de piezas FDM con diferentes meso estructuras. Concluyeron que las diferencias entre los resultados numéricos y experimentales se deben a que en el modelo numérico se asume una unión perfecta entre capas. Por otro lado, Somireddy *et al.* [54] desarrollaron modelos MEF de un elemento de volumen representativo (RVE, por sus siglas en inglés) sometido a carga de tensión. Estos modelos capturaron la influencia de la orientación de fabricación, la orientación de relleno y espesor de capa. Observaron que el comportamiento del material depende de la orientación de fabricación.

Recientemente Cerda-Avila *et al.* [55], presentaron un estudio para predecir el comportamiento mecánico de piezas FDM utilizando modelos numéricos. Se analizaron modelos MEF simplificados con distintos porcentajes de relleno, y se compararon con sus resultados experimentales correspondientes. Se observó que, aunque los resultados numéricos y experimentales presentan la misma tendencia, los modelos numéricos sobre estimaron los resultados experimentales.

2.6.2. Modelos analíticos

Diversos modelos predictivos del comportamiento mecánico de partes FDM también se han reportado en la literatura. Croccolo *et al.* [56] desarrollaron un modelo analítico para la predicción del módulo de elasticidad y rigidez, basado en los parámetros como el ancho y altura del filamento depositado, el ángulo de relleno, el número de capas de contorno y la

orientación de fabricación. Los resultados mostraron que el modelo propuesto fue capaz de reproducir la ruptura para cada una de las capas, y predecir la falla en toda la pieza.

Por otro lado, Hoon Ahn *et al.* [57] propusieron un modelo analítico para la predicción de la resistencia a la tensión de partes de ABS fabricadas mediante FDM, el cual está basado en la teoría clásica de laminación (CLT, por sus siglas en inglés) y el criterio de falla de Tsai-Wu. Primero realizaron un estudio experimental variando los ángulos de relleno (0° , 90° , $45^\circ/-45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$) de probetas que luego sometieron a ensayos a tensión. Luego, basándose en la micro mecánica de las piezas (ángulo de relleno) y mediante la teoría clásica de laminación y matrices de transformación, encontraron los valores de esfuerzo en los ejes. Una vez encontrados dichos esfuerzos se sometieron al criterio de falla de Tsai-Wu, el cual predice la falla de cada lámina mediante los esfuerzos longitudinales y transversales a tensión y compresión de la pieza además de utilizar la resistencia a cortante. Concluyeron que su modelo de falla anisotrópica podría predecir la falla razonablemente bien en función del ángulo de relleno, y que las discrepancias encontradas entre el modelo y los resultados experimentales podría reducirse con el desarrollo de un modelo más detallado y con más experimentos. Del mismo modo, Casavola *et al.* [58] utilizaron la CLT para describir el comportamiento mecánico de piezas FDM. Primero, midieron de manera experimental los valores del módulo elástico en la dirección longitudinal y transversal, con respecto a la fibra (E_1 , E_2), el coeficiente de Poisson (ν_{12}) y el módulo cortante (G_{12}). Luego, aplicaron la CLT para un material de capas ortotrópico en base al espesor de capa constante, el número de capas y ángulo de las capas depositadas para calcular el tensor de rigidez reducido, las deformaciones y esfuerzos para cada capa. Posteriormente compararon sus resultados con resultados experimentales, y concluyeron que la CLT mostró una alta capacidad de predicción el módulo elástico de piezas de PLA y ABS fabricadas mediante FDM, llegando a errores de 4.7% a 6.6%. Concluyeron que, aunque el modelo fue capaz de predecir con alta precisión el módulo elástico de piezas de ABS y PLA, no consideró parámetros como la temperatura de extrusión, la tasa de flujo del material y dirección vertical de fabricación.

Recientemente, Zhao *et al.* [59] desarrollaron dos modelos analíticos para predecir la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de probetas de PLA fabricadas mediante FDM. Para la manufactura de las probetas utilizaron diferentes orientaciones de fabricación y espesores de capa. Para el modelo de resistencia a la tensión utilizaron un modelo basado en materiales transversalmente isotrópicos y el criterio de resistencia de Tasi-Hill. En cuanto al modelo del módulo elástico, éste se basó en materiales ortotrópicos bajo un estado de

esfuerzo plano. Los resultados experimentales indicaron que la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad, aumentan a medida que incrementa el ángulo de fabricación o cuando el espesor de capa disminuye. Los errores relativos entre los resultados de sus modelos y los experimentales estuvieron por debajo de 0.14, lo que es satisfactorio para aplicaciones de ingeniería. Por lo tanto, concluyeron que los modelos analíticos desarrollados pueden predecir con precisión la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de piezas de PLA-FDM.

2.6.3. Modelos analíticos de la micromecánica

Como las tecnologías AM se basan en añadir material para crear una pieza utilizando algunos parámetros de proceso particulares, como la orientación de relleno y el porcentaje de relleno, las piezas creadas mediante AM pueden considerarse porosas. Las piezas porosas son importantes ya que son más ligeras y reducen el uso de material. Sin embargo, la porosidad afecta las propiedades mecánicas efectivas de la pieza, como el módulo elástico y la resistencia a la tensión [60].

De acuerdo a la literatura, existen diferentes modelos para poder predecir el comportamiento de materiales porosos y materiales compuestos. Uno de los modelos más conocidos y utilizados es el modelo de Voigt o mejor conocido como Regla de la Mezcla, el cual se describe como:

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (2-1)$$

donde E_c , E_m y E_p son el módulo elástico del material compuesto, de la matriz y de la fibra respectivamente, además V_m y V_p son el volumen de la matriz y de la fibra, respectivamente [61]. Una variante de este modelo está representada por la siguiente ecuación:

$$E_c = \alpha v_f E_f + (1 - v_f) E_m \quad (2-2)$$

donde E_f es el módulo elástico de la fibra, E_m es el módulo elástico de la matriz, V_f es el volumen de la fibra y α es un factor de orientación de la fibra [62]. Hasselman [63] propuso un modelo en donde las propiedades de la segunda fase fueran cero, como si fueran huecos:

$$E_p = E_0 \left(1 + \left[\frac{AP}{1-AP-P} \right] \right) \quad (2-3)$$

donde E_p es el módulo elástico efectivo del material poroso y E_0 es el módulo elástico del material sólido, respectivamente, P es la porosidad y A es una constante experimental.

Para materiales porosos la ecuación más utilizada es la de Gibson y Ashby [64], quienes son considerados como los pioneros en este campo. El modelo propuesto de Gibson y Ashby es:

$$\frac{E}{E_s} = C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (\text{para } 0.04 < \frac{\rho}{\rho_s} < 0.50) \quad (2-4)$$

donde E es el módulo elástico efectivo de la pieza, E_s es el módulo elástico del material sólido, ρ es la densidad aparente, ρ_s es la densidad del material sólido, y C y n son constantes que dependen de la microestructura del material y cuyos valores se obtienen experimentalmente.

Por otro lado, varios trabajos en la literatura han estudiado las relaciones entre el módulo elástico y el volumen poroso para describir su comportamiento. Entre ellos, se encuentra Duckworth [63], quien propuso el siguiente modelo:

$$S_p = S_0 \exp(-kP) \quad (2-5)$$

donde S_p y S_0 es el UTS del material poroso y del material sólido respectivamente, P es la porosidad y k es una constante que depende del material. Spriggs [63] extendió el modelo de Duckworth para caracterizar el módulo elástico para un óxido de aluminio hasta 37% de porosidad y obtuvo:

$$E_p = E_0 \exp(-mP) \quad (2-6)$$

donde m es una constante que depende del material, E_p y E_0 es el módulo elástico del material poroso y del material sólido, respectivamente, y P es la porosidad.

Para niveles de porosidad mayores a los aplicables en la ecuación (2-6), Rice [63] reconoció que el papel de los poros y el material de la matriz pueden invertirse, lo que lo llevo a una ecuación teórica aplicable a valores más grandes de porosidad:

$$E_p = E_0[1 - \exp(-r\{1 - P\})] \quad (2-7)$$

donde r es una constante que se determina empíricamente.

La revisión de literatura anterior revela que la influencia de los parámetros del proceso FDM sobre las propiedades mecánicas ha sido ampliamente estudiada en la literatura. Los resultados han demostrado que el espacio entre filamentos, la orientación de fabricación, el porcentaje de relleno y el número de capas de contorno son los parámetros de proceso que influyen más significativamente. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se basan en enfoques experimentales y numéricos, que han demostrado ser eficaces pero costosos y que requieren mucho tiempo. Poco trabajo de investigación se ha realizado al desarrollo de modelos analíticos capaces de predecir las propiedades mecánicas de manera más eficiente. Además, actualmente, no existen modelos analíticos capaces de predecir el comportamiento a nivel macro de partes FDM, desde el material del filamento y los parámetros del proceso. Por lo tanto, el desarrollo de dichos modelos analíticos no solo mejorará la eficiencia del proceso DfAM, sino que también ayudarán a ingenieros en la selección de los parámetros para satisfacer las necesidades y capacidades de fabricación existentes. Además los modelos analíticos presentados, se basan en la micromecánica y ninguna investigación se centra en el comportamiento efectivo a nivel macro de componentes FDM.

2.7. Redes neuronales

En la actualidad, existen diversas herramientas tecnológicas que permiten la predicción de eventos mediante programas computacionales capaces de analizar grandes cantidades de datos. Una de estas herramientas es la Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés), la cual ha tenido un gran desarrollo y auge en las últimas décadas. Hoy en día se han utilizado diferentes técnicas de AI para optimizar los parámetros del proceso AM, y predecir el comportamiento mecánico de componentes fabricados mediante AM [65].

2.7.1. Inteligencia artificial/Redes neuronales

El término de AI fue utilizado por primera vez en 1956 por John McCarthy, Marvin Minsky y Claude Shannon, quienes son considerados pioneros de este campo. La AI puede definirse como la habilidad que tiene una máquina o programa de computadora de aprender y pensar, y es una rama de la informática que tiene como objetivo comprender la esencia de la inteligencia humana y reproducirlo en una máquina que responda de manera similar [66]. Los sistemas de AI demostrarán alguno de los siguientes comportamientos asociados con la inteligencia humana: planificación, aprendizaje, razonamiento, resolución de problemas, representación del conocimiento, percepción, movimiento y manipulación [67].

Una rama de la AI es el Machine Learning o aprendizaje automático, en donde un sistema informático se alimenta de grandes cantidades de datos, que luego utiliza para aprender a llevar a cabo una tarea específica [67]. En esencia, el aprendizaje automático se trata de analizar grandes datos: la extracción automática de información y su uso para hacer predicciones, descifrar si la predicción fue correcta y, si es incorrecta, aprender de eso para hacer una predicción más correcta en el futuro [68]. La clave del proceso del Machine Learning son las redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés), conocidas como redes neuronales (NN, por sus siglas en inglés), las cuales se basan en tratar de imitar el comportamiento de una célula (neurona humana), como se muestra en la Figura 2.10, mediante modelos matemáticos. La Figura 2.10 muestra los elementos de una neurona que permiten la transmisión de datos. Las Dendritas es la entrada de la información a la neurona, el Núcleo la procesa y la transmite a través del Axón. Las ramificaciones terminales del Axón se conectan a otras neuronas a través de un proceso conocido como sinapsis. Se dice que cada neurona puede recibir información de 5000 a 15000 entradas de axones de otras neuronas [69].

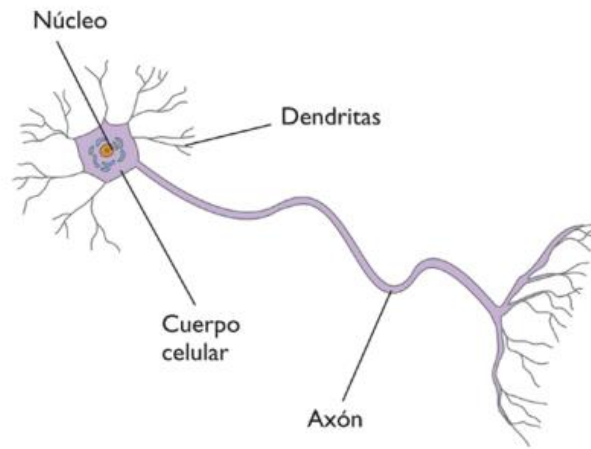


Figura 2.10. Una célula, una neurona [70].

Las NN pueden definirse como un grafo que contiene nodos, llamados neuronas, y aristas, llamados pesos, que alimentan datos entre sí y que pueden ser entrenadas para llevar a cabo tareas específicas, modificando la importancia atribuida a los datos de entrada a medida que pasan entre las capas mediante algoritmos de aprendizaje [67]. Los elementos que componen las NN son [66] (Figura 2.11):

- Capa de entrada, donde se ingresan los datos,
- Capas ocultas, donde se realiza el procesamiento de datos, y
- Capa de salida, responsable de representar los valores de salida deseada.

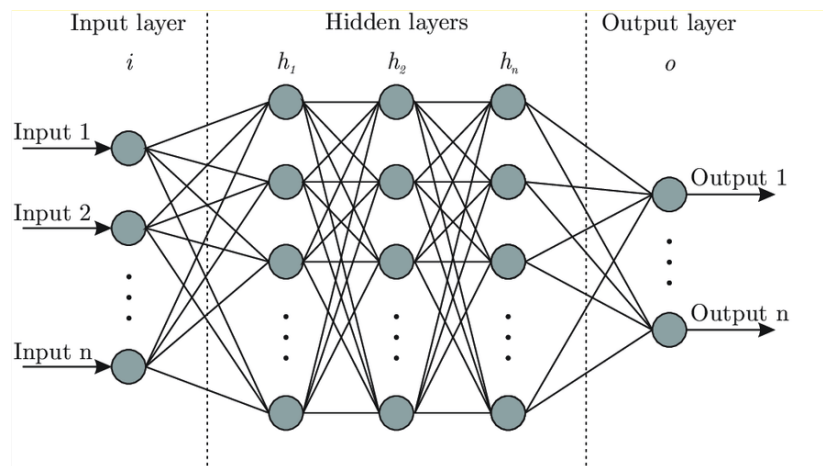


Figura 2.11. Topología de red neuronal simple [71].

Existen diversos tipos de redes neuronales dependiendo de la arquitectura y sobre todo el tipo de problema a resolver. En el aprendizaje automático existen dos tipos de problemas principales: clasificación y regresión [72]. Para el caso particular de este trabajo de tesis, se

considera un problema de regresión, en donde se trata de describir y representar un comportamiento de un conjunto de datos que permita describir datos invisibles con datos observados, es decir, que realicen interpolaciones y predicciones [72]. Por lo tanto, las redes neuronales de regresión general (GRNN, por sus siglas en inglés) fueron elegidas para el análisis de los datos experimentales.

Las redes GRNN tienen una capa de entrada X , una capa de patrones (pattern layer) de funciones ϕ_i que representan las funciones base, una capa S que conecta las neuronas ϕ_i con la capa de salida Y mediante los pesos W , como se muestra en la Figura 2.12 [72]. En comparación con la red de BPN, la GRNN es determinística ya que no hay pesos aleatorios de inicialización.

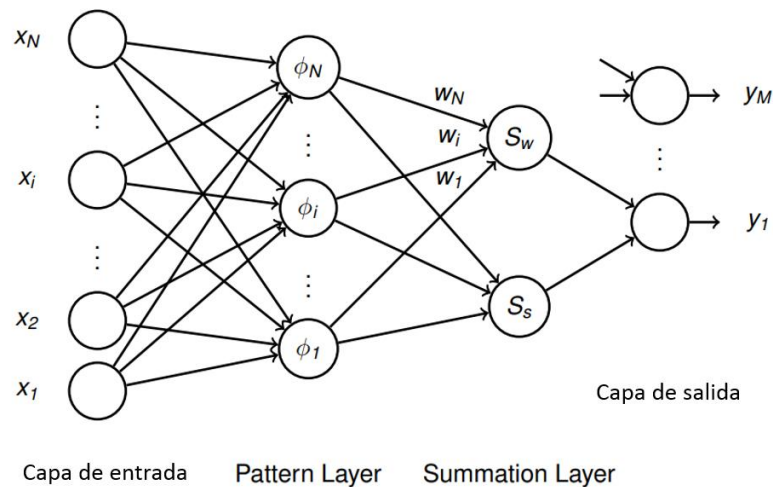


Figura 2.12. Arquitectura de la red GRNN [72].

El funcionamiento de las NN consta principalmente de dos etapas, la etapa de entrenamiento y la etapa de prueba (testing). En la primera etapa las neuronas adaptan los pesos de las variables de entrada mediante varias iteraciones o corridas automáticas para obtener valores con el menor error con respecto a la salida deseada. Una vez entrenada la red, se procede a la etapa de prueba (los pesos ya no varían) donde se le proporcionan datos de entrada diferentes a los de entrenamiento a la red para que solucione y entregue una salida deseada.

Para comprobar el desempeño de la red se evalúa el error medio cuadrático (MSE, por sus siglas en inglés), el cual compara los datos de salida de la red con los datos de salida deseados de entrenamiento de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta_j - \mu)^2 \quad (2-8)$$

donde n es el número de datos, Δ_j es la salida estimada de la red, y μ es el dato de salida real deseado. De acuerdo a este valor se modifican los parámetros de la red hasta obtener el valor MSE deseado.

Se han reportado algunas investigaciones con respecto al uso de ANN para la predicción de propiedades mecánicas de piezas FDM, los cuales se mencionan a continuación. Garg *et al.* [73] propusieron un enfoque híbrido de programación genética M5 (M5-GP, por sus siglas en inglés) para el modelado empírico del proceso FDM. Los parámetros de entrada fueron el espesor de capa, orientación de fabricación, orientación de relleno, ancho del filamento depositado y espacio entre filamentos, mientras que el parámetro de salida fue la resistencia a la compresión. Los resultados mostraron que el modelo propuesto se ajusta mejor que los modelos de vectores de regresión (RVS, por sus siglas en inglés) y los modelos de sistema de inferencia neuro-difuso adaptivo (ANFIS, por sus siglas en inglés). Mohamed *et al.* [74] caracterizaron piezas fabricadas mediante FDM para determinar la influencia de los parámetros del proceso, como espesor de capa, espacio entre filamentos, orientación de relleno, orientación de fabricación, ancho de filamento y número de contornos, en el comportamiento estructural en condiciones dinámicas y cíclicas. Dichos experimentos se realizaron mediante un DOE y el uso de ANN. Luego, el efecto de cada parámetro sobre el módulo dinámico de elasticidad se investigó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados mostraron que tanto el modelo ANN como el DOE proporcionaron predicciones de buena calidad; sin embargo, el ANN mostró superioridad ya que captó la relación no lineal del sistema.

Por su parte, Bayraktar *et al.* [75] realizaron ensayos a tensión a probetas de PLA con diferentes temperaturas de extrusión, espesores de capa y orientaciones de relleno. Posteriormente, utilizando ANN generaron un modelo matemático para los resultados de las pruebas de tensión correspondientes a las orientaciones de relleno utilizadas. Observaron que el modelo ANN con mejor desempeño fue para la orientación de relleno de

capas entrecruzadas, llegando a valores de prueba y entrenamiento de 0.999199 y 0.999997, respectivamente.

Por otro lado, Panda *et al.* [76] presentaron tres métodos numéricos para predecir las propiedades mecánicas de estructuras celulares de panal fabricadas mediante FDM: programación genética (GP, por sus siglas en inglés), búsqueda automatizada de redes neuronales (ANS, por sus siglas en inglés) y regresión de superficie de respuesta (RSR, por sus siglas en inglés). Diferentes tamaños de celda fueron experimentalmente y analíticamente estudiados para la predicción del límite elástico y el módulo elástico. Se observó que los modelos ANS funcionaron mejor que los restantes, y que a medida que el tamaño de celda aumenta el límite elástico y módulo elástico disminuyen, y mientras que el espesor de la pared aumenta, el límite elástico y módulo elástico aumentan.

Recientemente, Goudswaard *et al.* [77] realizaron una caracterización experimental de probetas con diferentes espesores de capa, orientaciones de fabricación, porcentaje de relleno, número de capas superiores e inferiores y número de capas de contorno. Luego, midieron la resistencia última a la tensión y el módulo de elasticidad de dichas probetas. Posteriormente utilizaron dicha caracterización para entrenar una NN que fue base para la creación de un perfil de capacidad integral para el proceso FDM. Además, realizaron la validación de dicho perfil incorporándolo a una metodología de diseño generativo para la fabricación de piezas funcionales. Con esta metodología crearon dos componentes portadores de carga y demostraron que dicho perfil es capaz de generar piezas con un rendimiento satisfactorio en solo un par de iteraciones.

La revisión de literatura anterior demuestra que las NN son una herramienta poderosa para la predicción de propiedades mecánicas que presentan un comportamiento no lineal. Acerca de los resultados encontrados, se pueden observar que existen muy poca investigación relacionada con la predicción de propiedades de probetas a tensión, que midan la resistencia última y el módulo elástico. Además, muy pocos trabajos incluyen los parámetros que tienen mayor influencia en el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante FDM, los cuales son: porcentaje de relleno, orientación de fabricación, espesor de capa, número de capas de perímetro, ángulo de relleno y el número de capas superior e inferior. Adicionalmente, no se encuentran trabajos que consideren el porcentaje de relleno real de las piezas, y relacionen las propiedades con respecto a la materia prima.

3. Pruebas experimentales de probetas FDM

3.1. Metodología general

Con el objetivo de conocer el comportamiento estructural de los componentes fabricados por el proceso FDM, se llevaron a cabo pruebas experimentales de acuerdo a la metodología mostrada en la Figura 3.1. Dicha metodología incluye la caracterización del filamento utilizado, la selección de los parámetros del proceso (orientación de fabricación, porcentaje de relleno, número de capas de contorno, etc.), la fabricación de probetas con diferentes combinaciones de parámetros, la medición dimensional, la medición del porcentaje de relleno real, ensayos a tensión y la normalización de los resultados. Esta metodología se describe a continuación.

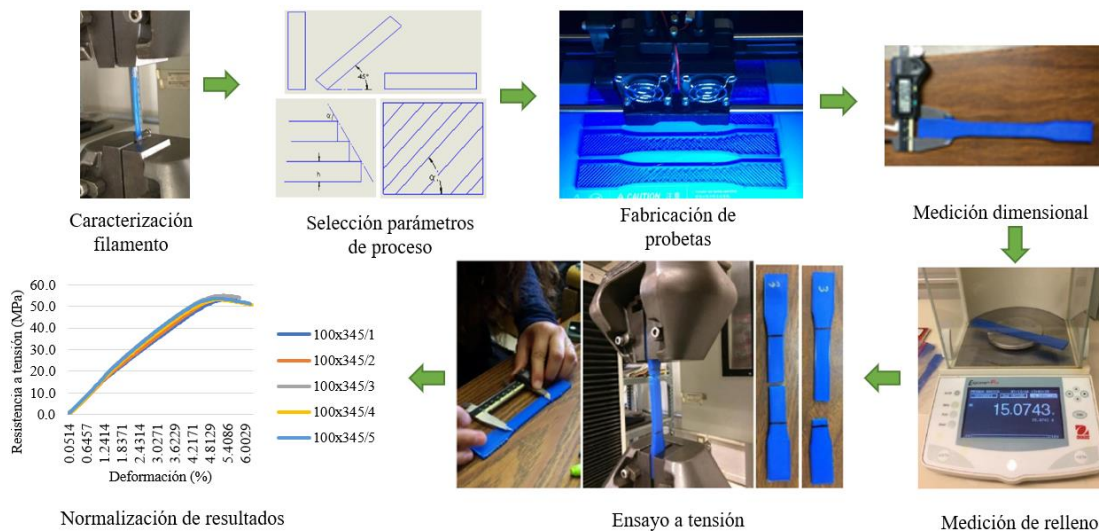


Figura 3.1. Metodología experimental.

3.1.1 Caracterización del filamento

Primero, se realizaron ensayos de tensión a los filamentos de PLA (material sin procesar) en una máquina Universal Shimadzu modelo AG-100KNI, y en una Máquina Universal marca INSTRON modelo 3367K3121 para determinar sus propiedades estructurales específicas. Varios rollos de filamento PLA de 1.75 mm de diámetro, colores variables y diferentes proveedores (3D Market y Color Plus) fueron utilizados.

De cada rollo de filamento se tomaron 6 muestras de 165 mm de largo y se ensayaron a una velocidad de 5 mm/min, a temperatura ambiente, humedad entre 35 y 50%, y una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud. Los resultados fueron analizados y se resumen en la Tabla 3.1, donde se presenta el número de rollo de material utilizado con su fabricante y propiedades mecánicas correspondientes. En esta tabla, se puede observar que el UTS varía de 32 a 68 MPa y todos los valores (excepto rollos 8, 10,12, 13, 15 y 17), se encuentran dentro del rango estándar de valores para PLA (40 a 70 MPa, [78]). Igualmente, en cuanto a la elongación, se observan variaciones y solo tres rollos se encuentra fuera de los valores estándar de PLA (al menos 6% de elongación). Con respecto al módulo, los valores varían dentro del rango de 1331 a 2501 MPa, los cuales se encuentran fuera de los valores estándar de 3450 MPa [79]. Estas variaciones pueden ser debidas a la calidad, el tiempo de envejecimiento, las condiciones ambientales de almacenamiento (temperatura, humedad, exposición al sol, etc.) del material, así como las diferencias entre los procedimientos de fabricación seguidos por cada fabricante [27], entre otras.

Tabla 3.1. Resultados promedio de los ensayos a tensión de los filamentos PLA.

Rollo de material	Fabricante	UTS (MPa)	Elongación (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	3D Market	45.73 ± 3.74	8.78 ± 0.42	2054.26 ± 150.27
2	3D Market	56.51 ± 0.65	8.47 ± 0.86	1891.61 ± 34.28
3	3D Market	42.44 ± 2.45	7.86 ± 0.25	1634.51 ± 370.19
4	3D Market	64.95 ± 2.81	11.58 ± 3.72	2501.63 ± 545.13
5	3D Market	68.20 ± 0.65	10.14 ± 2.41	2229.69 ± 109.63
6	3D Market	48.35 ± 0.61	10.14 ± 0.44	1598.18 ± 90.73
7	3D Market	48.52 ± 0.61	11.38 ± 2.49	1331.38 ± 145.56
8	ColorPlus	35.70 ± 2.69	9.79 ± 5.72	1945.60 ± 178.99
9	ColorPlus	41.75 ± 0.09	5.12 ± 1.31	2370.26 ± 143.86
10	ColorPlus	32.60 ± 0.45	12.23 ± 3.59	2378.51 ± 44.39
11	ColorPlus	45.18 ± 1.58	13.32 ± 5.14	2096.67 ± 214.18
12	ColorPlus	38.84 ± 0.39	10.11 ± 4.08	2186.34 ± 182.12
13	N/A	35.70 ± 2.69	9.79 ± 5.72	1945.60 ± 178.99
14	N/A	41.76 ± 0.09	5.12 ± 1.31	2370.26 ± 143.86
15	N/A	32.60 ± 0.45	12.23 ± 3.59	1945.60 ± 178.99
16	N/A	45.18 ± 1.58	13.32 ± 5.14	2096.67 ± 214.18
17	N/A	38.59 ± 0.74	5.01 ± 2.85	2186.34 ± 182.12

N/A: Fabricante sin identificar.

3.1.2 Selección de parámetros

Se seleccionaron 6 parámetros de proceso: porcentaje de relleno, ángulo de relleno, espesor de capa, orientación de fabricación, número de capas de contorno y número de capas superiores e inferiores. Para el porcentaje de relleno se eligieron valores con base en la literatura y, además, valores pequeños de relleno, con el fin de que se tuvieran datos sobre todo el espectro de porcentajes de relleno (0 a 100%). En cuanto a los parámetros restantes, éstos se definieron respecto a las capacidades de los equipos FDM utilizados en este proyecto. La Tabla 3.2 muestra los parámetros del proceso utilizados para la fabricación de las probetas.

Tabla 3.2. Valores de parámetros del proceso utilizados.

Parámetro de proceso	Valores
Espesor de capa (mm)	0.14, 0.18 y 0.30
Ángulo de relleno	Lineal $\pm 45^\circ$ y $0/90^\circ$
Porcentaje de relleno teórico (%)	5, 10, 20, 40, 80 y 100
Orientación de fabricación	Plana, En el borde y Vertical
Número de capas de perímetro	1 y 2
Número de capas inferiores y superiores	2 y 3

3.1.3 Fabricación de probetas

La geometría de las probetas de ensayo se definió de acuerdo a la norma ASTM D638 [80], de donde se seleccionó el Tipo I, y cuya geometría se muestra en la Figura 3.2.

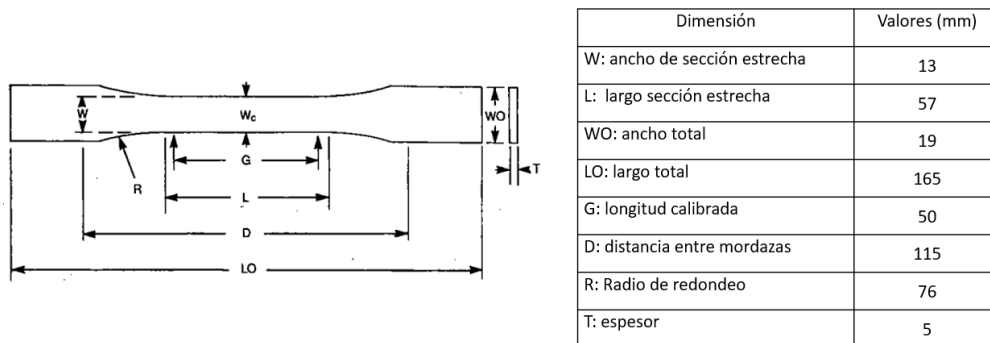


Figura 3.2. Dimensiones probeta Tipo I [80].

Las probetas se fabricaron en los equipos FDM Creator Pro de Flashforge TM (extrusora doble, precisión de 0.1 a 0.3 mm y espacio de trabajo de 225x145x150 mm) y Crealty CR-

10S Pro (extrusora simple, precisión de ± 0.1 mm y espacio de trabajo de 300x300x400 mm) utilizando los filamentos descritos anteriormente.

Con el objetivo de tener una muestra estadísticamente válida, y evaluar y/o desarrollar modelos analíticos buscando que sean lo más robustos y confiables posibles, se fabricaron 5 probetas y en algunos casos 3 probetas para cada posible combinación de valores de los parámetros de proceso, dando un total de 396 probetas. Todas las probetas fueron ensayadas y evaluadas. El resto de los parámetros permanecieron constantes y se definieron en base a los valores recomendados por los equipos FDM utilizados en esta investigación. Dichos valores se presentan en la Tabla 3.3. De acuerdo con los valores seleccionados 360 probetas se fabricaron en el equipo FDM Creator Pro Flashforge TM y 36 en el equipo FDM Creality CR-10S Pro (probetas con valores de porcentaje de relleno teórico de 5%, 10% y 100%, y en orientaciones plana, en el borde y vertical). La Figura 3.3 muestra las tres direcciones de fabricación y uno de los equipos FDM utilizados (Creality CR-10S Pro).

Tabla 3.3. Valores de parámetros restantes.

Parámetro	Valor
Temperatura de extrusión	200 °C
Velocidad de deposición	80 mm/s

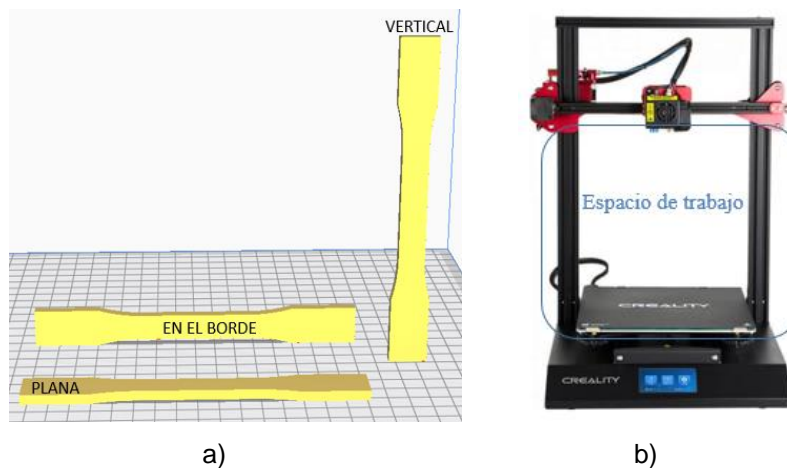


Figura 3.3. Fabricación de probetas: a) Direcciones de fabricación, b) Creality CR-10S Pro.

En la Figura 3.4 se puede observar el ángulo de relleno $\pm 45^\circ$ de las probetas para la orientación de fabricación plana, mientras que en la Figura 3.5 se observa la orientación en

el borde, donde se muestran los soportes necesarios para dicha orientación. Cabe mencionar que las probetas fabricadas en la orientación vertical en el equipo Flashforge Creator Pro, se escalaron a un 70% para que cupiera en el espacio de trabajo de la máquina.



Figura 3.4. Ángulo de relleno de $\pm 45^\circ$ y orientación plana de las probetas.



Figura 3.5. Orientación en el borde de probetas y soportes.

3.1.4 Medición dimensional

Las mediciones de las longitudes ancho mayor (WO), ancho menor (W) y espesor (T) de cada una de las probetas fueron realizadas con un calibrador digital Mitutoyo modelo 16 Ex 150 mm 0.01 mm, y un calibrador Mitutoyo CD-4" CSX con el fin de corroborar la precisión dimensional del equipo FDM. Dichas mediciones se validaron mediante una máquina de coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés) con el software ZEISS VISTA utilizando una muestra de siete probetas para cada orientación y porcentaje de relleno como se muestra en la Figura 3.6.

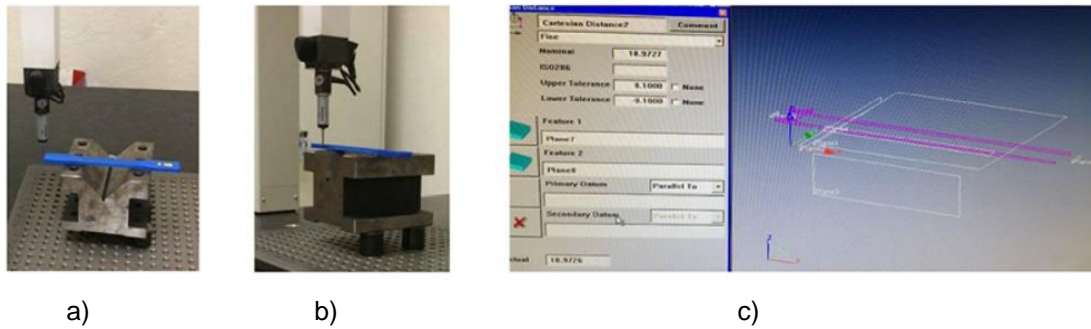


Figura 3.6. Medición en ZEISS VISTA CMM: a) Configuración, b) proceso de medición, y c) cálculo de distancia.

La Tabla 3.4 muestra los promedios para cada conjunto de parámetros con su respectiva desviación estándar y orientación de fabricación. Como se puede observar, los valores de desviación estándar encontrados son menores a 0.1 mm, por lo que se puede concluir que el equipo FDM cuenta con buena precisión dimensional. Además, la Tabla 3.5 presenta los valores para las probetas en orientación vertical que fueron escaladas.

Tabla 3.4. Dimensiones promedio de orientaciones plana, en el borde y vertical.

Orientación	Relleno (%)	Capas de perímetro	WO (mm)	W (mm)	T (mm)
			Nominal 19 mm	Nominal 13 mm	Nominal 5 mm
Plana	5	1	19.18 ± 0.04	13.05 ± 0.03	4.96 ± 0.01
	5	2	19.03 ± 0.012	13.05 ± 0.02	4.97 ± 0.05
	10	2	18.99 ± 0.08	13.02 ± 0.06	4.94 ± 0.06
	20	2	19.01 ± 0.06	13.12 ± 0.06	4.98 ± 0.10
	40	2	19.05 ± 0.08	13.14 ± 0.05	5.05 ± 0.04
	80	2	19.02 ± 0.07	13.17 ± 0.04	4.92 ± 0.09
	100	2	19.07 ± 0.06	13.19 ± 0.04	5.08 ± 0.04
	100	2	19.00 ± 0.06	13.04 ± 0.03	5.00 ± 0.05
En el borde	5	1	19.03 ± 0.04	13.11 ± 0.03	5.00 ± 0.04
	5	2	19.05 ± 0.01	13.07 ± 0.07	4.94 ± 0.04
	10	2	19.04 ± 0.06	13.00 ± 0.03	5.00 ± 0.01
	20	2	18.99 ± 0.07	13.24 ± 0.08	5.11 ± 0.04
	40	2	18.96 ± 0.04	13.24 ± 0.09	5.11 ± 0.03
	80	2	18.95 ± 0.04	13.24 ± 0.06	5.11 ± 0.05
	100	2	19.00 ± 0.05	13.25 ± 0.06	5.13 ± 0.02
	100	2	18.93 ± 0.04	13.22 ± 0.03	5.00 ± 0.03
Vertical	5	1	19.05 ± 0.04	13.04 ± 0.04	5.02 ± 0.10
	5	2	19.17 ± 0.04	13.03 ± 0.02	5.06 ± 0.04
	10	2	19.18 ± 0.02	13.06 ± 0.02	5.07 ± 0.05
	100	2	19.23 ± 0.13	13.13 ± 0.02	5.12 ± 0.08

Tabla 3.5. Dimensiones promedio de orientación vertical escaladas.

Orientación	Relleno (%)	Capas de perímetro	WO (mm)	W (mm)	T (mm)
			Nominal 13 mm	Nominal 9 mm	Nominal 3mm
Vertical	20	2	13.24 ± 0.10	9.09 ± 0.05	3.67 ± 0.09
	40	2	13.23 ± 0.10	9.08 ± 0.04	3.63 ± 0.05
	80	2	13.23 ± 0.09	9.07 ± 0.06	3.64 ± 0.05
	100	2	13.31 ± 0.04	9.16 ± 0.03	3.56 ± 0.03

3.1.5 Medición de relleno

Para validar los valores de relleno de las probetas fabricadas, se obtuvo el peso de cada probeta en una báscula ExplorerPro (Figura 3.7). Los valores de relleno reales se determinaron utilizando la siguiente ecuación:

$$RI = \frac{W_{ts}}{W_{ss}} * 100\% \quad (3-1)$$

donde RI es el porcentaje de relleno real, W_{ts} es el peso de la probeta y W_{ss} es el peso de una probeta sólida. El valor de W_{ss} se calculó mediante la ecuación (3-2) donde V_s es el volumen de la probeta, y γ es el peso específico del filamento, el cual se calculó midiendo el peso y volumen del filamento a utilizar.

$$W_{ss} = \gamma V_s \quad (3-2)$$

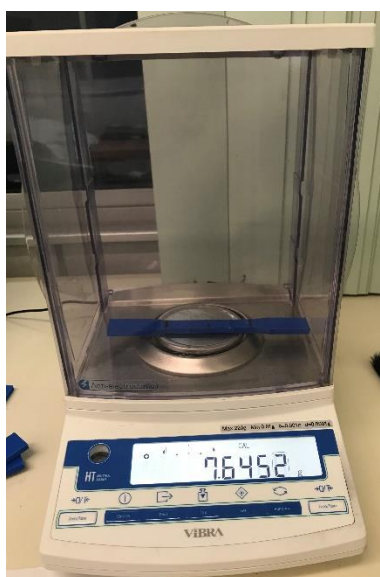


Figura 3.7. Probeta pesada.

La Tabla 3.6 muestra los resultados promedio obtenidos, de donde se puede observar que las capas de perímetro representan un papel muy importante, ya que aunque el porcentaje de relleno sea muy bajo, por ejemplo 5%, el porcentaje real anda en aproximadamente 38%. Además, también se puede observar que, aunque las capas de perímetro disminuyen, el porcentaje de relleno mínimo alcanzado es 23%, mucho más que el 5% nominal de relleno. Esto se debe a que el porcentaje de relleno nominal se mide únicamente dentro de las paredes de las piezas, sin considerar los contornos. Para este caso, se depositaron tres capas en la parte superior e inferior de las probetas, y dos capas de contorno de figura de dichas probetas, que es un contorno estándar del proceso. Esto da como resultado que el número de capas de contorno jueguen un papel predominante en el comportamiento estructural de las probetas, ya que dichas capas proporcionan rigidez a las mismas. Además, el uso de los valores reales de relleno permite la comparación entre diferentes estudios, independientemente del material y sistema FDM utilizado.

Tabla 3.6. Porcentajes de relleno real.

% relleno teórico	Capas de perímetro	% relleno real		
		Plana	En el borde	Vertical
5%	1	23.55	24.94	23.89
5%	2	34.06	40.63	41.42
10%	2	36.99	43.13	45.88
20%	2	52.85	66.66	75.18
40%	2	63.84	74.24	79.45
80%	2	84.59	92.01	95.90
100%	2	95.22	97.25	100
100%	2	94.95	98.70	99.43

3.1.6 Ensayo a tensión

Se realizaron ensayos de tensión a las probetas fabricadas de PLA de acuerdo a la norma ASTM D638-02a [80], con una velocidad de 5 mm/min, a temperatura ambiente (aproximadamente 22°C), con humedad entre 35% y 55%, una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud, y una longitud calibrada de 70 mm para todas las orientaciones. Para realizar los ensayos a tensión, se utilizó una Máquina Universal marca Shimadzu modelo AG-100KNI, y una Máquina Universal marca INSTRON modelo 3367K3121. La Figura 3.8 muestra las probetas durante el ensayo.

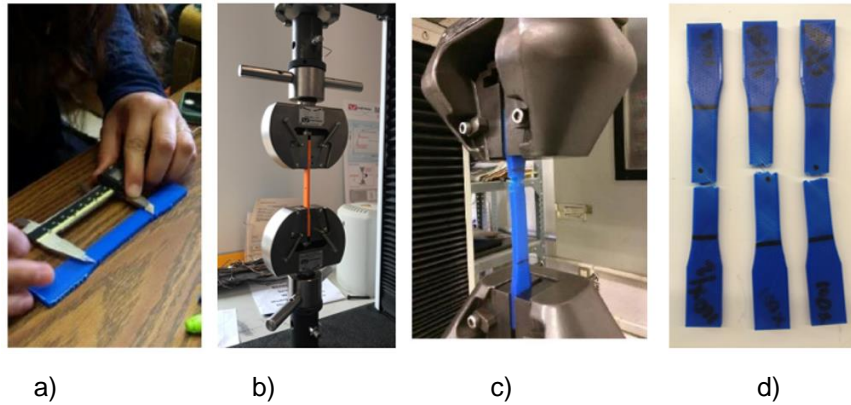


Figura 3.8. Ensayo de tensión probeta: a) preparación de la probeta, b) durante el ensayo (INSTRON), c) durante el ensayo (SHIMADZU) y d) después de ensayo.

3.1.7 Normalización de resultados

Los resultados experimentales fueron analizados en términos del módulo elástico (E), el UTS y la elongación (EB). El módulo elástico se calculó tomando dos valores de esfuerzo dentro de la zona elástica divididos entre sus valores respectivos de elongación, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3-3)$$

donde E es el módulo elástico, σ_1 y σ_2 son los esfuerzos de tensión y ϵ_1 y ϵ_2 las elongaciones correspondientes a dichos esfuerzos.

El esfuerzo se determinó de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$\sigma = \frac{F_{ensayo}}{A} \quad (3-4)$$

donde σ es el esfuerzo, F_{ensayo} es la fuerza obtenida del ensayo, y A es el área de la sección transversal.

La elongación se determinó mediante la siguiente ecuación,

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100\% \quad (3-5)$$

donde ϵ es la deformación, ΔL es el desplazamiento obtenido del ensayo y L_0 es la longitud inicial de ensayo.

La Figura 3.9 muestra una curva representativa esfuerzo-deformación para el conjunto de probetas “100y245” (100% de relleno, orientación en el borde, espesor de capa 0.18 mm y ángulo de relleno de 45°).

Con el fin de proporcionar resultados universales que puedan ser comparables con otros estudios, independientemente de las propiedades particulares del filamento y del equipo FDM utilizados, se realizó un proceso de normalización de resultados. Dicho proceso, consiste en dividir los resultados obtenidos de cada probeta y cada propiedad analizada, entre el resultado correspondiente del filamento utilizado en el proceso de fabricación. Las propiedades de dicho filamento fueron obtenidas previamente en el paso 1 de la metodología propuesta (caracterización de filamento).

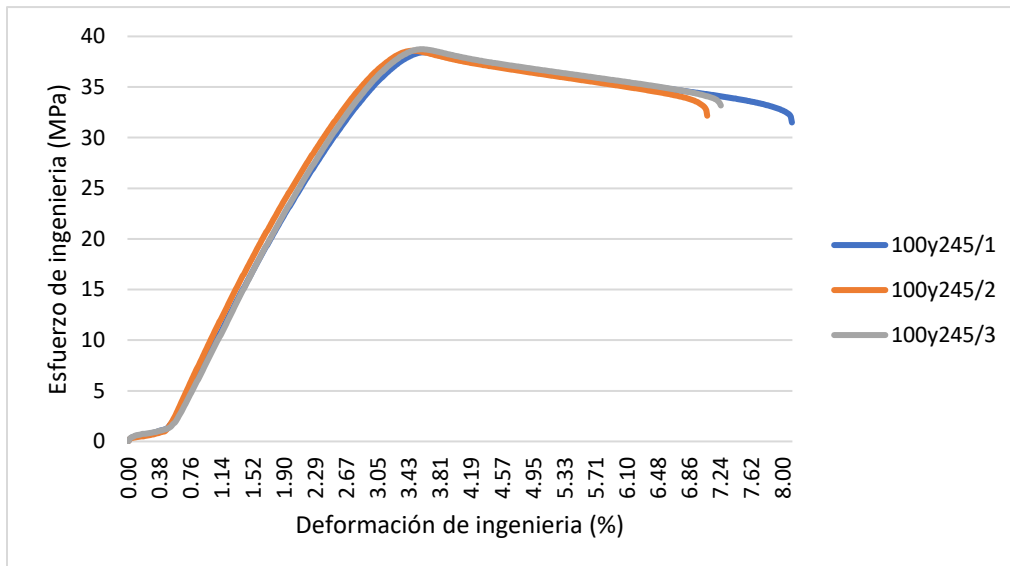


Figura 3.9. Curva esfuerzo-deformación del conjunto de probetas “100y245”.

3.2. Resultados experimentales de ensayos a tensión

La Tabla 3.7 muestra los resultados promedio agrupados para cada porcentaje de relleno, orientación y propiedad mecánica. Las propiedades mecánicas fueron calculadas como se mencionó anteriormente. El agrupamiento de los datos normalizados se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.7. Resultados de ensayos para esfuerzo y deformación.

Orientación PLANA				Orientación EN EL BORDE				Orientación VERTICAL			
% relleno real	E (MPa)	UTS (MPa)	EB (%)	% relleno real	E (MPa)	UTS (MPa)	EB (%)	% relleno real	E (MPa)	UTS (MPa)	EB (%)
24	350.39	7.54	2.79	25	257.69	7.93	4.81	24	127.73	1.70	0.92
34	524.36	12.34	3.59	41	701.67	17.32	3.79	41	411.71	3.99	1.45
37	538.39	10.71	3.04	43	792.38	17.47	4.13	46	578.30	6.95	1.64
53	751.94	25.39	4.92	67	879.33	28.90	5.36	77	687.32	13.86	2.47
64	816.80	27.14	5.21	75	905.35	29.68	6.20	79	753.79	14.15	2.78
85	1105.74	37.41	5.34	92	1248.95	40.82	5.38	92	923.45	21.57	3.68
95	1418.39	47.87	5.07	97	1612.57	38.58	7.48	100	939.52	22.42	3.95
95	1498.47	35.88	6.99	99	1342.13	49.88	6.68	100	1464.73	21.17	1.90

E- Módulo elástico, UTS – Resistencia última a la Tensión, EB – Elongación a la ruptura

En la Tabla 3.7 se observa que para el caso del módulo elástico, la orientación en el borde presenta valores mayores en comparación con las orientaciones restantes; sin embargo, las diferencias que se presentan entre la orientación plana y en el borde son mínimas en comparación de las diferencias con la orientación vertical, la cual queda por debajo de las anteriores. En cuanto al UTS, se puede observar que a mayor porcentaje de relleno mayor será el UTS alcanzado por las probetas. Luego, para la elongación, se observa que en las orientaciones plana y en el borde, los valores encontrados son mayores a comparación de la vertical, lo que indica una influencia en la adhesión de capas para dicha orientación.

Tabla 3.8. Resultados experimentales normalizados y agrupados.

Orientación PLANA				Orientación EN EL BORDE				Orientación VERTICAL			
% relleno real	E	UTS	EB	% relleno real	E	UTS	EB	% relleno real	E	UTS	EB
24	0.160	0.194	0.276	25	0.117	0.204	0.475	24	0.058	0.044	0.091
34	0.239	0.318	0.355	41	0.320	0.446	0.375	41	0.188	0.103	0.144
37	0.245	0.276	0.300	43	0.361	0.450	0.408	46	0.263	0.179	0.162
53	0.398	0.474	0.503	67	0.465	0.540	0.549	77	0.363	0.259	0.253
64	0.432	0.507	0.534	75	0.479	0.554	0.635	79	0.398	0.264	0.285
85	0.585	0.699	0.547	92	0.660	0.763	0.551	92	0.488	0.403	0.376
95	0.750	0.894	0.519	97	0.734	0.994	0.740	100	0.497	0.419	0.405
95	0.683	0.924	0.691	99	0.710	0.932	0.684	100	0.667	0.545	0.188

De la Tabla 3.8 se observa que en el caso del módulo elástico aunque se tenga un porcentaje de relleno alto, el valor máximo que se llega a obtener es aproximadamente el

71% con respecto a la materia prima. En cuanto al UTS se observa que para valores bajos de porcentajes de relleno (24%), las propiedades mecánicas decrecen significativamente con respecto a la materia prima, alcanzando un máximo de 20% con respecto a ésta en las orientaciones plana y en el borde. Para la orientación vertical se puede observar que el UTS se reduce a la mitad de la materia prima con 100% de relleno, además de que, en general, las propiedades mecánicas están muy por debajo con respecto a las otras dos direcciones. Con respecto a la elongación, se puede observar que el comportamiento es muy variable y oscila entre cada uno de los porcentajes de relleno; sin embargo, se puede observar que para los valores más altos de relleno la máxima elongación alcanzada está en la orientación vertical con 74% respecto a la materia prima. Además, se observa que en la orientación vertical se presenta una elongación mínima, esto debido a que en esta dirección en realidad no existe una elongación de los filamentos, sino que se mide la adhesión que existe entre cada una de las capas.

Las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 muestran el comportamiento de los datos para el módulo elástico, UTS y elongación, respectivamente. Como se observa en dichas figuras, las curvas de las propiedades mecánicas tienen una tendencia creciente, lo que significa que a mayor porcentaje de relleno mayor será la resistencia, módulo elástico y elongación de las piezas. Además, se observa que las orientaciones planas y en el borde tienen un comportamiento similar, llegando a valores muy cercanos entre sí.

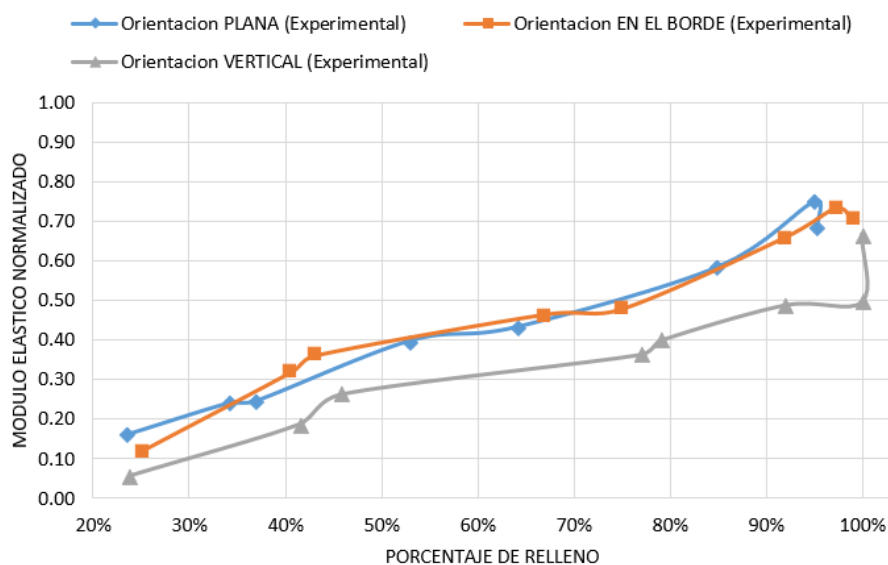


Figura 3.10. Módulo elástico normalizado vs. Porcentaje de relleno.

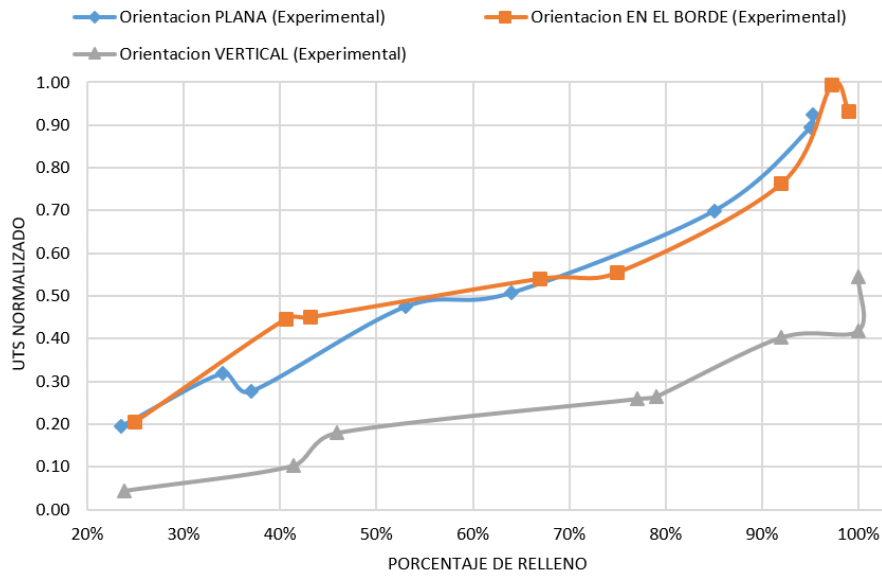


Figura 3.11. UTS normalizado vs. Porcentaje de relleno.

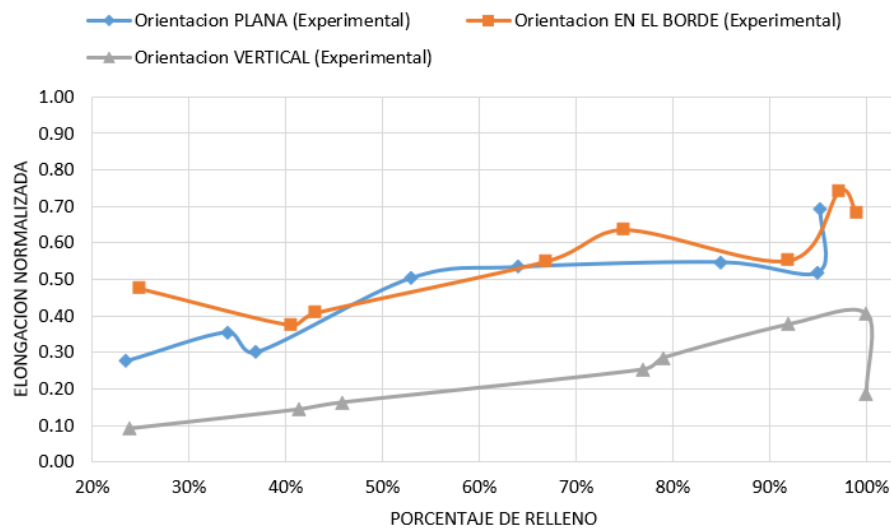
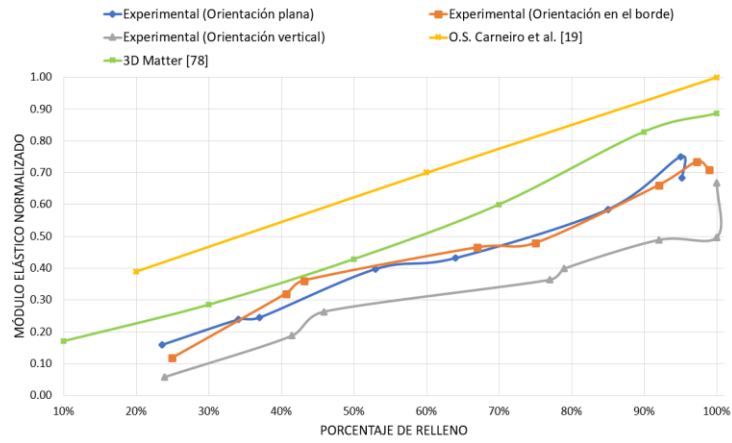


Figura 3.12. Elongación normalizada vs. Porcentaje de relleno.

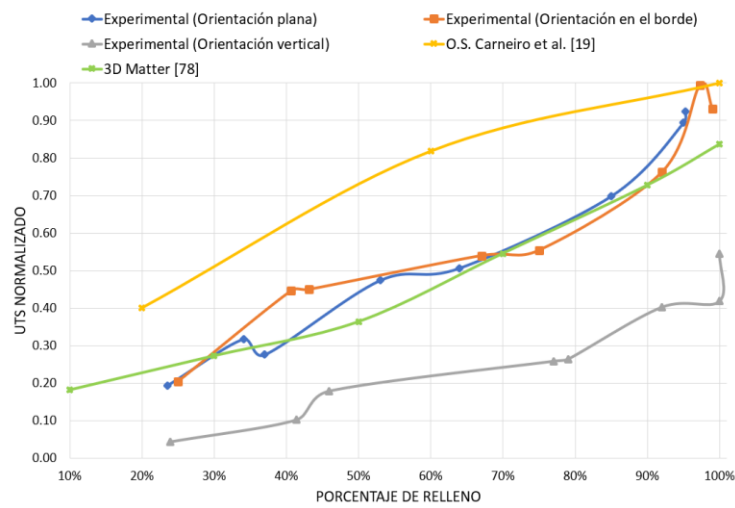
3.3. Comparación de resultados

Los resultados experimentales indican que tanto la orientación de fabricación como el porcentaje de relleno tienen gran influencia en el comportamiento mecánico de los componentes fabricados mediante FDM. Con el objetivo de confirmar dichas observaciones, se realizó una comparación con resultados reportados en la literatura. Para llevar a cabo este análisis comparativo, los resultados en la literatura se normalizaron utilizando el enfoque propuesto y considerando las propiedades promedio de la materia prima utilizada en dichas investigaciones.

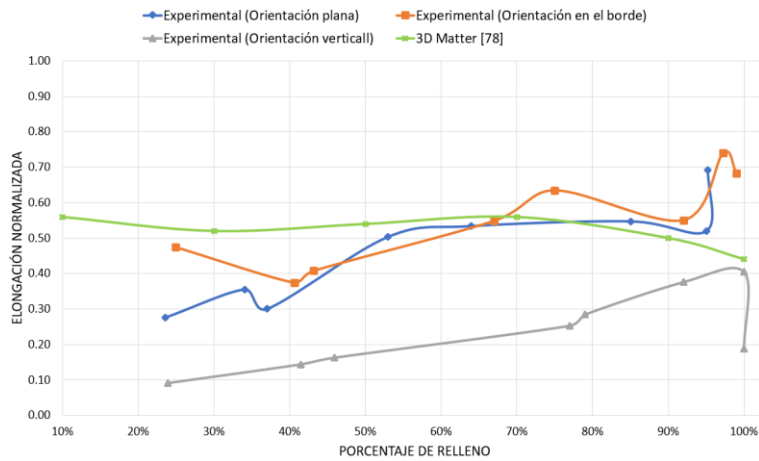
La Figura 3.13 compara los resultados experimentales y los resultados existentes en la literatura, agrupados según su orientación de fabricación. En el caso del módulo elástico (Figura 3.13a), se observa que los resultados experimentales muestran la misma tendencia creciente; sin embargo, se obtuvieron valores inferiores a los reportados en la literatura. Esta diferencia de valores puede deberse a las diferentes condiciones de fabricación, la diferencia entre los valores de relleno real y nominales, y las propiedades reales de la materia prima utilizada en los experimentos reportados en la literatura. Sin embargo, es evidente que los valores experimentales reproducen con buena precisión la tendencia de los resultados reportados. Para el caso del UTS, Figura 3.13b, se observa que los resultados experimentales para las orientaciones plana y en el borde, y los resultados de [78] tienen la misma tendencia y valores, mientras que los obtenidos en [19] siguen la misma tendencia, pero con valores mayores a los encontrados experimentalmente. Por otro lado, la Figura 3.13c muestra que todos los resultados de elongación no tienen una tendencia clara; sin embargo, los resultados experimentales muestran un buen grado de coincidencia y comportamiento con los resultados reportados en [78].



a)



b)



c)

Figura 3.13. Comparación de resultados experimentales con resultados reportados: a) módulo elástico, b) UTS y c) elongación.

3.4. Ensayos a tensión de probetas con orientación no ortogonal

Con el fin de generar información experimental del comportamiento estructural de probetas FDM para otras orientaciones distintas a los ejes ortogonales, se fabricaron nuevas probetas con diferentes valores de porcentaje de relleno, y diferentes ángulos de orientación, como se muestra en la Figura 3.14. De acuerdo a esta figura, el ángulo Θ representa la rotación de la probeta con respecto al eje Z en el espacio de trabajo del sistema FDM, y el ángulo Φ representa el ángulo de elevación con respecto al plano XY en dicho espacio de trabajo.

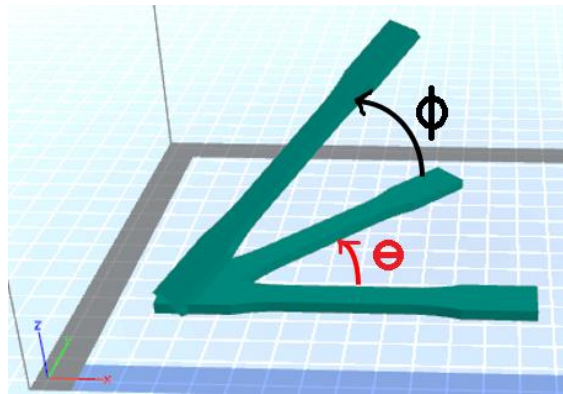


Figura 3.14. Ángulos de rotación Θ y Φ .

Las pruebas experimentales fueron realizadas de acuerdo a la metodología general descrita en la sección 3.1. Primeramente, se realizó la caracterización del filamento mediante pruebas de tensión a la materia prima con el fin de conocer sus propiedades estructurales. Las pruebas se realizaron en la máquina Universal Shimadzu modelo AG-100KNI. Varios rollos de filamento PLA de 1.75 mm de diámetro, marca Color Plus y colores variables, fueron utilizados. De cada rollo de filamento se tomaron 3 muestras de 165 mm de largo, las cuales se ensayaron a una velocidad de 5 mm/min, a temperatura ambiente, humedad entre 35 y 50% y una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud. La Tabla 3.9 muestra los resultados de los ensayos a tensión de la materia prima.

Tabla 3.9. Propiedades de la materia prima para el caso de probetas con orientación variable.

Número de rollo	Módulo elástico (MPa)	UTS (MPa)	Elongación (%)
1	2042.41	61.50	16.03
2	2060.82	54.17	14.47
3	1968.77	46.56	16.15

Posteriormente se definieron los parámetros de fabricación a ser evaluados, los cuales consideran el porcentaje de relleno, el ángulo Θ y el ángulo Φ , capas de contorno y capas superiores e inferiores como se muestra en la Tabla 3.10. Posteriormente, se fabricaron 3 probetas por cada combinación de valores de esta tabla, dando un total de 81 probetas. Las dimensiones utilizadas para las probetas son las indicadas en la Figura 3.15. Las probetas fueron fabricadas en el equipo FDM Creator Pro Flashforge TM (extrusora doble, precisión de 0.1 a 0.3 mm y espacio de trabajo de 225x145x150 mm), utilizando PLA, un espesor de capa de 0.18 mm y un ángulo de relleno de $\pm 45^\circ$, los cuales se mantuvieron constantes. Debido a la necesidad de incluir soportes, el tiempo de fabricación aumentó, siendo el máximo de aproximadamente 8 horas. La Figura 3.16 muestra los soportes de algunas de las probetas fabricadas.

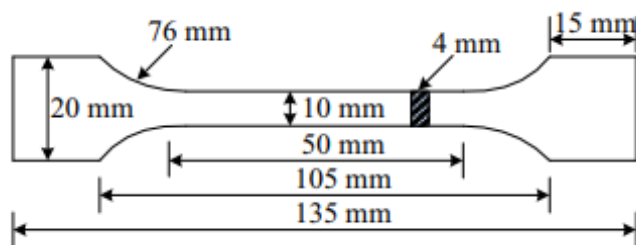
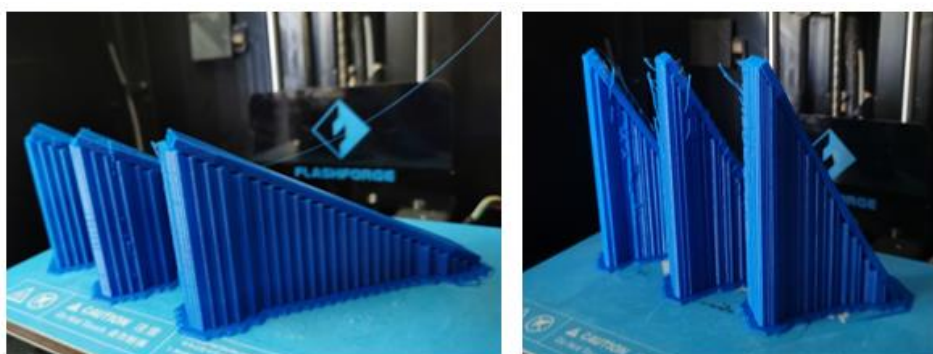


Figura 3.15. Dimensiones utilizadas de probetas con orientación variable [38].

Tabla 3.10. Valores utilizados para la fabricación de probetas con orientación variable.

% Relleno teórico	Capas contorno	Capas sup. e inf.	Θ	Φ
5%, 10%, 100%	1, 2	2, 3	45°, 30°, 60°	0°, 30°, 60°



a)

b)

Figura 3.16 Soportes de probetas: a) $\Phi = 30^\circ$, b) $\Phi = 60^\circ$.

A continuación, se realizó la medición dimensional para cada probeta. Los resultados se muestran en la Tabla 3.11. Luego, se midió el peso de cada probeta para determinar el porcentaje de relleno real promedio para cada combinación de parámetros. Los resultados se muestran en la Tabla 3.12, en donde se observa que los valores del 5% teórico están en alrededor de 30% real, mientras que los del 10% teórico están en 50% real, y los valores del 100% en 95% aproximadamente.

Tabla 3.11. Dimensiones promedio de orientación no ortogonal.

Orientación (°)		Relleno teórico (%)	Capas de perímetro	T (mm)	
Θ	Φ			Nominal 10 mm	Nominal 4 mm
45	0	5	1	10.01 ± 0.03	3.85 ± 0.03
		10	2	10.07 ± 0.02	3.82 ± 0.01
		100	2	10.08 ± 0.04	3.81 ± 0.02
45	30	5	1	10.08 ± 0.02	4.04 ± 0.01
		10	2	10.04 ± 0.02	4.05 ± 0.04
		100	2	10.00 ± 0.06	3.98 ± 0.04
45	60	5	1	9.95 ± 0.06	3.88 ± 0.04
		10	2	10.08 ± 0.02	3.95 ± 0.05
		100	2	10.02 ± 0.08	3.98 ± 0.04
30	0	5	1	10.00 ± 0.03	3.87 ± 0.09
		10	2	10.13 ± 0.06	3.90 ± 0.09
		100	2	10.11 ± 0.03	3.93 ± 0.02
30	30	5	1	10.09 ± 0.07	4.02 ± 0.08
		10	2	10.04 ± 0.02	4.03 ± 0.03
		100	2	9.98 ± 0.03	4.02 ± 0.02
30	60	5	1	10.04 ± 0.01	3.87 ± 0.02
		10	2	10.09 ± 0.03	4.00 ± 0.01
		100	2	10.03 ± 0.07	4.00 ± 0.02
60	0	5	1	10.01 ± 0.06	3.87 ± 0.01
		10	2	9.97 ± 0.06	3.89 ± 0.02
		100	2	10.06 ± 0.05	3.90 ± 0.03
60	30	5	1	10.01 ± 0.05	4.05 ± 0.06
		10	2	10.00 ± 0.07	4.06 ± 0.02
		100	2	10.04 ± 0.03	3.97 ± 0.13
60	60	5	1	9.98 ± 0.06	3.91 ± 0.02
		10	2	10.05 ± 0.03	3.93 ± 0.02
		100	2	10.04 ± 0.05	3.94 ± 0.03

Tabla 3.12. Porcentaje de relleno real promedio de las probetas con orientación variable.

Orientación de probetas (°)		% Relleno	
Θ	Φ	Teórico	Real
45	0	5%	33.62%
		10%	49.28%
		100%	96.05%
45	30	5%	31.75%
		10%	55.57%
		100%	95.22%
45	60	5%	29.99%
		10%	51.57%
		100%	92.37%
30	0	5%	33.86%
		10%	49.46%
		100%	98.29%
30	30	5%	29.46%
		10%	58.22%
		100%	94.58%
30	60	5%	29.25%
		10%	50.26%
		100%	94.25%
60	0	5%	32.55%
		10%	47.30%
		100%	93.55%
60	30	5%	30.93%
		10%	57.28%
		100%	93.55%
60	60	5%	28.51%
		10%	48.60%
		100%	93.10%

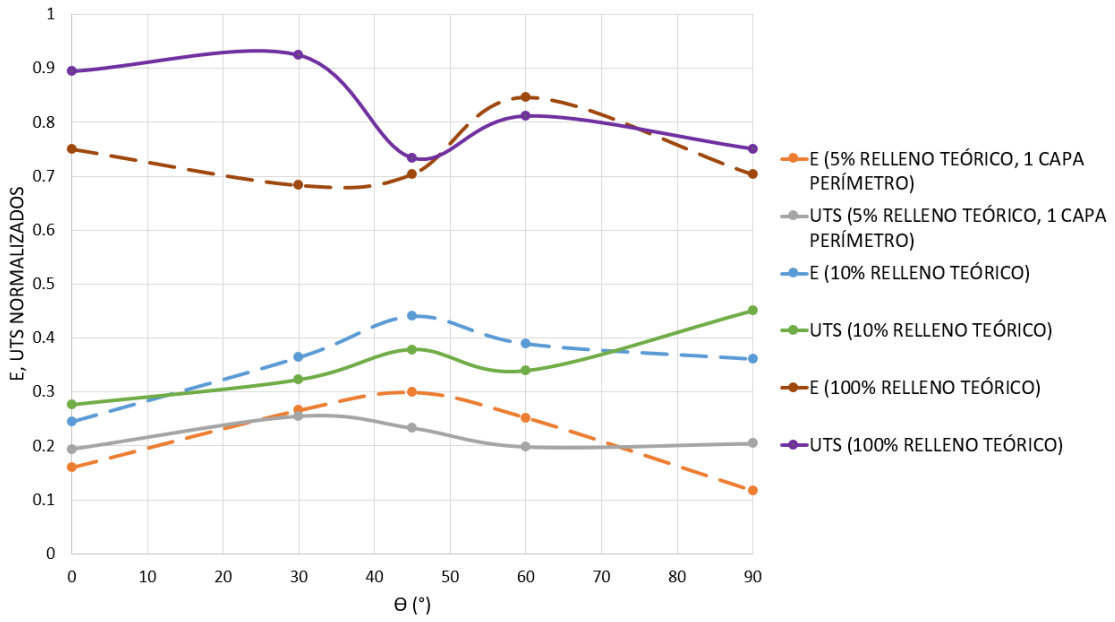
Posteriormente se realizaron los ensayos de tensión de las probetas en la Máquina Universal marca Shimadzu modelo AG-100KNI. Los parámetros de prueba utilizados fueron los mencionados previamente (Sección 3.1.6). Los resultados de estas pruebas fueron normalizados con base a la materia prima, y se muestran en la Tabla 3.13. Los resultados de esta tabla demuestran que la orientación de fabricación juega un papel muy importante en las propiedades finales de las piezas, ya que cuando Φ es diferente de 0° los valores obtenidos del UTS y módulo elástico reducen significativamente. Esto se debe a que cuando el valor de Φ aumenta, la carga ya no se encuentra paralela a la capa depositada y aparece el efecto de la adhesión entre capas.

Tabla 3.13. Resultados normalizados de probetas con orientación variable.

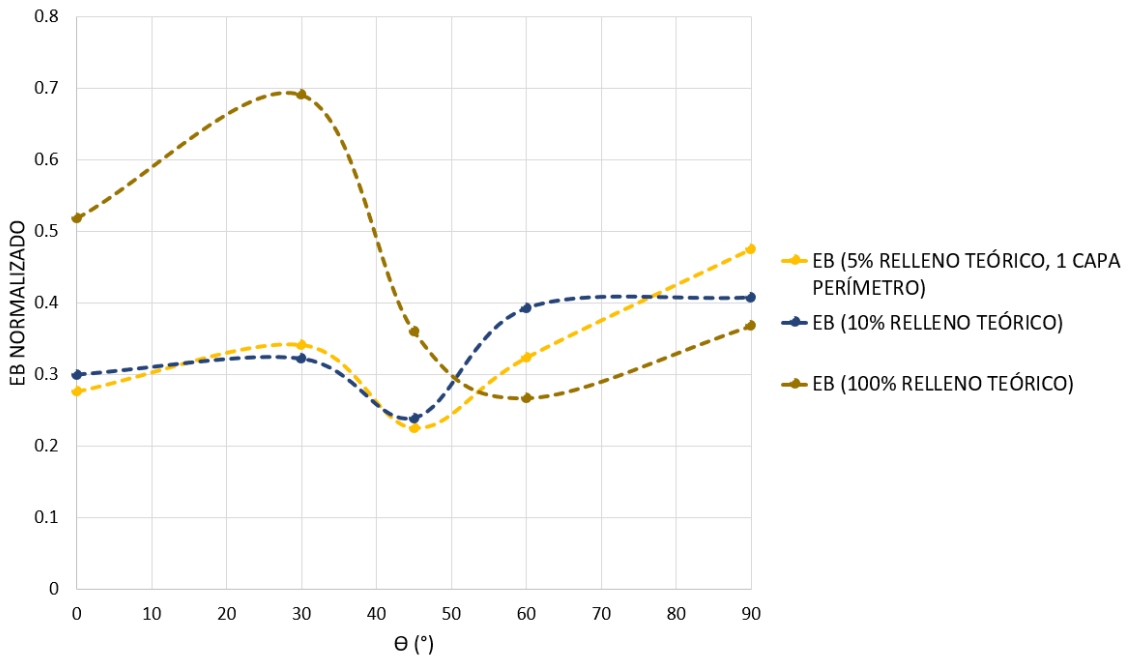
Probetas			Propiedad estructural (%)		
Θ (°)	Φ (°)	% relleno	E	UTS	EB
45	0	33.62%	0.2989	0.2325	0.2251
		49.28%	0.4402	0.3782	0.2392
		96.05%	0.8463	0.8114	0.2675
45	30	31.75%	0.1608	0.0736	0.1948
		55.57%	0.3206	0.1850	0.2279
		95.22%	0.5954	0.4789	0.2455
45	60	29.99%	0.1607	0.0881	0.1076
		51.57%	0.3029	0.1786	0.1320
		92.37%	0.6575	0.3997	0.1778
30	0	33.86%	0.2658	0.2546	0.3412
		49.46%	0.3644	0.3223	0.3222
		98.29%	0.7039	0.7335	0.3605
30	30	29.46%	0.2167	0.0737	0.2469
		58.22%	0.2802	0.3028	0.4445
		94.58%	0.4051	0.7849	0.3771
30	60	29.25%	0.1297	0.1013	0.1871
		50.26%	0.3313	0.2417	0.2579
		94.25%	0.3747	0.5998	0.3292
60	0	32.55%	0.2520	0.1979	0.3232
		47.30%	0.3894	0.3389	0.3930
		93.55%	0.7027	0.7503	0.3680
60	30	30.93%	0.1767	0.0844	0.1130
		57.28%	0.1989	0.2878	0.3603
		93.55%	0.6580	0.8385	0.3504
60	60	28.51%	0.2335	0.0985	0.1344
		48.60%	0.3235	0.2619	0.2623
		93.10%	0.3927	0.6170	0.2744

La Figura 3.17 muestra la influencia de diferentes valores de Θ , cuando Φ es igual a cero, en las propiedades estructurales de las probetas FDM. Con respecto al módulo elástico, en la Figura 3.17a se observa que para valores bajos de relleno, el máximo valor alcanzado de dicha propiedad es cuando Θ es igual a 45°, mientras que para las probetas del 100% de relleno teórico, el máximo valor es cuando Θ es igual a 60°. En cuanto al UTS, se puede observar que para los porcentajes de relleno teóricos del 5 y 10% se tiene una tendencia similar en las curvas, sin embargo, los valores máximo alcanzados para dicha propiedad es cuando Θ toma valor de 30° y 90° respectivamente.

Por otro lado, la Figura 3.17b muestra que los resultados de elongación para porcentajes de relleno bajos tienen una tendencia similar. Sin embargo, para las probetas del 100% de relleno teórico se muestra un comportamiento muy variable. Dichas diferencias pueden ser debido a que cuando se tiene mayor porcentaje de relleno, aparece el efecto de adhesión entre capas al momento de someter dichas probetas a cargas de tensión.



a)



b)

Figura 3.17. Comportamiento de probetas cuando $\Phi = 0^\circ$: a) módulo y UTS normalizados y b) elongación normalizada.

4. Modelos de predicción del comportamiento estructural

Se seleccionaron varios modelos analíticos (Capítulo 2) y modelos numéricos para evaluar sus capacidades y desempeño, en la predicción de propiedades estructurales de componentes fabricados mediante FDM. Además, se propusieron nuevos modelos analíticos y un modelo de homogenización para la predicción de propiedades en cualquier orientación. La evaluación se realizó con base en la metodología descrita a continuación y utilizando los resultados experimentales obtenidos previamente.

4.1. Metodología de evaluación de modelos de predicción

La Figura 4.1. muestra la metodología utilizada para la evaluación de modelos de predicción de propiedades. Esta metodología incluye la selección del modelo de predicción a utilizar, la determinación de los coeficientes (según el modelo), la estimación o predicción de las propiedades mecánicas, la evaluación de los errores de predicción y, finalmente, el ranking de modelos.

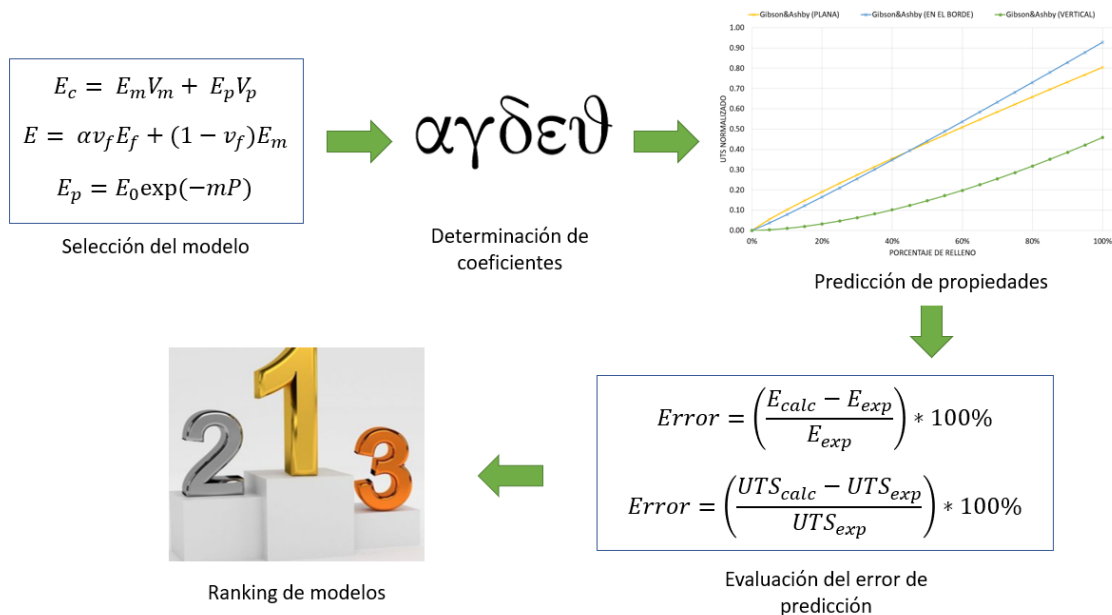


Figura 4.1. Metodología para evaluación de modelos de predicción.

Como se describió en el Capítulo 2, sección 2.5, se realizó una investigación acerca de diversos modelos (numéricos, analíticos) desarrollados para describir el comportamiento de partes FDM y partes compuestas, a partir de los cuales se seleccionaron algunos modelos analíticos para ser utilizados en este proyecto. La selección se basó en los datos con los que se contaba, los parámetros del proceso FDM y las propiedades a analizar. Una vez seleccionados, se procedió a determinar los coeficientes experimentales para cada modelo. Dichos coeficientes, se calcularon utilizando cada uno de los puntos experimentales y posteriormente obteniendo el promedio para cada orientación de fabricación y para cada propiedad mecánica (módulo elástico, UTS y elongación).

Posteriormente se realizaron las estimaciones de propiedades para valores desde 0 hasta 100% de relleno con cada uno de los modelos. Una vez estimadas las propiedades, se compararon los resultados obtenidos con los resultados experimentales, evaluando el error para cada valor experimental encontrado previamente (Capítulo 3, sección 3.2). Para el caso del módulo elástico el error se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Error = \left(\frac{E_{calc} - E_{exp}}{E_{exp}} \right) * 100\% \quad (4-1)$$

donde E_{calc} es el módulo calculado con el modelo y E_{exp} es el módulo obtenido experimentalmente. En el caso de la resistencia a la tensión el error se determinó como:

$$Error = \left(\frac{UTS_{calc} - UTS_{exp}}{UTS_{exp}} \right) * 100\% \quad (4-2)$$

donde UTS_{calc} es el esfuerzo calculado con el modelo y UTS_{exp} es el esfuerzo experimental. Para el caso de la elongación, el error se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Error = \left(\frac{EB_{calc} - EB_{exp}}{EB_{exp}} \right) * 100\% \quad (4-3)$$

donde EB_{calc} es la elongación calculada con el modelo, y EB_{exp} es la elongación experimental.

Finalmente se realizó un análisis para determinar el ranking de los modelos de predicción basado en sus desempeños de predicción por orientación y global. Dicho ranking permitió visualizar de una manera más clara el comportamiento predictivo de cada uno de los modelos evaluados, con el fin de utilizar los mejores para el desarrollo de nuevos modelos predictivos.

4.2. Modelos analíticos

4.2.1. Modelos lineales

El modelo de Voigt o Regla de la Mezcla (sección 2.5.3, Capítulo 2) no requiere el cálculo de parámetros por lo que sus estimaciones se calculan directamente. Por otro lado, para el modelo de Eficiencia (sección 2.5.3, Capítulo 2), se realizó el cálculo del factor de orientación α . La Tabla 4.1 muestra los valores de α para las tres orientaciones y las tres propiedades mecánicas (módulo elástico, UTS y elongación).

Tabla 4.1. Valores de α obtenidos.

α	Plana	En el borde	Vertical
E	0.7053	0.6830	0.4557
UTS	0.8592	0.8958	0.3264
EB	0.7954	0.8424	0.3277

Las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran los resultados experimentales y los estimados con los modelos de Mezcla y Eficiencia para el módulo elástico (E), UTS y elongación (EB), respectivamente, y para cada una de las tres orientaciones de fabricación de las probetas.

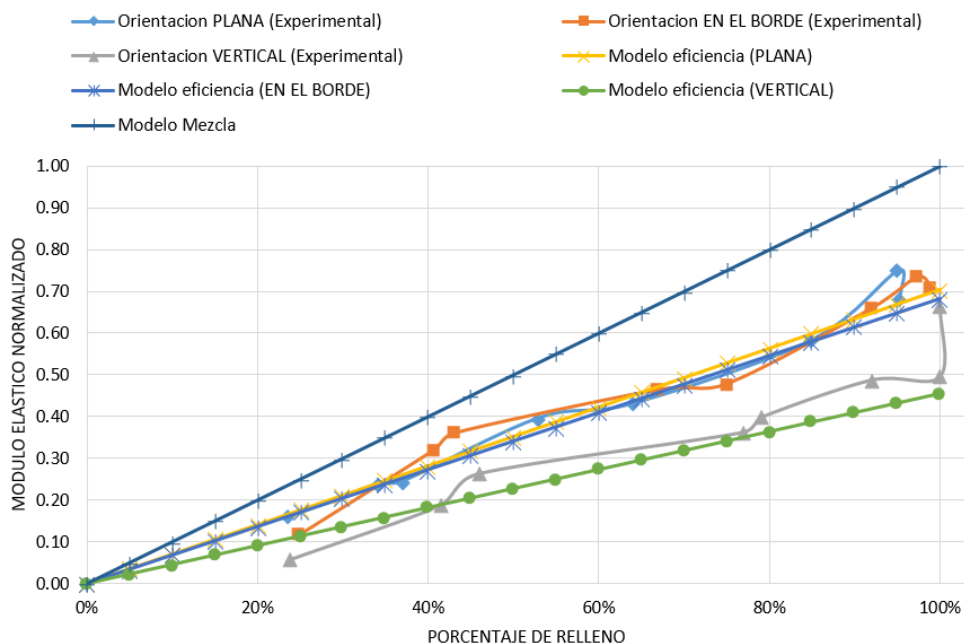


Figura 4.2. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.

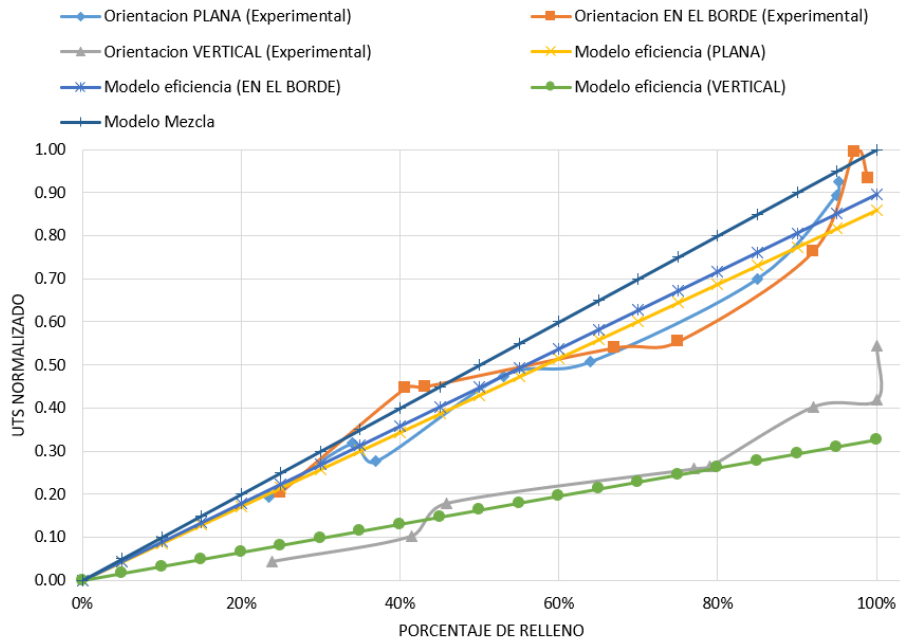


Figura 4.3. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.

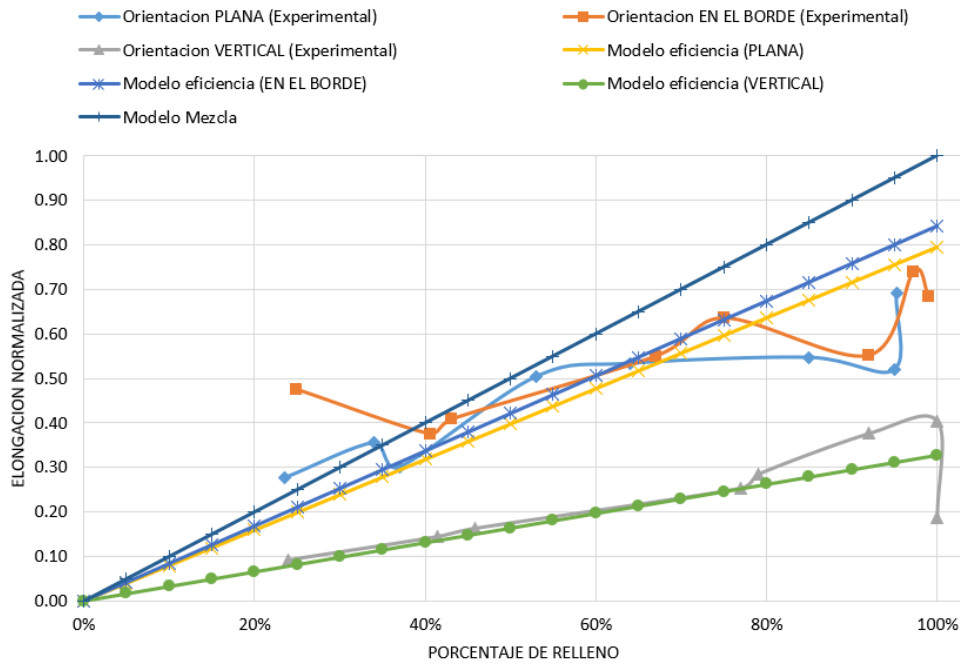


Figura 4.4. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Mezcla y Eficiencia.

Como se observa en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4, el comportamiento de la curva del modelo de Mezclas no se ajusta al comportamiento experimental para las tres orientaciones de fabricación, en específico para la orientación vertical. En cuanto al módulo elástico, Figura

4.1, se puede observar que los valores estimados por el modelo de Mezclas están muy por encima de los obtenidos experimentalmente para las tres orientaciones. Lo anterior debido a que el módulo elástico máximo alcanzado experimentalmente es aproximadamente 80% del valor de la materia prima, mientras que el modelo de mezcla predice que para un relleno de 100% la pieza fabricada tendrá la misma propiedad que la materia prima. Con respecto al modelo de Eficiencia, se observa que en la orientación plana, los valores estimados y experimentales del módulo (Figura 4.1) están muy cercanos, con diferencias de aproximadamente 10%. Además, los errores encontrados para la orientación en el borde de dicha propiedad son mucho menores para el mismo modelo a excepción del primer punto experimental. Un comportamiento similar se presenta en la orientación vertical, la cual se ajusta con mucha mejor precisión al comportamiento del módulo experimental a excepción del valor de 100% de relleno. Por otro lado, respecto al UTS (Figura 4.2) se puede observar que las estimaciones del modelo de Eficiencia en las orientaciones plana y en el borde, son cercanas en los valores intermedios experimentales; sin embargo, para los valores de 100% de relleno, el modelo queda ligeramente por debajo de los valores experimentales. Con respecto a la elongación, Figura 4.3, aunque el modelo de Eficiencia tiene un comportamiento lineal, se acerca mucho a los resultados experimentales en el rango 40% a 70% de relleno y para las orientaciones plana y en el borde; mientras que en la orientación vertical se observa que las curvas en los primeros 5 puntos experimentales son prácticamente la misma, teniéndose errores muy pequeños.

En la Tabla 4.2 se muestran los errores de predicción de cada modelo para cada propiedad y orientación. De estos resultados se observa que el modelo de Mezclas no describe el comportamiento experimental, ya que para las tres orientaciones y las tres propiedades mecánicas los errores alcanzados son considerablemente altos, alcanzando un máximo de 445.20% para la orientación vertical en el UTS. En cuanto al modelo de Eficiencia, éste se ajusta muy bien en la orientación plana para el módulo y el UTS ya que los errores encontrados son pequeños siendo el máximo valor de 15%. Sin embargo, en las orientaciones en el borde y vertical se puede observar que para el módulo los valores de error incrementan en porcentajes de relleno bajos. Esto puede ser debido a que el comportamiento experimental es no lineal. En cuanto a la elongación, se observa que el modelo de Eficiencia en la orientación vertical presenta los valores mínimos de error llegando hasta 0.31% para 77% de relleno. En general, el modelo de Eficiencia presenta un ajuste adecuado al comportamiento experimental.

Tabla 4.2. Error de predicción de los modelos de Mezcla y de Eficiencia.

Error de predicción de los modelos (%)						
Orientación PLANA						
% Real	E		UTS		EB	
	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia
24	47.56	4.07	21.15	4.10	14.63	32.09
34	42.61	0.58	7.12	7.96	4.08	23.71
37	50.84	6.39	33.99	15.12	23.23	1.98
53	33.33	5.96	11.72	4.01	5.26	16.27
64	48.22	4.54	26.22	8.45	19.94	4.60
85	45.41	2.56	21.64	4.51	55.42	23.62
95	26.69	10.64	6.23	8.73	82.94	45.51
95	39.51	1.60	3.01	11.49	37.72	9.54
Orientación EN EL BORDE						
% Real	E		UTS		EB	
	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia
25	112.49	45.13	22.13	9.40	47.51	55.79
41	27.13	13.17	8.95	18.44	8.31	8.76
43	19.50	18.38	4.16	14.15	5.69	10.97
67	44.13	1.56	24.08	11.16	22.00	2.77
75	56.70	7.03	35.26	21.17	18.06	0.55
92	39.34	4.83	20.65	8.08	66.94	40.63
97	32.40	9.57	2.18	12.37	31.41	10.70
99	39.53	4.70	6.25	4.82	44.81	21.99
Orientación VERTICAL						
% Real	E		UTS		EB	
	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia	Mezcla	Eficiencia
24	310.63	87.12	445.20	77.95	163.57	13.63
41	120.88	0.65	302.65	31.43	188.41	5.49
46	74.18	20.63	156.24	16.36	182.42	7.45
77	111.91	3.43	197.33	2.95	204.22	0.31
79	98.25	9.66	198.92	2.43	177.61	9.03
92	88.45	14.12	128.30	25.48	144.37	19.92
100	101.34	8.25	138.76	22.07	147.01	19.05
100	49.89	31.70	83.32	40.16	433.16	74.72

4.2.2. Modelos exponenciales

En el caso de los modelos analíticos de Gibson y Ashby, Duckworth, Spriggs, Rice y Hasselman (sección 2.5.2, Capítulo 2), los parámetros obtenidos a partir de los resultados

experimentales para cada orientación y propiedad mecánica son los mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores de los parámetros de los modelos exponenciales.

Orientación PLANA						
Propiedad mecánica	Gibson y Ashby		Duckworth/Spriggs		Rice	Hasselman
	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>A</i>
<i>E</i>	1.028	0.7175	-	2.4810	0.9074	-2.2350
UTS	0.8951	0.8037	1.9426	-	1.1830	-1.4400
EB	0.5285	0.6100	-	2.2900	1.1109	-1.8875
Orientación EN EL BORDE						
Propiedad mecánica	Gibson y Ashby		Duckworth/Spriggs		Rice	Hasselman
	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>A</i>
<i>E</i>	1.2278	0.7671	-	2.7690	0.8940	-2.7515
UTS	1.072	0.9272	1.8605	-	1.3405	-1.3881
EB	0.5192	0.6875	-	2.1142	1.2839	-1.8214
Orientación VERTICAL						
Propiedad mecánica	Gibson y Ashby		Duckworth/Spriggs		Rice	Hasselman
	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>A</i>
<i>E</i>	1.3326	0.5456	-	4.6260	0.5354	-7.4400
UTS	1.6456	0.4583	6.5850	-	0.3638	-14.8250
EB	0.8000	0.3001	-	5.6658	0.3735	-19.0468

Las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran los resultados experimentales, y los resultados estimados por cada uno de los modelos exponenciales, para cada propiedad (módulo elástico, UTS, y elongación, respectivamente), y para cada una de las orientaciones de las probetas. Por otro lado, en la Tabla 4.4 se muestran los errores de predicción de los modelos exponenciales para cada propiedad y orientación. En esta tabla se puede observar que en las tres orientaciones de fabricación, el modelo de Gibson y Ashby presenta los valores menores de error en las tres propiedades estudiadas.

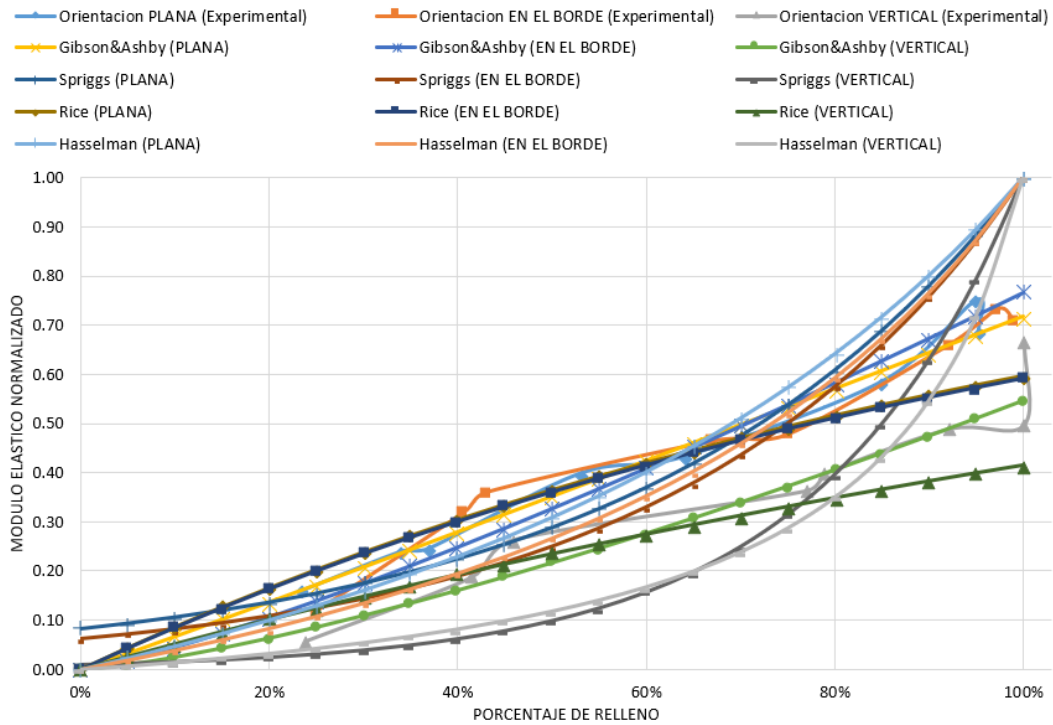


Figura 4.5. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Spriggs, Rice y Hasselman.

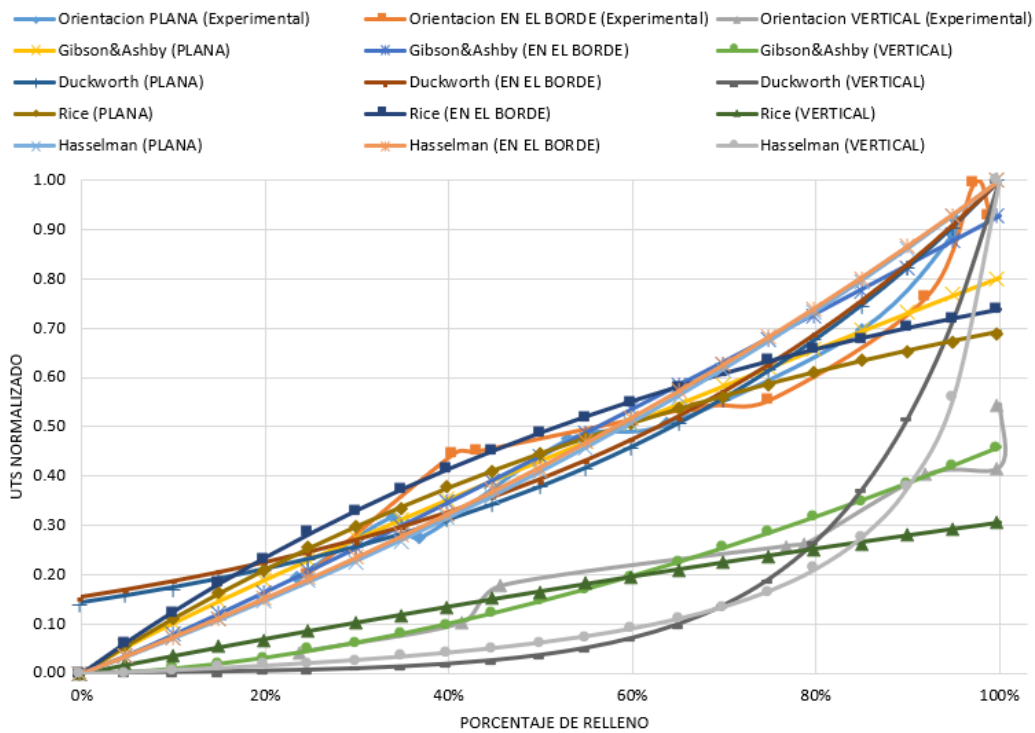


Figura 4.6. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Duckwoth, Rice y Hasselman.

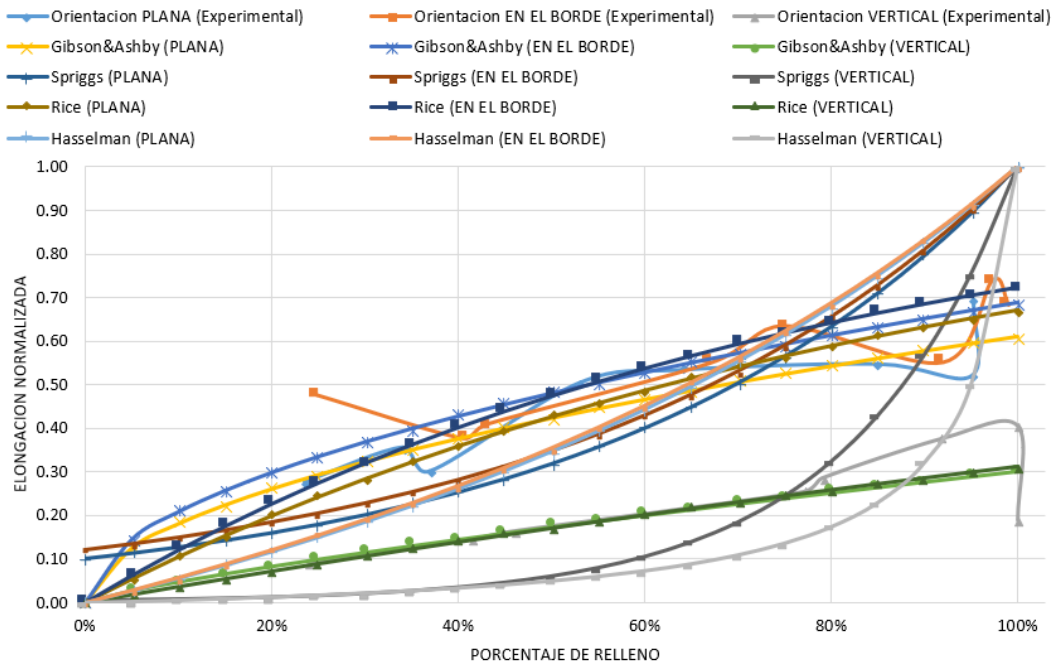


Figura 4.7. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos Gibson y Ashby, Spriggs, Rice y Hasselman.

En cuanto al módulo elástico, la Figura 4.5 muestra que el modelo que mejor se ajusta al comportamiento experimental para todas las orientaciones es el de Gibson y Ashby con errores máximos de 9.23% para la orientación plana, 24.31% para la orientación en el borde, y 39.16% para la orientación vertical. La Figura 4.6 muestra que en el caso del UTS los modelos exponenciales se asemejan más al comportamiento experimental. Sin embargo, para las orientaciones plana y en el borde, el modelo de Rice se queda debajo de los valores experimentales (errores negativos) en los valores altos de porcentaje de relleno; además de que la pendiente de dichas curvas es inversa a la de los resultados experimentales. De igual manera se puede observar que para la orientación vertical el modelo que predice con mejor precisión el comportamiento experimental es el de Gibson y Ashby, ya que el de Rice se queda por debajo de los valores encontrados y los modelos restantes no se acercan a los valores experimentales. En el caso de la elongación, la Figura 4.7 muestra que los modelos de Hasselman y Spriggs no predicen el comportamiento experimental con precisión ya que las curvas de estos modelos presentan errores máximos promedio de hasta 183% y 187%, respectivamente.

Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales.

Error de predicción de los modelos (%)				
Orientación PLANA				
% Real	E			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselman
24	1.67	-5.97	20.56	-24.10
34	-0.72	-18.45	11.32	-21.40
37	5.26	-14.59	16.27	-15.17
53	-6.02	-21.62	-3.96	-15.64
64	5.02	-5.20	2.02	2.60
85	3.86	17.91	-8.03	22.68
95	-9.23	17.80	-22.96	19.33
95	-0.04	30.13	-15.24	31.73
% Real	UTS			
	Gibson y Ashby	Duckworth	Rice	Hasselman
24	13.32	16.51	25.09	-9.34
34	-3.61	-12.64	4.30	-16.97
37	19.53	6.51	28.38	4.90
53	-4.02	-15.40	-1.81	-7.42
64	6.31	-2.00	4.72	8.96
85	-0.56	6.93	-9.25	14.11
95	-14.17	1.47	-24.53	3.94
95	-16.78	-1.41	-26.89	0.89
% Real	EB			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselman
24	2.98	-37.05	-16.55	-49.14
34	-2.78	-37.79	-11.29	-39.49
37	20.14	-21.30	12.26	-20.97
53	-13.38	-32.30	-11.62	-25.72
64	-9.70	-17.82	-4.64	-9.10
85	2.35	29.69	11.72	37.16
95	14.32	71.73	25.54	75.16
95	-14.03	29.64	-5.59	32.12

Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales (Cont.)

Error de predicción de los modelos (%)				
Orientación EN EL BORDE				
% Real	E			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselman
25	18.79	6.61	70.28	-8.20
41	-20.57	-39.54	-4.70	-37.68
43	-24.31	-42.63	-11.35	-40.13
67	0.92	-13.74	-3.06	-8.66
75	12.58	4.56	2.08	8.98
92	4.88	21.36	-15.08	22.22
97	0.92	26.16	-20.93	26.32
99	6.79	37.09	-17.22	37.13
% Real	UTS			
	Gibson y Ashby	Duckworth	Rice	Hasselman
25	2.46	21.18	39.16	-5.42
41	-20.88	-25.74	-5.89	-26.00
43	-16.36	-22.87	-2.44	-21.49
67	11.78	0.23	9.76	10.00
75	22.85	13.27	14.36	23.30
92	11.19	13.00	-7.07	17.01
97	-9.48	-4.43	-26.72	-3.21
99	-1.56	5.35	-21.14	5.84
% Real	EB			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselman
25	-29.65	-56.95	-42.34	-67.53
41	14.82	-24.02	8.35	-27.19
43	8.87	-26.37	4.20	-27.96
67	1.68	-9.37	5.05	-4.02
75	-6.79	-7.21	-2.68	-2.05
92	19.47	53.22	25.77	56.65
97	-8.44	27.49	-3.64	28.51
99	0.04	43.21	5.24	43.63

Tabla 4.4. Error de predicción de los modelos exponenciales (Cont.)

Error de predicción de los modelos (%)				
Orientación VERTICAL				
% Real	E			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselmann
24	39.16	-49.17	106.37	-30.42
41	-10.11	-64.52	6.06	-53.72
46	-26.66	-68.95	-17.32	-61.17
77	5.99	-5.03	-7.02	-14.59
79	0.01	-5.01	-13.45	-15.73
92	0.01	41.48	-20.33	24.38
100	9.85	101.34	-16.53	101.34
100	-18.22	49.89	-37.86	49.89
% Real	UTS			
	Gibson y Ashby	Duckworth	Rice	Hasselmann
24	-0.85	-84.80	89.97	-52.68
41	4.46	-79.47	35.98	-55.75
46	-28.99	-84.18	-14.14	-69.79
77	15.11	-15.08	-5.66	-28.86
79	17.66	-5.08	-5.48	-23.42
92	-0.85	46.53	-29.41	8.41
100	9.42	138.76	-27.19	138.76
100	-15.99	83.32	-44.09	83.32
% Real	EB			
	Gibson y Ashby	Spriggs	Rice	Hasselmann
24	5.32	-85.21	-5.82	-92.83
41	3.24	-74.80	-0.20	-89.89
46	-0.95	-71.32	-3.06	-89.32
77	-3.80	7.34	-1.25	-74.24
79	-12.67	6.92	-10.21	-74.46
92	-25.43	68.82	-22.76	-48.66
100	-25.87	147.01	-23.01	147.01
100	60.00	433.16	66.17	433.16

4.3. Modelos analíticos propuestos

Con el fin de mejorar la predicción de propiedades mecánicas de las piezas fabricadas por FDM, se decidió proponer dos modelos basados en los ya establecidos en la literatura. Estos modelos se describen a continuación.

4.3.1. Modelo variante Duckworth

El modelo propuesto es un híbrido del modelo de Duckworth (ecuación 2-5) y el modelo de Eficiencia (ecuación 2-2), ya que también se propone un factor de orientación. El modelo propuesto es:

$$\sigma_p = \beta \sigma_0 e^{-mP} \quad (4-4)$$

donde σ_p es el UTS del material poroso, σ_0 es el UTS del material sólido (filamento), β es el factor de orientación, P es la porosidad y m es un parámetro que puede obtenerse de datos experimentales. Para las propiedades de módulo elástico y elongación, el modelo sería el mismo pero con las propiedades correspondientes.

4.3.2. Modelo Exponencial

En este modelo se considera un comportamiento exponencial con una forma basada en el modelo de Gibson y Ashby (ecuación 2-4), ya que cuenta con dos parámetros como se muestra a continuación:

$$E_p = CE_0(e^{nV_m}) \quad (4-5)$$

donde E_p es el módulo elástico del material poroso, E_0 es el módulo elástico del material sólido, V_m es el porcentaje de relleno, y C y n son los parámetros del modelo los cuales se pueden obtener de datos experimentales.

La Tabla 4.5 muestra los valores encontrados de los parámetros de estos dos modelos propuestos. Estos parámetros fueron determinados a partir de los resultados experimentales.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros de los modelos propuestos.

Propiedad mecánica	Orientación PLANA				Orientación EN EL BORDE				Orientación VERTICAL			
	Variante Duckworth		Exponencial		Variante Duckworth		Exponencial		Variante Duckworth		Exponencial	
	m	β	n	C	m	β	n	C	m	β	n	C
E	1.7571	0.7610	1.8774	0.1221	1.9355	0.7767	1.8870	0.1158	3.4445	0.8033	2.6435	0.0457
UTS	1.9550	1.0208	1.9235	0.1450	1.7050	0.9512	1.7050	0.1729	2.6141	0.4704	2.9477	0.0268
EB	0.8744	0.6211	1.2020	0.2122	1.1045	0.7628	0.6845	0.3370	1.5927	0.3348	1.5071	0.0720

Las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los resultados experimentales y los resultados estimados por los modelos propuestos para el módulo elástico, UTS y elongación, respectivamente, y para las tres diferentes orientaciones de las probetas. En la Tabla 4.6 se presentan los errores de predicción de los modelos propuestos para cada propiedad y orientación.

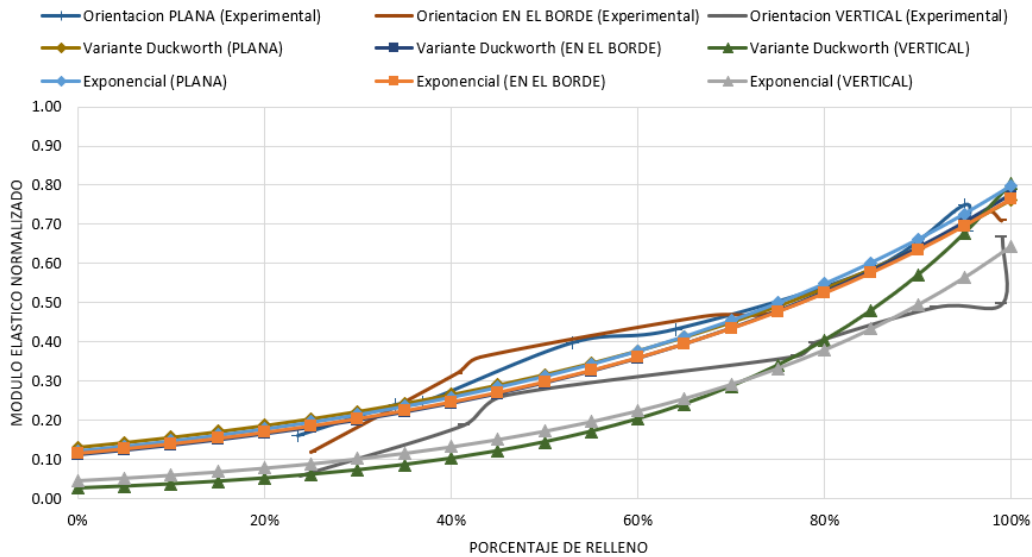


Figura 4.8. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.

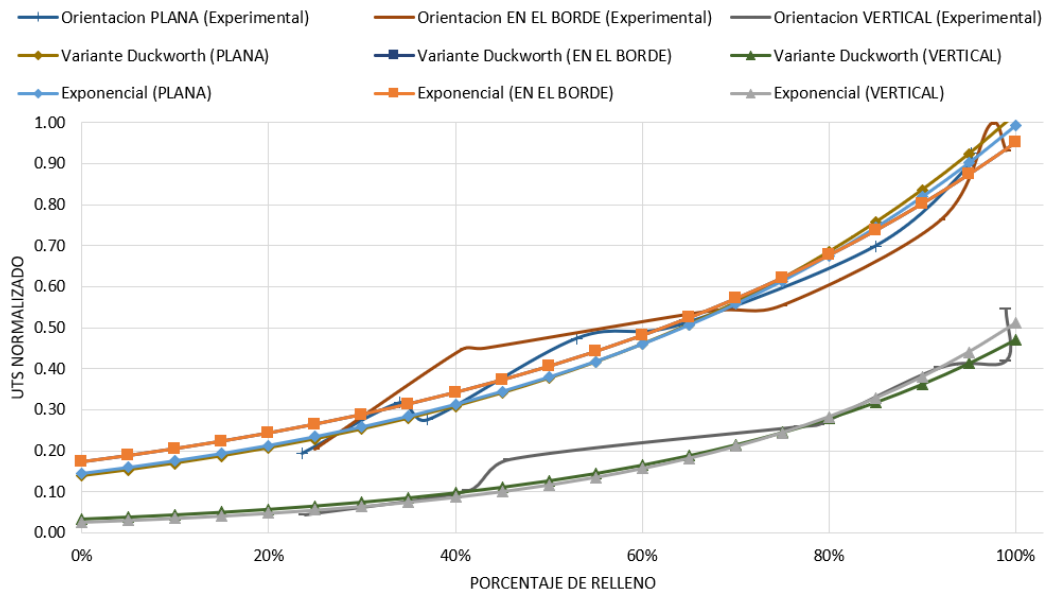


Figura 4.9. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.

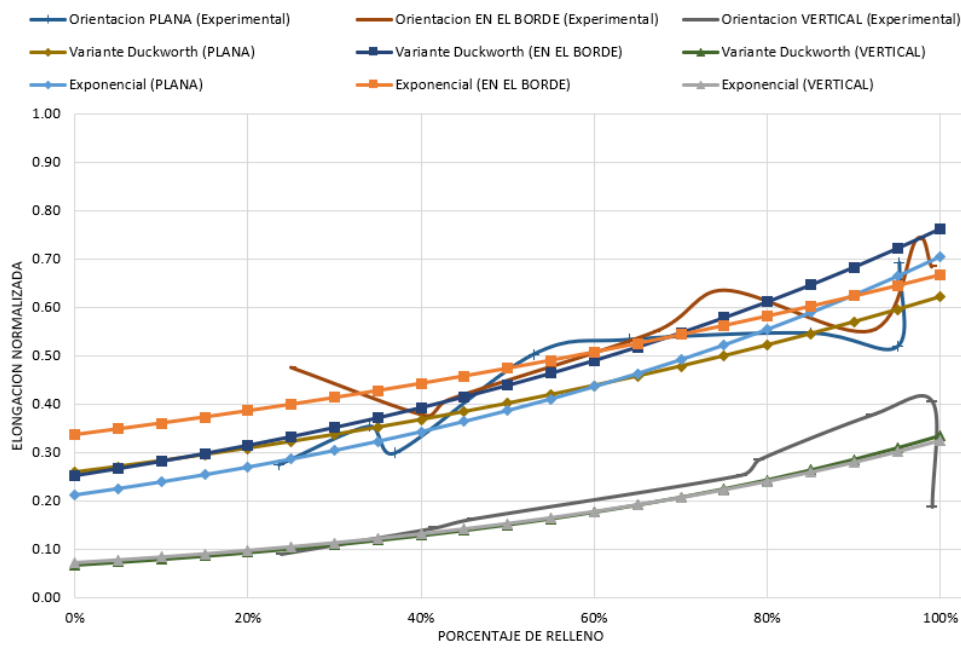


Figura 4.10. Elongación normalizada vs. porcentaje de relleno y orientaciones de las probetas para los modelos propuestos.

En cuanto al módulo elástico, la Figura 4.8 muestra que los modelos propuestos se ajustan muy bien a los resultados experimentales en los porcentajes de relleno de 60% a 100% en las orientaciones plana y en el borde, y 80% a 100% en la orientación vertical. Luego, como se observa en la Figura 4.9, los modelos propuestos se ajustan a la tendencia de los valores experimentales para el UTS y todas las orientaciones. Las discrepancias entre las curvas de los modelos propuestos y experimentales son mínimas comparadas con los modelos de Hasselman y Rice, llegando a un error máximo promedio de 32.6% para el modelo Variante Duckworth y 27.5% para el Exponencial. Finalmente, en el caso de la elongación, la Figura 4.10 muestra que aunque la elongación de los resultados experimentales presenta oscilaciones, los modelos propuestos se encuentran cercanos a los valores obtenidos. En la orientación vertical, las curvas estimadas de los modelos propuestos se ajustan bien a los porcentajes de relleno de 20% hasta 80% aproximadamente. Para las orientaciones plana y en el borde, las curvas estimadas presentan desviaciones estándar promedio de 20.7% para el modelo Variante Duckworth, y 18.3% para el modelo Exponencial.

Tabla 4.6. Error de predicción de los modelos propuestos.

Error de predicción de los modelos (%)						
Orientación PLANA						
% Real	E		UTS		EB	
	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial
24	24.52	19.04	14.26	17.34	15.39	2.10
34	0.08	-3.10	-13.85	-12.19	-1.73	-10.01
37	2.61	-0.29	5.20	6.99	19.26	10.27
53	-16.14	-16.92	-15.75	-15.28	-18.21	-20.31
64	-6.35	-5.97	-1.83	-2.06	-15.04	-14.17
85	0.04	3.02	8.30	6.43	-0.40	7.78
95	-7.04	-3.10	3.31	0.80	14.48	28.01
95	2.52	6.90	0.39	-2.06	-13.84	-3.60
Orientación EN EL BORDE						
% Real	E		UTS		EB	
	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial
25	54.79	57.95	29.54	29.53	-29.93	-15.88
41	-22.98	-22.00	-22.54	-22.54	5.55	18.64
43	-28.42	-27.60	-19.85	-19.85	-0.26	10.94
67	-11.79	-11.80	0.36	0.36	-3.53	-2.93
75	0.03	-0.38	12.01	12.01	-8.90	-11.36
92	0.76	-0.47	8.83	8.83	26.71	14.79
97	0.26	-1.21	-8.70	-8.70	-0.01	-11.39
99	7.37	5.70	0.36	0.36	10.35	-2.93
Orientación VERTICAL						
% Real	E		UTS		EB	
	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial	Variante Duckworth	Exponencial
24	0.36	47.71	46.81	23.68	9.90	13.86
41	-43.05	-27.16	-1.11	-11.67	-8.29	-6.41
46	-52.72	-41.65	-36.16	-42.12	-12.96	-11.51
77	0.11	-3.71	-0.44	0.14	-8.30	-9.22
79	-2.21	-7.43	2.80	4.09	-15.80	-16.78
92	24.92	6.55	-5.30	0.14	-21.71	-23.48
100	56.26	29.39	9.41	21.97	-18.61	-19.72
100	16.33	-3.67	-15.99	-6.35	75.68	73.27

4.4. Comparación cuantitativa de los modelos analíticos

Las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 presentan los valores promedio de los errores de predicción y su desviación estándar para cada uno de los modelos, las propiedades evaluadas, y en las tres orientaciones de fabricación. El error promedio es calculado como el promedio de los

errores obtenidos previamente incluyendo su signo. En estas tablas también se ha incluido el ranking de los modelos para cada orientación y propiedad.

Tabla 4.7. Error de predicción promedio de los modelos para el módulo elástico.

Error promedio de predicción para módulo elástico									
Modelos	PLANA			EN EL BORDE			VERTICAL		
	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking
Gibson & Ashby	-0.02	4.91	1	0.00	14.13	1	0.00	18.75	1
Eficiencia	-0.01	5.81	2	-0.01	19.77	2	0.00	36.63	4
Exponencial	-0.05	9.75	3	0.02	24.44	3	0.00	26.78	2
Variante Duckworth	0.00	11.73	4	0.00	25.44	4	0.00	35.23	3
Hasselman	0.00	22.09	7	0.00	28.83	5	0.00	55.25	6
Rice	0.00	15.39	5	0.00	29.44	6	-0.01	44.72	5
Duckworth	0.00	19.38	6	-0.01	29.64	7	0.00	60.78	7
Mezcla	41.77	8.24	8	46.40	28.95	8	119.44	80.39	8

Tabla 4.8. Error de predicción promedio de los modelos para el UTS.

Error de predicción promedio para UTS									
Modelos	PLANA			EN EL BORDE			VERTICAL		
	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking
Gibson & Ashby	0.00	11.78	6	0.00	14.09	1	0.00	14.77	1
Eficiencia	0.00	9.45	1	0.00	14.36	2	-0.01	37.98	4
Exponencial	0.00	9.89	2	0.00	16.10	3	-1.41	19.33	2
Variante Duckworth	0.00	10.38	4	0.00	17.21	5	0.00	23.54	3
Hasselman	-0.12	10.35	3	0.00	17.50	6	0.00	74.07	6
Rice	0.00	20.32	7	0.00	21.00	7	0.00	43.42	5
Duckworth	0.00	10.48	5	0.00	17.02	4	0.00	83.84	7
Mezcla	16.39	11.00	8	11.64	16.03	8	206.34	116.35	8

Tabla 4.9. Error de predicción promedio de los modelos para elongación.

Error de predicción promedio para elongación									
Modelos	PLANA			EN EL BORDE			VERTICAL		
	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking	Error Promedio (%)	Dev. Std. (%)	Ranking
Gibson&Ashby	-0.01	11.74	1	0.00	14.48	2	-0.02	25.32	1
Eficiencia	0.00	25.64	5	0.00	28.20	5	-0.02	30.93	4
Exponencial	0.01	14.50	2	-0.01	12.32	1	0.00	29.67	3
Variante Duckworth	-0.01	14.98	3	0.00	16.21	3	-0.01	32.07	5
Hasselman	0.00	43.46	7	0.00	41.45	7	33.28	177.94	6
Rice	-0.02	14.78	4	-0.01	19.34	4	-0.02	28.22	2
Duckworth	-1.90	40.52	6	0.00	38.01	6	53.99	172.67	7
Mezcla	25.72	30.15	8	18.71	31.31	8	205.10	88.28	8

En el caso del módulo elástico, la Tabla 4.7 muestra que para las orientaciones plana y en el borde el mejor modelo evaluado es el de Gibson y Ashby, seguido del modelo de Eficiencia, después el modelo Exponencial propuesto, y posteriormente el modelo propuesto Variante Duckworth. En cuanto a la orientación vertical, ésta comparte el modelo del Gibson y Ashby como primer lugar de la tabla, lo cual indica que para el módulo elástico el modelo de Gibson y Ashby es el que mejor predice el comportamiento en todas las orientaciones de fabricación. Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 4.8, el modelo que tiene mejor desempeño para el UTS en la orientación plana es el de Eficiencia (0% de error promedio y una desviación estándar de 9.45%); mientras que para las orientaciones en el borde y vertical el modelo de Gibson y Ashby es el que mejor desempeño tiene (0% de error promedio y desviaciones estándar de 14.09 % y 14.77%, respectivamente). Finalmente, la Tabla 4.9 muestra que en el caso de la elongación, el modelo de Gibson y Ashby se mantiene como mejor evaluado para la orientación plana y vertical, mientras que para la orientación en el borde el modelo propuesto Exponencial ocupa el primer puesto. Cabe destacar que en el caso de la elongación, el modelo de Rice se encuentra entre los primeros cuatro en todas las orientaciones, cosa que no sucedió con las otras propiedades.

La Tabla 4.10 muestra la clasificación general de los modelos evaluados para cada una de las orientaciones estudiadas, y además la clasificación global de los modelos sin hacer distinciones entre orientaciones y propiedades mecánicas. Para la orientación plana el mejor modelo predictivo es el propuesto Exponencial, seguido del modelo de Gibson y

Ashby, y del modelo de Eficiencia. Con respecto a la orientación en el borde, el mejor modelo evaluado es el de Gibson y Ashby, seguido del modelo Exponencial propuesto y del modelo de Eficiencia. Para la orientación vertical, el modelo con mejor desempeño predictivo es el de Gibson y Ashby, seguido del modelo Exponencial propuesto y del modelo Variante Duckworth propuesto. De manera global, el modelo que mejor describe y/o predice el comportamiento de las piezas FDM es el modelo de Gibson y Ashby, seguido en segundo lugar por el modelo propuesto Exponencial, y en el tercer lugar por el modelo de Eficiencia. El modelo de Mezcla fue el peor clasificado en todos los casos ya que no considera el efecto de la orientación del material depositado para el caso del proceso de FDM. Por tanto, se puede decir que el modelo propuesto Exponencial puede llegar a describir con precisión el comportamiento estructural de piezas fabricadas mediante FDM ya que se encuentra dentro de los tres mejores evaluados para cada orientación.

Tabla 4.10. Ranking general por orientación y global.

Modelos	Ranking			
	Plana	En el borde	Vertical	Global
Gibson y Ashby	2	1	1	1
Eficiencia	2	3	4	3
Exponencial	1	2	2	2
Variante Duckworth	3	4	3	4
Hasselman	5	6	5	6
Rice	4	5	4	5
Duckworth	5	5	6	7
Mezcla	6	7	7	8

Por lo anterior, se puede concluir que los modelos analíticos de Gibson y Ashby, Eficiencia y Exponencial tienen una buena precisión para predicción de propiedades mecánicas a nivel macro. Por lo tanto, el uso de modelos analíticos para predecir el comportamiento de componentes fabricados mediante FDM o categorías similares de AM basados en parámetros del proceso y propiedades del material, es factible. En consecuencia, dichos modelos analíticos pueden ser utilizados para asistir el proceso de diseño, reduciendo así la necesidad de utilizar enfoques experimentales y numéricos existentes, los cuales requieren mucho tiempo y son costosos. Además, el solo depender de dos parámetros los modelos, será mucho más fácil para el diseñador poder crear las piezas y manejar la tecnología FDM para cumplir con los requerimientos mecánicos deseados.

4.5. Modelo GRNN

En este proyecto también se consideró el uso de la inteligencia artificial (AI) para desarrollar un modelo de predicción de propiedades estructurales FDM basado en redes neuronales artificiales (ANN). Para ello se evaluó y seleccionó la red neuronal de regresión general (GRNN) como la mejor alternativa para representar el comportamiento estructural de las piezas fabricadas mediante FDM. Lo anterior debido a que dicha red es determinística ya que no hay pesos aleatorios de inicialización, y solo hay una función de activación que se puede modificar para mejorar el desempeño de la red. Además de que las redes GRNN requieren mucho menos tiempo de procesamiento en comparación con las de Backpropagation (BPN). La arquitectura de la red propuesta se muestra en la Figura 4.11.

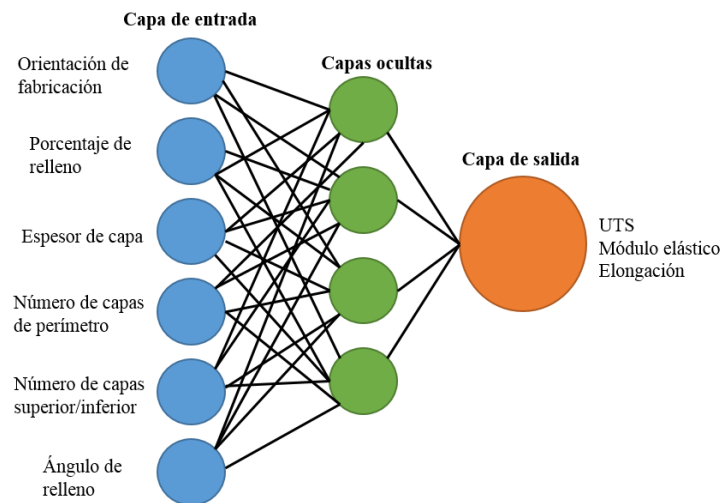
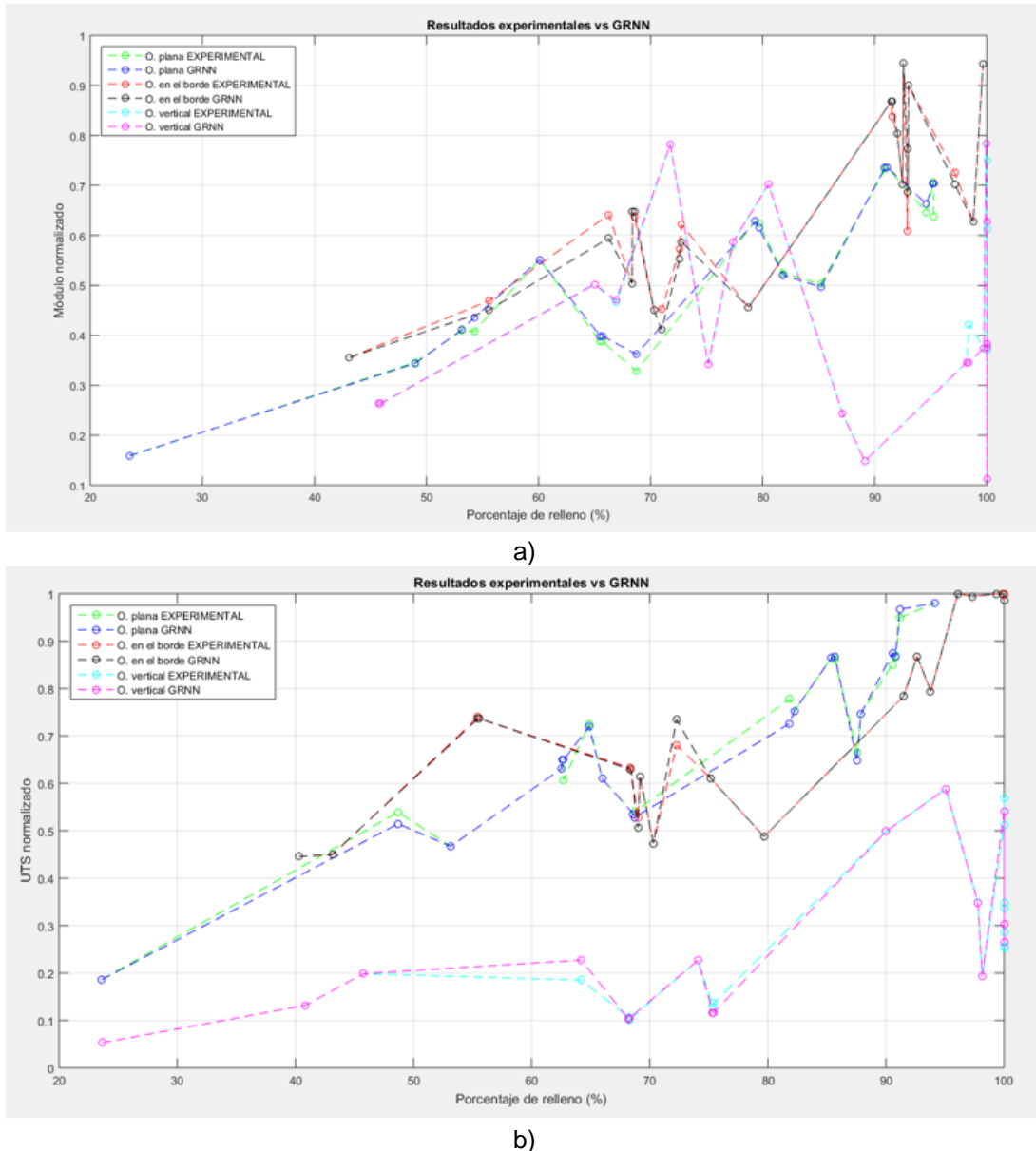


Figura 4.11. Arquitectura GRNN utilizada.

4.5.1. Desarrollo de red GRNN

Se ajustaron los códigos de las redes para que se realizara una separación automática y aleatoria de los datos, y tener un 80% para entrenamiento y 20% para el testing. Igualmente se ajustaron los parámetros de las redes hasta obtener un valor aceptable del error medio cuadrático (MSE). Una vez con los parámetros ajustados, se realizaron 50 corridas del GRNN para cada propiedad mecánica (módulo elástico y UTS) para obtener un MSE promedio. Dado que el comportamiento de la elongación en cada parte fabricada fue muy distinto entre sí, no se consideró esta propiedad mecánica en los modelos GRNN. Una vez encontrado el valor del MSE menor, se seleccionó la corrida con el valor mínimo de MSE, y se separaron los datos por orientación para luego graficarlos. La Figura 4.12 muestra los

resultados obtenidos para el módulo elástico y el UTS, así como sus respectivos valores de error.



b)
Figura 4.12. Resultados del modelo GRNN con 80% y 20% de la red: a) Módulo elástico, MSE = 0.0095, b) UTS, MSE = 0.0074

Como se observa en la Figura 4.12, los resultados obtenidos con la red son muy cercanos a los experimentales, obteniendo valores de MSE menores a 0.01. Sin embargo, se puede observar que los resultados son muy puntuales y se presentan cambios muy abruptos en el comportamiento. Debido a esto, se refinaron los datos experimentales y se realizó un estudio con el 50% de datos para entrenamiento y 50% de datos para el testing, con el fin de graficar más datos para cada orientación y representar con mayor precisión el

comportamiento experimental. La Figura 4.13 muestra los valores de spread propuestos y los valores de MSE obtenidos para cada propiedad. Luego, se seleccionaron los valores de spread con los valores mínimos de error, y se realizaron 50 corridas para obtener un valor de MSE promedio para cada caso y propiedad. La Tabla 4.11 muestra los valores promedio para cada caso seleccionado. Con base en esta tabla se seleccionó el valor de spread con el mínimo MSE para cada caso. Posteriormente, se seleccionó la corrida con el menor error dentro de las 50 y se corrió un nuevo código con el set de datos de entrenamiento y testing seleccionados. Luego, se separaron los datos de testing por orientaciones y se realizó el post procesamiento. Este post procesamiento consistió en agrupar los datos del testing de acuerdo al porcentaje de relleno sin considerar el espesor de capa, capas de perímetro, capas superiores e inferiores y ángulo de relleno. Por último, se calculó el error promedio para cada orientación con el fin de poder obtener una tendencia general de comportamiento que se pudiera comparar con los datos previamente reportados. Además, se realizó un postprocesamiento de datos del testing para poder compararlos con los datos experimentales previamente obtenidos.

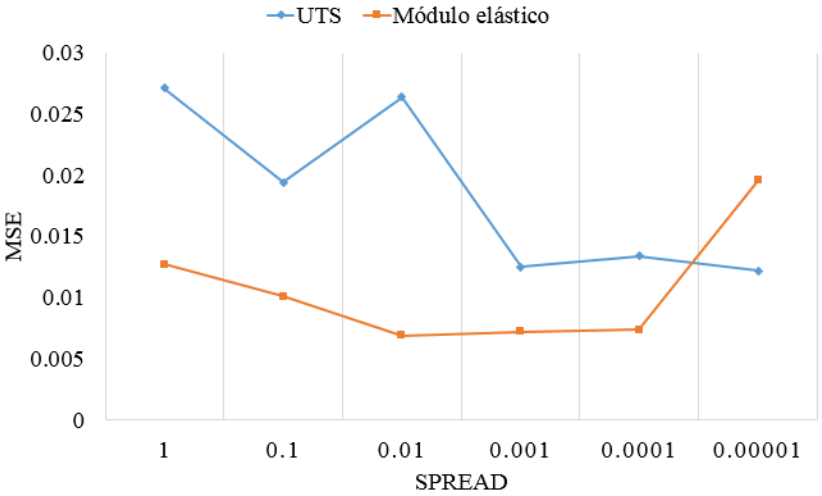


Figura 4.13. Valores de spread y MSE.

Tabla 4.11. Valores de MSE promedio mínimos.

UTS		Módulo elástico	
Spread	MSE promedio	Spread	MSE promedio
0.001	0.0154	0.01	0.0122
0.0001	0.0164	0.001	0.0141
0.00001	0.0155	0.0001	0.0129

4.5.2. Análisis y comparación de los resultados del modelo GRNN

La Figura 4.14 muestra los resultados experimentales y los obtenidos con la red GRNN después del post procesamiento para el módulo elástico. Como se muestra en esta figura, las predicciones del modelo GRNN en todas las orientaciones presentan la misma tendencia comparadas con los resultados experimentales. Además, las curvas se ven suavizadas sin cambios tan abruptos, proporcionando una tendencia general con muy buena precisión.

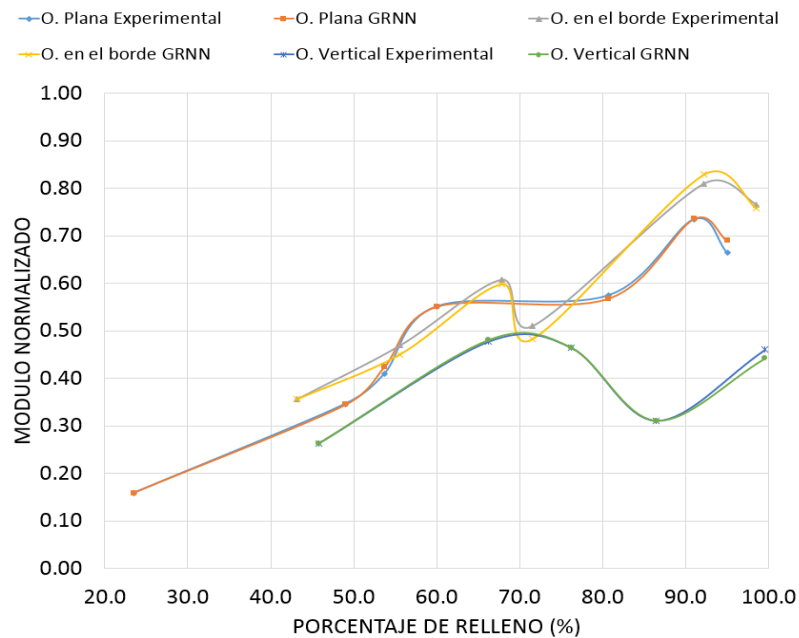


Figura 4.14. Resultados generales GRNN vs experimentales para el módulo elástico.

La Figura 4.15 muestra los resultados experimentales y los obtenidos del modelo GRNN después del post procesamiento para el UTS. Como se aprecia en esta figura, las predicciones del modelo GRNN en las orientaciones plana y en el borde tienen la misma tendencia comparadas con los resultados experimentales; además de describir con muy buena precisión el comportamiento. Sin embargo, en la orientación vertical se observa una mayor diferencia entre los valores calculados, pero siguiendo la misma tendencia o comportamiento.

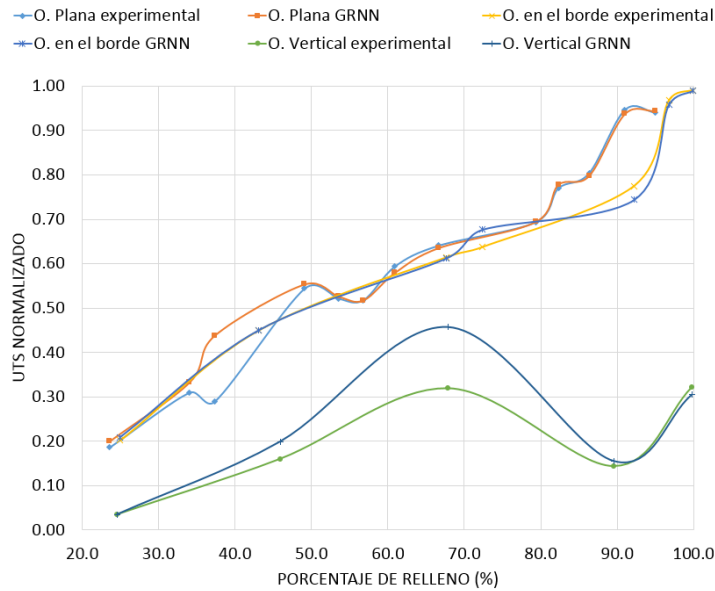


Figura 4.15. Resultados generales GRNN vs experimentales para el UTS.

La Tabla 4.12 presenta los valores de error promedio para cada propiedad y orientación. En esta tabla se puede observar que, en el caso del módulo elástico, los errores son menores al 2% en todas las orientaciones. Por otro lado, los errores promedio para el UTS en las orientaciones plana y en el borde son igual o menores al 5% lo cual es un valor aceptable; sin embargo, para la orientación vertical el error se incrementa hasta un 14%. Por lo anterior, se puede decir que las redes neuronales son capaces de describir comportamientos no lineales y se pueden implementar para la predicción de propiedades de piezas fabricadas mediante FDM.

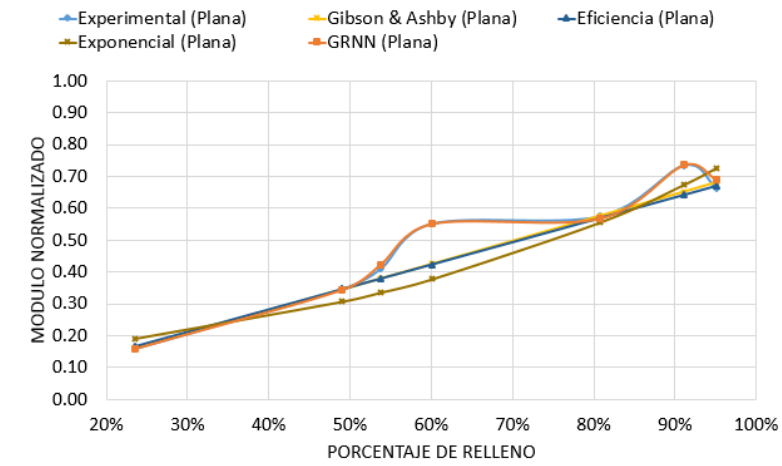
Tabla 4.12. Error promedio de la red GRNN vs resultados experimentales.

Módulo elástico		
Orientación	Error promedio (%)	Desviación estándar
Plana	0.93	1.98
En el borde	1.57	2.78
Vertical	0.67	1.87
UTS		
Orientación	Error promedio (%)	Desviación estándar
Plana	5.12	14.26
En el borde	0.62	3.30
Vertical	14.19	19.82

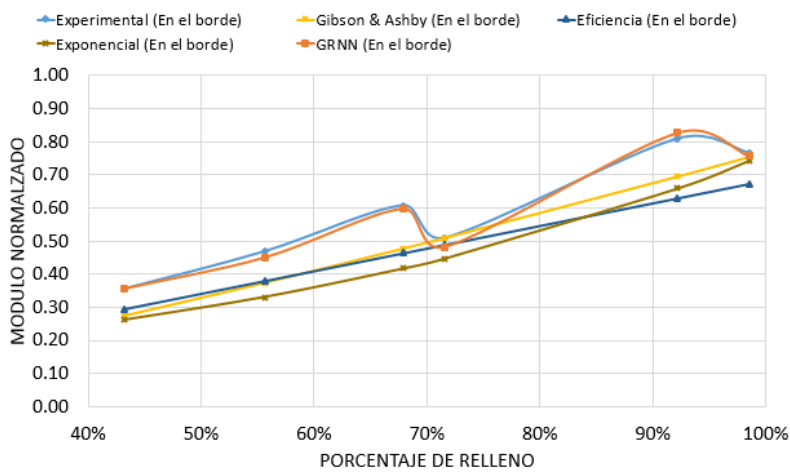
4.6. Análisis comparativo de modelos

Posteriormente se procedió a comparar el desempeño de predicción de los modelos analíticos con el del modelo GRNN para cada orientación y los valores de prueba seleccionados. Para cada orientación y cada valor de relleno se calculó el módulo y el UTS

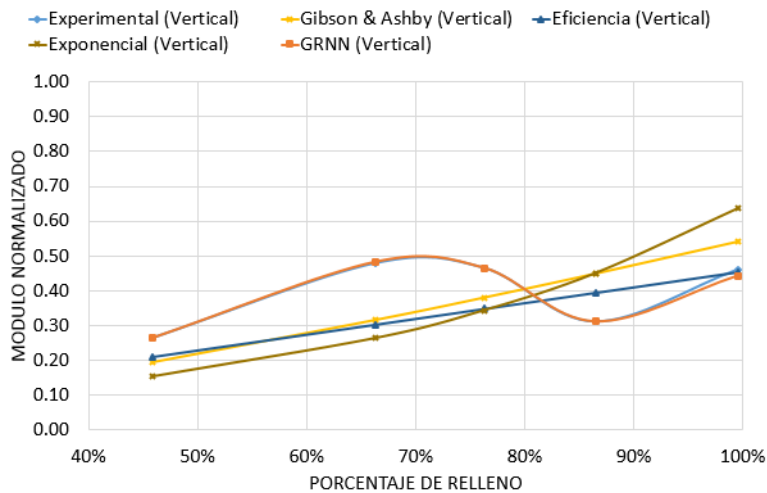
con tres modelos analíticos: Gibson & Ashby, Eficiencia y Exponencial. La Figura 4.16 muestra los resultados experimentales, los resultados de los modelos analíticos y los resultados del modelo GRNN para el módulo elástico en las tres orientaciones. En la orientación plana, Figura 4.16a, los resultados de las GRNN describen con gran precisión el comportamiento experimental, mientras que los modelos analíticos tienen una buena tendencia en comparación con los resultados experimentales, pero en algunos valores el error es alto. De igual manera, para la orientación en el borde, Figura 4.16b, las GRNN describen el comportamiento experimental con gran precisión y los modelos analíticos tienen la misma tendencia creciente pero las predicciones quedan por debajo de los resultados experimentales. Respecto a la orientación vertical, Figura 4.16c, los resultados de los modelos analíticos presentan un comportamiento suavizado en comparación con el GRNN y el experimental.



a)



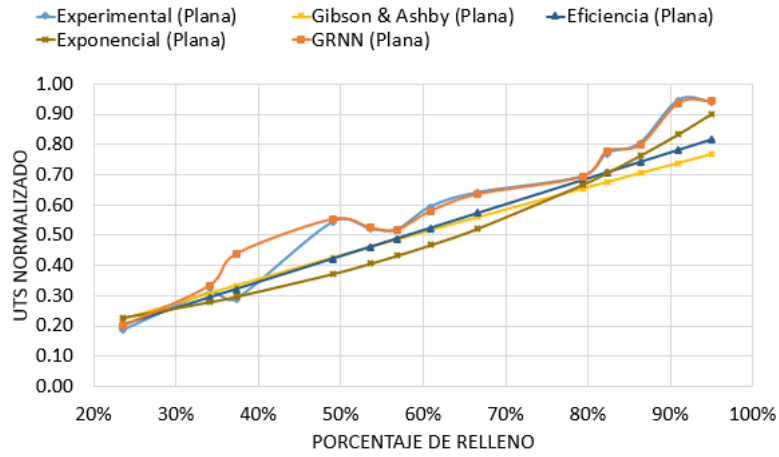
b)



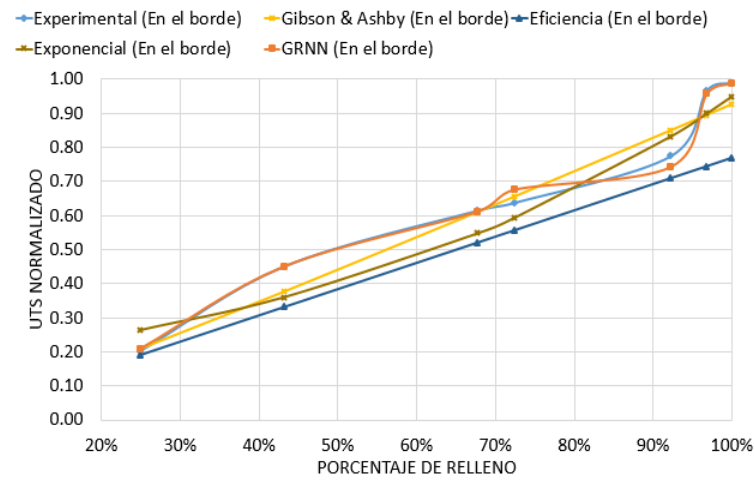
c)

Figura 4.16. Comparación de resultados para el módulo elástico: a) orientación plana, b) orientación en el borde, c) orientación vertical.

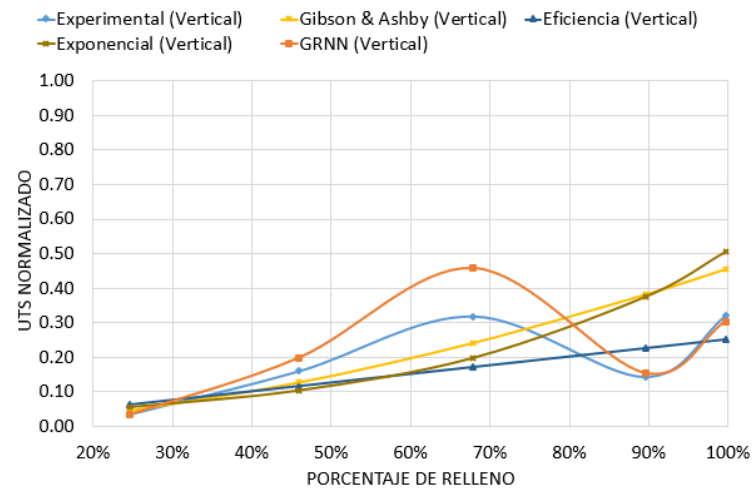
La Figura 4.17 muestra los resultados experimentales, los resultados de los modelos analíticos y los resultados del modelo GRNN para el UTS. En esta figura se observa que en la orientación plana, Figura 4.17a las predicciones del modelo GRNN tienen la misma tendencia que los resultados experimentales; sin embargo, presentan una importante diferencia en el rango 30 a 40% de relleno. Respecto a los modelos analíticos, se puede observar que mantienen la misma tendencia creciente pero sus valores se encuentran por debajo de los resultados experimentales. Con respecto a la orientación en el borde, Figura 4.17b se puede observar que los resultados de los modelos Exponencial y Gibson y Ashby demuestran la misma tendencia que los resultados experimentales; sin embargo, las GRNN representan con precisión el comportamiento experimental. En cuanto a la orientación vertical, Figura 17b, los modelos analíticos tienen unas líneas suavizadas en comparación de los cambios abruptos experimentales. Además se puede observar que el modelo GRNN presenta diferencias considerables en comparación con las otras orientaciones.



a)



b)



c)

Figura 4.17. Comparación de resultados para el UTS: a) orientación plana, b) orientación en el borde, c) orientación vertical.

Para tener una visión más clara y general del comportamiento de los modelos analíticos y el modelo GRNN, se determinaron los valores promedio de los errores de predicción, así como sus respectivas desviaciones estándar, de cada uno de los modelos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.13 para el módulo elástico, y Tabla 4.14 para el UTS.

Tabla 4.13. Resultados de errores de estimación para el módulo elástico.

Modelo	Error (%)			Error general (%)
	Orientación plana	Orientación en el borde	Orientación vertical	
GRNN	0.93 ± 1.98	-1.57 ± 2.77	-0.67 ± 1.87	-0.43 ± 2.21
Gibson y Ashby	-5.24 ± 9.36	-13.53 ± 10.25	-3.24 ± 33.46	-7.34 ± 17.69
Eficiencia	-5.45 ± 9.68	-16.38 ± 7.25	-11.42 ± 24.96	-11.09 ± 13.96
Exponencial	-6.13 ± 17.12	-20.19 ± 11.11	-5.96 ± 43.93	-10.76 ± 24.05

Tabla 4.14. Resultados de errores de estimación para el UTS.

Modelo	Error (%)			Error general (%)
	Orientación plana	Orientación en el borde	Orientación vertical	
GRNN	5.12 ± 14.26	0.62 ± 3.30	14.19 ± 19.82	6.64 ± 12.46
Gibson y Ashby	-7.99 ± 12.57	-2.08 ± 8.69	39.24 ± 77.16	9.72 ± 32.80
Eficiencia	-7.38 ± 9.37	-16.08 ± 8.08	7.8 ± 55.75	-5.22 ± 24.40
Exponencial	-9.75 ± 13.51	-1.39 ± 16.55	41.39 ± 82.51	10.08 ± 37.52

Como se puede observar en la Tabla 4.13, para la orientación plana el modelo con el menor error promedio es el GRNN con 0.93%, mientras que los modelos analíticos andan en alrededor de -5.50% de error promedio. De igual manera en la orientación en el borde, el modelo de GRNN tiene el menor error promedio mientras que el mayor error encontrado fue -20.19%, correspondiente al modelo Exponencial. En la orientación vertical el modelo GRNN presenta el error mínimo promedio de -0.67%, seguido por Gibson & Ashby con un -3.25%.

Respecto al UTS, la Tabla 4.14 muestra que en la orientación plana el modelo GRNN tiene un error promedio de 5.12%, mientras que los modelos analíticos sub-predicen el comportamiento al tener valores negativos de error, siendo el mejor el modelo de Eficiencia con un error promedio de -7.38%. En cuanto a la orientación en el borde, se observa que el error del modelo GRNN es mínimo en comparación con los modelos analíticos, de los cuales el que presenta menor error promedio de predicción es el modelo Exponencial con

-1.40%. Respecto a la orientación vertical, el valor más pequeño de error de predicción corresponde al modelo de Eficiencia, seguido del modelo GRNN.

Por lo anterior, se puede concluir que los modelos de predicción GRNN presentan gran nivel de precisión en las estimaciones del comportamiento estructural de componentes fabricados mediante FDM. Además, se demuestra que la IA es una herramienta muy poderosa ya que puede utilizarse en cualquier ámbito siempre y cuando se tenga una cantidad considerable de datos y el conocimiento adecuado de su funcionamiento.

4.7. Predicción de propiedades para cualquier orientación

Los modelos analíticos y numéricos analizados anteriormente consideran la predicción de propiedades estructurales en direcciones ortogonales y paralelas a los ejes de fabricación de los sistemas FDM. De manera más específica, los modelos anteriores son capaces de predecir las propiedades estructurales en el plano de la capa y en dirección perpendicular a la capa. Sin embargo, en ocasiones los componentes fabricados pueden tener cualquier orientación, no necesariamente ortogonal a los ejes de fabricación, o en ocasiones la dirección de las cargas estructurales en el componente fabricado puede no coincidir con las direcciones de los ejes de fabricación. En estos casos es necesario contar con un modelo que permita determinar las propiedades estructurales en cualquier dirección.

4.7.1. Modelo elipsoidal propuesto

El modelo propuesto para determinar las propiedades estructurales en cualquier dirección u orientación del componente FDM, corresponde a un elipsoide en el cual se consideran las orientaciones Θ y Φ , como se muestra en la Figura 4.18. El ángulo Θ representa la orientación con respecto al eje X y el ángulo Φ corresponde a la orientación con respecto al plano XY. El modelo elipsoidal propuesto se define mediante la siguiente ecuación para el caso del módulo elástico:

$$\frac{E_1^2}{E_x^2} + \frac{E_2^2}{E_y^2} + \frac{E_3^2}{E_z^2} = 1 \quad (4-6)$$

donde E_x , E_y , y E_z son los valores del módulo elástico calculados mediante modelos analíticos en dirección paralela a los ejes de fabricación X, Y, y Z, respectivamente, y E_1 , E_2 , y E_3 son los valores de módulo elástico para cualquier orientación.

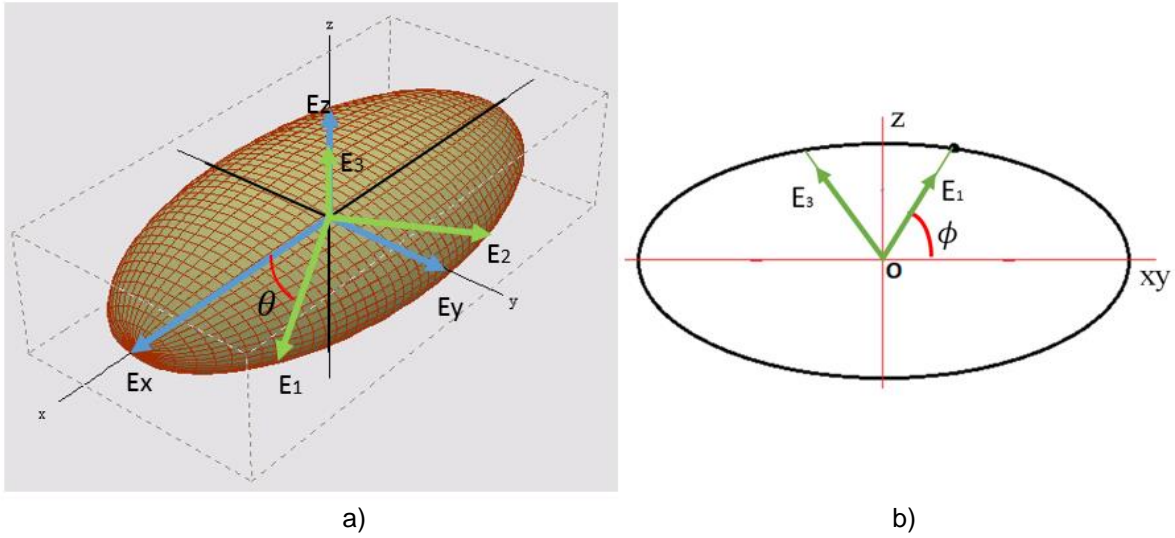


Figura 4.18. Esquema del modelo elipsoidal para cualquier orientación: a) orientación con respecto al eje x, b) orientación con respecto al plano XY.

A partir de la ecuación anterior y mediante el uso de identidades trigonométricas se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$E_1 = \frac{E_x E_y E_z}{\sqrt{E_z^2 \cos^2 \phi (E_y^2 \cos^2 \theta + E_x^2 \sin^2 \theta) + E_x^2 E_y^2 \sin^2 \phi}} \quad (4-7)$$

$$E_2 = \frac{E_x E_y}{\sqrt{(E_y^2 \sin^2 \theta + E_x^2 \cos^2 \theta)}} \quad (4-8)$$

$$E_3 = \frac{E_x E_y E_z}{\sqrt{E_z^2 \sin^2 \phi (E_y^2 \cos^2 \theta + E_x^2 \sin^2 \theta) + E_x^2 E_y^2 \cos^2 \phi}} \quad (4-9)$$

donde E_1 , E_2 , E_3 son los valores de módulo elástico en la dirección deseada, θ y ϕ los ángulos de orientación dentro de la cámara de fabricación, como se muestra en la Figura 4.18, y E_x , E_y , E_z son los valores de módulo elástico en dirección de los ejes de fabricación y calculados mediante modelos analíticos tomando en cuenta el porcentaje de relleno de la pieza y las constantes experimentales.

En el caso del UTS, el modelo elipsoidal se define como:

$$\frac{UTS_1^2}{UTS_x^2} + \frac{UTS_2^2}{UTS_y^2} + \frac{UTS_3^2}{UTS_z^2} = 1 \quad (4-10)$$

donde UTS_x , UTS_y , y UTS_z son los valores del esfuerzo calculados mediante modelos analíticos en dirección paralela a los ejes de fabricación X, Y, y Z, respectivamente, y UTS_1 , UTS_2 , y UTS_3 son los valores de esfuerzo para cualquier orientación.

A partir de la ecuación anterior y mediante el uso de identidades trigonométricas se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$UTS_1 = \frac{UTS_x UTS_y UTS_z}{\sqrt{UTS_z^2 \cos^2 \phi (UTS_y^2 \cos^2 \theta + UTS_x^2 \sin^2 \theta) + UTS_x^2 UTS_y^2 \sin^2 \phi}} \quad (4-11)$$

$$UTS_2 = \frac{UTS_x UTS_y}{\sqrt{(UTS_y^2 \sin^2 \theta + UTS_x^2 \cos^2 \theta)}} \quad (4-12)$$

$$UTS_3 = \frac{UTS_x UTS_y UTS_z}{\sqrt{UTS_z^2 \sin^2 \phi (UTS_y^2 \cos^2 \theta + UTS_x^2 \sin^2 \theta) + UTS_x^2 UTS_y^2 \cos^2 \phi}} \quad (4-13)$$

donde UTS_1 , UTS_2 , UTS_3 son los valores del esfuerzo en la dirección deseada, θ y ϕ los ángulos de orientación dentro de la cámara de fabricación, como se muestra en la Figura 4.18, y UTS_x , UTS_y , UTS_z son los valores del esfuerzo en dirección de los ejes de fabricación y calculados mediante modelos analíticos tomando en cuenta el porcentaje de relleno de la pieza y las constantes experimentales.

4.7.2. Evaluación del modelo propuesto

Con los modelos elipsoidales anteriormente propuestos se calcularon las propiedades del módulo elástico y UTS considerando los modelos analíticos de Gibson & Ashby (ecuación 2-4), Eficiencia (ecuación 2-2) y Exponencial (ecuación 4-5) para el cálculo de las propiedades a lo largo de los ejes ortogonales de fabricación X, Y, y Z. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados experimentales obtenidos y reportados en la sección 3.4 (Tabla 3.13) de esta tesis. Las Tablas 4.15 y 4.16 presentan de forma resumida

los resultados experimentales y los resultados estimados mediante el modelo elipsoidal propuesto para para el módulo elástico y el UTS, respectivamente. Cabe mencionar, que la comparación de cada propiedad se realizó únicamente para la dirección principal (E_1 , UTS₁) utilizando el porcentaje de relleno real de las piezas.

Tabla 4.15. Comparación de resultados del modelo elipsoidal para el módulo elástico.

Orientación (°)		% de relleno (%)	Experimental	Modelo elipsoidal (Gibson & Ashby)		Modelo elipsoidal (Eficiencia)		Modelo elipsoidal (Exponencial)	
θ	ϕ		E_1	E_1 calculado	Error (%)	E_1 calculado	Error (%)	E_1 calculado	Error (%)
45	0	34	0.2989	0.2157	-27.82	0.2333	-21.95	0.2238	-25.14
45	0	49	0.4402	0.3335	-24.24	0.3419	-22.32	0.3005	-31.74
45	0	96	0.8463	0.7083	-16.31	0.6665	-21.25	0.7247	-14.37
45	30	32	0.1608	0.1661	3.3	0.1911	18.82	0.1613	0.34
45	30	56	0.3206	0.3305	3.08	0.3344	4.3	0.2785	-13.15
45	30	95	0.5954	0.6348	6.62	0.573	-3.76	0.6662	11.9
45	60	30	0.1607	0.12	-25.3	0.1476	-8.18	0.1123	-30.11
45	60	52	0.3029	0.2444	-19.33	0.2537	-16.23	0.196	-35.31
45	60	92	0.6575	0.5229	-20.47	0.4545	-30.88	0.5534	-15.83
30	0	34	0.2658	0.226	-14.95	0.2368	-10.89	0.2276	-14.36
30	0	49	0.3644	0.3412	-6.36	0.346	-5.06	0.3052	-16.25
30	0	98	0.7039	0.7157	1.66	0.6876	-2.32	0.7643	8.58
30	30	29	0.2167	0.1548	-28.54	0.1781	-17.82	0.1538	-29.04
30	30	58	0.2802	0.3518	25.58	0.3519	25.6	0.2974	6.14
30	30	95	0.4051	0.6244	54.14	0.5717	41.14	0.6619	63.4
30	60	29	0.1297	0.1167	-10.02	0.1441	11.09	0.1103	-14.96
30	60	50	0.3313	0.2368	-28.54	0.2475	-25.29	0.1897	-42.75
30	60	94	0.3747	0.5357	42.98	0.4642	23.9	0.5814	55.16
60	0	33	0.252	0.2003	-20.52	0.2241	-11.06	0.2166	-14.02
60	0	47	0.3894	0.312	-19.89	0.3256	-16.38	0.286	-26.55
60	0	94	0.7027	0.6971	-0.8	0.644	-8.35	0.6839	-2.67
60	30	31	0.1767	0.1576	-10.84	0.1853	4.85	0.1575	-10.88
60	30	57	0.1989	0.3408	71.34	0.3431	72.51	0.2876	44.61
60	30	94	0.658	0.6266	-4.78	0.5604	-14.84	0.6382	-3.01
60	60	29	0.2335	0.1118	-52.12	0.1401	-39.99	0.108	-53.76
60	60	49	0.3235	0.2256	-30.26	0.2389	-26.15	0.1813	-43.94
60	60	93	0.3927	0.5293	34.8	0.4576	16.54	0.5627	43.29
			Promedio	-4.36	Promedio	-3.11	Promedio	-7.57	
			DESV. STD.	28.37	DESV. STD.	24.42	DESV. STD.	29.92	

En cuanto al módulo elástico la Tabla 4.15 muestra que el modelo elipsoidal propuesto en combinación con cualquiera de los tres modelos analíticos sub-predicen el comportamiento

estructural ya que todos presentan un error promedio negativo. La combinación que mejor predice el comportamiento del módulo elástico es el modelo elipsoidal con el modelo de Eficiencia, teniendo un error promedio de -3.11% y una desviación estándar de 24.42. Además, se puede observar que los errores promedio obtenidos son relativamente pequeños llegando a un error máximo de -7.57%, mientras que los valores de desviación estándar son similares entre los 3 modelos. De esta manera se puede decir que los valores estimados por el modelo elipsoidal propuesto son aceptables y confiables.

Tabla 4.16. Comparación de resultados del modelo elipsoidal para el UTS.

Orientación (°)		% de relleno (%)	Número capas contorno	Experimental	Modelo elipsoidal (Gibson & Ashby)		Modelo elipsoidal (Eficiencia)		Modelo elipsoidal (exponencial)	
				UTS ₁	UTS ₁ calculado	Error (%)	UTS ₁ calculado	Error (%)	UTS ₁ calculado	Error (%)
θ	φ									
45	0	34	1	0.2325	0.2953	27.01	0.2948	26.81	0.2906	25
45	0	49	2	0.3782	0.4304	13.79	0.4321	14.26	0.3867	2.24
45	0	96	2	0.8114	0.8259	1.79	0.8423	3.81	0.9042	11.43
45	30	32	1	0.0736	0.1274	73.15	0.1742	136.69	0.1259	71.1
45	30	56	2	0.185	0.2958	59.89	0.3049	64.81	0.2416	30.57
45	30	95	2	0.4789	0.6304	31.62	0.5224	9.09	0.6719	40.3
45	60	30	1	0.0881	0.0722	-17.99	0.1105	25.43	0.0742	-15.77
45	60	52	2	0.1786	0.1746	-2.25	0.19	6.4	0.1394	-21.96
45	60	92	2	0.3997	0.4458	11.53	0.3404	-14.84	0.4538	13.54
30	0	34	1	0.2546	0.301	18.22	0.2939	15.4	0.2847	11.82
30	0	49	2	0.3223	0.4299	33.4	0.4293	33.2	0.3816	18.39
30	0	98	2	0.7335	0.8167	11.34	0.8531	16.3	0.9509	29.64
30	30	29	1	0.0738	0.1138	54.18	0.1611	118.32	0.1177	59.44
30	30	58	2	0.3028	0.3154	4.16	0.3184	5.16	0.2585	-14.62
30	30	95	2	0.7849	0.6157	-21.55	0.5173	-34.08	0.6635	-15.46
30	60	29	1	0.1013	0.0694	-31.54	0.1077	6.3	0.0726	-28.38
30	60	50	2	0.2471	0.1674	-32.26	0.1851	-25.1	0.1341	-45.74
30	60	94	2	0.5998	0.4591	-23.46	0.3472	-42.13	0.4793	-20.1
60	0	33	1	0.1979	0.2821	42.59	0.2885	45.8	0.2928	47.97
60	0	47	2	0.3389	0.4145	22.28	0.4192	23.67	0.3799	12.1
60	0	94	2	0.7503	0.8326	10.97	0.8291	10.5	0.8581	14.37
60	30	31	1	0.0844	0.1221	44.63	0.1702	101.65	0.1236	46.4
60	30	57	2	0.2878	0.3101	7.76	0.3152	9.53	0.2536	-11.86
60	30	94	2	0.8385	0.6245	-25.52	0.5148	-38.6	0.6428	-23.33
60	60	29	1	0.0985	0.0665	-32.53	0.1051	6.65	0.0711	-27.85
60	60	49	2	0.2619	0.1586	-39.44	0.1792	-31.59	0.1279	-51.17
60	60	93	2	0.617	0.4526	-26.64	0.3432	-44.37	0.4632	-24.92
				Promedio	7.97		Promedio	16.63	Promedio	4.93
				DESV. STD.	31.41		DESV. STD.	45.69	DESV. STD.	32.1

En el caso del UTS, Tabla 4.16, el modelo elipsoidal propuesto en combinación con cualquiera de los tres modelos analíticos sobre predicen el comportamiento estructural, ya que presentan errores promedio positivos. Además, el modelo elipsoidal propuesto en combinación con el modelo exponencial presenta el mejor desempeño de predicción con un error promedio menor al 5%, lo cual es muy aceptable. De igual manera se puede observar que los valores mayores de error se obtienen cuando la probeta presenta únicamente una capa de perímetro. En cuanto a los otros modelos, el modelo de Eficiencia combinado con el elipsoidal presenta el error promedio y desviación estándar máximos, llegando a 16.63% y 45.69 respectivamente.

En general se puede concluir que el modelo elipsoidal propuesto es robusto y confiable ya que presenta estimaciones de error relativamente bajas, por lo que es capaz de predecir con buena precisión el comportamiento estructural (módulo elástico y UTS) en cualquier orientación de fabricación. Dicho modelo es de gran utilidad ya que describe el comportamiento a nivel macro basado únicamente en dos parámetros de proceso FDM, en la materia prima y en la orientación dentro del espacio de trabajo. Esto es conveniente para el proceso de diseño, ya que el diseñador podrá estimar las propiedades de la pieza utilizando la orientación de la misma y el porcentaje de relleno. Este modelo representa un gran avance dentro del campo de generación de conocimientos de DfAM, buscando que las tecnologías AM puedan ser utilizadas dentro de la línea de producción de productos finales.

5. Comportamiento a la fatiga de probetas FDM

5.1. Metodología experimental

Con el objetivo de generar mayor conocimiento acerca del comportamiento de componentes fabricados mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM), se decidió fabricar probetas de PLA para evaluar el comportamiento a la fatiga. Se propuso utilizar un Diseño de Experimentos (DOE) con el fin de optimizar el procedimiento experimental, tomando en cuenta el tiempo de ensayo y la disponibilidad del equipo.

La Figura 5.1 muestra la metodología experimental desarrollada para evaluar el comportamiento a fatiga de las probetas. Dicha metodología incluye la caracterización del filamento utilizado, la selección de los parámetros del proceso (orientación de fabricación y porcentaje de relleno), la fabricación de las probetas basada en un DOE, la medición de las dimensiones y peso para calcular el porcentaje de relleno real, ensayos a tensión de las probetas, la selección de las características de los ensayos a fatiga, el análisis de los datos experimentales y, por último, la normalización de los resultados.

5.1.1. Caracterización del filamento

Con el fin de caracterizar la materia prima utilizada, se procedió a realizar ensayos a tensión al filamento para obtener sus propiedades mecánicas, tales como el UTS, el módulo de elasticidad y la elongación, como se describió anteriormente (Capítulo 3). Los ensayos a tensión se llevaron a cabo en una Máquina Universal Shimadzu modelo AG-100K a una velocidad de 5 mm/min, a temperatura ambiente. Se utilizaron 3 rollos diferentes de materia prima marca Color Plus, de los cuales se tomaron 3 muestras de 165 mm de largo para ser ensayadas. En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de las propiedades de la materia prima, los cuales fueron utilizados para la normalización de los resultados.

Tabla 5.1. Propiedades de la materia prima.

No. de rollo	UTS (MPa)	Módulo elástico (MPa)	Elongación (%)
1	56.52 ± 2.76	1984.33 ± 69.75	14.01 ± 1.44
2	59.11 ± 0.92	2188.18 ± 23.40	15.88 ± 0.16
3	46.56 ± 0.61	1968.77 ± 39.65	16.15 ± 0.37

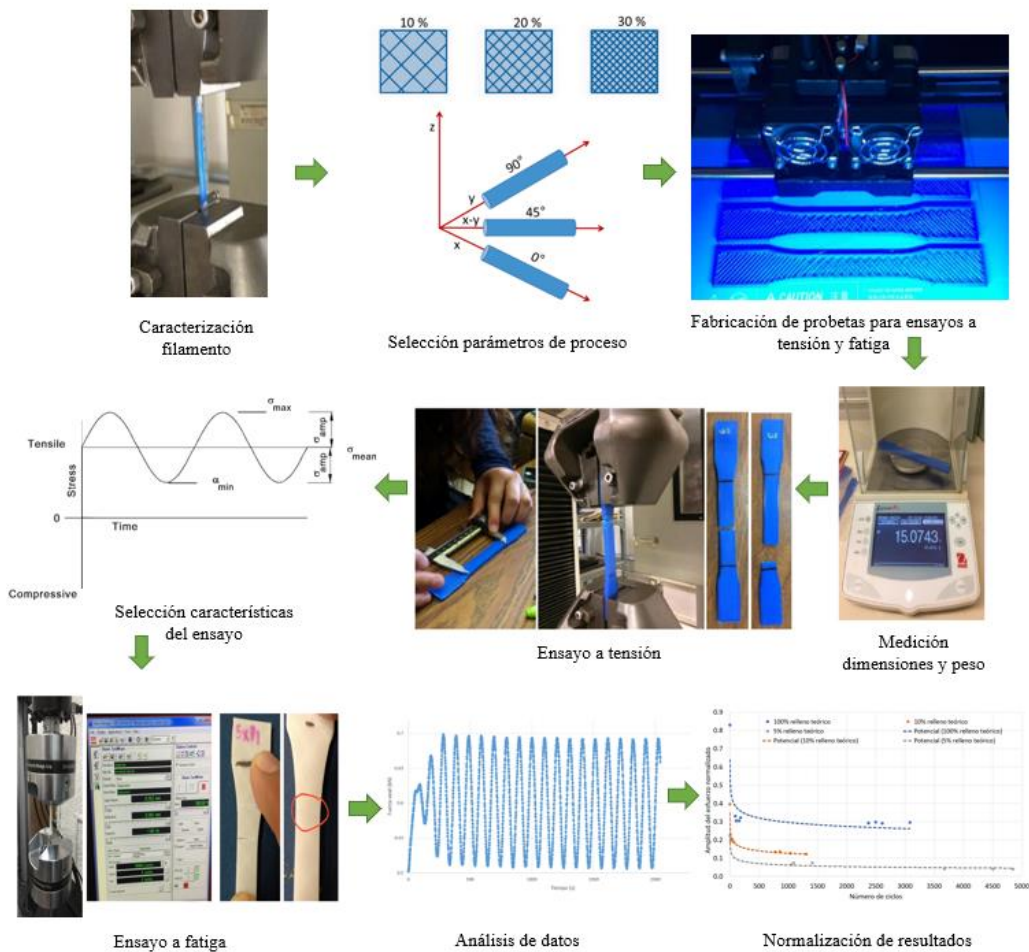


Figura 5.1. Metodología para ensayos a fatiga.

5.1.2. Selección de parámetros de proceso

Para seleccionar los parámetros de proceso a utilizar en la fabricación de las probetas de los ensayos a fatiga, se realizó un estudio de literatura identificando los parámetros y las condiciones de ensayo utilizadas previamente. La Tabla 5.2 muestra una compilación de los estudios y valores utilizados en la literatura. En esta Tabla se puede observar que el parámetro más estudiado es la orientación de fabricación ya que, como se ha mencionado anteriormente, dicho parámetro tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de piezas FDM. Además, se muestra que el porcentaje de relleno no ha sido estudiado, siendo también uno de los parámetros que más influyen en el comportamiento mecánico. Adicionalmente, se observa que una de las principales condiciones del ensayo es el nivel de esfuerzo con respecto al UTS de las probetas ensayadas a fatiga.

Con base al estudio de literatura se seleccionaron la orientación de fabricación y el porcentaje de relleno como los parámetros a considerar en la fabricación de probetas. La

Tabla 5.3 muestra los valores seleccionados de dichos parámetros y la Figura 5.2 muestra las tres orientaciones de fabricación seleccionadas. Además, se establece como condición de ensayo a la fatiga el nivel de esfuerzo con respecto al UTS, por lo cual surge la necesidad de realizar ensayos a tensión de las probetas.

Tabla 5.2. Parámetros FDM y características de ensayos de fatiga reportados en la literatura.

Referencia	Año	Material	Norma	Tipo probeta	Parámetros a analizar	Características del ensayo de fatiga
J. Lee, A. Huang [31]	2013	ABS	UNI EN ISO 527-1(1997)	Probeta a tensión	Orientación de fabricación	Número máximo de ciclos: 10 000 Número de probetas por ensayo: 3 Niveles de esfuerzo: 40, 60 y 80% del UTS
S. Ziemian et al. [32]	2015	ABS	ASTM D7791(2012)	Probeta a tensión	Orientación del filamento Solo una orientación de fabricación	Niveles de esfuerzo: 45, 60, 75 y 90% del UTS Relación de esfuerzo (R): 0.1 Temperatura ambiente Frecuencia: 0.25 Hz
C. Lee et al. [34]	2015	ABS	ASTM D7774-12	Probeta a tensión	Espesor de capa Ancho de extrusión Orientación de fabricación Velocidad de alimentación Distancia entre filamentos depositados	Número de probetas por ensayo: 3
C.W. Ziemian [33]	2016	ABS	ASTM D7791	Probeta a tensión	Nivel máximo de esfuerzo de UTS Orientación de filamentos	Temperatura ambiente Frecuencia: 0.25 Hz Número máximo de ciclos: 17 500 Relación de esfuerzo (R): 0.1 Número de probetas por ensayo: 4
M.A. Afrose et al. [38]	2016	PLA	ASTM D638	Probeta a tensión	Orientación de fabricación	Número de probetas por ensayo: 1 Frecuencia: 1 Hz Temperatura ambiente Niveles de esfuerzo: 50, 60, 70 y 80% del UTS Número máximo de ciclos: 5000

* UTS – Resistencia última a la tensión

Tabla 5.2. Parámetros FDM y características de ensayos de fatiga reportados en la literatura (cont.).

Referencia	Año	Material	Norma	Tipo probeta	Parámetros a analizar	Características del ensayo de fatiga
V. Schöppner et al. [81]	2016	ULTEM 9085: Mezcla de Polieterimida (PEI) con Policarbonato (PC)	ASTM D638	Probeta a tensión	Orientación de fabricación	Frecuencia: 5 Hz Esfuerzo mínimo: 20N Esfuerzo máximo: variable Número de probetas por ensayo: 5
M.M. Padzi et al. [37]	2017	ABS	ASTM D638	Probeta a tensión	Comparación entre probetas FDM-ABS y ABS fundida	Frecuencia: 1 Hz Carga cíclica: Tensión – Tensión Relación de esfuerzo (R): 0 Niveles de esfuerzo: 40, 60 y 80% del UTS Hasta la fractura
M. Frascio et al. [35]	2018	ABS	-	Geometría desarrollada por Nicoletto	Orientación de fabricación	Frecuencia: 25 Hz Amplitud del esfuerzo: Rango entre 4 MPa y 33 MPa Número de probetas por ensayo: 2 Modo de falla: Cuando la rigidez disminuía 10% respecto al valor inicial Relación de esfuerzo (R): 0 y -1

Tabla 5.3. Valores de parámetros FDM seleccionados.

Parámetro	Valores
Orientación de fabricación	Plana, en el borde, vertical
Porcentaje de relleno	5%, 10%, 100%

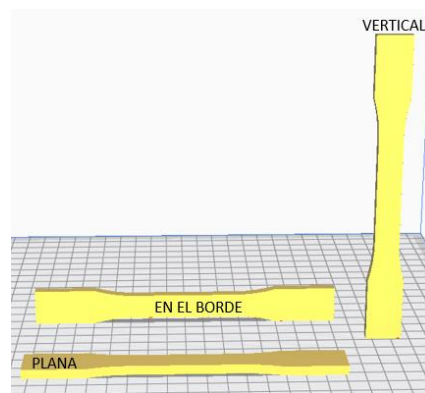


Figura 5.2. Orientaciones de fabricación seleccionadas para ensayo a fatiga.

5.1.3. Fabricación de probetas para ensayos a tensión y fatiga

Para la fabricación de las probetas se eligió un diseño de experimentos de Taguchi debido a que éste reduce significativamente el número de experimentos en comparación con los diseños factoriales. Para ello se propone utilizar un diseño ortogonal L9 de tres factores y

tres niveles cada uno, lo que genera un total de 9 tipos de probetas. En la Tabla 5.4 se presentan los factores con sus niveles, los cuales se definieron tomando en cuenta los parámetros que tienen mayor influencia en el comportamiento mecánico y los datos reportados en la literatura. En la Tabla 5.5 se presenta el arreglo ortogonal para la fabricación de las probetas. Para cada combinación de parámetros se fabricaron 4 probetas con el fin de poder obtener resultados estadísticamente confiables, dando un total de 36 probetas para los ensayos de fatiga. Adicionalmente se fabricaron 27 probetas (3 por cada combinación) para someterlas a ensayos a tensión y obtener los valores UTS. La Figura 5.3 muestra las dimensiones de las probetas utilizadas.

Tabla 5.4. Factores seleccionados con sus niveles.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A. Orientación de fabricación	Plana	En el borde	Vertical
B. Porcentaje de relleno	5% (1 capa perímetro)	10% (2 capas perímetro)	100% (2 capas perímetro)
C. Nivel máximo de esfuerzo	40% con respecto al UTS	60% con respecto al UTS	80% con respecto al UTS

Tabla 5.5. Arreglo ortogonal de Taguchi L9.

Experimentos	A	B	C	Resultado del experimento
1	1	1	1	β_1
2	1	2	2	β_2
3	1	3	3	β_3
4	2	1	2	β_4
5	2	2	3	β_5
6	2	3	1	β_6
7	3	1	3	β_7
8	3	2	1	β_8
9	3	3	2	β_9

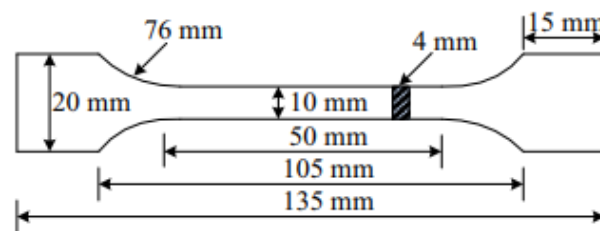


Figura 5.3. Dimensiones utilizadas para probetas a fatiga [38].

5.1.4. Medición de dimensiones y peso

Una vez fabricadas las probetas se midieron sus dimensiones con un calibrador Mitutoyo CD-4" CSX y se calculó el porcentaje de relleno real de las mismas, utilizando el mismo procedimiento descrito anteriormente en el Capítulo 3, sección 3.1.5. La Tabla 5.6 muestra los resultados del porcentaje de relleno real promedio para cada conjunto de parámetros. En esta tabla se puede observar que los valores del porcentaje de relleno real difieren con los valores teóricos debido a las capas de perímetro. Las probetas con el 5% de relleno teórico andan en alrededor de 30% de relleno real, las del 10% de relleno teórico en alrededor de 50% de relleno real, y las del 100% de relleno teórico andan muy cercanas a dicho porcentaje.

Tabla 5.6. Porcentaje de relleno real promedio de probetas a fatiga.

ID Probeta	Orientación	% Relleno teórico	% Relleno real
5x	Plana	5%	31.49%
10x		10%	46.51%
100x		100%	98.92%
5y	En el borde	5%	38.34%
10y		10%	60.62%
100y		100%	99.98%
5z	Vertical	5%	29.81%
10z		10%	53.99%
100z		100%	97.69%

5.1.5. Ensayos a tensión

Los ensayos a tensión para determinar el valor UTS de las probetas se realizaron en una Máquina Universal Shimadzu modelo AG-100 KNI a una velocidad de 5 mm/min según la norma ASTM D638a, a temperatura ambiente, humedad entre 35 y 50% y una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud. Los resultados normalizados con respecto a las propiedades de la materia prima (Tabla 5.1) del esfuerzo último a tensión (UTS), el módulo elástico (E) y la elongación (EB) se presentan en la Tabla 5.7. En esta tabla se puede observar que, como se había comentado anteriormente, los valores UTS en la dirección vertical son mucho menores en comparación con las dos orientaciones restantes. En cuanto a la resistencia a la tensión y el módulo elástico, se puede observar que en la orientación vertical los valores encontrados para el porcentaje de relleno de 100% teórico se encuentran en alrededor del 50% con respecto de la materia prima.

Tabla 5.7. Resultados normalizados de ensayos a tensión estática de las probetas.

Relleno teórico	Orientación	UTS	E	Elongación
5%	Plana	0.1959	0.1922	0.3090
10%		0.3701	0.2790	0.4102
100%		0.7434	0.5700	0.3958
5%	En el borde	0.2514	0.2784	0.3183
10%		0.4206	0.3723	0.3357
100%		0.9144	0.6901	0.3639
5%	Vertical	0.1023	0.1923	0.1273
10%		0.1509	0.2806	0.1183
100%		0.4870	0.4536	0.2650

5.1.6. Selección de características del ensayo de fatiga

Con base en la información reportada en la literatura, los resultados de los ensayos a tensión y el diseño de experimentos descritos anteriormente (secciones 5.1.2 y 5.1.3), se propusieron las características y condiciones de ensayo para fatiga mostradas en las Tablas 5.8 y 5.9.

Tabla 5.8. Características de ensayo a fatiga de probetas FDM.

Parámetro	Valor
Frecuencia	1 Hz
Número de probetas por ensayo	4
Relación de carga máxima y mínima (R)	0.1
Temperatura ambiente	20°C
Humedad	66 y 89%
Altura sobre nivel del mar	9 m

Tabla 5.9. Condiciones de prueba para ensayos de fatiga de probetas FDM.

Relleno Nominal (%)	Orientación	Máximo esfuerzo (% UTS)	Fuerza mínima (N)	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mínimo (mm)	Desplazamiento máximo (mm)
5	Plana	40	17.13	171.32	0.0649	0.6490
10		60	49.28	492.80	0.1318	1.3180
100		80	130.25	1302.50	0.1923	1.9230
5	En el borde	60	34.38	343.79	0.0899	0.8987
10		80	76.63	766.34	0.1865	1.8650
100		40	87.21	872.08	0.1068	1.0677
5	Vertical	80	18.13	181.30	0.0687	0.6870
10		40	13.65	136.46	0.0346	0.3457
100		60	64.03	640.31	0.0896	0.8955

5.1.7. Ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga se realizaron en el CICY (Centro de Investigación Científica de Yucatán) localizado en Mérida, Yucatán, México. Los ensayos se realizaron en una máquina servo hidráulica para ensayos de fatiga axial MTS Landmark modelo 370.35 con capacidad máxima de 250 kN, Figura 5.4. Dichos ensayos se realizaron controlando el

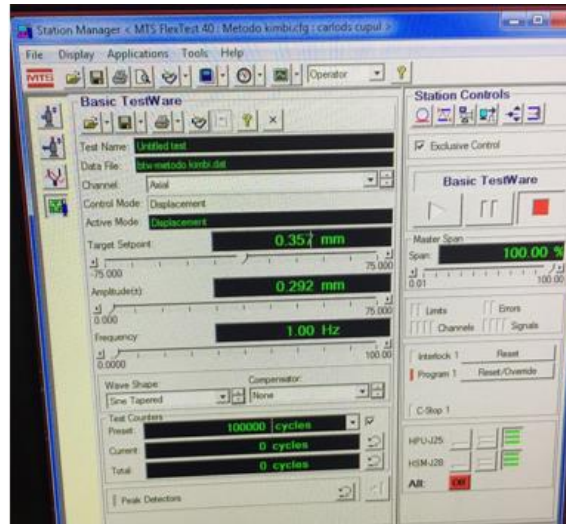
desplazamiento mínimo y máximo para cada conjunto de probetas (Tabla 5.8). Como resultado de los ensayos se obtuvieron el número de ciclos antes de la falla y la fuerza ejercida o aplicada. La Figura 5.5 muestra el proceso de ensayo de fatiga de las probetas, la sujeción, los datos utilizados en el software y el agrietamiento de las mismas.



Figura 5.4. Equipo de ensayo de fatiga MTS Landmark 370.35.



a)



b)

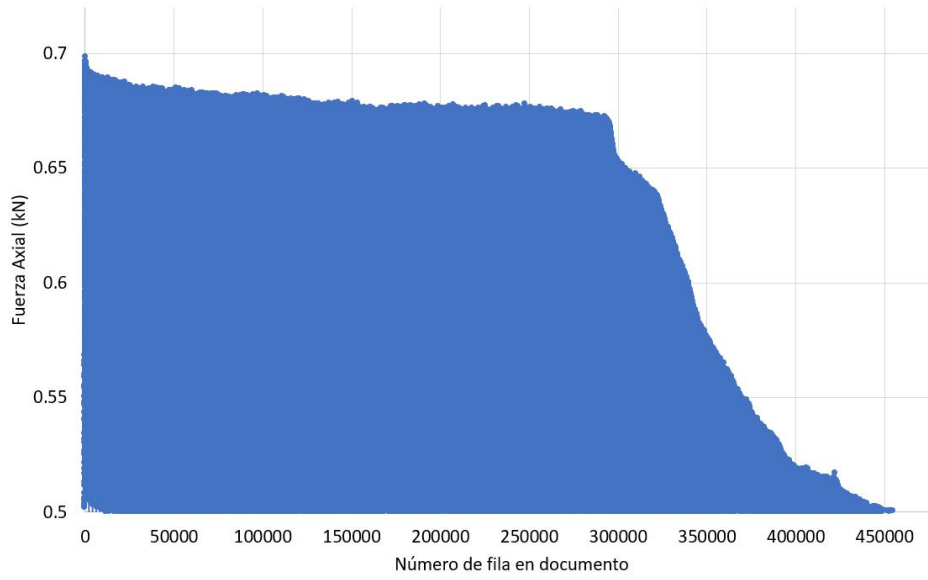


c)

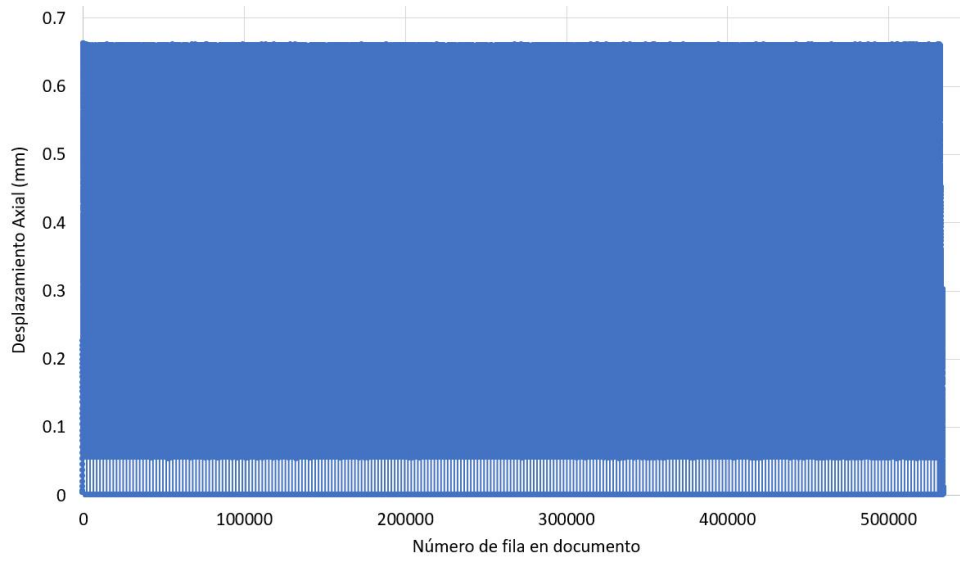
Figura 5.5. Ensayo de fatiga: a) probeta durante ensayo, b) interface de la máquina, c) probetas ensayadas.

5.1.8. Análisis de datos

Posteriormente, se realizó el análisis de los datos donde se calculó el esfuerzo máximo y mínimo para cada conjunto de probetas. Primero, como se mencionó anteriormente, se graficaron los datos obtenidos, Fuerza axial y Desplazamiento axial vs número de fila en el documento, para cada una de las probetas. La Figura 5.6 muestra las gráficas de una probeta ensayada, donde se puede observar que después de cierto tiempo, la fuerza disminuye considerablemente, mientras que el desplazamiento axial permanece estable durante todo el ensayo. Para determinar el número de ciclos se seleccionó el último valor de fuerza axial aplicada antes del decrecimiento de la misma y se graficó nuevamente como se observa en la Figura 5.7. Se utilizó ese criterio ya que cuando la fuerza decrece, significa que ocurre la degradación de las propiedades mecánicas de dichas probetas, por lo que se considera que llega a la falla, aún cuando no haya ocurrido una rotura.



a)



b)

Figura 5.6. Gráfica de resultados obtenidos del ensayo: a) Fuerza axial y b) Desplazamiento axial.

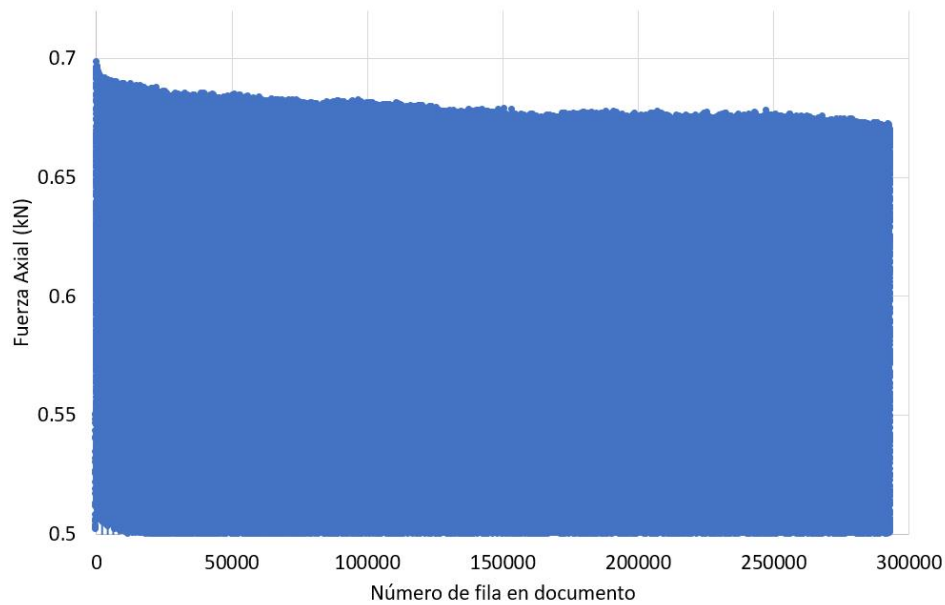


Figura 5.7. Gráfico delimitado de fuerza axial.

Luego, para calcular la fuerza máxima y mínima, y el desplazamiento máximo y mínimo se tomó un fragmento de los valores obtenidos del ensayo y se tomaron seis valores máximos y mínimos de los mismos para, posteriormente, calcular la fuerza máxima y mínima promedio y el desplazamiento máximo y mínimo promedio como se muestra en la Figura 5.8.

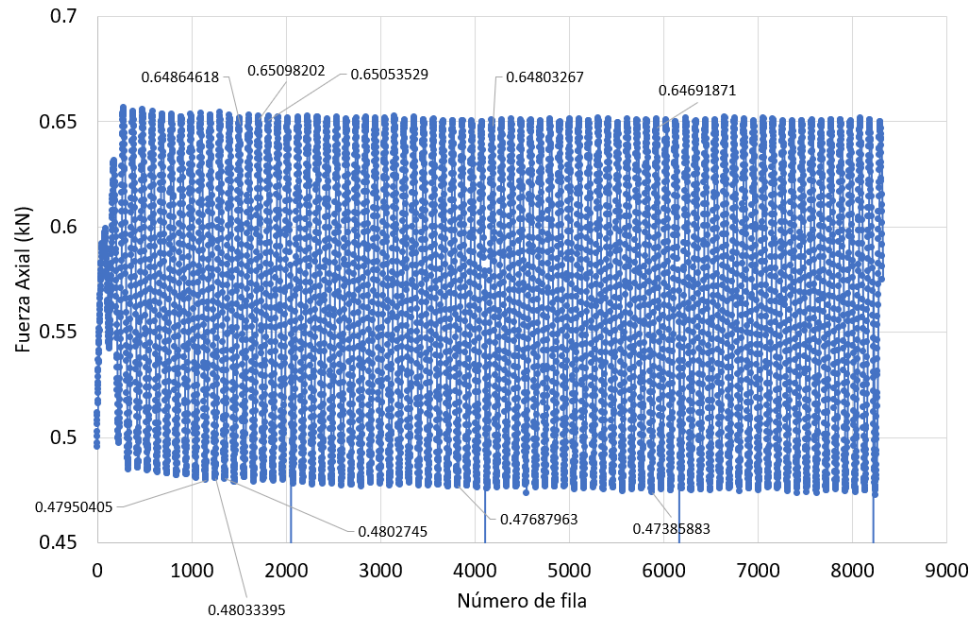
Después se calcularon los esfuerzos máximo y mínimo utilizando la siguiente ecuación 5-1:

$$\sigma_{max/min} = \frac{F_{max/min}}{A_0} \quad (5-1)$$

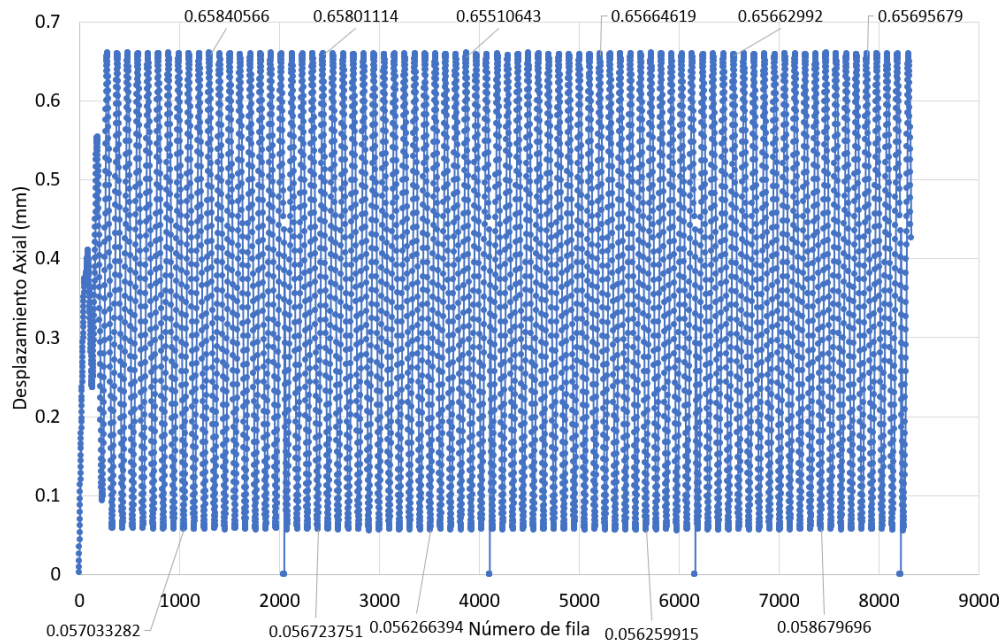
donde $\sigma_{max/min}$ es el esfuerzo máximo y mínimo calculado, $F_{max/min}$ es la fuerza máxima y mínima promedio de cada probeta y A_0 es el área real de la sección transversal de cada probeta. Finalmente, se calculó la amplitud del esfuerzo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5-2)$$

donde $\Delta\sigma$ es la amplitud del esfuerzo calculada, σ_{max} es el esfuerzo máximo y σ_{min} el esfuerzo mínimo en la probeta.



a)



b)

Figura 5.8. Valores máximos y mínimos: a) Fuerza axial y b) Desplazamiento axial.

5.1.9. Normalización de resultados

Continuando con la metodología, se realizó la normalización de los resultados con respecto al valor UTS de la materia prima utilizada para cada probeta (Tabla 5.1). Dicha normalización se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma_{norm} = \frac{\Delta\sigma}{UTS_0} \quad (5-3)$$

donde $\Delta\sigma_{norm}$ es la amplitud del esfuerzo normalizada, $\Delta\sigma$ es la amplitud de esfuerzo de cada probeta y UTS_0 es el esfuerzo último a la tensión de la materia prima utilizada.

5.2. Ensayos de fatiga complementarios

Para complementar la información experimental obtenida respecto al porcentaje de relleno y los valores máximos de UTS, y tener un panorama amplio del comportamiento a la fatiga de las probetas FDM, se decidió ampliar los ensayos de fatiga siguiendo la misma metodología descrita anteriormente. Debido a que el comportamiento a tensión en las orientaciones plana y en el borde no mostró diferencias significativas, únicamente se fabricaron probetas en la orientación plana. Se realizaron cuatro probetas para cada conjunto de parámetros. La Tabla 5.10 muestra las combinaciones seleccionadas y las condiciones de ensayo. Como se muestra, se añadió un nivel al factor de Nivel máximo de esfuerzo para poder abarcar un rango más grande de esfuerzo máximo con respecto al UTS.

Tabla 5.10. Condiciones de prueba para las pruebas de fatiga complementarias.

Relleno teórico (%)	Orientación de fabricación	Nivel máximo de esfuerzo (% UTS)	Desplazamiento mínimo (mm)	Desplazamiento máximo (mm)
5	Plana	20%	0.0399	0.3993
		80%	0.1148	1.1483
10	Plana	20%	0.0224	0.2240
		40%	0.0771	0.7710
100	Plana	20%	0.0640	0.6400
		60%	0.1495	1.4953

De igual manera los ensayos a fatiga se realizaron en el CICY usando el mismo equipo MTS Landmark modelo 370.35 con capacidad máxima de 250 kN, y controlando el desplazamiento mínimo y máximo para cada conjunto de probetas. Como resultado de los ensayos se obtuvieron el número de ciclos a la falla y la amplitud del esfuerzo aplicado, el cual fue normalizado.

5.3. Resultados a la fatiga

Los resultados obtenidos de las pruebas de fatiga se resumen en la Tabla 5.11. En esta tabla se puede observar que el número de ciclos de vida depende del nivel de esfuerzo que se aplique ya que para el caso de las probetas con 5% de relleno teórico y orientación plana, el nivel de esfuerzo llegó hasta un 20% con respecto al UTS mientras que para las probetas con 100% de relleno teórico en la misma orientación, el nivel de esfuerzo fue de 80% con respecto al UTS por lo que el número de ciclos se redujo considerablemente. Por otro lado, se puede observar que las probetas en dirección vertical muestran un comportamiento no uniforme ya que el número de ciclos entre cada probeta presenta una desviación estándar (DS) considerable. Esto se debe al bajo número de probetas y a que la adhesión entre capas representa el mecanismo de falla de dichas probetas. En cuanto a la amplitud del esfuerzo se puede notar que los valores de las desviaciones estándar son muy pequeños, siendo el máximo en la orientación de probetas con 100% de relleno teórico y orientación vertical, lo cual indica que los valores de esfuerzo en general demostraron un comportamiento uniforme y cercano entre ellos. Además, se puede observar que cuando la carga de esfuerzo es significativamente menor (20% respecto al UTS), el número de ciclos incrementa considerablemente como se muestra en las probetas con 5, 10 y 100% de relleno teórico en la orientación plana, llegando a un máximo de 28 000 ciclos aproximadamente. Sin embargo, las probetas con menor porcentaje de relleno presentan una desviación estándar considerable con respecto al número de ciclos que soporta la probeta.

Tabla 5.11. Resultados las pruebas de fatiga.

Probeta			Esfuerzo (desviación estándar)				Vida a la fatiga (ciclos) (desviación estándar)
Relleno teórico (%)	Orientación	Esfuerzo máximo (% UTS)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Amplitud (MPa)	Amplitud normalizada	
5	Plana	20	13.55 (0.5821)	10.12 (0.3497)	1.72 (0.1237)	0.04 (0.0027)	12799 (3050)
5	Plana	40	17.28 (0.5705)	12.73 (0.4082)	2.28 (0.0831)	0.04 (0.0015)	4343 (605)
5	En el borde	60	19.65 (1.6365)	11.69 (1.1131)	3.98 (0.3531)	0.07 (0.0062)	1184 (196)
5	Plana	80	18.14 (0.6387)	8.42 (1.2632)	4.80 (0.6975)	0.10 (0.0033)	537 (277)
5	Vertical	80	17.01 (0.5732)	12.36 (0.4750)	2.32 (0.0583)	0.04 (0.0010)	93 (23)
10	Plana	20	13.20 (0.2576)	9.68 (0.2397)	1.76 (0.0218)	0.04 (0.0005)	28808 (8)
10	Plana	40	20.64 (0.2345)	10.02 (0.0930)	5.31 (0.0881)	0.11 (0.0019)	2732 (420)
10	Vertical	40	15.76 (2.1636)	10.82 (2.2048)	2.47 (0.0650)	0.04 (0.0011)	4437 (3231)
10	Plana	60	26.54 (1.0333)	11.87 (0.3201)	7.33 (0.3584)	0.13 (0.0063)	994 (234)
10	En el borde	80	30.56 (1.3919)	8.50 (0.5693)	11.03 (0.4350)	0.20 (0.0077)	40 (30)
100	Plana	20	25.47 (1.5361)	7.00 (1.5929)	9.23 (0.0740)	0.20 (0.0016)	10477 (2420)
100	En el borde	40	42.51 (0.5404)	9.23 (0.6529)	16.64 (0.1615)	0.29 (0.0029)	2641 (311)
100	Plana	60	42.11 (0.7133)	6.05 (0.6343)	18.03 (0.6648)	0.39 (0.0143)	302 (44)
100	Vertical	60	34.04 (2.8225)	10.36 (1.4344)	11.84 (0.9013)	0.21 (0.0159)	77 (29)
100	Plana	80	39.91 (1.2138)	4.23 (0.3556)	17.84 (0.7126)	0.32 (0.0126)	134 (43)

Del mismo modo que para los ensayos de tensión, se propone separar la orientación vertical y tomar los valores de las orientaciones plana y en el borde como una misma orientación. La Figura 5.9 muestra el comportamiento de las probetas de 5%, 10% y 100% de relleno teórico en las orientaciones plana y en el borde, así como los valores obtenidos en los ensayos de tensión para cada conjunto de probetas con el fin de representar el valor de un solo ciclo. Además se presentan líneas de tendencia basadas en aproximaciones logarítmicas para cada conjunto de probetas. Se puede observar que, con una amplitud de esfuerzo baja el número de ciclos incrementa. Además, se puede observar que el porcentaje de 100% teórico tiene una resistencia mayor a la fatiga en comparación con los dos porcentajes restantes, los cuales se encuentran entre el 5% y 20% con respecto a la materia prima. Por lo tanto, se puede decir que el porcentaje de relleno afecta de manera importante en el comportamiento a la fatiga de piezas fabricadas mediante FDM.

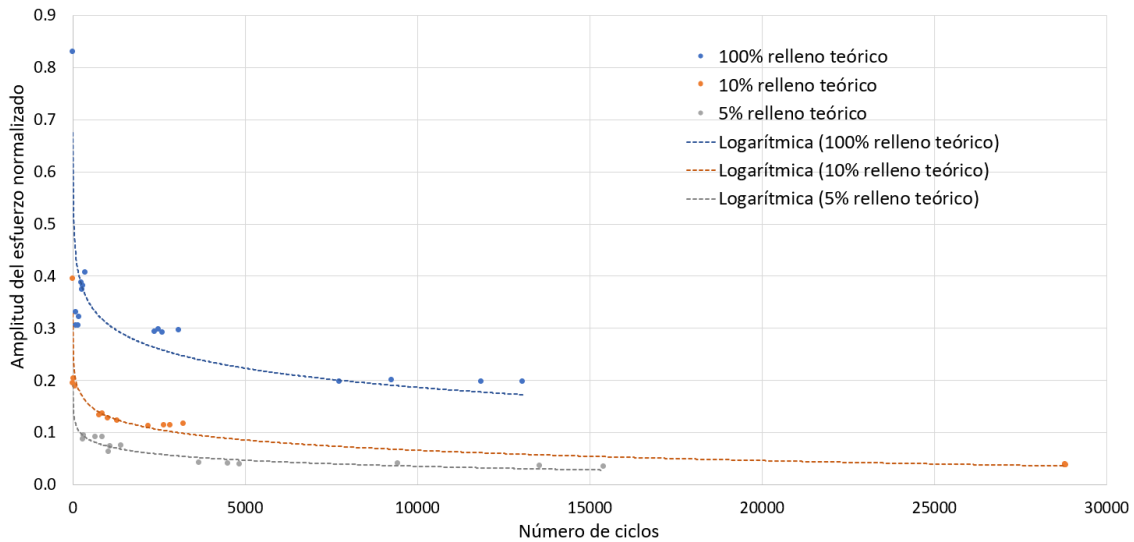


Figura 5.9. Resultados ensayos de fatiga: Amplitud del esfuerzo vs. Número de ciclos.

5.4. Análisis y discusión de resultados

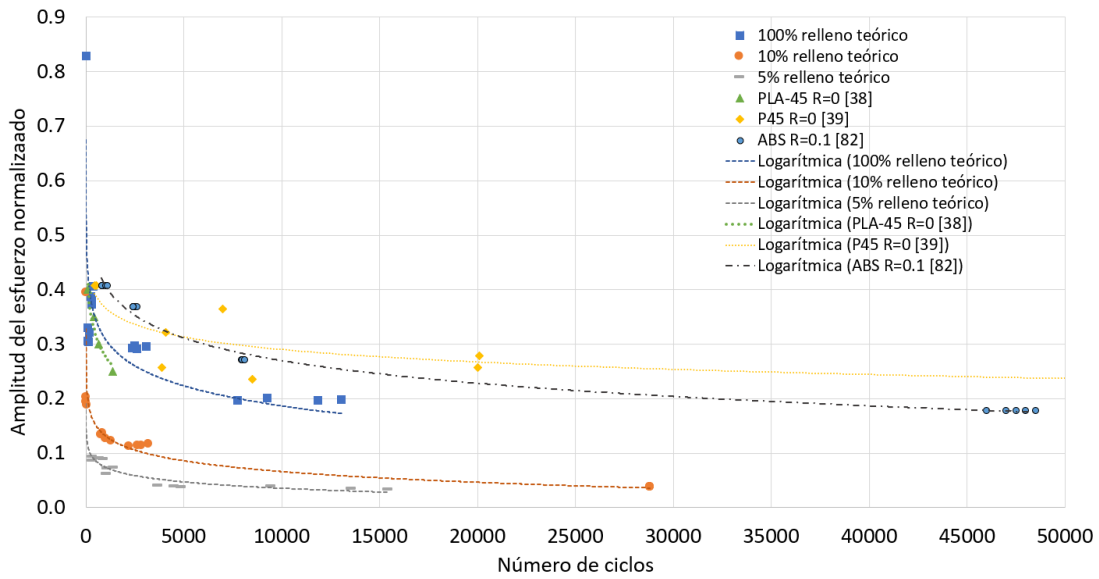
Los resultados obtenidos muestran un comportamiento esperado a la fatiga; a mayor porcentaje de relleno de las probetas, mayor es la amplitud de esfuerzo o resistencia a la fatiga. Además, también se observa que la orientación de fabricación tiene una gran influencia en el comportamiento a la fatiga de las piezas FDM. En la orientación vertical las probetas presentan mayor variación en la cantidad de ciclos que soportan, y los valores de amplitud de esfuerzo son mucho menores respecto a las orientaciones restantes. De igual manera se puede observar que mientras menor sea la amplitud del esfuerzo, mayor será la cantidad de ciclos que soportan las probetas FDM; alcanzando más de 30 000 ciclos sin ruptura. También se observa que el porcentaje de relleno tiene gran influencia en el comportamiento a la fatiga, ya que las probetas de 40% y 100% de relleno teórico presentan mayor resistencia a la fatiga comparadas con las de 5%, las cuales tienen un bajo porcentaje de relleno y únicamente una capa de perímetro. Adicionalmente, se demuestra nuevamente que tanto las orientaciones plana y en el borde no presentan diferencias significativas en el comportamiento a la fatiga, lo cual trae beneficios ya que se puede simplificar el análisis a únicamente dos orientaciones de fabricación.

5.4.1. Comparación de resultados

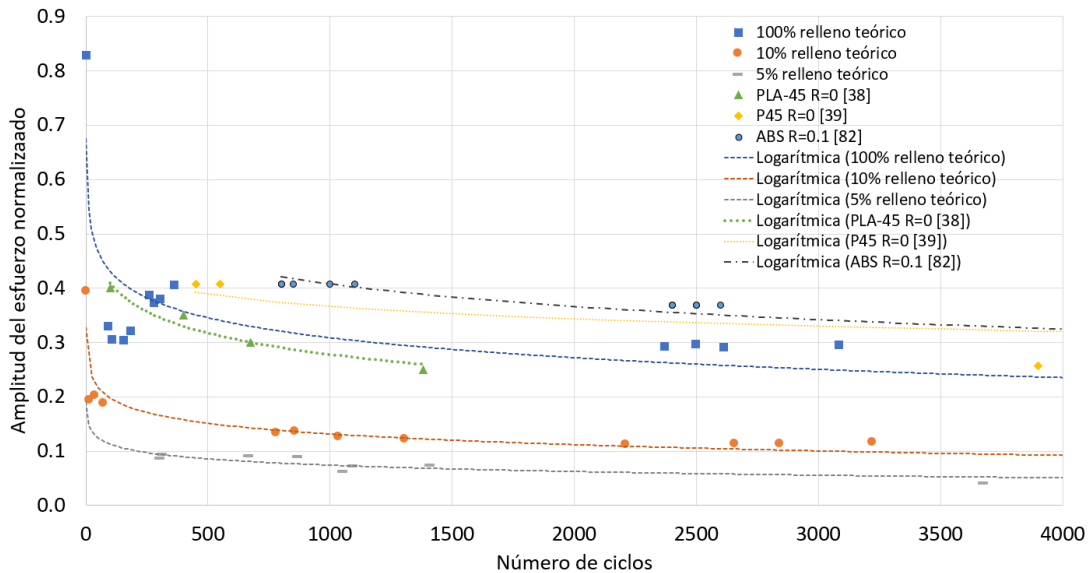
En la Figura 5.10 se comparan los resultados obtenidos con diferentes resultados reportados en la literatura [38,39,82], los cuales fueron realizados a probetas con 100% de relleno teórico, orientación de fabricación similar a la orientación plana y relaciones de carga máxima y mínima (R) iguales a 0 [38, 39] y 0.1 [82]. Adicionalmente se muestran líneas de

tendencia logarítmicas para cada caso. En la Figura 5.10 se observa que los resultados obtenidos tienen la misma tendencia y comportamiento a los reportados en la literatura, por lo que se pueden validar los resultados experimentales obtenidos. Además, se puede observar que las probetas señaladas como “PLA-45 [38]”, las cuales tienen una orientación de relleno coincidente con la orientación plana de este trabajo, presentan valores muy cercanos a los obtenidos en este proyecto (ver Figura 5.7b). Sin embargo, los ciclos obtenidos en dichas probetas (PLA-45 [38]) son mucho menores a los resultados encontrados en este trabajo de tesis. Esto puede deberse a la diferencia en la relación entre el esfuerzo máximo y mínimo, ya que el esfuerzo mínimo utilizado en [38] para su análisis fue igual a 0.

Por otro lado, los resultados de [39] muestran la misma tendencia decreciente que los resultados experimentales obtenidos a diferentes amplitudes de esfuerzo. Sin embargo, los ciclos alcanzados por [39] llegan a un máximo de 1.5×10^6 ciclos cuando tienen relaciones de carga máxima y mínima negativas, lo que indica que el ensayo fue bajo cargas de compresión. Adicionalmente presentan resultados con la relación entre el esfuerzo máximo y mínimo igual a cero. Estos resultados normalizados con el UTS de probetas a tensión reportados en dicha investigación muestran un máximo de 4×10^5 ciclos mientras que los resultados obtenidos en este trabajo llegan a un máximo de 1.5×10^4 ciclos para las probetas con 100% de relleno teórico. Sin embargo, la tendencia de los datos presentados es similar, además se observa mayor variación en el comportamiento a la fatiga de cada conjunto de probetas comparadas con los resultados experimentales obtenidos en esta tesis. Adicionalmente, se puede observar en la Figura 5.7b que algunos puntos experimentales se encuentran muy cercanos a los obtenidos en este proyecto. Los resultados reportados por Jap *et al.* [82] corresponden a probetas de ABS sometidas a fatiga tensión-tensión, logrando una vida máxima de hasta 60 000 ciclos, la cual está cercana a la vida máxima obtenida en este trabajo de tesis, la cual corresponde a 30 000 ciclos de vida pero sin llegar a la falla.



a)



b)

Figura 5.10. Comparación de resultados: a) amplitud de esfuerzo vs números de ciclos completo y b) acercamiento a la zona de bajo ciclaje (hasta 4000 ciclos).

5.4.2. Modelado del comportamiento a la fatiga

Se realizó un análisis de los datos experimentales en el Software ProFatigue, desarrollado por Fernández-Canteli *et al.* [83]. Este software estima a partir de datos experimentales, los parámetros involucrados en el modelo probabilístico de regresión de fatiga de Weibull desarrollado por los autores, permitiendo su aplicación para el diseño a la fatiga de

estructuras y componentes mecánicos utilizando un enfoque basado en esfuerzos o deformaciones. El modelo de Weibull de fatiga se define como:

$$P_f(N, \Delta\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{(\log N - B)(\log \Delta\sigma - C) - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right]; (\log N - B)(\log \Delta\sigma - C) \geq \lambda \quad (5-1)$$

donde P_f es la probabilidad de falla de la probeta, N el número de ciclos a la falla, $\Delta\sigma$ el nivel o amplitud de esfuerzo, B es el parámetro de umbral por vida, C es el parámetro de umbral para nivel de esfuerzo, λ es el parámetro de umbral para la variable normalizada $V=(\log N - B)(\log \Delta\sigma - C)$, δ es el parámetro de escala y β es el parámetro de forma del modelo de Weibull.

En el software ProFatigue se introdujeron los valores de las amplitudes de esfuerzo (MPa) de cada una de las probetas, el número de ciclos a la fatiga y la dimensión de altura de las probetas ensayadas (mm). Posteriormente se graficaron los datos y se seleccionó el modelo probabilístico a utilizar; en este caso Weibull. La Tabla 5.12 muestra los parámetros de ajuste seleccionados en el software para todos los casos experimentales. Una vez definidos dichos valores, se procedió a correr el programa para calcular los parámetros del modelo. La Tabla 5.13 presenta los valores de los parámetros obtenidos para cada porcentaje de relleno teórico. Las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 muestran los resultados de forma gráfica para el 5%, 10% y 100% de porcentaje de relleno teórico, respectivamente. Estas graficas fueron obtenidas directamente del software.

Tabla 5.12. Valores de parámetros de ajuste seleccionados.

Parámetro	Valor
Tolerancia	0.001
Número máximo de Iteraciones	100
Dimensión de referencia	135 mm

Tabla 5.13. Parámetros estimados para los diferentes porcentajes de relleno teórico.

Parámetro	Relleno teórico		
	5%	10%	100%
β	7.31	7.09	1.57
B	0	0	0
C	-1.46	-1.52	1
δ	7.6	23.18	3.37
λ	11.79	0	8.36

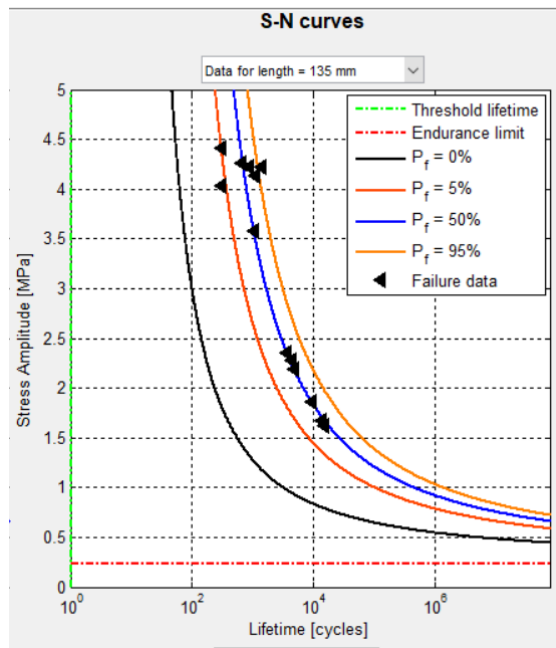


Figura 5.11. Diagrama de fatiga de probetas de 5% relleno teórico.

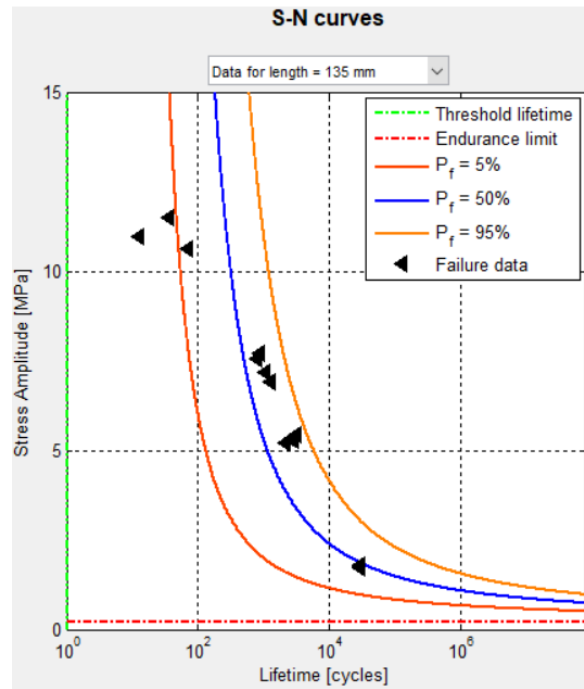


Figura 5.12. Diagrama de fatiga de probetas de 10% relleno teórico.

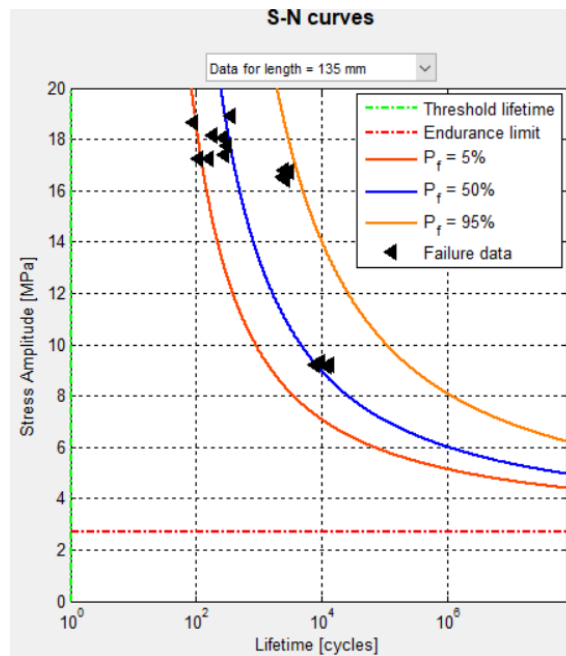


Figura 5.13. Diagrama de fatiga de probetas de 100% relleno teórico.

Como se puede observar en la Figura 5.11, la mayoría de los datos experimentales obtenidos se ajustan a la curva de probabilidad de falla del 50%, lo cual es un comportamiento aceptable de las probetas ensayadas. Por otro lado, para las probetas del 10% de relleno teórico (Figura 5.12), el ajuste de la curva de probabilidad de falla del 50% se encuentra ligeramente por debajo de los valores experimentales obtenidos. En cuanto a las probetas con 100% de relleno teórico (Figura 5.13), se observa que la mayoría de resultados experimentales se concentran alrededor de las curvas de probabilidad de falla del 5% y 50%, lo que indica un comportamiento confiable.

Por lo anterior se puede decir que el modelo de Weibull puede ser utilizado para predecir el comportamiento a la fatiga de los componentes FDM. Mediante este modelo es posible determinar el comportamiento a la fatiga de dichos componentes con base en el número de ciclos, la carga o amplitud de esfuerzo aplicado, la orientación de fabricación y el porcentaje de relleno. El modelo puede ser utilizado durante el proceso de diseño de componentes fabricados mediante FDM, reduciendo la incertidumbre del comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante este tipo de tecnologías. De esta manera se contribuye a la generación de conocimientos de Diseño para Manufactura Aditiva.

6. Análisis de casos de estudio de piezas fabricadas por FDM

Con el propósito de evaluar los modelos analíticos estudiados en el Capítulo 4, se propuso el análisis de casos de estudio correspondientes a componentes mecánicos. Estos casos de estudio fueron evaluados de forma analítica, numérica y experimentalmente, comparando su comportamiento estructural con las predicciones de los modelos analíticos.

6.1. Selección de casos de estudio

Se realizó una revisión de la literatura para identificar casos de estudio de componentes mecánicos fabricados por manufactura aditiva. La Tabla 6.1 muestra una compilación de los casos de estudio reportados en la literatura que evalúan las propiedades estructurales de componentes FDM. En esta tabla se indica la propiedad analizada para cada caso y el tipo de estudio realizado. Se observa que en los casos de estudio analizados se miden generalmente propiedades físicas de las piezas y se utiliza el método del elemento finito (MEF) para realizar optimización topológica y calcular algunas propiedades mecánicas de las piezas. Además, el parámetro más estudiado es la orientación de fabricación. Cabe destacar que en [50] se presenta una metodología similar al proyecto de tesis, ya que se realizaron ensayos experimentales, se calculó la deformación para posteriormente comprobar mediante un caso de estudio la propiedad tomando diferentes orientaciones de fabricación del componente.

Después de analizar los casos de estudio reportados en la literatura, se eligieron dos componentes mecánicos como casos de estudio para validar los modelos analíticos. Los componentes seleccionados corresponden a un gancho de izaje, el cual fue definido en este trabajo, y a un conector reportado en [53], los cuales se muestran en las Figuras 6.1 y Figura 6.2, respectivamente. En la Tabla 6.2 se presentan los parámetros de proceso seleccionados para la manufactura de estos casos de estudio. Cabe mencionar que solo se fabricó una pieza para cada conjunto de parámetros.

Tabla 6.1. Casos de estudio reportados en la literatura.

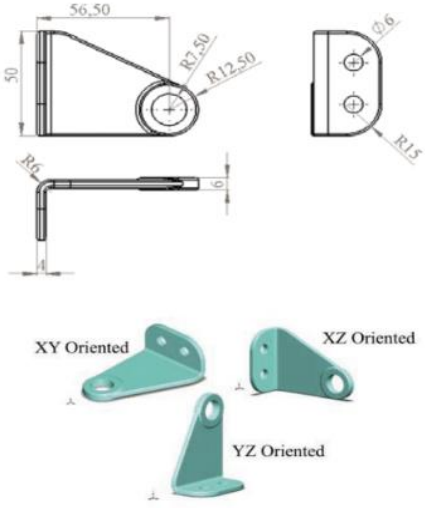

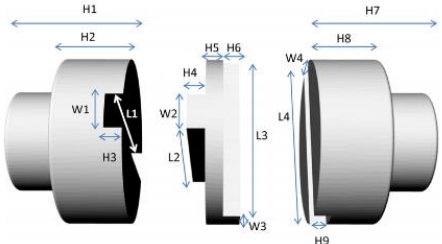
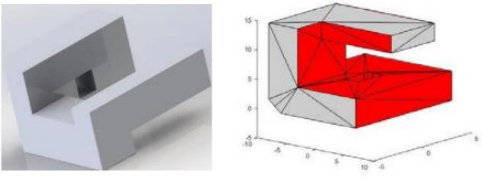
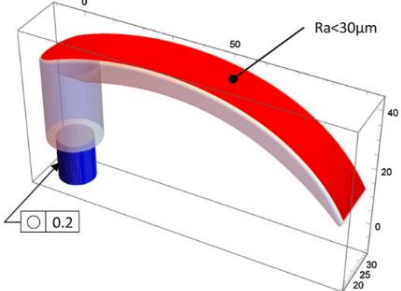
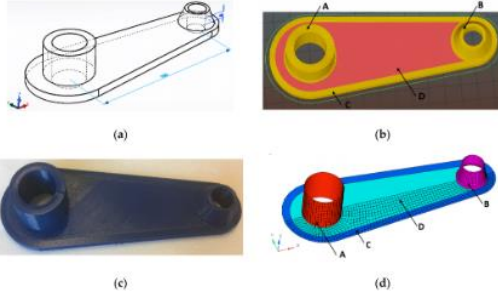
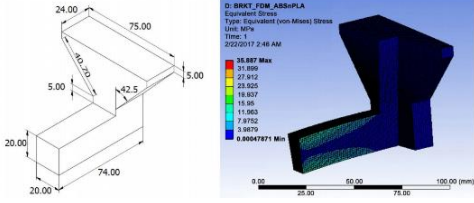
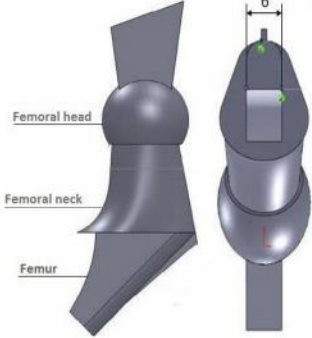
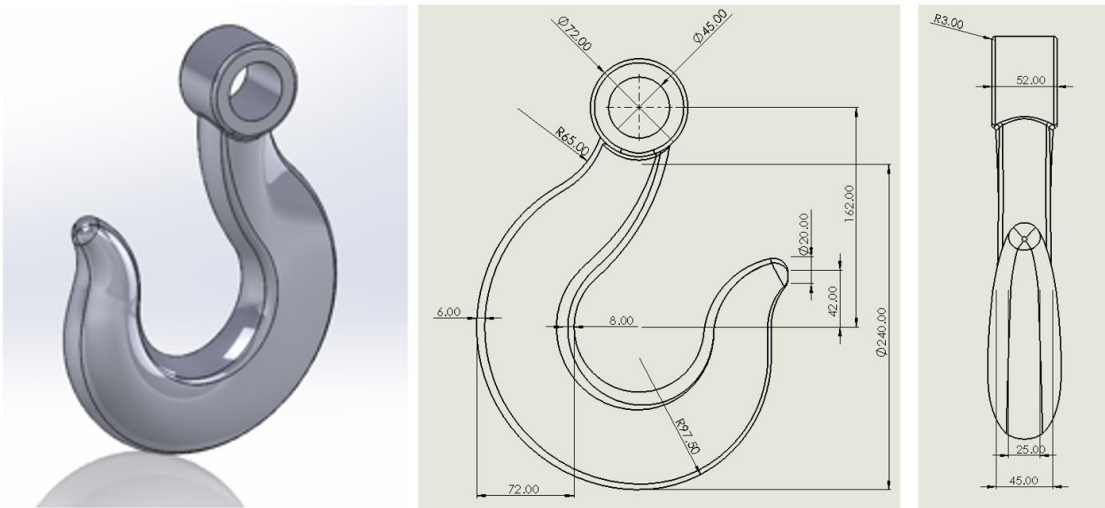
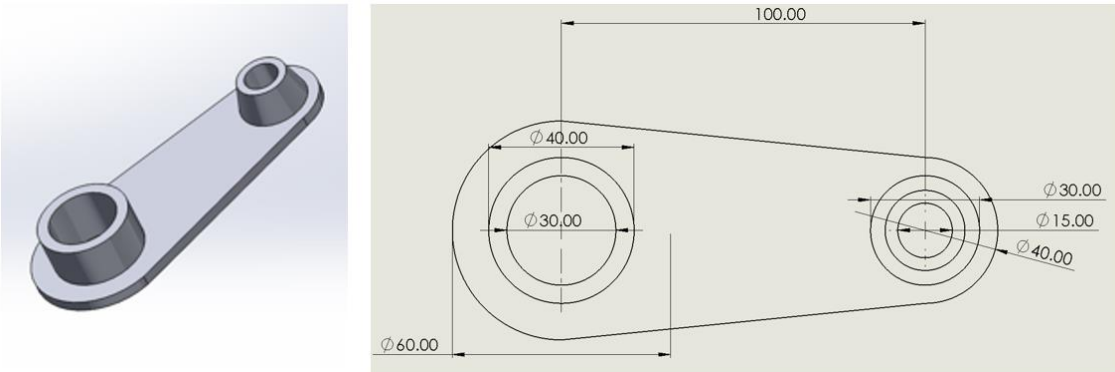
Caso de estudio	Modelo	Parámetro del proceso	Tipo de estudio	Propiedad /herramienta analizada
<p>Bracket (R.H. Hambali et al. [50])</p>		<p>Orientación de fabricación</p>	<p>Flexión</p>	<p>Deformación</p>
<p>Conector Oldham (P. Jain et al. [84])</p>		<p>-</p>	<p>-</p>	<p>Comparativa entre manufactura aditiva y casting</p>
<p>Conector Oldham (A. Boschetto et al. [85])</p>		<p>Orientación de fabricación</p>	<p>Medición dimensional</p>	<p>Validar modelo analítico para medir la precisión dimensional</p>
<p>Parte 3D no funcional (P. Zwier et al. [86])</p>		<p>Orientación de fabricación</p>	<p>Demostración de algoritmo de optimización de 5 pasos para seleccionar la orientación de fabricación.</p>	<p>Validación de algoritmo de optimización</p>

Tabla 6.1. Casos de estudio reportados en la literatura (cont.).

Caso de estudio	Modelo	Parámetro del proceso	Tipo de estudio	Propiedad/herramienta analizada
<p>Manija (A. Boschetto et al. [87])</p>		<p>Espesor de capa Orientación de fabricación</p>	<p>Demostración de metodología para seleccionar la orientación y espesor de capa</p>	<p>Validación de metodología para acabado superficial y dimensional</p>
<p>Componente conectivo (M. Somireddy et al. [53])</p>		<p>Mesoestructura</p>	<p>MEF Tensión, diferentes mesoestructuras</p>	<p>MEF para obtener el modulo elástico para obtener la matriz de rigidez</p>
<p>Bracket de soporte (A. Alafaghani et al. [88])</p>		<p>Soportes y orientación</p>	<p>MEF Flexión</p>	<p>MEF para optimización topológica y medir el esfuerzo de von Mises</p>
<p>Prótesis de cadera (J. Singh et al. [89])</p>		<p>Porcentaje de relleno Orientación de fabricación</p>	<p>Acabado superficial</p>	<p>Rugosidad</p>



a) b) c)
 Figura 6.1. Gancho de izaje: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista lateral.



a) b) c)
 Figura 6.2. Conector [53]: a) vista isométrica, b) vista frontal y c) vista lateral.

Tabla 6.2. Parámetros del proceso seleccionados para la fabricación de componentes.

Parámetro de proceso	Valores
Espesor de capa	0.18 mm
Ángulo de relleno	45°
Porcentaje de relleno	5, 40 y 100
Orientación de fabricación	Plana (XY), en el borde (XZ) y vertical (YZ)
Número de capas de perímetro	1 y 2
Número de capas inferiores y superiores	2 y 3

6.2. Metodología general

La metodología utilizada para analizar el comportamiento estructural de los casos de estudio se muestra en la Figura 6.3. Dicha metodología incluye la caracterización del filamento, la fabricación de los casos de estudio con las combinaciones de parámetros de proceso seleccionados, la medición del peso para estimar el porcentaje de relleno real, el ensayo a tensión, la estimación de propiedades con modelos de predicción, en donde se utilizó el método del elemento finito y los modelos analíticos, y el análisis de resultados en donde se compararon los resultados experimentales y analíticos.

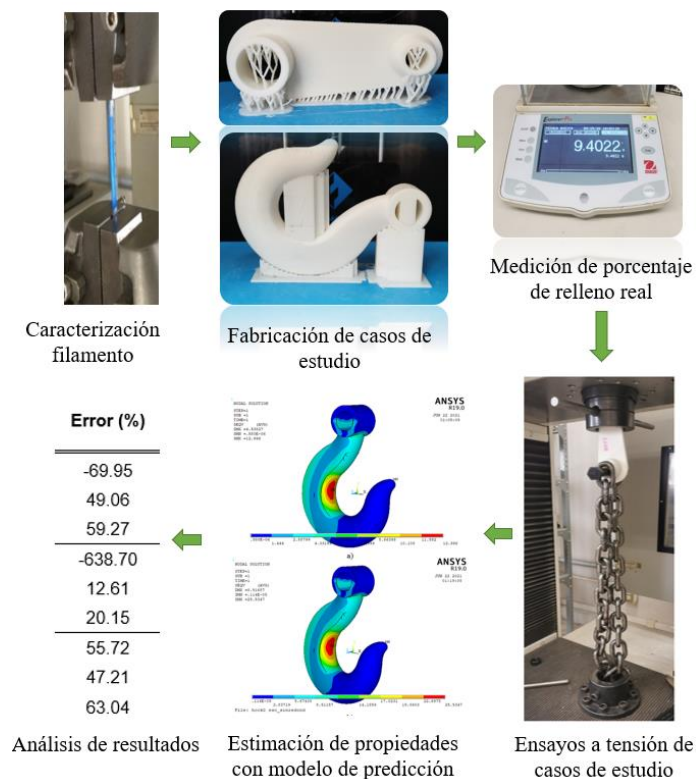


Figura 6.3. Metodología experimental para casos de estudio.

6.2.1. Caracterización del filamento

Para conocer las propiedades de la materia prima (filamento), se realizaron ensayos de tensión a los filamentos de PLA (material sin procesar) en una máquina Universal Shimadzu modelo AG-100KNI para determinar sus propiedades estructurales. Varios rollos de filamento PLA de 1.75 mm de diámetro, colores variables, resistencia nominal a la tensión en el rango de 55 a 65 MPa fueron utilizados. De cada rollo de filamento se tomaron 3 muestras de 165 mm de largo y se ensayaron a una velocidad de 5 mm/min, a temperatura ambiente, humedad entre 35 y 50% y una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud. Los resultados fueron analizados para determinar el UTS y módulo elástico, y para posteriormente calcular el valor promedio de las mismas. Los resultados se resumen en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Propiedades promedio de materia prima.

No. de rollo	UTS (MPa)	Módulo elástico (MPa)
2,3,4	58.64	2071.79

6.2.2. Fabricación de casos de estudio

Los casos de estudio se fabricaron de PLA mediante el proceso FDM en el equipo Creator Pro Flashforge TM (extrusora doble, precisión de 0.1 a 0.3 mm y espacio de trabajo de 225x145x150 mm). Las Tablas 6.4 y 6.5 muestran los porcentajes de relleno teórico utilizados, las orientaciones, y tiempo de fabricación para cada caso. Como se observa en dichas tablas, el tiempo de fabricación fue extenso debido a la necesidad de soportes para las diferentes orientaciones de manufactura. Además, cabe mencionar que las piezas con el 5% de relleno teórico se fabricaron con únicamente una capa de contorno a diferencia de las del 40% y 100% de relleno, en las cuales se utilizaron dos capas de perímetro.

Tabla 6.4. Orientación, relleno y tiempo de fabricación para el gancho.


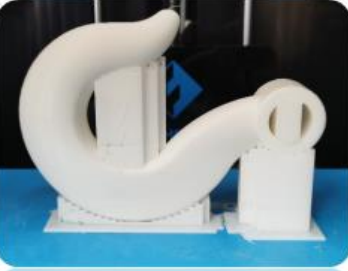




Caso de estudio	Orientación	Relleno teórico (%)	Tiempo de fabricación
	Plana (XY)	5	3 hr 35 min
		40	5 hr 02 min
		100	6 hr 32 min
	En el borde (XZ)	5	2 hr 12 min
		40	3 hr 41 min
		100	5 hr 09 min
	Vertical (YZ)	5	2 hr 20 min
		40	3 hr 49 min
		100	5 hr 15 min

Tabla 6.5. Orientación, relleno y tiempo de fabricación para el conector.

Caso de estudio	Orientación	Relleno teórico (%)	Tiempo de fabricación
	Plana (XY)	5	1 hr 07 min
		40	2 hr 01 min
		100	2 hr 49 min
	En el borde (XZ)	5	2 hr 35 min
		40	3 hr 47 min
		100	4 hr 34 min
	Vertical (YZ)	5	3 hr 02 min
		40	4 hr 13 min
		100	5 hr 05 min

6.2.3. Medición del porcentaje de relleno real

Una vez fabricados los componentes, se pesó cada uno de ellos en una báscula ExplorerPro para determinar el porcentaje de relleno real. Para estimar el porcentaje de relleno real se utilizó la siguiente ecuación:

$$RI = \frac{W_{cs}}{W_{ss}} * 100\% \quad (6-1)$$

donde RI es el porcentaje de relleno real, W_{cs} es el peso real del componente fabricado y W_{ss} es el peso del componente sólido.

El valor de W_{ss} se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$W_{ss} = \gamma V_s \quad (6-2)$$

donde V_s es el volumen del componente obtenido del dibujo CAD y γ es el peso específico del material (filamento), el cual se calculó midiendo el peso y volumen del filamento a utilizar. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.6. En esta tabla se observa que los porcentajes de relleno reales del gancho se encuentran por debajo de los valores obtenidos del conector, llegando a aproximadamente 90% de relleno real en los modelos con 100% de relleno teórico. Esta diferencia puede deberse a la complejidad de la geometría del gancho, ya que el área de deposición de material es más pequeña en comparación del conector por lo que, se deposita menor cantidad de material en dichas áreas.

Tabla 6.6. Porcentaje de relleno real de casos de estudio.

Caso estudio	Orientación	Relleno teórico (%)	Relleno real (%)
Gancho	Plana (XY)	5	16.97
		40	46.66
		100	86.36
	En el borde (XZ)	5	15.29
		40	49.41
		100	89.65
	Vertical (YZ)	5	15.47
		40	49.72
		100	90.84
Conector	Plana (XY)	5	29.81
		40	66.14
		100	100
	En el borde (XZ)	5	33.84
		40	75.44
		100	100
	Vertical (YZ)	5	27.50
		40	64.24
		100	94.98

6.2.4. Ensayos a tensión de casos de estudio

Para realizar los ensayos de resistencia estructural de los casos de estudio seleccionados, se hicieron algunas adecuaciones en la máquina Universal Shimadzu modelo AG-100KNI para la sujeción y aplicación de carga. La Figura 6.4 muestra las configuraciones utilizadas para la sujeción y el ensayo de los casos de estudio mencionados. En dicha figura se puede observar que se utilizó una cadena, pernos, tornillos, tuercas y arandelas para asegurar la sujeción. Para realizar el ensayo se tensó la cadena antes de iniciar la prueba. Las pruebas

de tensión fueron realizadas a una velocidad de 5 mm/min, temperatura ambiente (aproximadamente 22°C), humedad entre 35% y 55%, una presión atmosférica de 827 mbar a 1876 m de altitud. Como resultados de los ensayos se obtuvieron la fuerza máxima soportada en cada caso.



Figura 6.4. Configuración y utillaje para el ensayo a tensión del: a) gancho y b) conector.

En las Figuras 6.5 y 6.6 se muestran los componentes ensayados. En general, se puede observar que los componentes presentan un comportamiento de falla uniforme entre cada orientación, y en el caso del conector las fallas anormales presentadas fueron en las probetas con menor porcentaje de relleno. Además, en la Figura 6.5 se observa que la falla del gancho fabricado en la orientación vertical, se presenta en dirección de la capa depositada, lo cual indica que la adhesión entre capas tuvo un efecto fundamental en el comportamiento estructural del componente, ya que en dicha orientación la carga es perpendicular a la capa depositada. Por otro lado, en la orientación plana se observa que para los valores de 40% y 100% de relleno teóricos, la pieza presenta pequeñas estrías antes de llegar a la ruptura, por lo que se puede decir que existe una deformación en las capas antes de que el componente falle. En cuanto a la orientación en el borde, la ubicación de la falla fue distinta a las anteriores, siendo ésta en la parte inferior del gancho, en la orientación de la capa depositada, lo cual indica que la unión entre capas no soporta gran cantidad de carga antes de separarse.

Con respecto al conector, en la Figura 6.6 se observa que en la orientación vertical para los porcentajes de relleno de 40% y 100% teóricos, se presenta la falla en dirección de la capa

como sucedió en el caso anterior, debido a la orientación de la carga con respecto a las capas. Para la orientación plana, la falla se presenta en el mismo lugar que la orientación vertical; sin embargo, el modo de falla es diferente ya que en dicho caso se presenta una deformación antes de la ruptura. Para el caso de la orientación en el borde, la localización de la falla difiere de las anteriores y se presenta en la parte superior del agujero grande del conector en dirección de la capa depositada, lo cual indica que la unión entre capas en dicha orientación representa un factor decisivo en el comportamiento estructural. En cuanto a los valores de relleno bajos, la falla anormal puede ser debida a que se utilizó únicamente una capa de perímetro, reduciendo la integridad y rigidez estructural del componente, y por lo tanto su resistencia a la tensión.

La Tabla 6.7 muestra los resultados correspondientes a la fuerza máxima que soportó cada componente en el ensayo a tensión. De estos resultados se puede confirmar que mientras mayor sea el porcentaje de relleno la pieza tendrá una mayor resistencia mecánica, soportando mayor carga. Asimismo se demuestra que la orientación de fabricación juega un papel importante en el comportamiento estructural de piezas fabricadas mediante AM, por lo que es un parámetro que debe tomarse en cuenta en el Diseño para Manufactura Aditiva.



Figura 6.5. Ganchos ensayados.

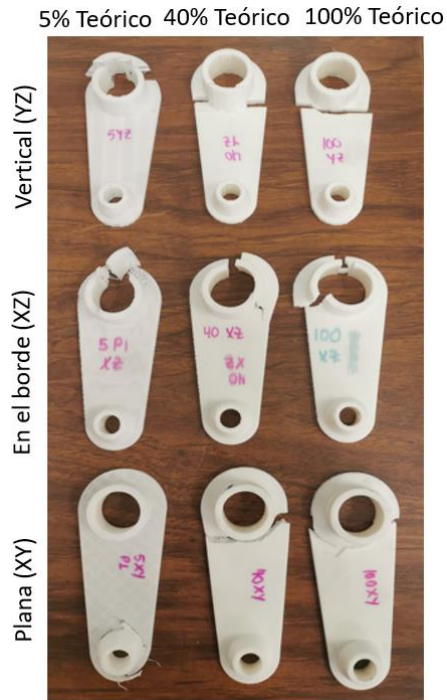


Figura 6.6. Conectores ensayados.

Tabla 6.7. Resultados de los ensayos a tensión de los casos de estudio.

Componente	Orientación	Relleno nominal (%)	Relleno real (%)	Fuerza máxima (N)
Gancho	Plana (XY)	5	16.97	567.82
		40	46.66	1181.25
		100	86.36	2943.75
	En el borde (XZ)	5	15.29	62.50
		40	49.41	406.25
		100	89.65	1596.88
	Vertical (YZ)	5	15.47	115.63
		40	49.72	296.88
		100	90.84	784.38
Conector	Plana (XY)	5	29.81	343.75
		40	66.14	2340.63
		100	100.00	4237.50
	En el borde (XZ)	5	33.84	84.38
		40	75.44	1684.38
		100	100.00	2493.75
	Vertical (YZ)	5	27.50	265.63
		40	64.24	900.00
		100	94.98	2446.88

6.2.5. Estimación de propiedades con modelos de predicción

Para estimar de forma analítica la resistencia mecánica de los componentes analizados en función del porcentaje de relleno y la orientación de fabricación, se seleccionó el modelo de predicción de Gibson & Ashby. Este modelo se seleccionó debido a que mostró el mejor desempeño global (ver Capítulo 4, sección 4.4). El modelo se define como:

$$\sigma_{eq} = \sigma_s C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (6-3)$$

donde σ_{eq} es la resistencia efectiva del componente, σ_s es la resistencia última a la tensión (UTS) de la materia prima, (ρ/ρ_s) es el porcentaje de relleno real, y C y n son constantes experimentales obtenidas previamente para cada orientación, las cuales se muestran en la Tabla 6.8. A partir del modelo de Gibson & Ashby se determinó la resistencia a la tensión para cada componente, orientación y porcentaje de relleno real.

Tabla 6.8. Valores de constantes experimentales Gibson & Ashby.

Propiedad mecánica	Orientación plana		Orientación en el borde		Orientación vertical	
	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>n</i>	<i>C</i>
E	1.028	0.7175	1.2278	0.7671	1.3326	0.5456
UTS	0.8951	0.8037	1.072	0.9272	1.6456	0.4583
EB	0.5285	0.6100	0.5192	0.6875	0.8000	0.3001

Posteriormente se desarrolló un modelo MEF para determinar la carga máxima que puede soportar cada componente considerando la resistencia a la tensión determinada de forma analítica con el modelo de Gibson & Ashby. Para el análisis MEF se utilizó el software ANSYS y se realizaron las siguientes consideraciones:

- Análisis estructural elástico
- Material sólido isotrópico
- Pieza sólida

Para la simulación MEF, el módulo elástico del material se calculó utilizando el modelo de Gibson & Ashby y el porcentaje de relleno real, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{eq} = E_s C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (6-4)$$

donde E_{eq} es el módulo efectivo del componente, E_s es el módulo elástico promedio de la de la materia prima, (ρ/ρ_s) es el porcentaje de relleno real, y C y n son constantes experimentales obtenidas previamente para cada orientación. En cuanto al coeficiente de Poisson se tomó el valor 0.39 de la literatura [79].

6.2.5.1. Gancho

La Figura 6.7 muestra el modelo MEF del gancho, en donde se aprecia el mallado y las cargas aplicadas. Para el mallado se utilizó un elemento sólido tetraédrico con 3 grados de libertad, los cuales son suficientes para caracterizar la respuesta del modelo para el análisis requerido. Además, se eligió un nivel de mallado global igual a 1. Se aplicó una restricción de desplazamiento cero en la dirección X y Y al área correspondiente al soporte superior del gancho, además un nodo de esa área se restringió en todos los grados de libertad. Respecto a la fuerza aplicada, se realizó una selección de nodos en la parte inferior del gancho en las coordenadas alineadas con la parte superior y se aplicaron diferentes valores de cargas hasta igualar el esfuerzo de von Mises con el valor UTS estimado mediante el modelo analítico. La Figura 6.8 muestra los resultados de la simulación MEF para el caso 40% de relleno teórico con orientación en el borde (XZ). En esta figura se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en la parte central izquierda de la curvatura del gancho, lo cual se debe a que en esta zona se presenta una combinación de esfuerzos de tensión y flexión, que propician un valor de esfuerzo mayor en comparación con la parte posterior de la misma. Esta zona de falla coincide con la falla ocurrida en los ensayos experimentales en la orientación vertical, ya que además de tener la concentración de esfuerzo en dicha zona, se presenta el efecto de adición de capas, por lo cual la pieza se debilita y fractura en la zona de mayor esfuerzo.

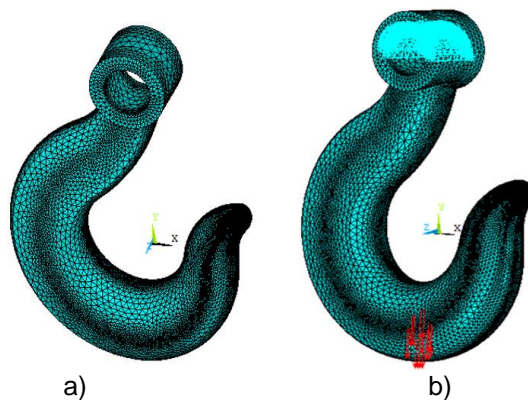


Figura 6.7. Modelo MEF del gancho: a) mallado, b) mallado con cargas.

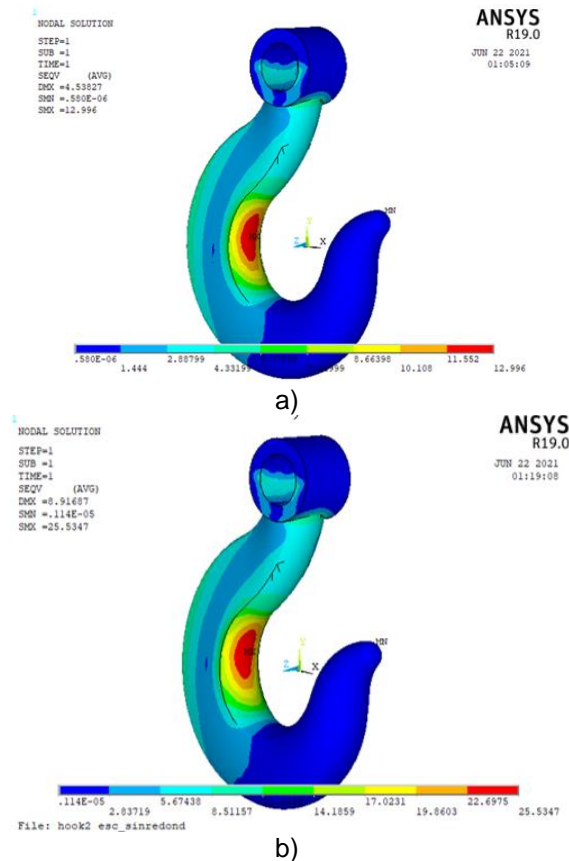
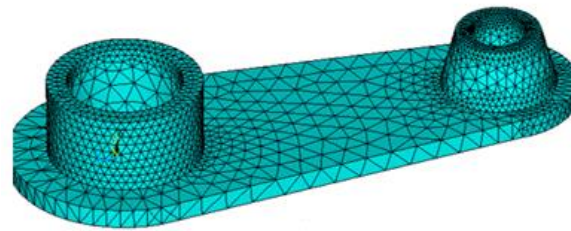


Figura 6.8. Análisis del gancho con 40% relleno teórico y orientación en el borde (XZ): a) carga experimental, b) carga para alcanzar la resistencia a la tensión estimada por el modelo analítico.

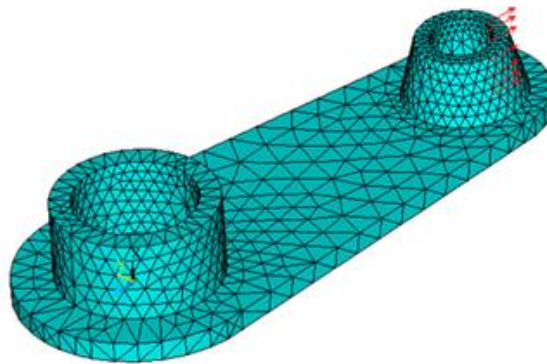
6.2.5.2. Conector

La Figura 6.9 muestra el modelo MEF del conector, en donde se aprecia el mallado y las cargas aplicadas. Para el mallado se utilizó un elemento sólido tetraédrico de 3 grados de libertad y se eligió un nivel de mallado global igual a 1. En cuanto a las condiciones de frontera, se aplicó un desplazamiento de cero en la dirección Y y Z a una línea vertical en el lado izquierdo del conector (agujero grande), además se restringió el punto inferior de esta línea en todos los grados de libertad. Respecto a la fuerza aplicada, se seleccionaron los nodos de una línea central en la parte derecha del conector (agujero pequeño), y se aplicaron diferentes valores de cargas hasta igualar el esfuerzo de von Mises con la resistencia a la tensión estimada mediante el modelo analítico. La Figura 6.10 muestra los resultados de la simulación MEF para el caso de 40% de relleno teórico con orientación en el borde (XZ), en donde se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en la parte derecha del conector y se presenta una concentración de esfuerzos en la parte superior de

éste como consecuencia de la forma de aplicar la carga; sin embargo, no se considera en esa zona el esfuerzo máximo sino en la parte inferior del agujero pequeño. Para poder encontrar los valores de esfuerzo en esa zona se tuvo que seleccionar el nodo asociado y tomar su valor.



a)



b)

Figura 6.9. Modelo MEF del Conector: a) mallado, b) mallado con cargas.

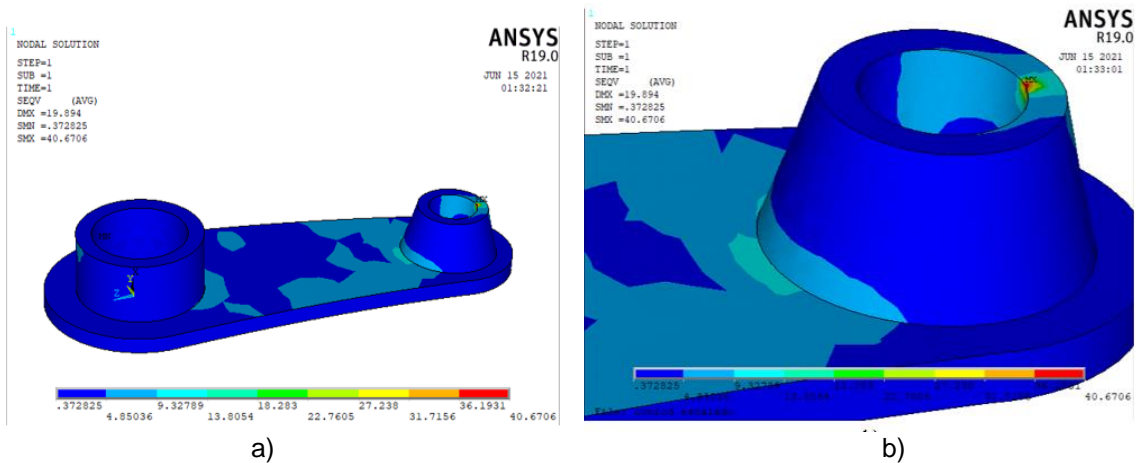


Figura 6.10. Análisis del conector con orientación en el borde (XZ) y 40% de relleno teórico: a) carga experimental, b) zoom de la zona de concentración de esfuerzos.

6.2.6. Análisis de resultados

La Tabla 6.10 muestra los resultados obtenidos de la simulación MEF para el gancho, los cuales corresponden a la fuerza necesaria para alcanzar la resistencia última a la tensión (UTS) estimada mediante el modelo analítico. Los valores UTS estimados mediante el modelo analítico para cada caso se muestran también en la Tabla 6.10. En esta tabla también se muestra el error que existe entre los resultados de fuerza máxima obtenidos de forma de forma analítica-numérica y de forma experimental. Este error fue determinado mediante la siguiente expresión:

$$Error = \left(\frac{F_{MEF} - F_{exp}}{F_{exp}} \right) \times 100\% \quad (6-4)$$

en donde F_{MEF} es la fuerza máxima obtenida en el análisis MEF y F_{exp} es la fuerza experimental.

Los resultados de la Tabla 6.9 muestran que los errores encontrados son en la mayoría de los casos negativos y relativamente altos, lo cual indica que la fuerza máxima obtenida de forma experimental es más alta que la estimada analíticamente. Este comportamiento puede ser debido a varios factores tales como la geometría compleja del caso de estudio; ya que por la naturaleza del proceso de fabricación FDM, la geometría del gancho y las orientaciones de fabricación, se depositaron un mayor número de capas de perímetro consecutivas en áreas más pequeñas, lo cual puede aumentar la rigidez del componente. Este comportamiento también podría deberse a que durante el ensayo exista una deformación interna del filamento de relleno, lo que propiciaría mayor resistencia al componente. También puede deberse a factores como la integridad del componente físico cuando se tienen pocas capas de perímetro. También se observa que en la orientación vertical (YZ) los valores de error son mucho menores, y en el caso del gancho en la orientación en el borde (XZ) y 100% de relleno, el error llega a 5.33% lo que se puede considerar bastante aceptable.

Tabla 6.9. Resultados de fuerza máxima para el gancho.

Orientación	% relleno teórico	% relleno real	UTS estimado (MPa)	Fuerza máxima analítico-MEF (N)	Fuerza máxima experimental (N)	Error (%)
Plana (XY)	5	16.97	9.63	301.13	567.82	-46.97
	40	46.66	23.82	744.63	1181.25	-36.96
	100	86.36	41.33	1292.01	2943.75	-56.11
En el borde (XZ)	5	15.29	7.26	227.00	62.50	263.21
	40	49.41	25.54	798.21	406.25	96.48
	100	89.65	48.36	1511.75	1596.88	-5.33
Vertical (YZ)	5	15.47	1.25	38.95	115.63	-66.31
	40	49.72	8.51	266.04	296.88	-10.39
	100	90.84	22.95	717.25	784.38	-8.56

La Tabla 6.10 muestra los resultados obtenidos de la simulación MEF para el conector, los cuales corresponden a la fuerza necesaria para alcanzar la resistencia última a la tensión (UTS) estimada mediante el modelo analítico. Como en el caso anterior, los valores de error encontrados son considerablemente altos llegando hasta un error de 638% para 5% de relleno teórico con orientación en el borde. Esto es debido a que el valor experimental fue muy bajo con respecto al calculado. Uno de los factores que influyen en los valores de relleno bajos, para este caso, es que se están fabricando con únicamente una capa de relleno, lo que provoca que la integridad de las piezas sea reducida y no resistan una carga tan grande. Sin embargo, para los valores restantes de porcentaje de relleno en dicha orientación de fabricación presentan errores pequeños entre 12% y 20%, los cuales para el caso del conector son los valores mínimos encontrados.

Tabla 6.10. Resultados de fuerza máxima para el conector.

Orientación	% relleno teórico	% relleno real	UTS calculado (MPa)	Fuerza máxima analítico-MEF (N)	Fuerza máxima experimental (N)	Error (%)
Plana (XY)	5	29.81	15.95	584.20	343.75	69.95
	40	66.14	32.55	1192.21	2340.63	-49.06
	100	100.00	47.13	1726.06	4237.50	-59.27
En el borde (XZ)	5	33.84	17.02	623.28	84.375	638.70
	40	75.44	40.19	1472.04	1684.38	-12.61
	100	100.00	54.37	1991.27	2493.75	-20.15
Vertical (YZ)	5	27.50	3.21	117.62	265.63	-55.72
	40	64.24	12.97	475.15	900.00	-47.21
	100	94.98	24.69	904.28	2446.88	-63.04

En general los resultados de desempeño estructural estimados de forma analítica y los encontrados experimentalmente presentan diferencias importantes. Sin embargo, se puede observar que los valores de error encontrados para los valores de relleno de 40% y 100% teóricos para algunas orientaciones son relativamente aceptables. En cuanto al valor de relleno bajo (5% teórico), se puede observar que el número de capas de perímetro es importante en el comportamiento mecánico de piezas AM ya que dicho parámetro es el que brinda integridad y rigidez a las piezas fabricadas por FDM.

Por otro lado, se ha demostrado que se es posible predecir el comportamiento estructural de componentes fabricados mediante FDM con modelos analíticos basados en los principales parámetros del proceso. Esto representa un avance importante dentro del Diseño para Manufactura Aditiva ya que es posible predecir el comportamiento de manera general de un componente utilizando solamente tres parámetros de proceso. Dicho enfoque tiene la ventaja de que puede ser utilizado por ingenieros de diseño que no sean necesariamente expertos en el tema AM, proporcionándoles una metodología sencilla y robusta de predicción de propiedades mecánicas.

7. Conclusiones

Mediante el desarrollo del presente trabajo de tesis se logró estudiar y analizar el efecto de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM). Entre los parámetros de proceso estudiados se encuentran el porcentaje de relleno, la orientación de fabricación y el número de capas de perímetro. Las propiedades mecánicas consideradas en el estudio fueron la resistencia última a la tensión (UTS), el módulo de elasticidad, la elongación a la ruptura, y la resistencia a la fatiga. La metodología utilizada contempló pruebas experimentales, desarrollo de modelos teórico-experimentales, desarrollo de modelos numéricos y la validación de dichos modelos mediante casos de estudio. Los resultados demostraron que el comportamiento de los valores experimentales se asemeja a los encontrados en la literatura. Además, los resultados derivados de los modelos de predicción propuestos concuerdan con los experimentales y los resultados de la validación mediante casos de estudio reflejaron un comportamiento cercano al experimental en valores altos del porcentaje de relleno.

En general, se puede decir que los resultados obtenidos del comportamiento mecánico de piezas FDM contribuyen al desarrollo de conocimiento en el área de Diseño para Manufactura Aditiva, apoyando el proceso de toma de decisiones durante el diseño estructural de componentes a ser fabricados mediante AM. De esta manera los diseñadores pueden utilizar los resultados presentados en este trabajo para garantizar que los componentes a diseñar cumplan con los requerimientos particulares de desempeño mecánico.

Comportamiento mecánico de probetas FDM

Con el fin de tener una base importante de datos experimentales, se realizaron ensayos a tensión a conjuntos de probetas fabricadas utilizando diferentes equipos FDM, valores de porcentaje de relleno bajos, diferentes parámetros de proceso y utilizando PLA como materia prima. Luego, para evaluar el comportamiento estructural de piezas FDM, se desarrolló una metodología experimental que incluye la normalización de los resultados con respecto a la materia prima (filamento) y el cálculo del porcentaje real de relleno tomando en cuenta las capas de perímetro de la pieza. Finalmente las curvas de comportamiento estructural para las tres orientaciones de fabricación fueron obtenidas, en las cuales se basaron los modelos teórico-experimentales.

Además, se realizaron ensayos a la fatiga a distintos conjuntos de probetas fabricadas con diferentes valores de porcentaje de relleno, orientaciones de fabricación y utilizando PLA como materia prima. Los resultados normalizados fueron comparados con los resultados reportados en la literatura, observándose una tendencia similar y cercana entre sí. Para describir el comportamiento experimental a la fatiga, se utilizó un software especializado en comportamiento a la fatiga el cual usa el modelo analítico estadístico de Weibull. De este programa se obtuvieron los valores de los parámetros del modelo de Weibull para cada porcentaje de relleno. Así, el modelo de fatiga para componentes FDM queda en función de los ciclos, la amplitud del esfuerzo, y el porcentaje de relleno.

En conclusión, los resultados experimentales de los ensayos a tensión demostraron que la orientación de fabricación y el porcentaje de relleno influyen significativamente en el UTS y el módulo elástico, ya que mientras menor sea el porcentaje de relleno menor será la resistencia de la pieza. Además, en la orientación vertical las propiedades mecánicas decrecen significativamente debido a que la carga se encuentra en dirección perpendicular a la capa depositada, por lo que la adhesión entre capas juega un papel importante en la resistencia de la pieza en esta dirección. En cuanto a los ensayos de fatiga, los resultados experimentales demostraron que a mayor porcentaje de relleno mayor será la resistencia de fatiga de la pieza, y a menor esfuerzo de amplitud mayor será la vida (ciclos) a la fatiga. Además, se demuestra nuevamente que en la orientación vertical las propiedades mecánicas decrecen significativamente ya que se obtuvieron amplitudes de esfuerzo muy pequeñas comparadas con las orientaciones restantes. Igualmente se observó que los resultados de tensión en las orientaciones plana y en el borde no presentan diferencias significativas, por lo que se puede considerar un comportamiento transversalmente isotrópico de las probetas.

Modelos teórico-experimentales

Para realizar la predicción de propiedades mecánicas de piezas FDM se eligieron seis modelos analíticos existentes correspondientes a materiales compuestos y/o porosos. También se propusieron dos nuevos modelos analíticos. Los modelos fueron evaluados comparando sus valores estimados con los resultados experimentales. Los resultados revelaron que algunos modelos analíticos existentes y propuestos pueden adaptarse para predecir con buena precisión el comportamiento mecánico de piezas FDM. De igual manera se observó que el modelo más preciso es el de Gibson & Ashby, seguido del modelo de eficiencia y los dos nuevos modelos propuestos, Exponencial y variante de Duckworth. Por lo tanto, se concluye que es factible el uso de modelos analíticos para predecir el comportamiento estructural de piezas FDM, o categorías de piezas AM similares, en función de los parámetros del proceso y propiedades de la materia prima. En consecuencia, los

modelos analíticos pueden ser utilizados en el proceso de Diseño para Manufactura Aditiva, reduciendo la necesidad de enfoques experimentales y numéricos, los cuales consumen mucho tiempo y son costosos.

Adicionalmente se propuso un modelo elipsoidal que permite la predicción de propiedades estructurales en cualquier dirección a partir de los parámetros del proceso FDM (porcentaje de relleno y orientación de la pieza dentro del espacio de trabajo). Dicho modelo se basa en la ecuación de un elipsoide y toma en cuenta dos ángulos de orientación de la pieza en el espacio de trabajo del sistema FDM. También fueron realizados varios ensayos experimentales usando diferentes orientaciones de fabricación, valores de porcentaje de relleno y número de capas de perímetro. Al comparar los resultados obtenidos con el modelo elipsoidal y los resultados experimentales, se pudo observar que los valores del error promedio fueron relativamente bajos, por lo que el modelo propuesto es aceptable y puede ser utilizado para la predicción de propiedades de componentes FDM en cualquier orientación.

Modelos numéricos

Para la predicción del comportamiento estructural de piezas FDM también se desarrollaron modelos basados en redes neuronales GRNN, las cuales son redes determinísticas y tienen una sola función de activación para mejorar el desempeño de la red. La estructura de la red se determinó mediante la selección de los parámetros de entrada, los cuales fueron los parámetros del proceso FDM, la realización de diversas iteraciones para cada propiedad mecánica estudiada (UTS y módulo de elasticidad) y la definición del valor de spread mediante el cálculo del error medio cuadrático (MSE). Posteriormente, los datos obtenidos pasaron a una etapa de post-procesamiento para así obtener los resultados. Estos resultados fueron comparados con los resultados experimentales y los resultados obtenidos de los modelos analíticos.

Los valores de las redes neuronales con respecto a los resultados experimentales presentaron errores mínimos y las tendencias de las curvas fueron muy cercanas a las experimentales. En cuanto a la comparación con los modelos analíticos, los modelos GRNN obtuvieron errores promedio menores y desviaciones estándar mínimas con respecto a los valores obtenidos mediante los modelos de Gibson & Ashby, Exponencial y Eficiencia. Por lo tanto, se concluye que los modelos GRNN mostraron un buen desempeño en la predicción de propiedades mecánicas de piezas FDM, ya que presentaron valores de precisión muy altos y las curvas representaron el comportamiento experimental de manera puntual. De esta manera se puede decir que el modelo GRNN puede ser de gran utilidad para el cálculo de propiedades mecánicas de componentes FDM, o tecnologías AM similares. Sin embargo,

es necesario que para el manejo de dichos modelos GRNN se cuente con experiencia y conocimiento adecuado de las mismas.

Casos de estudio

Para validar los modelos analíticos presentados previamente se seleccionaron dos casos de estudio, los cuales fueron fabricados con diferentes parámetros del proceso FDM. Los parámetros considerados fueron el porcentaje de relleno, la orientación de fabricación y el número de capas de perímetro. Con el fin de calcular la fuerza máxima experimental soportada, los componentes fabricados se sometieron a ensayos de tensión. Los resultados experimentales fueron comparados con los resultados obtenidos mediante un análisis por elemento finito (MEF) considerando las propiedades de la pieza obtenidas del modelo analítico. Los valores encontrados presentaron un rango aceptable de error para valores altos de porcentaje de relleno. Por lo tanto se concluye que los modelos analíticos pueden ser utilizados para la predicción de propiedades de componentes FDM complejos. Dichos modelos son una contribución al desarrollo de conocimiento de Diseño para Manufactura Aditiva.

Contribuciones

Las principales contribuciones del presente trabajo de tesis se resumen a continuación:

- Evaluación de la influencia de la orientación de fabricación y porcentaje de relleno en el desempeño estructural de componentes FDM.
- Una nueva metodología experimental basada en la normalización de resultados con respecto a las propiedades de la materia prima y utilizando el porcentaje de relleno real de las piezas fabricadas.
- Diversos modelos analíticos de predicción de propiedades mecánicas de componentes FDM, basados en el porcentaje de relleno y orientación de fabricación.
- Un modelo nuevo para la predicción de propiedades en cualquier orientación de fabricación y con base en los valores de porcentaje de relleno y orientación de fabricación.
- Dos modelos basados en redes neuronales GRNN, para la predicción de propiedades estructurales de componentes FDM.
- Evaluación de la influencia de la orientación de fabricación y porcentaje de relleno en el desempeño a la fatiga de componentes FDM.

- Aplicación y validación de los modelos de predicción mediante casos de estudio correspondientes al diseño de componentes mecánicos fabricados por el proceso FDM.
- Generación de conocimientos en el área de Diseño para Manufactura Aditiva.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se consideran las siguientes actividades:

- ❖ Desarrollar modelos analíticos de predicción para el comportamiento a la fatiga de componentes fabricados mediante FDM.
- ❖ Implementar mejoras como factores de forma para geometrías complejas en los modelos analíticos de predicción del comportamiento a la tensión para obtener valores menores de error.
- ❖ Desarrollar una plataforma digital para implementar los modelos desarrollados y realizar el análisis de factibilidad, con el fin de que el diseñador pueda contar con una herramienta que facilite su proceso de diseño de componentes fabricados mediante tecnologías AM de una manera más rápida y confiable.
- ❖ Evaluar el comportamiento estructural y modelos de predicción para otro tipo de materiales, cargas, y tecnologías AM. Lo anterior para ampliar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico y observar si existen diferencias con respecto a la tecnología FDM o el material utilizado.

REFERENCIAS

- [1] S.S Babu, R. Goodridge, (2014), "Additive Manufacturing", American Ceramic Society Bulletin Journal, Vol. 31 Iss. 8 pp. 67-7.
- [2] Durgun I., Ertan R., (2014), "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost", Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 pp. 228 – 235.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, (2010), "Design for Additive Manufacturing", Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Chapter 11 pp. 283-316.
- [4] C. Klahn, B. Leutenecker, M. Meboldt, (2015), "Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing", Procedia CIRP Journal, Vol. 36 pp. 230-235.
- [5] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve, (2012), "Designing for Additive Manufacturing", Procedia CIRP Journal, Vol. 3 Iss 1 pp. 632- 637.
- [6] V. Shanmugam, O. Das, K. Babu, U. Marimuthu, A. Veerasimman, D. J. Johnson, R. E. Neisiyany, M. S. Hedenqvist, S. Ramakrishna and F. Berto, (2020), "Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials", International Journal of Fatigue, Vol. 143, pp. 1-15.
- [7] Nannan Guo, Ming C. Leu, (2013), "Additive manufacturing: technology, applications, and research needs", Front. Mech. Eng., Vol. 8 Iss. 3 pp. 215-243.
- [8] T. Vaneker, (2017), "The role of Design for Additive Manufacturing in the successful economical introduction of AM", Procedia CIRP Journal, Vol. 60 pp. 181-186.
- [9] M. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, et. al, (2016), "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints", CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 65 Iss 2 pp. 737- 760.
- [10] D. Bourell, M. Leu, D. Rosen, (2009), "Identifying the Future of Freedom Processing", Rapid Prototyping Journal, pp. 1-40.
- [11] Cuan-Urquizo E., Barocio E., Tejada-Ortigoza V., Pipes R.B., Rodriguez C.A. and Roman-Florrs A., (2019), "Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches", Materials, Vol. 12, pp. 1-25.
- [12] Cerda-Avila S.N., "Análisis de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de partes fabricadas mediante Modelado por Deposición Fundida", Tesis de maestría, Mecatrónica y sistemas mecánicos, UASLP, San Luis Potosí, México, 2017.
- [13] Fodran E., Koch M. and Menon U., (1996), "Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles", Proceedings of the 1996 Solid Freeform Fabrication Symposium, pp.419-442.

- [14] Bertoldi M., Yardimci M.A., Güçeri S.I. and Sala G., (1998), "Mechanical characterization of Parts Processed via Fused Deposition", Proceedings of the 1998 Solid Freeform Fabrication Symposium, pp.557-566.
- [15] Rodriguez J.F., Thomas J.P. and Renaud J.E., (2000), "Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, pp. 175-186.
- [16] Bellini A., and Güçeri B., (2003), "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling", Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, pp. 252 – 264.
- [17] Raut S., Jatti V.S., Khedkar N.K. and Singh T.P., (2014), "Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts", Procedia Materials Science, Vol 6., pp. 1625-1630.
- [18] Hill N. and Haghi M., (2014), "Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate", Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, pp. 221- 227.
- [19] Carneiro O.S., Silva A.F. and Gomes R., (2015), "Fused deposition modeling with polypropylene", Materials & Design, Vol.83, pp. 768-776.
- [20] Lanzotti A., Grasso M., Staiano G. and 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, Vol. 21, pp. 604-617.
- [21] Alvarez K.L., Lagos R. and Aizpun M., (2016), "Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts", Ingeniería e Investigación, Vol. 36, pp. 110-116.
- [22] Torres J., Cole M., Owji A., DeMastry Z. and Gordon A.P., (2016), "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments", Rapid Prototyping Journal, Vol. 22, pp. 1-56.
- [23] Christiyan K.G., Chandrasekhar U. and Venkateswarlu K., (2016), "A study of the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 114, pp. 1-8.
- [24] Chacón J.M., Caminero M.A., Gracia-Plaza E. and 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, Vol. 124, pp. 143-157.
- [25] Kozior T. and Kundera C., (2017), "Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models", Procedia Engineering, Vol. 192, pp. 463-468.
- [26] Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Young A., Jerez A., Steinbach D., Kroese C. and Ifju P., (2017), "Experimental Characterization of the

- Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts”, Yoshida S., Lamberti L., Sciammarella C. (eds) *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, Vol. 3, pp.89-105.
- [27] Rodriguez-Panes A., Claver J. and Camacho A.M., (2018), “The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis”, *Materials*, Vol. 11 pp. 1-21.
- [28] Liu Z., Lei Q. and Xing S., (2019), “Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, pp. 3741-3751.
- [29] N.A. Fountas, P. Kostazos, H. Pavlidis, V. Antoniou, D.E. Manolakos and N.M. Vaxevanidis, (2020), “Experimental investigation and statistical modelling for assessing the tensile properties of FDM fabricated parts”, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 26, pp. 139-146.
- [30] W. Cui, X.P.Huang and F. Wang, (2014), “Description of Fatigue Loading”, *Advanced Topics in Science and Technology in China*, pp.173-208.
- [31] J. Lee and A. Huang, (2013), “Fatigue analysis of FDM materials”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol 19 Iss 4, pp. 291-299.
- [32] S. Ziemian, M. Okwara and C.W. Ziemian, (2015), “Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21 Iss. 3, pp. 270-278.
- [33] C.W. Ziemian, R.D. Ziemian and K.V. Haile, (2016), “Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts”, *Materials and Design*, Vol. 109, pp. 209-218.
- [34] C. Lee, T. Corbett, T. Kok, S.T. Smith, H. Villarraga and J.A. Tarbuton, (2014), “Identification of Mechanical and Fatigue Characteristics of Polymers Fabricated by additive Manufacturing Process”, *American Society for Precision Engineering*, Vol. 57, pp. 186-189.
- [35] M. Frascio, M. Avalor and M. Monti, (2018), “Fatigue strength of plastic components made in additive manufacturing: first experimental results”, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 12, pp. 32-43.
- [36] M. Domingo-Espin, J.A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa and J. Lluma Fuentes, (2018), “Fatigue Performance of ABS Specimens Obtained by Fused Filament Fabrication”, *Materials*, Vol 11. Pp. 1-16.
- [37] M.M Padzi, M.M Bazin and W. M. W. Muhamad, (2017), “Fatigue Characteristics of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)”, *Materials, Science and Engineering*, Vol. 269, pp. 1-6.

- [38] M. F. Afrose, S. H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad and I. Sbarski, (2016), "Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material", *Prog Additive Manufacturing*, Vol. 1, pp. 21-28.
- [39] O.H. Ezeh and L. Susmel, (2018), "Fatigue behaviour of additively manufactured polylactide (PLA)", *Procedia Structural Integrity*, Vol. 13, pp. 728 – 734.
- [40] R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, J. Lluma-Fuentes, G. Gomez-Gras and DA. Puig, (2017), "Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 872-879.
- [41] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez and J. Lluma-Fuentes, (2018), "Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens", *Materials and Design*, Vol. 140, pp. 278-285.
- [42] B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, M. Meboldt, (2016), "Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing", *Procedia CIRP Journal*, Vol. 50 pp. 408- 413.
- [43] G. Adam, D. Zimmer, (2014), "Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 7 Iss 1 pp. 20-28.
- [44] C. Klahn, B. Leutenecker, M. Meboldt, (2014), "Design for additive manufacturing – Supporting the substitution of components in series products", *Procedia CIRP Journal*, Vol. 21 pp. 138- 143.
- [45] S. Hällgren, L. Pejryd, J. Ekengren, (2016), "(Re) Design for Additive Manufacturing ", *Procedia CIRP Journal*, Vol. 50 pp. 246- 251.
- [46] M. Orquéra, S. Campocasso, D. Millet, (2017), "() Design for Additive Manufacturing Method for a Mechanical System Downsizing", *Procedia CIRP Journal*, Vol. 60 pp. 223- 228.
- [47] K. Saloniitis, S. Zarban, (2015), "Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques", *Procedia CIRP Journal*, Vol. 36 pp. 193- 198.
- [48] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognal et. al., (2014), "Robotics and Computer-Integrated Manufacturing A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 30 Iss 4 pp. 389-398.
- [49] Zhang, Y. and Chou, Y.K. (2006), "Three- dimensional finite element analysis simulations of the fused deposition modelling process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220 No. 10, pp. 1663-1671.
- [50] Hambali, R.H., Celik, H.K., Smith, P.C. and Rennie, A. (2010), "Effect of build orientation of FDM parts: a case study for validation of deformation behaviour by FEA", *IDECON 2010-International Conference on Design and Concurrent Engineering*, pp. 224-228.

- [51] Rezayat, H., Zhou, W., Siriruk, A., Penumadu, D. and Babu, S.S. (2015), "Structure-mechanical property relationship in fused deposition modelling", *Materials Science and Technology*, Vol. 31 No. 8, pp. 895-903.
- [52] Gorski, F., Kuczko, W., Wichniarek, R. and Hamrol, A. (2015), "Computation of mechanical properties of parts manufactured by fused deposition modeling using finite element method", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 368, pp. 403-413.
- [53] Somireddy, M. and Czekanski, A. (2017), "Mechanical characterization of additively manufactured parts by FE modeling of mesostructure", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 1 No. 2, pp. 1-21.
- [54] Somireddy, M., Czekanski, A. and Singh, C.V. (2018), "Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM", *Materials Today Communications*, Vol. 15, pp. 143-152.
- [55] Cerda-Avila, S.N., Medellin-Castillo, H.I. and de Lange, D.F. (2019), "Analysis and numerical simulation of the structural performance of fused deposition modeling samples with variable infill values", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 141 No. 2, pp. 021005-021005-7.
- [56] Croccolo, D., De Agostinis, M. and Olmi, G. (2013), "Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behavior of fused deposition processed parts made of ABS-M30", *Computational Materials Science*, Vol. 79, pp. 506-518.
- [57] Sung-Hoon A. et. al., (2003), "Anisotropic tensile failure model of rapid prototyping parts – Fused Deposition Modeling (FDM)", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, pp. 1510-1516.
- [58] Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V. and Pappalettere, C. (2016), "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory", *Materials & Design*, Vol. 90, pp. 453-458.
- [59] Y. Zhao, Y. Chen and Y. Zhou, (2019), "Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses", *Materials and Design*, Vol. 181, pp. 1 -10.
- [60] Ang, K.C., Leong, K.F., Chua, C.K. and Chandrasekaran, M. (2006), "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12 No. 2, pp. 100-105.
- [61] Hernandez-Rivera et al. (2016), "Numerical and theoretical modeling of the elastoplastic response of aluminum-graphite composites during straining", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 650 pp. 323-334.
- [62] Mouhmid et al. (2006), "A study of the mechanical behavior of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation", *Polymer Testing*, Vol. 25 pp.544-552.

- [63] Choren et al. (2013), “Young’s modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications”, *Journal of Materials Science*, Vol. 48, Iss. 15 pp. 5103-5112.
- [64] Gibson and Ashby (1988), “Cellular solids: structure and properties”, Oxford: Pergamon Press.
- [65] S. Nasiri, M. R. Khosravani, (2021), “Machine learning in predicting mechanical behavior in additively manufactured parts”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 14, pp. 1137-1153.
- [66] Soriano-Méndez M.A., (2019), “Visual recognition with Machine Learning using Cloud services”, Tesis de maestría en Ingeniería de la Computación.
- [67] Heath N. (Febrero 2018), “What is AI? Everything you need to know about Artificial Intelligence”, disponible en <https://www.zdnet.com/article/what-is-ai-everything-you-need-to-know-about-artificial-intelligence/>
- [68] Sinnot N., (Abril 2018), “How Machine Learning Is Changing the World – and Your Everyday Life”, disponible en <https://www.entrepreneur.com/article/312016>
- [69] Cuevas-Tello J.C., (2017), “Apuntes de Redes Neuronales Artificiales”, arXiv:1806.05298v1.
- [70] Andres, (Junio 2011), “Neuronas Y Nervios”, disponible en <http://nauronas.blogspot.com/>
- [71] Sandhu S., (Abril), “How Neural Networks process input data”, disponible en <https://medium.com/ai-in-plain-english/my-notes-on-neural-networks-adf3e49657f8>
- [72] Cuevas-Tello, (2019), “Handouts on Regression Algorithms”, Apuntes de clase de Inteligencia Artificial, UASLP.
- [73] Garg, A., Tai, K., Lee, C.H. and Savalani, M.M. (2014), “A hybrid M5'-genetic programming approach for ensuring greater trustworthiness of prediction ability in modelling of FDM process”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 25 No. 6, pp. 1349-1365.
- [74] Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL (2016) Investigation of dynamic elastic deformation of parts processed by fused deposition modeling additive manufacturing. *Adv Prod Eng Manag* 11(3):227–238.
- [75] Bayraktar Ö, Uzun G, Çakiroğlu R, Guldaz A (2017) Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. *Polym Adv Technol* 28(8):1044–1051.

- [76] Panda, B., Leite, M., Biswal, B.B., Niu, X. and Garg, A. (2018), "Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures", *Measurement*, Vol. 116, pp. 495-506.
- [77] M. Goudswaard, B. Hicks and A. Nassehi, (2021), "The creation of a neural network based capability profile to enable generative design and the manufacture of functional FDM parts", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, pp. 2951-2968.
- [78] 3D Matter. (2015). What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints? [en línea] Disponible en: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/> [Acceso 11 Junio 2019].
- [79] MatWeb, NatureWorks® Ingeo™ 2002D Extrusion Grade PLA [en línea] Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1e288619764846d2b794bd077e7f1bba&ckck=1> [Acceso 11 Junio 2019].
- [80] ASTM International, D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [81] Fischer M. and Schöppner, (2016), "Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085", *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 69, pp. 1-24.
- [82] Jap N.S.F., Pearce G.M., Hellier A.K., Russell N., Parr W.C. and Walsh W.R., (2019), "The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer". *Int J Fatigue*, Vol. 37, pp. 124:328
- [83] Fernández-Canteli A., Przybilla C., Nogal M., López Aenlle M. and Castillo E., (2014), "ProFatigue: A Software Program for Probabilistic Assessment of Experimental Fatigue Data Sets", *Procedia Engineering*, Vol.74, pp. 236-241.
- [84] Jain P. and Kuthe A.M., (2013), "Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach", *Procedia Engineering*, Vol. 63, pp. 4-11.
- [85] Boschetto A. and Bottini L., (2014), "Accuracy prediction in fused deposition modelling", *International Journal of Additive Manufacturing Technology*, Vol 73, pp. 913-928.
- [86] Zwier M.P. and Wits W.W., (2016), "Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization", *Procedia CIRP*, Vol. 55, pp. 128-133.
- [87] Boschetto A., Bottini L. and Venial F., (2016), "Integration of FDM surface quality modeling with process design", *Additive Manufacturing*, Vol. 12, pp. 334-344.
- [88] Alafaghani A., Qattawi A. and Ablat M.A., (2017), "Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling", *Open Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, pp. 291-318.
- [89] Singh J., Singh R., and Singh H., (2017), "Investigations for improving the surface finish of FDM based ABS replicas by chemical vapor smoothing process: A case study", *Assembly Automation*, Vol. 37, pp. 13-21.

