



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



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

Análisis de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de partes fabricadas mediante Modelado por Deposición Fundida

TESIS

Para obtener el grado de
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

En la opción de
MECATRÓNICA Y SISTEMAS MECÁNICOS (MSM)

Presenta

Ing. Steffany Noemí Cerda Avila

Asesor

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo



UASLP

Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

20 de julio de 2017

**ING. 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 **Maestra en Ingeniería Mecánica**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Análisis de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de partes fabricadas mediante Modelado Por Deposición Fundida”

Introducción.

1. Antecedentes teóricos.
2. Análisis del proceso de Deposición Fundida.
3. Metodología experimental del proceso de Deposición Fundida.
4. Pruebas experimentales del comportamiento estructural.
5. Análisis teórico y numérico del comportamiento estructural.
6. Análisis y discusión de resultados.

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR:
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Resumen

El uso de las tecnologías de prototipado rápido (RP), comúnmente conocidas como técnicas de impresión 3D, ha incrementado grandemente desde sus orígenes hace aproximadamente tres décadas. Originalmente las tecnologías RP fueron desarrolladas y utilizadas para la fabricación de prototipos. Sin embargo, debido al gran desarrollo y avance tecnológico logrados en los últimos años, las tecnologías RP han evolucionado gradualmente a convertirse en tecnologías de Manufactura Rápida (RM) de componentes o partes funcionales. Esta evolución ha sido limitada debido a que las propiedades mecánicas de las partes generadas en estos sistemas son limitadas y dependen en gran manera de los parámetros del proceso.

Por lo anterior, el presente trabajo de tesis comprende el análisis y evaluación de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las partes fabricadas mediante el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM), debido a que es uno de los procesos comerciales más comúnmente utilizados en la industria. El objetivo es determinar la influencia de los diferentes parámetros del proceso en las propiedades estructurales de las partes FDM, así como desarrollar modelos que permitan predecir el comportamiento estructural de la pieza final. La metodología utilizada contempla pruebas experimentales, desarrollo de modelos teórico-experimentales, y el desarrollo de modelos numéricos. Los parámetros del proceso considerados son el espesor de capa, la dirección de relleno, el porcentaje de relleno y la orientación de fabricación. Para realizar el estudio se fabricaron diversas probetas FDM con diferentes combinaciones de los parámetros del proceso, las cuales fueron sometidas a ensayos de tensión. Las propiedades mecánicas analizadas son la resistencia última a la tensión (UTS), el Módulo de Young y la elongación a la ruptura. Además se desarrollaron modelos teóricos y numéricos mediante el Método de Elemento Finito (FEM).

Los resultados demostraron que el comportamiento de los valores experimentales se asemeja a los encontrados en la literatura; además, los resultados analíticos concuerdan con los resultados experimentales, y los resultados numéricos reflejaron un comportamiento muy cercano al experimental. Se encontró que los parámetros más influyentes en las propiedades estructurales son el porcentaje de relleno y la orientación de fabricación. Estos resultados pueden ser utilizados en la toma de decisiones al momento de elegir los parámetros de fabricación de acuerdo a las condiciones o requerimientos de desempeño mecánico particulares de la pieza o componente en cuestión.

Agradecimientos

Agradezco a mi esposo Roberto Carlos Juárez Mitre por todo el amor y comprensión 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 Alanis 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 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.

Al M.I. Alonso De la Garza San Miguel, encargado del Laboratorio 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.

A mis compañeros del Laboratorio de Manufactura Avanzada por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias, por ayudarme cuando lo necesitaba y sobre todo por su amistad incondicional y hacer de mi estadía en la maestría una experiencia única y gratificante.

Steffany

Contenido

Resumen.....	i
Agradecimientos.....	ii
Contenido.....	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tablas.....	ix
Introducción.....	1
Justificación.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos particulares.....	3
Organización de la tesis.....	4
Capítulo 1.....	5
Antecedentes teóricos.....	5
1.1 Manufactura aditiva.....	5
1.2 Modelado por Deposición Fundida.....	11
1.3 Parámetros del proceso FDM.....	13
1.4 Propiedades mecánicas de partes fabricadas por FDM.....	15
1.5 Influencia de los parámetros FDM en las propiedades mecánicas.....	18
1.6 Modelado y simulación numérica de partes fabricadas por FDM.....	20
1.7 Comportamiento mecánico de materiales porosos.....	21
1.7.1 Materiales porosos.....	21
1.7.2 Comportamiento mecánico.....	23
Capítulo 2.....	25
Análisis del proceso de Deposición Fundida.....	25
2.1 Definición de parámetros del proceso FDM a analizar.....	25
2.2 Influencia de los parámetros FDM en las propiedades mecánicas.....	25
2.3 Establecimiento de valores de los parámetros del proceso FDM.....	31
Capítulo 3.....	37
Metodología experimental del proceso de Deposición Fundida.....	37
3.1 Diseño del experimento.....	37
3.2 Combinación de parámetros FDM.....	40
3.3 Nomenclatura de probetas.....	42
3.4 Probetas estándar.....	42
3.5 Validación de parámetros de fabricación.....	43
3.5.1 Espesor de capa.....	44
3.5.2 Dimensiones.....	46
3.5.3 Porcentaje de relleno.....	48
3.6 Caracterización de materia prima.....	49

Capítulo 4.....	53
Pruebas experimentales del comportamiento estructural.....	53
4.1 Metodología experimental general.....	53
4.2 Fabricación de probetas.....	53
4.3 Medición de dimensiones.....	55
4.4 Medición de peso.....	59
4.5 Ensayo mecánico.....	61
4.6 Resultados experimentales.....	62
4.6.1 Efectos de la orientación de fabricación.....	63
4.6.2 Efectos del espesor de capa.....	66
4.6.3 Efectos del patrón de relleno.....	69
4.6.4 Efectos del porcentaje de relleno.....	73
4.7 Análisis y discusión general.....	76
Capítulo 5.....	77
Análisis teórico y numérico del comportamiento estructural.....	77
5.1 Modelos teóricos-empíricos.....	77
5.1.1 Ley de Mezclas.....	78
5.1.2 Modelo de Ley de Mezclas con eficiencia.....	81
5.1.3 Modelo Gibson & Ashby.....	84
5.1.4 Otros modelos.....	89
5.2. Modelado numérico.....	92
5.2.1 Modelo geométrico.....	93
5.2.2 Material.....	95
5.2.3 Modelo FEM.....	95
5.2.4 Simulación.....	97
5.2.5 Resultados.....	98
5.2.6 Análisis y discusión.....	98
Capítulo 6.....	101
Análisis y discusión de resultados.....	101
6.1 Resultados experimentales.....	101
6.2 Modelos teórico-experimental.....	103
6.2.1 Modelo lineal-exponencial.....	103
6.2.2 Modelo Euleriano.....	107
6.2.3 Modelo Tangencial.....	109
6.2.4 Análisis comparativo de modelos.....	113
6.2.4.1 Orientación X.....	113
6.2.4.2 Orientación Y.....	116
6.2.4.3 Orientación Z.....	119
6.3 Experimental, teórico, numérico.....	122
6.4 Discusión.....	124
Conclusiones.....	127
Referencias.....	131

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de FDM.	3
Figura 1.1 Metodología general de proceso de AM.	6
Figura 1.2. Clasificación de los procesos de AM de acuerdo al conformado de la pieza.	7
Figura 1.3. Proceso SLA.	9
Figura 1.4. Proceso SLS.	10
Figura 1.5. Proceso LOM.	10
Figura 1.6. Proceso FDM.	12
Figura 1.7. Altura de capas o diseño del espesor de capa [11].	14
Figura 1.8. Parámetro de ángulo de trama [11].	14
Figura 1.9. Orientación de la parte [11].	14
Figura 1.10. Anchura del hilo [11].	14
Figura 1.11. Aplicación de espacio de aire entre filamentos [11].	15
Figura 1.12. Vista de la sección transversal de una parte ABS construida con 0/90° de orientación de relleno: a) vista general y b) acercamiento.	16
Figura 1.13. Orientación de fabricación Z y las posiciones de medición de las partes fabricadas [31].	20
Figura 2.1. Análisis de la influencia del espesor de capa en el UTS.	26
Figura 2.2. Análisis de la influencia del espesor de capa en el Módulo de Young.	27
Figura 2.3. Análisis de la influencia de la orientación de la pieza en el UTS.	27
Figura 2.4. Análisis de la influencia de la orientación de la pieza en el Módulo de Young.	28
Figura 2.5. Análisis de la influencia del ángulo de relleno de la pieza en el UTS.	28
Figura 2.6. Análisis de la influencia del ángulo de relleno de la pieza en el Módulo de Young.	29
Figura 2.7. Análisis de la influencia del ángulo de relleno cruzado en el UTS.	29
Figura 2.8. Análisis de la influencia del ángulo de relleno cruzado en el Módulo de Young.	30
Figura 2.9. Análisis de la influencia del porcentaje de relleno de pieza por autor contra UTS.	30

Figura 2.10. Análisis de la influencia del porcentaje de relleno de pieza por autor contra Módulo de Young.	31
Figura 2.11. FlashForge Creator Pro™.	34
Figura 2.12. Orientaciones de fabricación X, Y y Z de izquierda a derecha respectivamente.	34
Figura 3.1. Variables de un proceso y preguntas a responder para un diseño de experimentos.	38
Figura 3.2. Clasificación de los diseños experimentales.	39
Figura 3.3. Diferentes geometrías para ensayos a tracción según ASTM D638-02a.	43
Figura 3.4. FlashForge Creator Pro™.	44
Figura 3.5. Comparador óptico PJ-2500, Mitutoyo.	44
Figura 3.6. Validación de espesor de capa: a) probeta en comparador óptico, b) vista de capas y c) valor de medición de capas.	45
Figura 3.7. Validación de dimensiones: a) creación de planos en mesa de coordenadas, b) toque con el punzón en cara y c) cálculo de la distancia entre planos.	46
Figura 3.8. Soportes de probeta impresa en dirección Y.	48
Figura 3.9. Tramos de filamentos de materia prima: a) Filamentos durante ensayo a tracción y b) Filamentos al terminar el ensayo.	50
Figura 4.1. Metodología general.	53
Figura 4.2. Proceso de fabricación de probetas de PLA: a) Probetas durante el proceso y b) Probetas terminadas.	54
Figura 4.3 Espacio de trabajo del equipo con la probeta con dimensiones originales en orientación Z.	55
Figura 4.4. Falla de dislocaciones entre las capas en probetas con orientación Z.	55
Figura 4.5. Microestructura de las probetas: a) 20% de relleno teórico, b) 40% de relleno teórico y c) 80% de relleno teórico.	58
Figura 4.6. Medición del peso de probetas.	59
Figura 4.7. Ensayo a tracción de probetas: a) preparación de probetas para ensayo, b) ensayo a tracción y c) probetas después del ensayo.	61
Figura 4.8. Máquina Universal Shimadzu, modelo AG-100KNI.	61
Figura 4.9. Curva esfuerzo-deformación del conjunto de probetas 100X345.	62
Figura 4.10. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.	64

Figura 4.11. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.	64
Figura 4.12. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.	65
Figura 4.13. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.	67
Figura 4.14. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.	68
Figura 4.15. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.	68
Figura 4.16. EB normalizada vs. porcentaje y patrón de relleno.	71
Figura 4.17. UTS normalizado vs. porcentaje y patrón de relleno.	72
Figura 4.18. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje y patrón de relleno.	72
Figura 4.19. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.	73
Figura 4.20. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.	74
Figura 4.21. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.	75
Figura 5.1. Comparativa de resultados del modelo en UTS respecto a todas las orientaciones.	80
Figura 5.2. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico respecto a todas las orientaciones.	80
Figura 5.3. Comparativa de resultados del modelo en UTS en las orientaciones X, Y y Z.	83
Figura 5.4. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico en las orientaciones X, Y y Z.	84
Figura 5.5. Comparativa de resultados del modelo en UTS en las orientaciones X, Y y Z.	87
Figura 5.6. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico en las orientaciones X, Y y Z.	88
Figura 5.7. Comparativa de resultados UTS del modelo Ravichandran y los experimentales.	91
Figura 5.8. Comparativa de resultados del módulo elástico del modelo Ravichandran y los experimentales.	91
Figura 5.9. Microestructura y porosidad de las probetas FDM experimentales (izquierda) y modelos CAD ANSYS (derecha): a) 36% relleno, b) 37.58% relleno, c) 53% relleno, d) 65.7% relleno, e) 82% relleno y f) 96.61% relleno.	93

Figura 5.10. Microestructura y porosidad de las probetas FDM experimentales (izquierda) y modelos Comsol (derecha): a) 36% relleno, b) 34.14% relleno, c) 53% relleno, d) 49% relleno, e) 82% relleno y f) 83.66% relleno.	94
Figura 5.11. Modelos FEM ANSYS y Comsol: a) modelo con 37.58% relleno, 536 978 elementos ANSYS, b) modelo con 65.7% relleno, 588 291 elementos ANSYS, c) modelo con 96.61% relleno, 705 377 elementos ANSYS, d) modelo con 34.14% relleno, 1 582 137 grados de libertad Comsol, e) modelo con 49% relleno, 1 681 524 grados de libertad Comsol y f) modelo con 83.66% relleno, 2 700 000 grados de libertad Comsol.	96
Figura 5.12. Condiciones de frontera FEM.	97
Figura 5.13. Módulo Elástico Equivalente vs. Porcentaje de relleno.	99
Figura 6.1. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno en orientaciones X, Y, Z.	101
Figura 6.2. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno en orientaciones X, Y, Z.	102
Figura 6.3. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación X.	114
Figura 6.4. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación X.	115
Figura 6.5. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Y.	117
Figura 6.6. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Y.	118
Figura 6.7. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Z.	120
Figura 6.8. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Z.	121
Figura 6.9. UTS vs. porcentaje de relleno para todas las orientaciones de fabricación, resultados de literatura y modelos analíticos principales para cada orientación.	123
Figura 6.10. Módulo elástico vs. porcentaje de relleno para todas las orientaciones de fabricación, resultados de literatura y modelos analíticos principales para cada orientación.	124

Índice de tablas

Tabla 1.1. Principios de funcionamiento de los procesos AM [6].	8
Tabla 2.1. Parámetros del proceso FDM estudiados en la literatura.	25
Tabla 2.2. Valores utilizados para el espesor de capa.	31
Tabla 2.3. Valores utilizados para el ángulo de relleno.	32
Tabla 2.4. Valores utilizados para el porcentaje de relleno.	32
Tabla 2.5. Valores utilizados para la orientación de pieza.	33
Tabla 2.6. Parámetros y valores seleccionados.	35
Tabla 3.1. Parámetros y valores seleccionados de fabricación de probetas.	40
Tabla 3.2. Combinaciones posibles de parámetros y valores de fabricación de probetas.	41
Tabla 3.3. Nomenclatura de las probetas.	42
Tabla 3.4. Dimensiones utilizadas para el Tipo I.	43
Tabla 3.5. Valores de mediciones de espesores de capa para un espesor nominal de 0.18mm.	45
Tabla 3.6. Resultados de dimensiones para validación de probetas.	47
Tabla 3.7. Resultados de la medición del peso en probetas con una capa de perímetro.	49
Tabla 3.8. Resultados de ensayos a tensión de filamentos de PLA.	51
Tabla 4.1. Valores estándar de los parámetros de fabricación utilizados.	54
Tabla 4.2. Dimensiones utilizadas para las probetas fabricadas con orientación Z.	55
Tabla 4.3. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación X y Y.	56
Tabla 4.3. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación X y Y (cont.).	57
Tabla 4.4. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación Z.	58
Tabla 4.5. Valores promedio de peso y porcentaje de relleno real.	60
Tabla 4.6. Valores promedio de la materia prima utilizados para normalizar los resultados.	63
Tabla 4.7. Resultados con respecto a la orientación de fabricación.	63
Tabla 4.8. Resultados promedio considerando el efecto del espesor de capa.	66
Tabla 4.9. Resultados promedio del efecto del patrón de relleno.	70

Tabla 5.1. Valores experimentales considerados.	77
Tabla 5.2. Valores de materia prima.	78
Tabla 5.3. Resultados del modelo de Ley de Mezclas.	79
Tabla 5.4. Valores promedio del coeficiente de eficiencia.	82
Tabla 5.5. Resultados del modelo de Ley de Mezclas con eficiencia.	82
Tabla 5.6. Valores promedio de las constantes experimentales C y n.	86
Tabla 5.7. Resultados del modelo de Gibson y Ashby.	86
Tabla 5.8. Resultados del modelo de Reuss para los porcentajes experimentales.	89
Tabla 5.9. Resultados del modelo de Ravichandran.	90
Tabla 5.10. Dimensiones y porcentajes de relleno de los modelos CAD.	94
Tabla 5.11. Propiedades del PLA.	95
Tabla 5.12 Resultados del Módulo Elástico Equivalente para cada grupo de probetas.	98
Tabla 6.1. Estimaciones del modelo lineal-exponencial para la orientación X.	104
Tabla 6.2. Estimaciones del modelo lineal-exponencial para la orientación Y.	105
Tabla 6.3. Estimación del modelo lineal-exponencial para la orientación Z.	106
Tabla 6.4. Estimación del modelo Euleriano para la orientación X.	107
Tabla 6.5. Estimaciones del modelo Euleriano para la orientación Y.	108
Tabla 6.6. Estimaciones del modelo Euleriano para la orientación Z.	109
Tabla 6.7. Estimación para el Modelo Tangencial en orientación X.	110
Tabla 6.8. Estimaciones para el Modelo Tangencial en orientación Y.	111
Tabla 6.9. Estimación para el Modelo Tangencial en orientación Z.	112
Tabla 6.10. Error de predicción para la orientación X.	116
Tabla 6.11. Error de predicción para la orientación Y.	119
Tabla 6.12. Error de predicción para la orientación Z.	122

Introducción

Con el fin de reducir los tiempos y costos de desarrollo de nuevos productos, varias compañías han migrado de los procesos tradicionales de desarrollo de nuevos productos a métodos modernos como la Manufactura Aditiva (AM, por sus siglas en inglés), originalmente conocida como Prototipado Rápido (RP, por sus siglas en inglés). Este cambio ha sido motivado no solo por la reducción de costos y tiempos de desarrollo que brindan estas nuevas tecnologías, sino también a la gran flexibilidad y capacidades que ofrecen dichas tecnologías. De esta manera los diseñadores pueden producir partes con geometrías complejas utilizando una amplia gama de materiales disponibles actualmente, así como la fabricación de productos personalizados.

La manufactura aditiva es un término genérico para una serie de tecnologías que permiten fabricar componentes sin la necesidad de herramientas convencionales en primera instancia, o sin la necesidad de contratar servicios de expertos modelistas [1]. La AM también se conoce como Manufactura por Capas (LM Layered Manufacturing) debido a que la pieza es fabricada apilando una capa tras otra [2]. El crecimiento de las tecnologías AM ha sido exponencial desde la comercialización del primer método, estereolitografía (SLA), a finales de 1980. Originalmente las tecnologías AM fueron desarrolladas y utilizadas para la fabricación de prototipos. Sin embargo, debido al gran desarrollo y avance tecnológico logrados en los últimos años, las tecnologías AM han evolucionado gradualmente hasta convertirse en tecnologías de manufactura rápida de componentes o partes funcionales.

Las aplicaciones de las tecnologías AM incluyen:

- Prototipos. Fabricación de prototipos de un amplio rango de piezas con geometrías simples hasta geometrías muy complejas, de una manera más rápida y barata que utilizando los procesos de manufactura convencionales.
- Patrones maestros. Fabricación de herramientas de producción, incluyendo patrones para moldes de fundición de precisión.
- Herramental directo. Para producción baja, puede fabricarse herramental “suave” como son los moldes; de la misma manera puede fabricarse herramental “duro” o volumen de producción alto de herramientas con los nuevos procesos de AM.
- Componentes funcionales o semifuncionales. Algunos procesos AM permiten construir partes completamente funcionales si la aplicación de la misma no es demasiado exigente. Las piezas fabricadas por técnicas AM también pueden utilizarse en ensambles y realizar la función de un producto final de manera exitosa. Sin embargo, en muchos de los casos los materiales disponibles en los sistemas AM no tienen las propiedades físicas adecuadas para su aplicación final [1].

Aun cuando las tecnologías AM han estado en constante evolución y desarrollo desde sus orígenes hace más de tres décadas, su aplicación principal sigue siendo la fabricación de prototipos y modelos conceptuales. Este uso restringido de las tecnologías AM se debe a diversas limitantes, entre las que destaca un comportamiento mecánico incierto de las piezas fabricadas mediante este tipo de tecnologías. La incertidumbre en el desempeño estructural de las partes AM se debe a la gran influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las piezas. Cada combinación de los parámetros del proceso AM puede resultar en diferentes valores de propiedades mecánicas tales como el módulo elástico, anisotropía, dureza, resistencia mecánica, y deformación mecánica. A diferencia de la mayoría de las tecnologías de fabricación convencional, los valores de los parámetros del proceso AM pueden ser más significativos que las propiedades de la materia prima. Por ejemplo, dos conjuntos diferentes de parámetros del proceso AM pueden resultar en la obtención de dos productos con propiedades completamente diferentes. Entre los parámetros de proceso de las tecnologías AM más comunes son: espesor de capa, espacio entre filamentos, porcentaje de relleno, orientación de la pieza, número de capas de perímetro, velocidad de proceso, temperatura de proceso, entre otros. Cada combinación de estos parámetros tiene un efecto en las propiedades y comportamiento mecánico de la pieza final. Por tanto, con el fin de manufacturar piezas funcionales con las tecnologías AM, es necesario conocer la influencia y efecto de los diferentes parámetros del proceso en las propiedades mecánicas finales de la pieza.

Una de las técnicas AM más utilizada es el Modelado por Deposición Fundida (FDM), la cual ofrece muchas ventajas entre las que sobresalen el bajo costo del equipo y materiales, bajos costos de mantenimiento, baja temperatura de operación, amplia gama de materiales disponibles, uso en ambiente de oficina, entre otras. En el proceso FDM la pieza es creada capa tras capa, en donde cada capa se genera mediante el calentamiento de un filamento termoplástico (usualmente ABS o PLA) a un estado semi-líquido por encima de su temperatura de fusión. Una vez calentado, el filamento es depositado a través de una boquilla sobre una plataforma, la cual también se encuentra a una temperatura elevada. La boquilla se mueve en el plano X-Y y la plataforma con respecto al eje Z; de tal manera que al ser depositada una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo para así poder crear la siguiente capa de la sección transversal de la pieza. El proceso continúa de esta manera hasta terminar la pieza, Figura 1 [3].

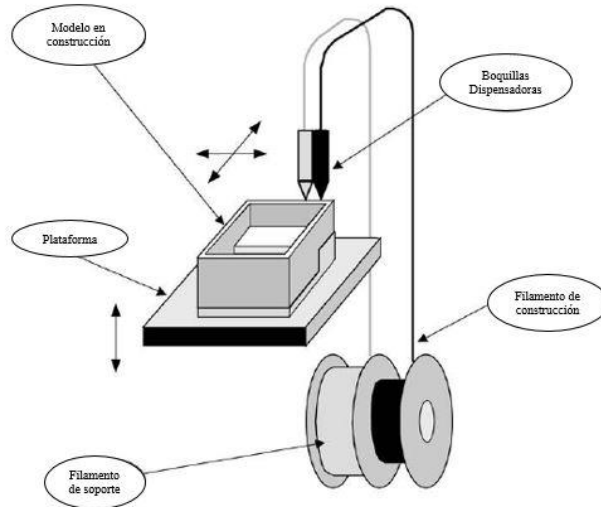


Figura 1. Proceso de FDM.

Justificación

De la literatura se ha observado que una buena cantidad de los trabajos de investigación se han enfocado en el análisis experimental de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante el proceso FDM. Sin embargo, muy poco trabajos se han enfocado en el desarrollo de modelos predictivos para la estimación de las propiedades mecánicas de las piezas en función de los parámetros del proceso FDM. La predicción de propiedades mecánicas de partes fabricadas mediante sistemas AM es de suma importancia para poder diseñar y fabricar partes no solo con cualquier geometría sino también con propiedades mecánicas variables o personalizadas de acuerdo a las necesidades estructurales particulares.

Por lo anterior, el presente trabajo de tesis comprende el análisis y evaluación de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las partes fabricadas mediante FDM, así como el desarrollo de modelos predictivos de las propiedades mecánicas de las piezas FDM en función de los parámetros del proceso. La investigación se centra en el proceso FDM debido a que es uno de los procesos comerciales más comúnmente utilizados en la industria.

Objetivo general

Determinar la influencia de los diferentes parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las partes o componentes fabricados mediante el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM), así como desarrollar modelos que permitan predecir el comportamiento estructural de la pieza final fabricada en FDM.

Objetivos particulares

Los objetivos particulares de este proyecto son:

- Conocer el estado del arte del comportamiento mecánico de las partes fabricadas mediante Prototipado Rápido (RP) y Manufactura Rápida.
- Conocer los principales parámetros del proceso FDM.
- Caracterizar experimentalmente las propiedades mecánicas de partes fabricadas por FDM bajo diversas condiciones y parámetros del proceso.

- Proponer modelos analíticos de predicción de las propiedades mecánicas de partes fabricadas por FDM en función de los parámetros del proceso.
- Probar y mejorar los modelos analíticos con base a los resultados experimentales.
- Analizar y discutir la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las partes fabricadas por FDM.
- Publicar los resultados de la investigación.

Organización de la tesis

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera. En el capítulo 1 se presentan los antecedentes teóricos de la manufactura aditiva, el proceso FDM y sus parámetros, así como del comportamiento estructural de partes FDM y materiales porosos. En el capítulo 2 se analiza el proceso FDM así como trabajos previos en relación a la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades estructurales de las piezas FDM. Posteriormente se habla acerca del diseño de experimentos y la justificación del número de experimentos elegido, la validación de los parámetros de fabricación y caracterización de la materia prima. El capítulo 4 abarca todas las pruebas experimentales realizadas, el procedimiento y los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros de fabricación seleccionados. En el capítulo 5 se presenta el análisis de varios modelos teóricos y numéricos para predecir y simular el comportamiento estructural de las probetas. Posteriormente en el Capítulo 6 se analizan y discuten los diferentes resultados encontrados mediante la experimentación, simulación y modelos teóricos del comportamiento estructural de las probetas fabricadas según los parámetros de fabricación. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas y se plantea el trabajo futuro.

1. Antecedentes teóricos

1.1 Manufactura aditiva

La Manufactura Aditiva (AM por sus siglas en inglés) es el proceso de unir materiales con el fin de fabricar objetos de un modelo 3D, usualmente capa tras capa [4]. Los procesos AM fabrican partes tridimensionales a partir de modelos CAD mediante la adición de material capa por capa, para así ofrecer el beneficio de construir partes de geometrías y materiales complejos. A comparación de los sistemas de manufactura convencionales, los cuales generalmente sustraen material para lograr la forma final, la manufactura aditiva se centra en la creación de piezas añadiendo material para lograr la forma final de éstas. Algunos de los beneficios que ofrece la AM es la reducción de material de desperdicio, la reducción de costos de producción al no requerir herramientas, la facilidad de optimización del diseño, y la rapidez de conceptualización de la pieza, ya que de un modelo computarizado se puede fabricar rápidamente la pieza final.

La AM permite el diseño de productos amigables con el medio ambiente, reduciendo de esta manera la cantidad de energía, combustible y recursos naturales requeridos para su operación. Se han realizado avances significativos en el desarrollo de la manufactura aditiva, los cuales elevan las expectativas para que esta nueva tecnología logre predominar la producción industrial y brinde varios beneficios a la sociedad, como son [4]:

- Productos de atención médica, como implantes, adaptados a las necesidades individuales de los pacientes.
- Uso reducido de materias primas energía mecánica para contribuir a la sostenibilidad ambiental.
- La capacidad de poder reconfigurar la cadena de suministro de acuerdo a la demanda, lo cual presenta una oportunidad de brindar productos menos costosos en menor tiempo y utilizando menos recursos económicos, materiales y maquinaria.

La metodología utilizada por los sistemas de AM se puede resumir de la siguiente manera y se presenta en la Figura 1.1 [5]:

1. El modelo virtual 3D es dividido en una serie de capas paralelas de espesor pequeño.
2. Una vez que se genera la información de cada capa, el sistema AM genera las instrucciones para que se elabore la pieza capa por capa.
3. Ya terminada la pieza, ésta se retira junto con las estructuras de soporte si es el caso.

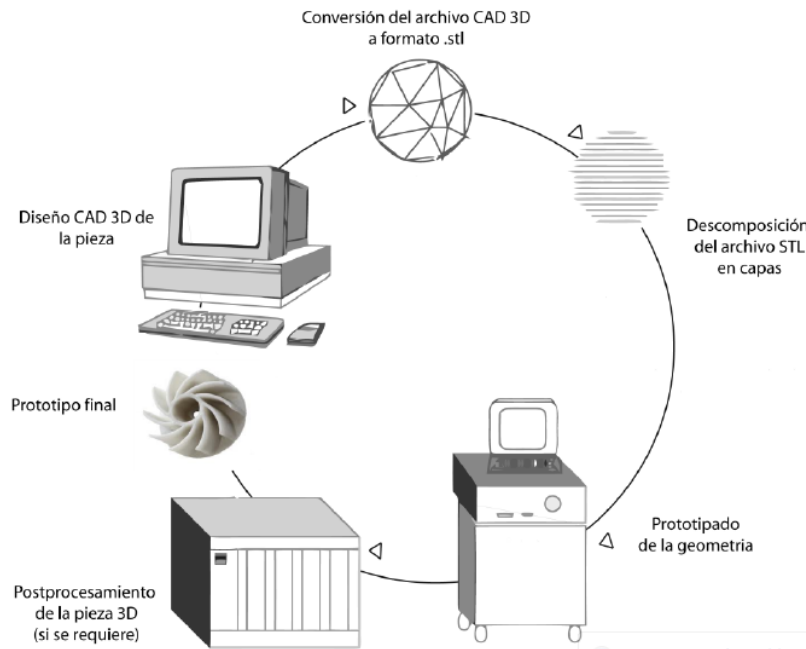


Figura 1.1 Metodología general de proceso de AM.

Las tecnologías de manufactura rápida que existen actualmente utilizan diversas técnicas y materiales para construir componentes capa por capa desde un archivo CAD. Por esta razón, existen diversas clasificaciones, dentro de las cuales se encuentran de acuerdo al conformado de la pieza [5] o de acuerdo al estado de la materia prima depositada. Para el primer caso se clasifican como se muestra en la Figura 1.2 en donde se describen las características para cada uno de ellos y se mencionan algunas tecnologías que utilizan dicho proceso.

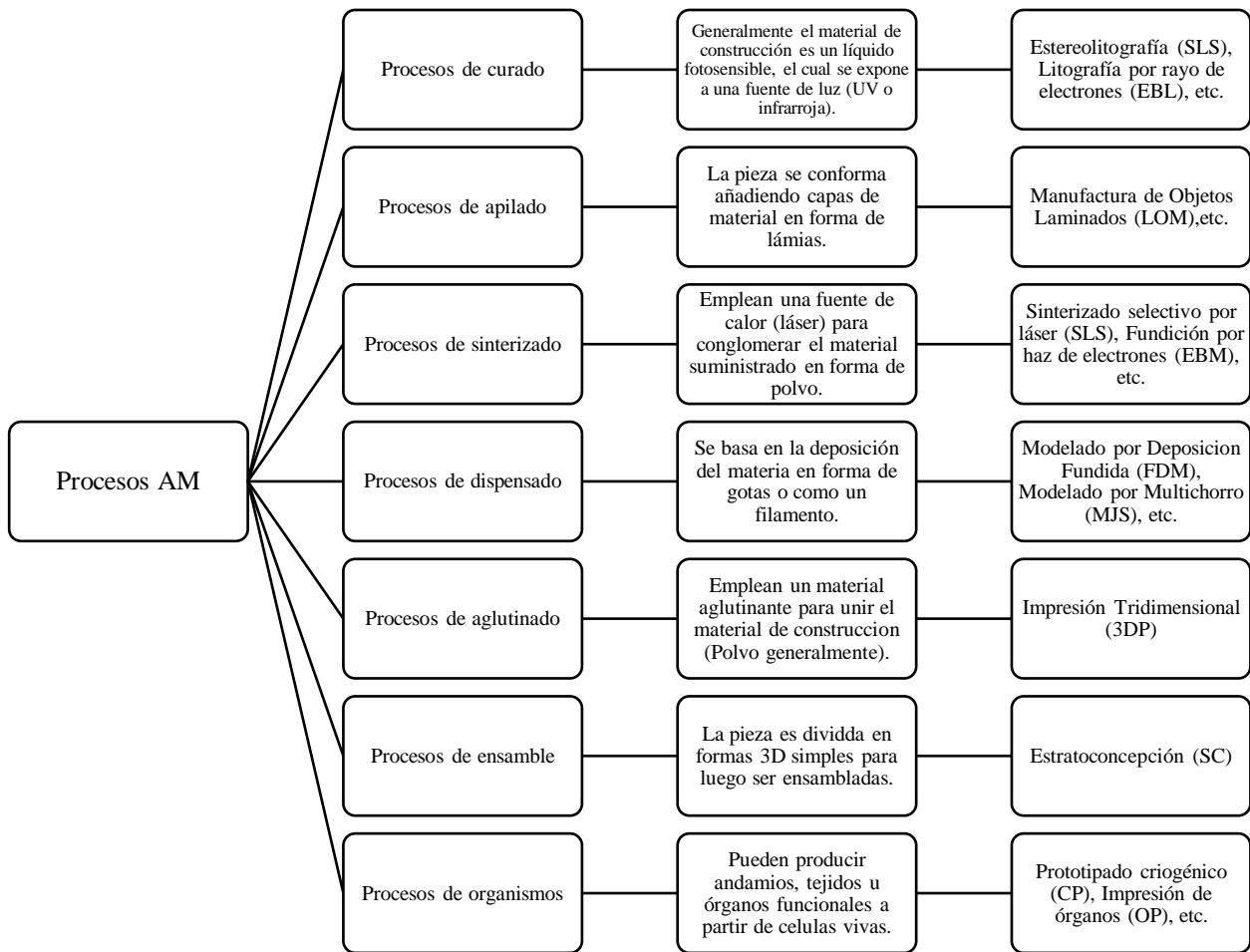


Figura 1.2. Clasificación de los procesos de AM de acuerdo al conformado de la pieza.

Para el segundo tipo de clasificación, según el estado de la materia prima, se pueden observar cuatro categorías [6]:

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

Los principios de funcionamiento de los procesos AM se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Principios de funcionamiento de los procesos AM [6].

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

Como se observa en las clasificaciones anteriores algunos de los procesos más utilizados son:

Estereolitografía (SLA), el cual es el proceso más antiguo y comienza en una tina de polímero que contiene una plataforma sobre la que se construye la pieza. Dicha plataforma se mueve hasta que se encuentra por debajo de la superficie del polímero líquido y un láser traza la sección transversal de la parte solidificándola [5] para posteriormente moverse una capa y repetir el proceso (Figura 1.3).

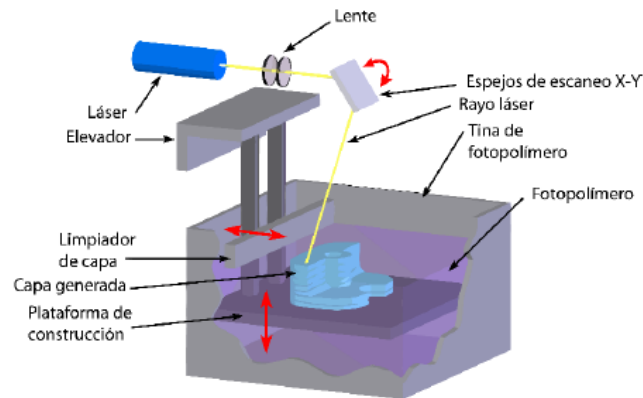


Figura 1.3. Proceso SLA.

Algunas ventajas de este proceso son que tiene una buena precisión y acabado superficial, y cuenta con una amplia gama de polímeros a utilizar, sin embargo este proceso requiere postprocesamientos y postcurados. Algunas aplicaciones de este proceso son para instrumentos médicos y asistenciales, electrónica, elementos de hardware militar, insertos de moldes de inyección, modelos para fundición y aplicaciones para túnel de viento.

Sinterizado Selectivo por Láser (SLS), el cual utiliza un láser de alta potencia para fusionar partículas de plástico, metal, cerámica, vidrio o polvos de una capa transversal del modelo tridimensional. Para este proceso una capa de polvo se deposita en la parte superior de la capa solidificada anterior; posteriormente el polvo se aplanar mediante un rodillo y el láser funde, en un ambiente controlado, el material por medio del escaneo de secciones transversales. Después de que cada sección se escanea, el proceso se repite hasta que la parte se ha completado, Figura 1.4 [5].

A diferencia de otros procesos, éste no requiere de estructuras de soporte y dependiendo del material es posible obtener piezas totalmente densas. Sin embargo, esta tecnología es costosa ya que el precio del equipo supera los 100,000 USD. Algunas aplicaciones para este proceso son herramientas rápidas, piezas con bisagras, piezas para aplicaciones de altas temperaturas y prototipos funcionales.

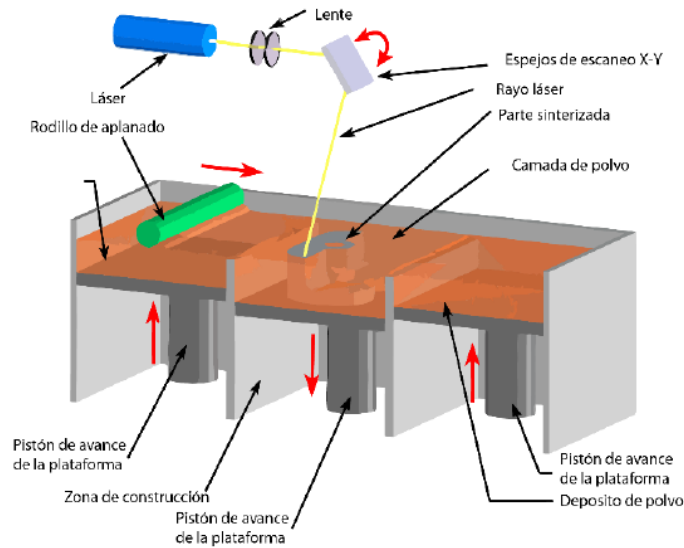


Figura 1.4. Proceso SLS.

Manufactura de Objetos Laminados (LOM), en donde las secciones transversales de los objetos se cortan utilizando un láser de CO₂. La materia prima se despliega de un rollo de alimentación sobre una base y se une a la capa anterior utilizando un rodillo caliente. Éste funde el revestimiento en el lado inferior para crear la unión. Una vez que se corta la capa superior de acuerdo a las características de la pieza, el material adicional se enrolla en un rodillo. Al finalizar la sección transversal de cada capa, el láser corta una matriz cuadrangular sobre el material que rodea la pieza con el fin de facilitar la remoción de material adicional, Figura 1.5 [5].

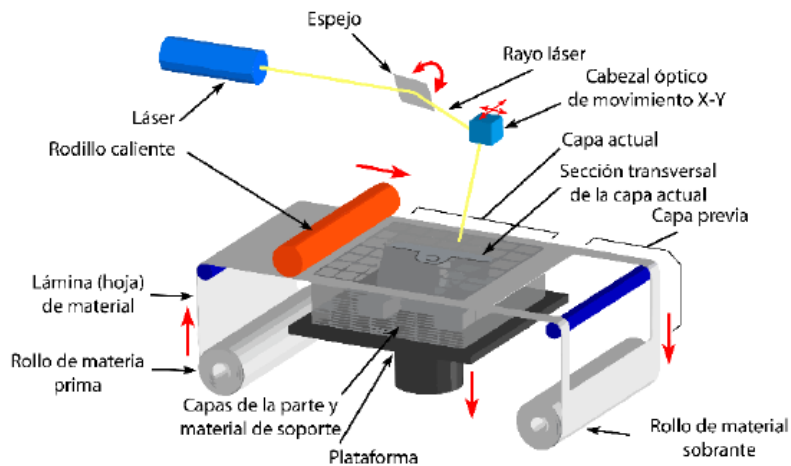


Figura 1.5. Proceso LOM.

Este proceso es autosuficiente para soportar cavidades y voladizos, además de que los materiales utilizados son baratos y la técnica es moderadamente rápida. Por otro lado, la pieza generada no es muy estable en el tiempo y los objetos pueden llegar a deformarse, además, existe escalonamiento pronunciado en los bordes y no cuenta con buena precisión a

comparación de otros métodos. Existen pocas aplicaciones para este proceso entre las cuales están patrones de herramental rápido y piezas para prueba de diseño y forma [5].

Asimismo, como se mencionó anteriormente, las tecnologías AM tienen diversas aplicaciones industriales, tales como automotriz, aeroespacial, biomedicina, energética y al mismo tiempo aplicaciones de investigación y académicas. En cuanto a la industria automotriz, se utilizan como una herramienta importante para el diseño y desarrollo de componentes automotrices debido a que se pueden reducir tiempos de desarrollo y costos de piezas, además de fabricar pequeñas cantidades de partes estructurales y funcionales como escapes de motor, ejes de transmisión, etc. En la biomedicina se aplica en los biomateriales, y en fabricación de productos como implantes, andamios de tejidos, órganos artificiales, dispositivos y chips biológicos [6]. En cuanto a la investigación, actualmente se continúan desarrollando nuevos proyectos ya que se siguen encontrando grandes desafíos, tales como la limitación del material de trabajo utilizado, la repetitividad del comportamiento de las piezas y la calidad superficial de las piezas [7] con la finalidad de que los sistemas de AM puedan llegar a representar un papel importante en la fabricación de piezas finales.

A continuación se describe el proceso de Modelado por Deposición Fundida, el cual es muy utilizado en la actualidad y es el que se va a estudiar en este proyecto.

1.2 Modelado por Deposición Fundida

En el Modelado por Deposición Fundida (FDM) las capas de material son creadas mediante el calentamiento y deposición de un filamento termoplástico (usualmente ABS o PLA de ~1.78 mm de diámetro) extruido a través de una boquilla motorizada sobre una plataforma [7]. El filamento es fundido adentro de un cabezal a una temperatura por encima de su punto de fusión, y es empujado a través de la boquilla por el filamento sólido que se encuentra encima [8]. La boquilla se mueve en el plano X-Y de modo que el filamento calentado a un estado semi-líquido se deposita para formar una fina capa de sección transversal de la pieza (Figura 1.6). Se baja a continuación la plataforma respecto a la boquilla y la siguiente capa de la pieza es depositada por encima de la capa previa. Este proceso continúa hasta que la pieza es terminada completamente. 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 rompen y se remueven.

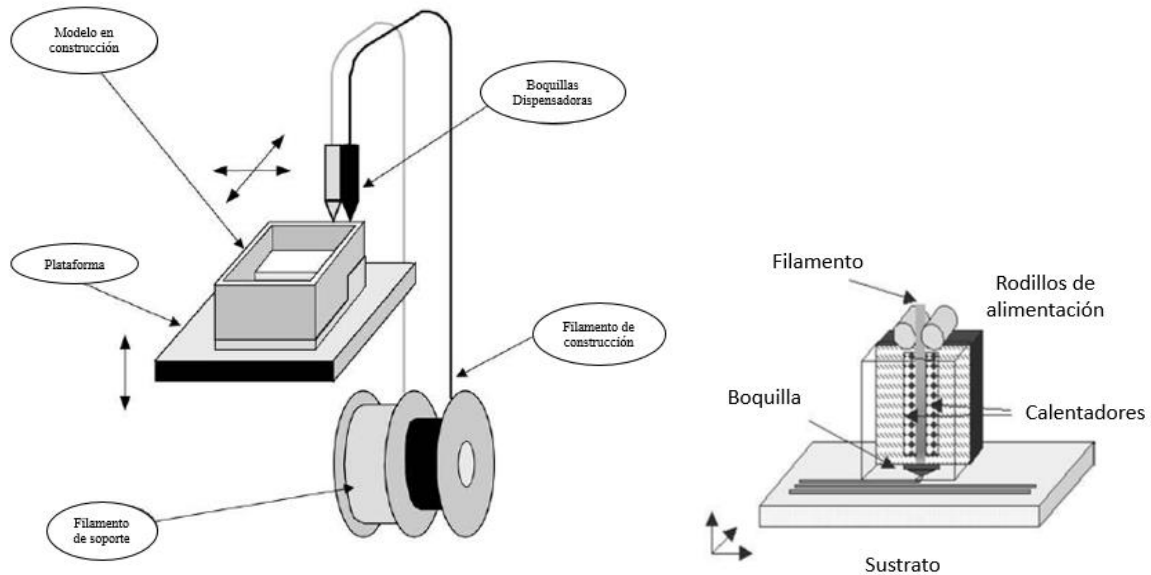


Figura 1.6. Proceso FDM.

Al igual que otros procesos AM, el proceso FDM comienza a partir del modelo CAD de la pieza (generalmente en formato .stl). Este modelo es utilizado para crear el perfil transversal que se fabricará capa por capa. Mientras tanto, el software utilizado es responsable de definir el relleno de la pieza, fija la dirección del filamento y la trayectoria de la(s) boquilla(s) [1].

Las ventajas del proceso FDM son [9]:

- Las partes se pueden fabricar de diversos materiales, es decir, este proceso utiliza diferentes tipos de polímeros, los cuales pueden ser depositados por las boquillas en la fabricación de una misma pieza
- La máquina se puede configurar fácilmente y usar en ambientes de oficina, ya que el equipo es de tamaño compacto y no utiliza materiales tóxicos, además de que la temperatura de operación del equipo es baja en comparación con otros procesos.
- La materia prima se puede cambiar y reemplazar fácilmente
- Bajos costos de mantenimiento del equipo, ya que sus componentes son de fácil acceso
- Producción rápida de partes delgadas
- Tolerancia global igual a ± 0.1 mm
- No necesita supervisión humana durante el proceso de fabricación.

Por otro lado, las desventajas del proceso FDM son [9]:

- El proceso es lento para partes con masa grande
- Se requieren estructuras de soporte cuando la pieza cuenta con salientes o voladizos y con cavidades
- Acabado superficial pobres debido a las estructuras de soporte
- Dimensiones de las piezas restringidas, debido a que el tamaño del espacio de trabajo es limitado
- Las partes fabricadas tienen mala resistencia en la dirección vertical, es decir, cuando la carga mecánica se presenta en dirección perpendicular al filamento depositado.

La capacidad del proceso para crear partes geoméricamente complejas, junto con su alto grado de automatización, lo dota de un gran potencial para volúmenes de producción bajos. El factor de control más importante de las propiedades mecánicas de las partes fabricadas es la mesoestructura, que es controlada, a su vez, por los parámetros de fabricación ajustables.

1.3 Parámetros del proceso FDM

A diferencia de la mayoría de las tecnologías de fabricación, los valores de los parámetros de proceso de las tecnologías AM pueden ser más significativos que las propiedades del material fuente. Dos conjuntos diferentes de parámetros de proceso aplicados a la misma geometría pueden resultar en la obtención de dos productos de propiedades completamente diferentes. Entre los parámetros del proceso FDM más importantes se encuentran:

- Orientación de la pieza en la plataforma de trabajo
- Espesor de capa
- Espacio de aire entre filamentos
- Ángulo de trama
- Temperatura de la plataforma o cama
- Temperatura de la materia prima
- Velocidad de impresión
- Dirección de relleno
- Densidad de relleno (o porcentaje de relleno)
- El número de capas de contorno o perímetro
- Tasa de flujo

Estos parámetros del proceso FDM se definen como [10]:

- Espesor de capa (mm): es el espesor de cada una de las capas de la pieza en construcción.
- Dirección de relleno (grados): es el patrón de los ángulos para cada capa, y puede ir desde 0° hasta 180°.
- Número de capas de contorno o perímetro: es el número de capas a utilizar para la parte exterior o coraza de la pieza.
- Tasa de flujo: es el flujo del material que es extruido desde el extremo caliente, medido al extruir 1 mm de filamento.
- Velocidad de impresión (mm/min): es la velocidad del extremo caliente.
- Densidad de relleno (%): la cantidad de material dentro de la pieza.
- Temperatura de la plataforma o cama (°C): es la temperatura de la plataforma o cama de impresión. Este parámetro depende del material y su ajuste correcto aumenta a medida que la adhesión sobre la plataforma evita los fenómenos de deformación.
- Temperatura de la materia prima (°C): es la temperatura de extrusión del material.

La combinación de parámetros, los cuales deben ser ajustados con base en el objeto a imprimir, hará que la estructura del mismo luzca diferente, lo que puede resultar en valores diferentes de propiedades mecánicas, precisión o calidad superficial. Como las propiedades mecánicas son muy importantes para las piezas funcionales, es necesario estudiar la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas, de tal manera que se

puedan seleccionar los parámetros que mejor convengan de acuerdo a las necesidades particulares.

Según Rayegani et. al. [11] se han realizado diversos estudios que han concluido que a través del enfoque en el diseño de experimentos (DOE- Design Of Experiments), los parámetros del proceso FDM tales como el espesor de capa (Figura 1.7), ángulo de trama (Figura 1.8), orientación de la parte (Figura 1.9), anchura del hilo (Figura 1.10) y espacio de aire (Figura 1.11), influyen significativamente en la respuesta mecánica la pieza FDM.

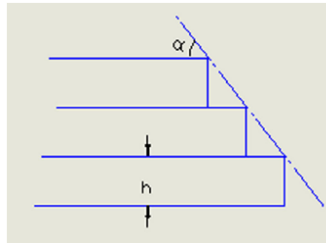


Figura 1.7. Altura de capas o diseño del espesor de capa [11].

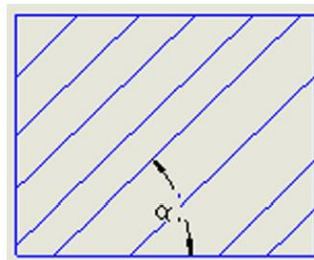


Figura 1.8. Parámetro de ángulo de trama [11].

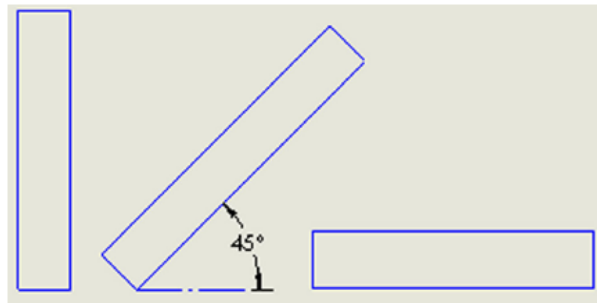


Figura 1.9. Orientación de la parte [11].

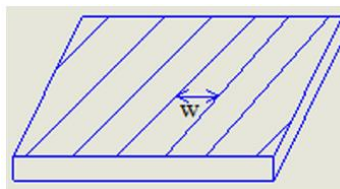


Figura 1.10. Anchura del hilo [11].

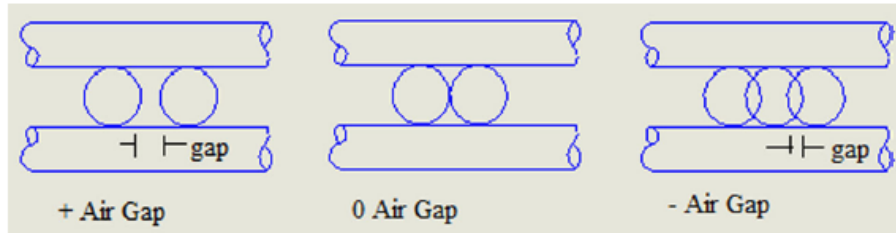


Figura 1.11. Aplicación de espacio de aire entre filamentos [11].

1.4 Propiedades mecánicas de partes fabricadas por FDM

Las piezas creadas mediante el proceso FDM han sido evaluadas por diversos grupos de investigación para propiedades mecánicas diferentes, incluyendo precisión dimensional, rugosidad, compresión, tensión, flexión y resistencia al impacto. Esto debido a la importancia que tiene el desempeño mecánico final de dichas piezas. Por esta razón varias investigaciones se han centrado en el análisis de dichas propiedades tales como Carneiro et. al. [8] quienes fabricaron probetas de polipropileno con diferentes porcentajes de relleno, espesores de capa y direcciones de relleno y les realizaron pruebas de tracción. Posteriormente midieron el esfuerzo a tracción y el módulo de Young. Las conclusiones que obtuvieron fueron las siguientes:

- Las muestras fueron más rígidas dependiendo de la dirección del filamento
- El espesor de las capas tuvo poca influencia en el comportamiento mecánico de las muestras
- El porcentaje de relleno tuvo un efecto lineal en las propiedades mecánicas analizadas
- El uso de fibras como refuerzo fue efectivo en la fabricación tridimensional
- Hubo una pérdida en el rendimiento mecánico de las muestras fabricadas de alrededor de 20 a 30%, lo cual dependió de los valores de los parámetros de impresión utilizados y cuando se compararon con muestras producidas mediante moldeo por compresión.

Por su parte, Bertoldi et al. [12] realizaron ensayos a tracción en muestras con diversas orientaciones de fabricación (ej. xy, xz, yz, etc.) de un cubo de ABS construido con una dirección de filamentos en una secuencia “pseudo- isotrópica”. Ellos encontraron diferencias significativas en los promedios de la resistencia a la tracción y módulo de Young, ya que éstas dependieron de la orientación de la muestra y en cada una de las anteriores el modo de falla fue diferente.

Del mismo modo, Bellini et al. [2] realizaron pruebas de tracción al filamento de ABS y a partes fabricadas con el mismo para comparar sus valores. Al comparar los resultados del filamento con los de las partes fabricadas, concluyeron que el proceso de extrusión no influyó de manera considerable en la resistencia y módulo del material, pero afectó notablemente la deformación máxima. También observaron que la forma del filamento y la interacción filamento con filamento, así como la dirección de relleno afectan fuertemente las propiedades y desempeño del producto final. Expresaron que las propiedades mecánicas de

los productos finales dependen considerablemente de dos fases de modelado importantes: la orientación de la pieza (Figura 1.12) y la dirección de relleno elegido.

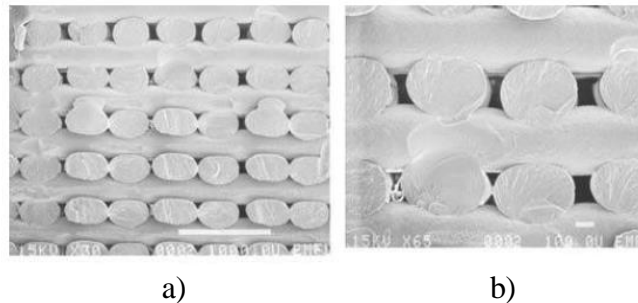


Figura 1.12. Vista de la sección transversal de una parte ABS construida con 0/90° de orientación de relleno: a) vista general y b) acercamiento.

Con el mismo propósito, Fodran et al. [13] realizaron ensayos a tracción en partes de FDM-ABS construidos con diferentes tasas de flujo y direcciones de relleno. Además, realizaron una impregnación adhesiva a las partes después de su fabricación. Los resultados demostraron que los parámetros del proceso utilizados pueden tener un efecto significativo en los valores de resistencia a la tracción y módulo de Young, y que la impregnación adhesiva proporcionó mejoras significativas en dichas propiedades mecánicas.

Por otro lado, Gray et al. [14] reportaron el efecto de la dirección de relleno en la dureza y resistencia a la tracción de piezas de FD-ABS y de piezas con filamentos reforzados con polipropileno para deposición fundida (fibras de polímero cristalino líquido termotrópico cortas). Se presentaron los valores alcanzados de dichas propiedades para ambos casos. Se observó que los de las muestras con los filamentos reforzados fueron significativamente más altos en comparación con los de ABS sin refuerzo. Tomando en cuenta la orientación de fabricación, Lee et al. [15] observaron que la resistencia a compresión de partes FDM es 23.6% mayor en muestras con cargas axiales que las muestras con cargas transversales.

Por su parte, Ker Ching Ang et al. [16] construyeron muestras de estructuras de andamios ABS con las dimensiones especificadas por el ASTM D695-02a. Los parámetros que utilizaron para ver el efecto en la porosidad de las muestras fueron el espacio de aire entre filamentos, el ancho de la trama, la orientación dentro de la cámara de trabajo, la dirección de relleno y la capa de construcción. Encontraron que el espacio de aire entre los filamentos y la anchura de la trama eran los parámetros más significativos en afectar la porosidad y las propiedades mecánicas de las estructuras del andamio del ABS. Igualmente, Rodríguez et al. [17] y Rodríguez [18] midieron las densidades de huecos en planos principales del material y la unión de filamento a filamento en función del espacio de aire entre éstos, la tasa de flujo y temperaturas de procesamiento. Utilizando micrografías de sección transversal, encontraron que un espacio de aire entre filamentos menores minimiza los huecos y maximiza la extensión de la unión.

Sin embargo, estudios de FDM como los mencionados anteriormente se han centrado principalmente alrededor de componentes de ABS, en lugar de otros polímeros que pueden ser utilizados en el proceso de FDM. Tal es el caso del ácido poli láctico (PLA), el cual es

ecológico y popular, además de que es empleado en muchas impresoras tridimensionales de oficina. El PLA es un termoplástico biodegradable polimerizado a partir de ácido láctico natural proveniente de fuentes naturales tales como el maíz. A continuación, se describen diversas investigaciones acerca de las propiedades mecánicas de piezas de PLA fabricadas mediante FDM. Tal es el caso de Torres et. al [4] quienes mediante el diseño de experimentos y utilizando análisis de varianza para el análisis de resultados (ANOVA), realizaron ensayos a tracción y fractura a diversas muestras utilizando PLA y variando 6 parámetros de proceso: temperatura, velocidad, dirección de relleno, densidad relativa, espesor de capa y perímetro. Ellos desarrollaron un método de caracterización conjunta y encontraron que un espesor de capa delgado y velocidad baja resultan en una resolución alta con una mejora en el acabado superficial cuando la estética es importante; si se desea reducir el consumo de material, la densidad relativa puede ser menor (~70%).

Del mismo modo, Antonio Lanzotti et al. [9] realizaron experimentos en 60 especímenes de PLA de ensayo de tracción realizados en una impresora 3D Rep-Rap Prusa I3 de código abierto para estudiar el efecto del espesor de la capa, la dirección de relleno y el número de capas de perímetro en el Módulo de Elasticidad y Esfuerzo Último a la Tracción (UTS por sus siglas en inglés). En su estudio, los valores de UTS y tracción en falla se encontraron afectados por la dirección de relleno y el número de capas de perímetro. Otro estudio acerca de la relación entre los parámetros del proceso y la resistencia a la tracción de piezas de PLA fue desarrollado por Rayegani et al. [10], quienes realizaron una investigación para determinar dicha relación utilizando el método de grupo para el modelado de datos con fines de predicción. Los parámetros del proceso y los resultados experimentales fueron presentados con el método de grupo de manejo de datos (GMDH Group Method for Data Handling), resultando en valores que se correlacionaron estrechamente con los valores medidos. Utilizando evolución diferencial (DE por sus siglas en inglés), se encontraron los parámetros del proceso óptimos para lograr buena resistencia. Esta es una de las investigaciones cuyos resultados obtenidos son prometedores.

Por otro lado, Filip Górski et al. [19] construyeron un modelo digital de muestras con varias suposiciones para simular pruebas de flexión de diferentes partes con tres orientaciones diferentes en la cámara de trabajo y analizarlas utilizando el método de elementos finitos (FEM). Luego, compararon los resultados de la simulación con los resultados experimentales y obtuvieron niveles de errores considerablemente bajos y aceptables entre la simulación y la experimentación, aunque la predicción del estrés interno no fue concluyente y el tiempo de los cálculos fueron inaceptablemente largo. Paralelo a esto, partes producidas vía FDM de PLA han sido también de alto interés en el campo de la medicina, debido a la biocompatibilidad de éste en el uso de aplicaciones tales como ingeniería de tejidos e implantes hechos a medida de acuerdo a las necesidades del paciente (Drummer et al., 2012; Too et al., 2002).[20][21]

En cuanto a otros materiales se ha encontrado que Domingo-Espin et al. [22] diseñaron una pieza de policarbonato que fue impresa en diferentes orientaciones para ser evaluada físicamente. Se aplicaron cargas combinadas incluyendo torsión y tensión. Se observaron diferencias en la respuesta mecánica durante las pruebas físicas dependiendo de la orientación de impresión. Y concluyeron que es conveniente utilizar diferentes modelos constitutivos dependiendo de las especificaciones de diseño y uso de la pieza a construir. De igual manera, Nevin Hill et al. [23] imprimieron probetas de policarbonato variando los

ángulos de rellenos de las mismas, variando desde 0° hasta 90° en intervalos de 15°. El esfuerzo de cedencia, el esfuerzo a tensión, el porcentaje de elongación, módulo de elasticidad, dureza y densidad fueron medidos en función del ángulo de relleno de los filamentos. Encontraron que las variaciones de las propiedades del material son pronunciadas con los cambios de ángulo de relleno cuando el material es depositado en una dirección. En tensión, las capas individuales son significativamente más débiles perpendicular que a lo largo de la fuerza aplicada.

Como se observa, existen muchos trabajos realizados acerca del análisis del comportamiento de partes fabricadas mediante FDM. Sin embargo ninguno de los trabajos anteriormente mencionados han desarrollado modelos que permitan predecir el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante el proceso FDM en función de los parámetros del proceso.

1.5 Influencia de los parámetros FDM en las propiedades mecánicas

De la revisión de literatura anterior, se observan los siguientes comportamientos y efectos de los diferentes parámetros del proceso FDM en las propiedades mecánicas de las piezas FDM.

Número de capas

El número de capas de una pieza depende del espesor de la capa y de la orientación de fabricación de la pieza. Si el número de capas es mayor resultará en un gradiente de alta temperatura hacia el fondo de la pieza. Esto aumentará la adhesión entre filamentos adyacentes y la resistencia mecánica mejorará. Sin embargo, el gradiente de alta temperatura también es responsable de la distorsión dentro de las capas o entre las capas. Además, el aumento en el número de capas aumenta también el número de ciclos de calentamiento y enfriamiento y, por lo tanto, la acumulación de esfuerzo residual aumenta. Esto puede resultar en distorsiones, agrietamiento entre capas y falla mecánica. Por lo tanto, la resistencia mecánica se reducirá [24]. Cuantas más capas tenga la pieza, mayor tiempo se tardará el proceso de fabricación (FDM) y habrá más puntos débiles que disminuirán su resistencia en ciertos ensayos mecánicos, tales como tracción, flexión, compresión, etc. [19].

Ángulo o dirección de relleno

El ángulo de relleno es un parámetro importante que afecta la rugosidad de la superficie y el comportamiento mecánico en piezas FDM [8]. Éste tenderá a afectar la estructura interna del producto terminado ya que cada capa vecina tiene un ángulo de relleno perpendicular a la capa precedente inmediata [10]. Se ha encontrado que pequeños ángulos de deposición de filamentos darán como resultado hilos largos que aumentarán la acumulación de tensiones a lo largo de la dirección de deposición lo que generará una mayor distorsión y, por lo tanto, una unión débil. [24].

Ancho de filamento

Este parámetro es relevante solamente para el tiempo de fabricación de la pieza, mientras que no tiene ninguna influencia en el esfuerzo máximo de compresión de las partes [25]. Por otro lado se ha encontrado que filamentos gruesos tenderán a dar como resultado una acumulación de esfuerzo a lo largo de la anchura de la pieza y tendrán un mismo efecto que los hilos largos

como se mencionó anteriormente. Sin embargo, esta acumulación de esfuerzos produce una temperatura elevada lo que puede mejorar la adhesión y puede dar lugar a una fuerte formación de enlaces entre capas [24].

Espesor de capa

El espesor de capa se sabe que afecta el producto final FDM porque cuanto menor sea el espesor de capa, más resistente será la pieza terminada cuando se someta a una carga mecánica axial [10]. Dicho parámetro es el responsable por la resolución geométrica de la pieza y está directamente relacionado con el diámetro de la boquilla. Además, existe una regla de oro que dice que dicho espesor debe ser menor que el 80% del diámetro de la boquilla [6]. Lužanin et al [26] encontraron que este parámetro tiene un efecto dominante en la fuerza de flexión.

Orientación de la pieza

La importancia de la orientación de la pieza, especialmente cuando se considera la respuesta a tracción de componentes FDM, es que la resistencia mecánica en la dirección longitudinal de la capas es mayor a las otras direcciones [4]. Dicha orientación influye directamente tanto en la exactitud como en la repetitividad de las piezas FDM. Ya que cada parte tendrá una resistencia menor si la dirección de carga es igual a la dirección de fabricación [19]. Además se ha encontrado que este parámetro es importante porque cuando la pieza es construida inclinada, tiende a resistir mayor carga en la dirección X y Y [26].

Porcentaje de relleno

El porcentaje de relleno tiene un fuerte impacto en el desempeño mecánico de las piezas FDM y en sus propiedades. A mayor porcentaje de relleno es conocido que se produce una parte con resistencia mecánica superior [10]. Álvarez et. al [27] encontraron que en el intervalo de 50% a 98% de relleno no es conveniente fabricar piezas, ya que el tiempo de fabricación es mayor a comparación de las del 100% y la resistencia a la tracción y al impacto son menores. Por el contrario, en [28] encontraron que el esfuerzo de cedencia fue mayor cuando las probetas estaban a un 90% que cuando estaban al 100%.

Espacio de aire entre filamentos

En cuanto al espacio de aire entre filamentos, se ha encontrado que un espacio de aire igual a cero mejorará la fusión entre los filamentos adyacentes y puede disminuir la disipación de calor [24].

De igual manera la influencia de los parámetros se puede clasificar de acuerdo a las propiedades mecánicas afectadas por éstos. Algunos de estos resultados son presentados a continuación:

Rugosidad de la superficie

Se ha encontrado que un parámetro de gran influencia con respecto a la rugosidad superficial es el espesor de capa, y se descubrió que hay una relación inversa entre éstos [29]. Nancharaiah et. al. [30] encontraron que el espesor de capa y el ancho de hilo afectan la rugosidad superficial y que el espacio entre filamentos no influye significativamente es esta propiedad. Del mismo modo, Wang et al. [31] encontraron que el parámetro que tiene la

mayor influencia en la calidad o rugosidad de la superficie de la parte fabricada es el espesor de capa, al igual que [11] ya que a menor espesor de capa se obtiene una calidad superficial mayor.

Precisión dimensional

Wang et al. [31], encontraron que uno de los parámetros que afectan en gran medida la precisión dimensional es la orientación de la pieza dentro de la cámara de fabricación, ya que en la dirección Z que se muestra en la Figura 1.13, las dimensiones de la pieza tuvieron un porcentaje de error y de desviación estándar mayores que el resto de los parámetros analizados.

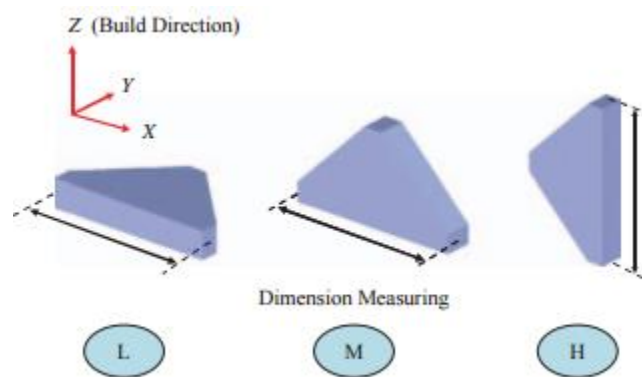


Figura 1.13. Orientación de fabricación Z y las posiciones de medición de las partes fabricadas [31].

Igualmente, Nancharaiah et. al. [30], concluyeron que el espesor de capa y el ancho del filamento afectan en gran medida la calidad superficial y precisión dimensional y que el ángulo del filamento (dirección de relleno) tiene muy poco efecto en estas propiedades mecánicas. Del mismo modo encontraron que el espacio de aire entre los filamentos tiene mayor influencia en la precisión dimensional a comparación de la calidad de la superficie de la pieza.

Comportamiento del material

Lee et al. [32] encontraron que los parámetros que tiene mayor influencia en el régimen elástico del objeto flexible de ABS fabricado son el espesor de capa, dirección de relleno y espacio entre filamentos.

1.6 Modelado y simulación numérica de partes fabricadas por FDM

A continuación se presentan distintas investigaciones mediante análisis numérico para evaluar el desempeño mecánico de partes fabricadas mediante FDM reportadas en la literatura. Un modelo numérico para calcular las propiedades mecánicas de partes FDM se presentó por parte de Górski et. al. [19]. El modelo FEM con tres orientaciones diferentes dentro de la cámara de impresión fue analizado en flexión en el estudio. En términos generales, los resultados tanto numéricos como experimentales fueron cercanos, sin embargo

la predicción de esfuerzos internos fue inconclusa y el tiempo computacional requerido fue muy grande. De igual manera, un modelo FEM simplificado para examinar la respuesta de una pieza FDM bajo cargas de tensión fue presentado por Rezayat et. al. [33]. Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas se pueden mejorar si se rediseñan los patrones de contornos actualmente empleados en sistemas AM.

Por otro lado, tres modelos FEM para el análisis de la deformación de un soporte considerando las tres diferentes orientaciones de fabricación FDM fueron presentados por Hambali et. al. [34]. También se realizaron pruebas experimentales para efectos de comparación con los modelos FEM. Los resultados experimentales mostraron una tendencia no lineal de las partes, mientras que los resultados FEM siguieron un comportamiento lineal. De igual manera, un modelo FEM termo-mecánico para analizar el comportamiento de herramientas termoplásticas (ULTEM) sólidas y porosas creadas mediante FDM fue presentado por Li et. al. [35]. Los resultados FEM evidenciaron que las herramientas de construcción porosa son preferibles a las de construcción sólida ya que además de ahorrar costos, éstas tienden a causar una menor disgregación térmica.

1.7 Comportamiento mecánico de materiales porosos

El objetivo central en el estudio de los materiales en general es comprender y cuantificar la relación entre su estructura interna y sus propiedades. Las relaciones Estructura-Propiedad son usadas para el diseño y mejora de materiales, o para interpretar relaciones experimentales en términos de sus características micro estructurales [36].

En la literatura se ha estudiado la influencia que tienen los poros (porosidad) en el comportamiento mecánico de diferentes tipos de materiales, esto con la finalidad de poder realizar una caracterización completa del material para un desempeño funcional. La caracterización consiste en obtener información a partir de la respuesta de un material al ser perturbado por una señal. La información que se puede obtener de una caracterización es la composición, estructura, topología, propiedades mecánicas efectivas, etc. de cada material. Por lo tanto es importante poder caracterizar los materiales porosos con la finalidad de conocer y predecir sus propiedades, ya que se ha encontrado que dicha porosidad reduce los valores de propiedades mecánicas como el Módulo de Young [16] y resistencia a cargas y así de esta manera valorar su utilidad en diversas aplicaciones. Para aplicaciones como biomedicina, aeronáutica, aeroespacial, automotriz, entre otras, es importante poder manejar materiales porosos ya que se requieren piezas que puedan ser ligeras y al mismo tiempo puedan soportar distintos tipos de cargas mecánicas según sea el caso.

1.7.1 Materiales porosos

Históricamente, el interés por los materiales ultra porosos surgió a través del lado fluido en general y a través de espumas inducidas por líquidos en particular [16]. Comúnmente para materiales porosos o materiales con densidad variable, se requiere cumplir con algún

requisito para un cierto nivel de densidad. Sin embargo, de la misma manera se necesita cumplir con un nivel de integridad mecánica; es decir, la capacidad de soportar carga.

Existen muchas referencias acerca del estudio de materiales porosos. Los más conocidos son Gibson y Ashby [42], quienes podrían ser llamados los pioneros de la era moderna en este campo. Por otro lado, algunas revisiones relevantes acerca de las características de los poros en un material han sido realizadas por Hashin y Torquato [42] los cuales describen que si los poros se encuentran aislados, éstos pueden ser aproximados por esferoides y ocupar fracciones de volumen de baja a moderada, nombrando a éstos como dispersiones. Sin embargo, muchos materiales presentan una estructura de poros más interconectada, ya que incluso pequeños tamaños de poros pueden formar grandes grupos, mientras que en tamaños de poros grandes la fase del poro puede estar interconectada macroscópicamente; dando una estructura bicontinua [36].

Según Roberts et al. [37] para materiales porosos existe un umbral de filtración (que puede ser cero para algunos modelos), por debajo del cual la estructura se desconecta. A medida de que el umbral se aproxima, las propiedades elásticas se vuelven dependientes de pequeñas conexiones, las cuales son cada vez más difíciles de resolver. Ellos realizaron pruebas a diferentes tipos de porosidades del material, analizando los resultados numéricamente y mediante un modelo analítico y concluyeron que el Módulo de Young puede ser considerado prácticamente como independiente de la relación de Poisson sólido.

En cuanto a los modelos analíticos, algunos encontrados en la literatura consideran uniones perfectas y materiales isotrópicos, además de un comportamiento elástico lineal del material poroso con respecto al material sólido. A continuación se presentan algunos de estos modelos que describen dicha linealidad. La forma del modelo de ley de mezclas se describe en la ecuación 1-1:

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

donde E_c , E_m y E_p son el Módulo de Young del material compuesto, de la matriz, y de la partícula respectivamente; y V_m , V_p son las fracciones de volumen de la matriz y de la partícula, respectivamente. Una variante de este modelo ha sido utilizada de la misma manera y se representa como sigue [38] [13]:

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

donde E_f es el Módulo de la fibra o partícula, E_m es el valor del módulo del material sin fibras (material sólido), v_f es la fracción de volumen de la fibra o partícula y α es un factor de orientación de la fibra o partícula. Estos modelos aplican también para el esfuerzo último a la tensión (UTS, por sus siglas en inglés) de los materiales tomando en cuenta los valores del UTS de la partícula y de la matriz.

Por otra parte, el modelo de Reuss [39] [40] también basado en la ley de mezclas se expresa como:

$$E_c = \frac{E_m E_p}{E_m V_p + E_p V_m} \quad (1-3)$$

Ravichandran [39] [40] por su parte se basó en el modelo de Hashin el cual está basado en el principio de la mínima energía y considera una distribución aleatoria de las partículas en la matriz. Sin embargo Ravichandran propuso que cuando existe una gran diferencia entre los módulos de la matriz y partícula, los módulos efectivos se pueden obtener como sigue:

$$E_c^l = \frac{(C E_m E_p + E_m^2)(1+C)^2 - E_m^2 + E_m E_p}{(C E_p + E_m)(1+C)^2} \quad (1-4)$$

$$E_c^u = \frac{[E_p E_m + E_m^2(1+C)^2 - E_m^2](1+C)}{(E_p - E_m)C + E_m(1+C)^3} \quad (1-5)$$

donde

$$C = \left[\frac{1}{V_p} \right]^{1/3} - 1 \quad (1-6)$$

Otro modelo analítico empleado con fines de predicción es el de Ramakrishnan y Arunachalam el cual modela el efecto de la porosidad en el Modulo de Young y tiene la forma siguiente:

$$E = E_0 \left[\frac{(1-p)^2}{1 + \kappa_E p} \right] \quad (1-8)$$

donde E es el módulo de Young del material poroso, E_0 es el módulo de Young del material completamente denso, p es la fracción de porosidad y κ_E es una constante en términos del coeficiente de Poisson del material completamente denso (ν_0):

$$\kappa_E = 2 - 3\nu_0 \quad (1-9)$$

1.7.2 Comportamiento mecánico

Diversos equipos de trabajo han analizado materiales porosos con el fin de aproximar los comportamientos mecánicos de éstos con modelos analíticos que permitan predecir sus propiedades estructurales. Enrique Gallegos et. al [41] analizaron el comportamiento de la hidroxiapatita con diferentes porosidades bajo una carga a compresión. Realizaron pruebas experimentales y simulaciones numéricas FEM para posteriormente ajustar dicho comportamiento a un modelo analítico de acuerdo al modelo de Gibson y Ashby [42], el cual es una descripción fenomenológica basada en representaciones relativas, y se expresa como sigue:

$$\frac{E}{E_s} = C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (\text{para } 0.04 < \frac{\rho}{\rho_s} < 0.50) \quad (1-7)$$

en donde E es el módulo de elasticidad aparente, E_s es el módulo de elasticidad del sólido, ρ es la densidad aparente, ρ_s es la densidad del sólido, y C y n son constantes que dependen de la micro estructura del material y sus valores pueden ser obtenidos experimentalmente.

N. Chawla et al. [43] utilizaron el modelo de Ramakrishnan y Arunachalam para la predicción del comportamiento de aceros sinterizados porosos y de la misma manera que el caso anterior validaron este modelo mediante un análisis FEM con carga a tensión y carga cíclica. Concluyeron que la resistencia a la tracción aumentaba con una mayor densidad sinterizada, la micro estructura FEM mostró que poros grandes e irregulares contribuyen significativamente a deformaciones localizadas y por ende resultan fallas prematuras a menores densidades. Tal como se puede observar en la literatura, es de suma importancia poder conocer el comportamiento de materiales porosos y distintos grados de porosidad ya que esto influye de manera significativa en los valores de las propiedades estructurales mecánicas de los materiales.

2. Análisis del proceso de Deposición Fundida

2.1 Definición de parámetros del proceso FDM a analizar

De la revisión de la literatura se identificaron los parámetros del proceso FDM más estudiados, los cuales se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros del proceso FDM estudiados en la literatura.

Autores	Espacio entre filamentos	% de relleno	Orientación de pieza	Ángulo de relleno	Espesor de capa	Velocidad de impresión	Temperatura de impresión	Ancho de filamento	Capas de perímetro	Construcción de capa
Bellini [2]			x	x						
Rodríguez [7]	x			x						
Carneiro [8]		x		x	x					
Durgun [9]			x	x						
Lanzotti [10]				x	x				x	
Rayegani [11]	x		x	x	x			x		
Chin [16]	x		x	x				x		x
Górski [19]			x							
Domingo-Espin [22]			x							
Hill [23]				x						
Lužanin [26]		x		x	x					
3D Matter [28]		x		x	x					
Rezayat [33]	x			x						
Torres [44]		x		x	x	x	x		x	
Armillota [45]			x							
Ahn [66]	x						x	x		

Como se puede observar en la Tabla 2.1, los parámetros más estudiados debido a su influencia en el comportamiento final de las piezas FDM son: orientación de la pieza, ángulo de relleno, espesor de capa y espacio entre filamentos en cada capa. Por lo anterior, los parámetros seleccionados para este estudio son:

1. Espesor de capa
2. Orientación de la pieza
3. Ángulo de relleno de pieza
4. Porcentaje de relleno

El porcentaje de relleno es el complemento del espacio entre filamentos y se elige este parámetro el cual puede ser configurado directamente en el equipo FDM a ser utilizado.

2.2 Influencia de los parámetros FDM en las propiedades mecánicas

Para cada uno de los parámetros del proceso FDM seleccionados, se analizaron los resultados reportados en la literatura con el propósito de identificar la influencia de cada uno de estos parámetros en las propiedades mecánicas de las piezas FDM. Las propiedades mecánicas consideradas son: el esfuerzo último en la prueba de tracción (UTS) y el módulo de Young.

Los valores reportados en la literatura se normalizaron con base al valor de la propiedad mecánica de la materia prima o filamento utilizado. En la Figura 2.1 se observa el comportamiento del UTS encontrado en la literatura. Como se puede observar, los valores del UTS no presentan una diferencia significativa con respecto al valor de espesor de capa utilizado en [10]. Sin embargo, el primer valor obtenido con respecto al 0.1 mm de espesor de capa presenta un comportamiento diferente en comparación con los puntos siguientes. Por otro lado, en [28] se puede observar que la curva presenta un orden ascendente en los resultados contra el espesor de capa, con excepción del último valor. Además en comparación con los resultados de Lanzotti [10] la tendencia de la curva es similar con excepción del primer valor.

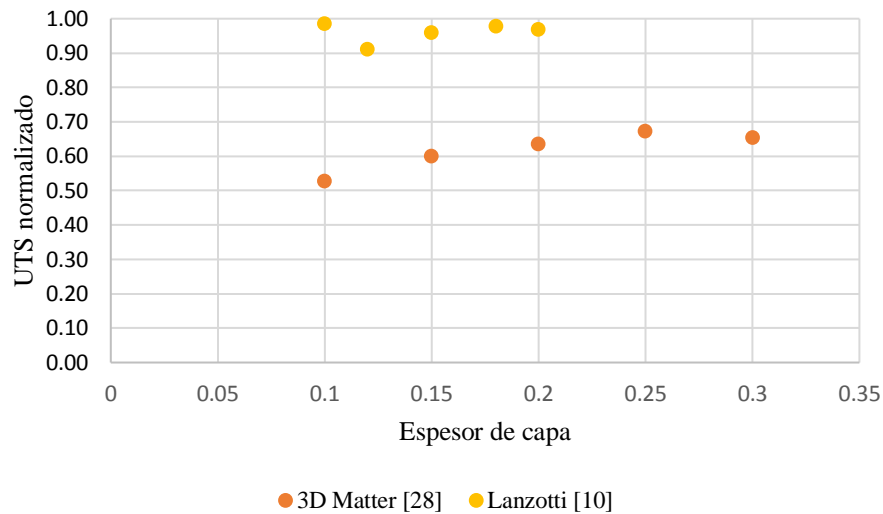


Figura 2.1. Análisis de la influencia del espesor de capa en el UTS.

En la Figura 2.2. se presentan los resultados con respecto al Módulo de Young, en donde se observa que la curva presenta una tendencia similar al comportamiento respecto al UTS y el espesor de capa. Por otro lado, se observa que los valores son menores al Módulo de Young del material para cuatro espesores de capa y para el espesor de 0.10 mm es igual a 1 debido que se normalizó con el valor más alto obtenido ya que no se reportaron valores de la materia prima en dicho artículo.

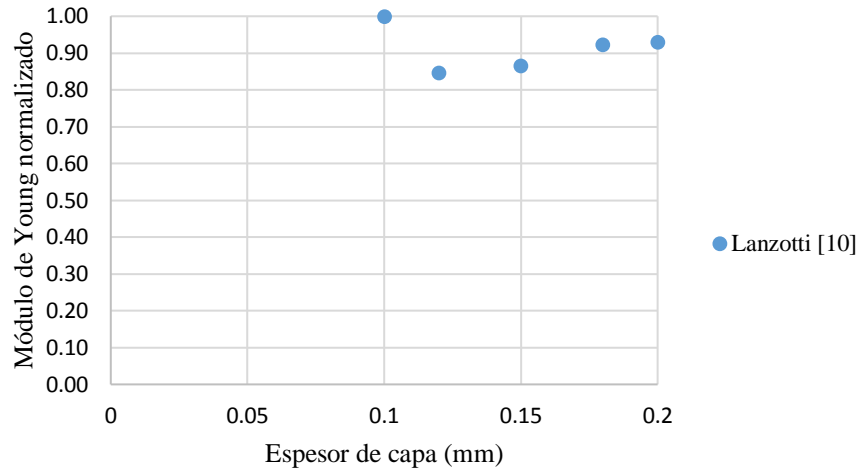


Figura 2.2. Análisis de la influencia del espesor de capa en el Módulo de Young.

Con respecto a la orientación de la pieza, en la Figura 2.3 se presentan resultados obtenidos del UTS y se observa que en todos los casos, el UTS máximo se encuentra en la orientación Y, en donde la carga es paralela al largo del filamento, independientemente del material utilizado. Y en todos los casos, se muestra que en la orientación Z (carga perpendicular a los filamentos), los valores obtenidos son considerablemente menores.

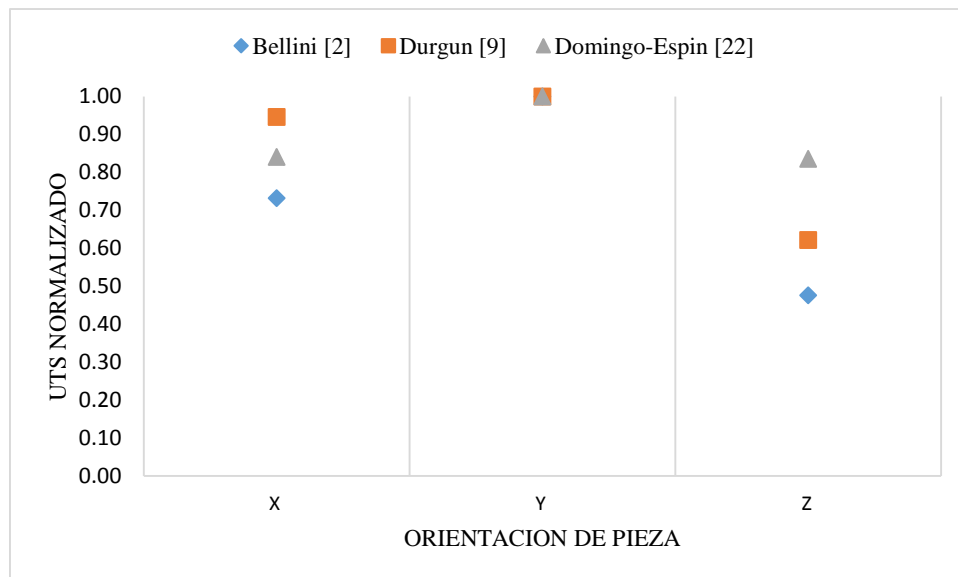


Figura 2.3. Análisis de la influencia de la orientación de la pieza en el UTS.

En la Figura 2.4 se presentan los resultados del Módulo de Young, en donde se observa una diferencia en las curvas con respecto a la Figura 2.3. Las tendencias de las curvas muestran que igualmente los mayores valores obtenidos son en la orientación Y, sin embargo los valores mínimos obtenidos fueron en la orientación X y no en la Z como en la Figura anterior. También se observa que en la curva de [9] los valores son muy parecidos y no presentan tanta variación.

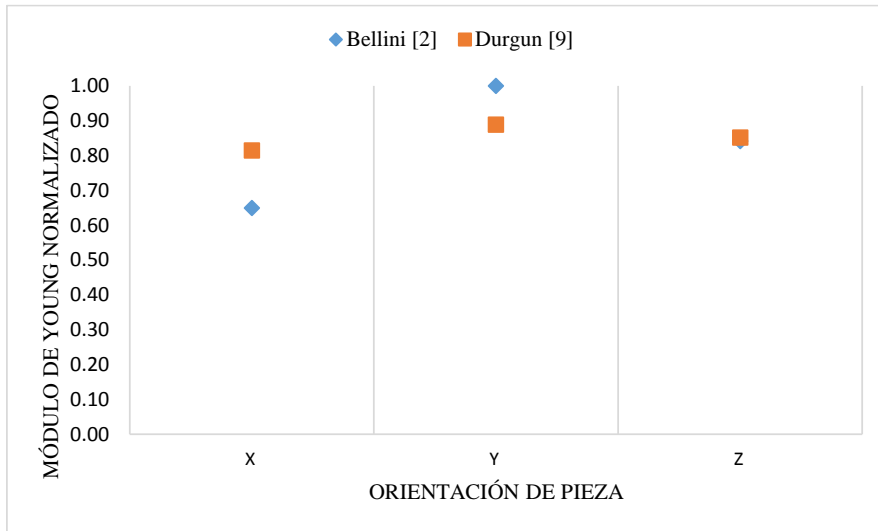


Figura 2.4. Análisis de la influencia de la orientación de la pieza en el Módulo de Young.

Respecto a la dirección de relleno o ángulo de relleno, se tiene en la Figura 2.5, los resultados con respecto al UTS y como se puede observar, el comportamiento reportado es muy variable, ya que para el caso [23], cuanto mayor fue el ángulo de relleno del filamento, mayor fue la resistencia a la tracción. Por otro lado, en [10] se reportó lo contrario, ya que entre mayor fue el ángulo menor UTS fue alcanzado y en [8] se observa un comportamiento sin mucha variación entre sí.

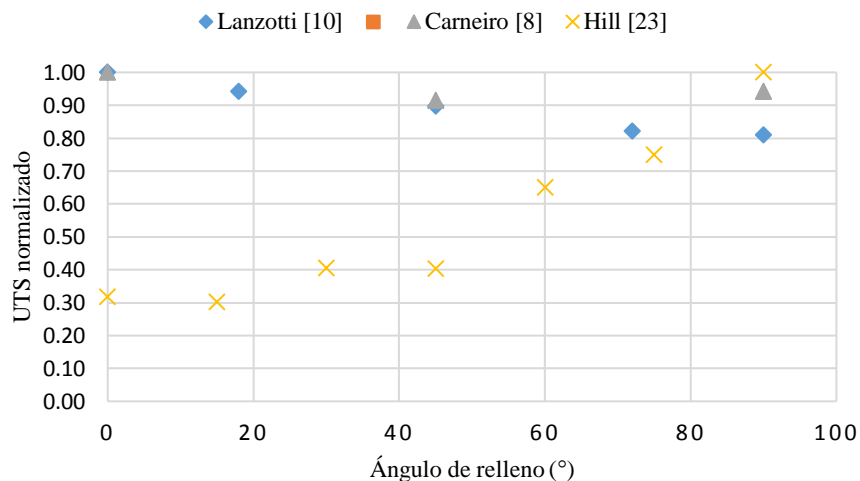


Figura 2.5. Análisis de la influencia del ángulo de relleno de la pieza en el UTS.

Con respecto al Módulo de Young, como se muestra en la Figura 2.6, los valores reportados son mayores en comparación de la Figura anterior ya que el valor más pequeño se encuentra en 0.65 y no en 0.30. Aunque, de igual manera, son muy variables y siguen las mismas tendencia de curva mencionadas anteriormente. Cabe señalar que los ángulos de los filamentos depositados son todos en la misma dirección y no se cruzan como se realiza comúnmente.

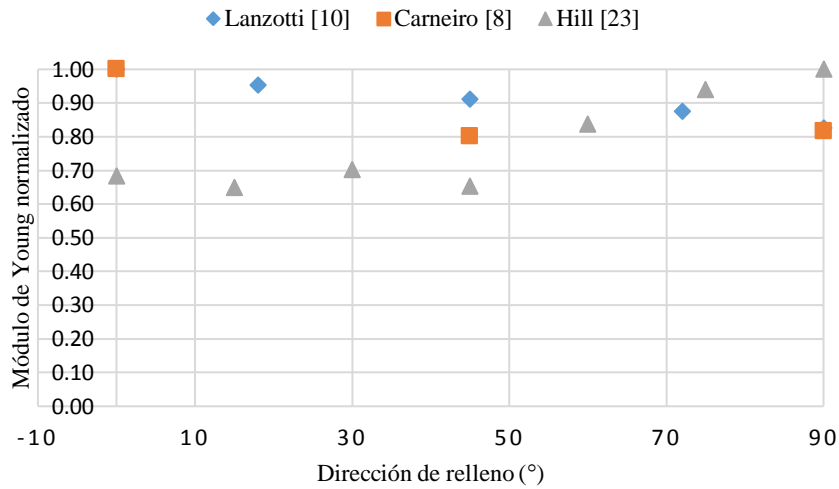


Figura 2.6. Análisis de la influencia del ángulo de relleno de la pieza en el Módulo de Young.

Para el ángulo de relleno cruzado, es decir, que una capa se deposita en el ángulo elegido y la siguiente en el ángulo perpendicular al anterior, se encontró que mientras mayor sea dicho ángulo mayor será el UTS como se muestra en la Figura 2.7. Un ejemplo de este tipo de relleno puede ser que para la primera capa se deposite en 0° y por consiguiente la capa posterior será depositada a 90° , perpendicular a la anterior.

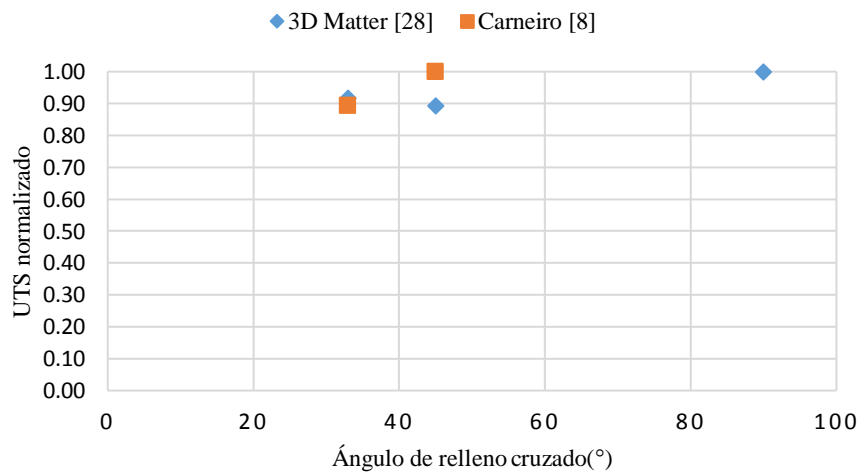


Figura 2.7. Análisis de la influencia del ángulo de relleno cruzado en el UTS.

De igual manera, para el Módulo de Young, en la Figura 2.8 se muestra que si el ángulo de relleno es mayor, el módulo será mayor. Aunque no se presentan diferencias significativas en los valores ya que para el relleno de $\pm 45^\circ$ el valor obtenido es de 0.80, mientras que para el de $0^\circ/90^\circ$ el valor resultante es de 0.82.

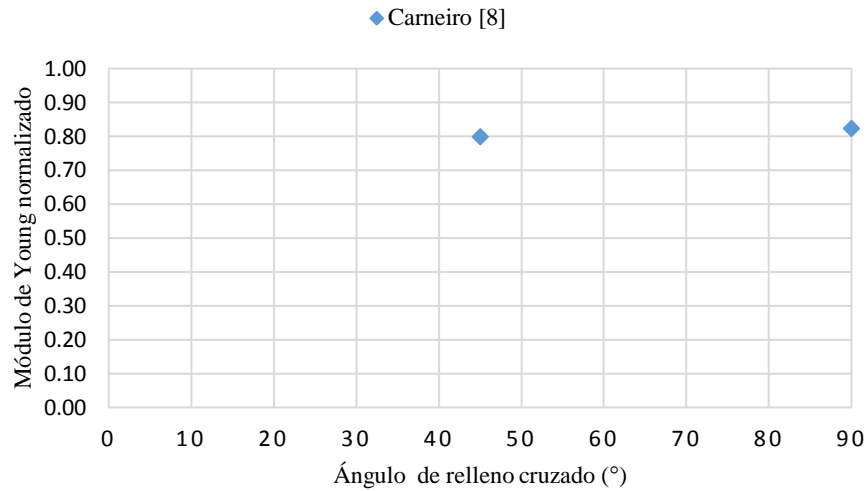


Figura 2.8. Análisis de la influencia del ángulo de relleno cruzado en el Módulo de Young.

Para el parámetro de porcentaje de relleno, se muestra en la Figura 2.9 que mientras mayor sea en porcentaje de relleno, mayor será el UTS resultante para todos los casos. Esto valida lo mencionado en el capítulo anterior acerca de dicho parámetro.

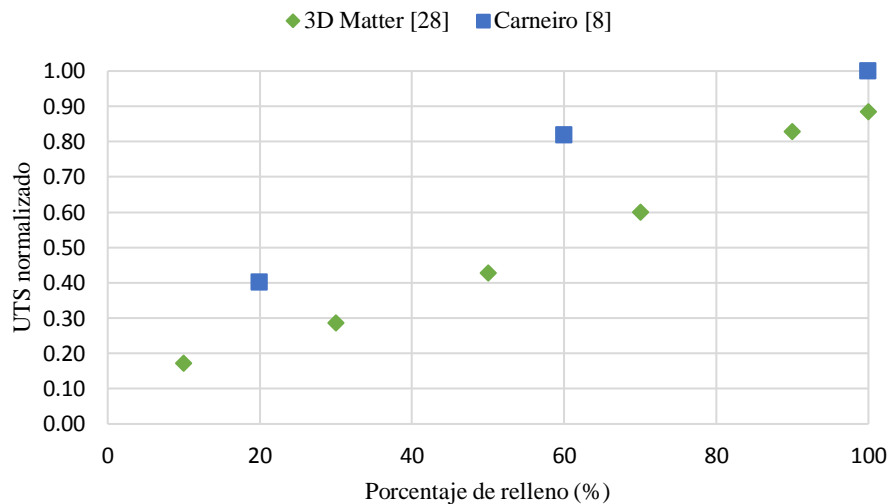


Figura 2.9. Análisis de la influencia del porcentaje de relleno de pieza por autor contra UTS.

En cuanto al Módulo de Young, los valores presentados en la Figura 2.10, muestra que de igual manera que la Figura anterior, a mayor porcentaje de relleno se obtuvieron mayores módulos de elasticidad, independientemente del material utilizado. Y se puede observar una tendencia lineal de todos los valores resultantes con respecto al porcentaje de relleno.

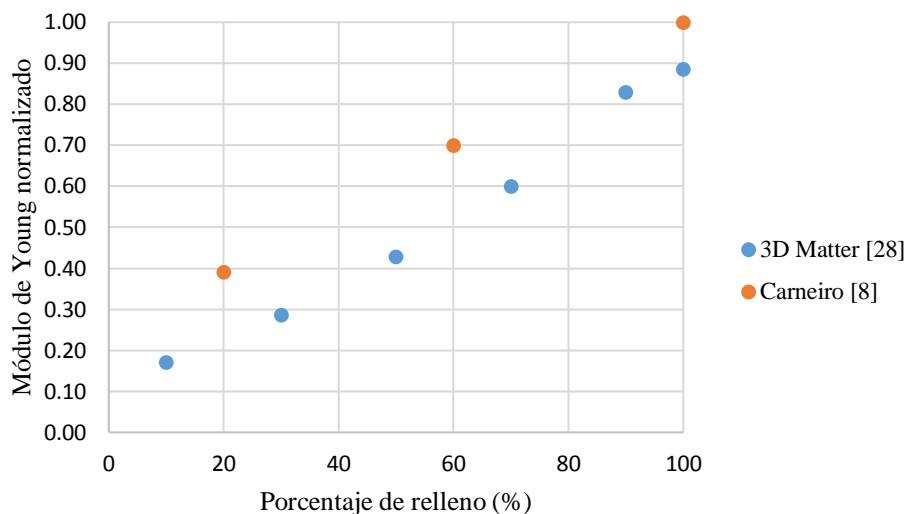


Figura 2.10. Análisis de la influencia del porcentaje de relleno de pieza por autor contra Módulo de Young.

2.3 Establecimiento de valores de los parámetros del proceso FDM

Una vez elegidos los parámetros a estudiar, se procedió a observar los valores con los que se han trabajado previamente en la literatura, así como el criterio de selección utilizado. Esto con el fin de tener un historial y una mejor visión para poder seleccionar los valores para este trabajo. Los resultados se resumen en las Tablas 2.2 a la 2.5.

Tabla 2.2. Valores utilizados para el espesor de capa.

Autores	Material	Valores	Criterios de selección
Carneiro [8]	Polipropileno y reforzado	0.20 y 0.35 mm	
Lanzotti [10]	PLA	0.1, 0.12, 0.15, 0.18, 0.2 mm	
3D Matter [28]	PLA	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 mm	Los parámetros de impresión utilizados son específicos para el equipo Makerbot Replicator, y pueden ser ligeramente diferentes en otras impresoras.
Torres [44]	PLA	0.1, 0.3 mm	Filamento de 1.75 mm de PLA en el equipo FDM MakerBot Replicator 2. Los valores altos y bajos se basan en la configuración de la máquina utilizada para este tipo de impresoras, según lo definido por el fabricante con una desviación de los “ajustes normales” que definen los valores altos y bajos. Para el espesor de capa, por ejemplo, la configuración estándar es de 0.2 mm, entonces una desviación de +/- 0.1 mm fue realizada para determinar los valores altos y bajos.

Tabla 2.3. Valores utilizados para el ángulo de relleno.

Autores	Material	Valores	Criterios de selección
Bellini [2]	ABS	[0 90 +45 -45]	
Carneiro [8]	Polipropileno y reforzado	45, 0, 90, cruzado 45° (+-45°) y cruzado 0-90	El relleno de la pieza alternada y el espesor de capa seleccionados son valores típicos para impresión 3D FDM con un diámetro de boquilla de 0.4 mm.
Durgun [9]	ABS	0°, 30°, 45°, 60°, 90°	
Lanzotti [10]	PLA	0°, 18°, 45°, 72°, 90°	
Rayegani [11]	ABS	0°, 45°	
Chin [16]	Biopolímero	2 ángulos, 5 ángulos	Para identificar los parámetros del proceso que tienen una influencia significativa en la porosidad y propiedades mecánicas de andamios, el método de análisis de varianza fue utilizado en conjunto con la distribución F (95%).
Hill [23]	Policarbonato	0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°	Las muestras tenían un contorno alrededor del perímetro, a pesar de que el espesor del contorno fuera muy pequeño a comparación con la anchura de la muestra que los efectos del contorno en las propiedades mecánicas de la misma fueron despreciables.
3D Matter [28]	PLA	Lineal, Diagonal (45°), Hexagonal	Los parámetros de impresión utilizados son específicos para el equipo Makerbot Replicator y pueden ser ligeramente diferentes en otras impresoras.
Rezayat [33]	ABS	0°, 45°, 90°	
Torres [44]	PLA	0/90 y 45/135	La dirección de relleno se ajustó utilizando el software Skeinforge

Tabla 2.4. Valores utilizados para el porcentaje de relleno.

Autores	Material	Valores	Criterios de selección
Carneiro [8]	Polipropileno y reforzado	20%, 60% y 100%	Debido a que no hay información acerca de las condiciones de impresión del polipropileno y el polipropileno reforzado, se realizaron varias corridas de impresión para determinar las condiciones de impresión óptimas con estos dos materiales.
3D Matter [28]	PLA	10%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90%, 100%	Los parámetros de impresión utilizados son específicos para el equipo Makerbot Replicator, y pueden ser ligeramente diferentes en otros equipos.
Torres [44]	PLA	35%/100%	Las limitaciones establecidas para cada parámetro para el rango posible se determinan principalmente por limitaciones del hardware como se define en el software

Tabla 2.5. Valores utilizados para la orientación de pieza.

Autores	Material	Valores	Criterios de selección
Bellini [2]	ABS	Orientación en x, Orientación en y, Orientación en z, Orientación en x+45, Orientación en y+45, Orientación en z+45	
Durgun [9]	ABS	Horizontal, vertical y perpendicular	
Rayegani [11]	ABS	0°, 90°	
Chin [16]	Biopolímero	0°, 90°	Para identificar los parámetros del proceso que tienen una influencia significativa en la porosidad y propiedades mecánicas de andamios, el método de análisis de varianza fue utilizado en conjunto con la distribución F (95%).
Górski [19]	ABS	Orientación plana (X=0° Y=0°), Orientación de lado X= 90° Y=0°, Orientación vertical Y=90°.	
Domingo-Espin [22]	Polycarbonato	Orientación en x, Orientación en y, Orientación en z, Orientación en x+45, Orientación en y+45, Orientación en z+45.	Procedimiento experimental: Se divide en 3 partes. Primero, las partes de polycarbonato FDM (PC), impresas bajo parámetros de construcción específicos, son caracterizadas mecánicamente para así obtener la matriz de rigidez. Luego, una pieza geoméricamente simple es fabricada en diferentes orientaciones y probada experimentalmente. Finalmente, utilizando la matriz de rigidez previamente obtenida, se realiza una simulación de Elemento Finito para modelar el comportamiento de la pieza.
Armillota [45]	ABS	Perpendicular a la superficie texturizada, paralela a la superficie texturizada	En los dos casos el espesor de capa fue de 0.127 mm, que garantiza la mejor resolución disponible actualmente para el proceso FDM.

El equipo FDM disponible para este proyecto es un sistema FDM modelo Creator Pro™, de la marca FlashForge 3D Printer, Figura 2.7, el cual utiliza el software FlashPrint cuyos valores de configuración para cada parámetro son:

- Espesores de capa: 0.14, 0.18, 0.3 mm.
- Orientaciones: X, Y, Z.
- Rellenos: hexagonal, lineal con ángulos desde 0° hasta 180°, y triangular.
- Porcentajes de relleno: de 1 hasta 100%.



Figura 2.11. FlashForge Creator Pro™.

Por lo anterior y tomando en cuenta los valores reportados en la literatura, se proponen los parámetros y valores mostrados en la Tabla 2.6 para realizar las pruebas experimentales y complementar los valores de la literatura.

Las orientaciones de fabricación X, Y y Z dentro de la cámara de impresión se presentan en la Figura 2.12.

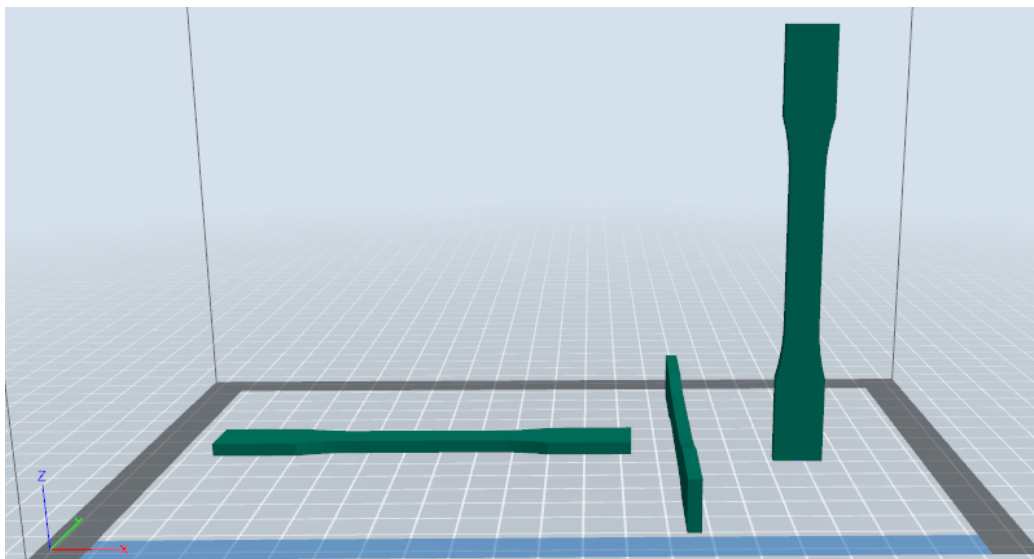


Figura 2.12. Orientaciones de fabricación X, Y y Z de izquierda a derecha respectivamente.

Tabla 2.6. Parámetros y valores seleccionados.

Parámetro	Valores	Justificación
Espesor de capa (mm)	0.14, 0.18, 0.30	Se eligen dichos valores, debido a que son los valores estándar que ofrecen el equipo y software a utilizar.
Orientación de pieza	Orientación en X, Orientación en Y, Orientación en Z.	Las orientaciones seleccionadas se eligen debido a que son las orientaciones principales que se quieren analizar y de las que se han encontrado valores en la literatura con el fin de comprar resultados.
Dirección de relleno de pieza (°)	0°/90° ±45°	Se eligen dichos ángulos de relleno dado que se ha demostrado que generalmente, los mejores patrones a utilizar son el Lineal o el Diagonal (=Lineal en 45°) [28]. También debido a que patrones decorativos tales como el Moroccan y el Catfill muestran un desempeño bajo y solo deben utilizarse si éstos están expuestos y son parte del diseño [28].
Porcentaje de relleno (%)	20, 40, 80, 100	Se eligen dichos porcentajes de relleno como complemento de los reportados en la literatura.

3. Metodología experimental del proceso de Deposición Fundida

3.1 Diseño del experimento

Un experimento puede definirse como una prueba o series de pruebas en las que se realizan cambios deliberados en las variables o condiciones de operación de entrada de un proceso o sistema, esto con el fin de observar e identificar los efectos de dichos cambios en la respuesta de salida [47]. Dicho experimento permite aumentar el conocimiento acerca del comportamiento del sistema [48]. En ingeniería, la experimentación desempeña un papel importante en el desarrollo de procesos de manufactura, diseño de nuevos productos y el mejoramiento de procesos. El objetivo es desarrollar un proceso robusto, es decir, un proceso que sea afectado de forma mínima por fuentes externas de variabilidad [47].

El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es fundamental en la investigación científica, cuyo objetivo es ampliar el conocimiento que sobre la naturaleza y humanidad se tiene. En el caso de la ciencia, el objetivo es producir conocimientos y soluciones fundamentales [48]. En otras palabras, el diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso. Éste consiste en planear un conjunto de pruebas experimentales, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca del sistema o proceso.

En todo proceso intervienen distintos tipos de variables y preguntas a responder, como se muestran en la Figura 3.1 [48]. Entre estas variables se encuentran:

- Variables de respuesta: es la característica cuyo valor interesa mejorar.
- Factores controlables: son variables del proceso que se pueden controlar y fijar en un nivel de operación. Se distinguen porque existe un mecanismo para manipular su nivel de operación.
- Factores no controlables o de ruido: son variables que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso. Un factor no controlable puede convertirse en controlable, cuando se tenga el mecanismo para ello.
- Factores estudiados: son las variables que se investigan en el experimento, para determinar cómo influyen o afectan a la(s) variable(s) de respuesta. Dichos factores pueden ser controlables o no controlables y para que puedan ser estudiados es necesario que durante el experimento se hayan probado en al menos dos niveles o condiciones.
- Niveles y tratamientos: los niveles se refieren a los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental. A la combinación de niveles de todos los factores se le denomina tratamiento o punto de diseño [48].

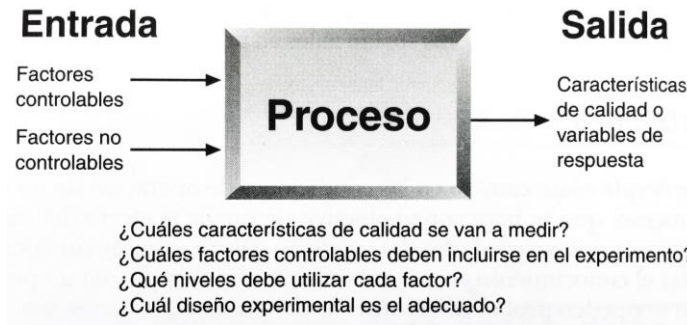


Figura 3.1. Variables de un proceso y preguntas a responder para un diseño de experimentos.

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental son:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a controlar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

En la Figura 3.2 se muestra la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo [48].

En el caso particular de este trabajo de investigación, se requiere conocer el efecto de los diversos factores o parámetros del proceso FDM en las propiedades mecánicas de las piezas. Por lo anterior y de acuerdo a la Figura 3.2, el tipo de diseño experimental es el diseño factorial, cuyo objetivo es el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos ya que tienen como objetivo estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, etc.) o de tipo cuantitativo (temperatura, velocidad, presión, etc.). Con este diseño de experimentos se corren todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar de manera aleatoria. Por lo tanto, el arreglo factorial será dicho conjunto de tratamientos que pueden formarse considerando lo anterior [48].

Los diseños experimentales de Taguchi, están basados en arreglos ortogonales y se hicieron populares por el ingeniero Genichi Taguchi. Normalmente se identifican con un nombre como L8, que indica un arreglo con 8 corridas. Algunas veces los diseños de Taguchi pueden tener grandes números de corridas, por ejemplo, investigando los efectos de 5 factores con 3 niveles de ruido. Más detalles del método pueden ser revisados en [49].

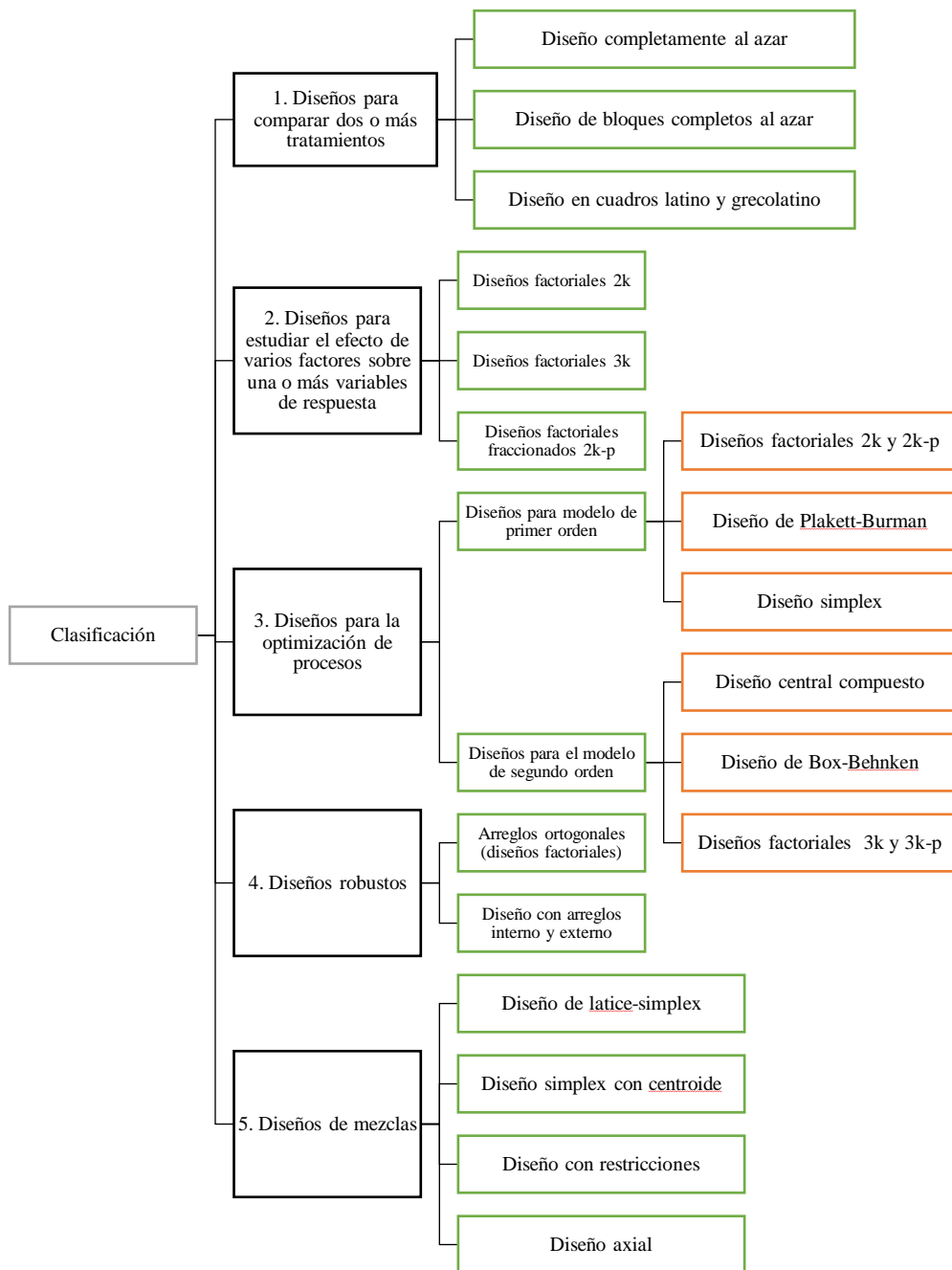


Figura 3.2. Clasificación de los diseños experimentales.

La Tabla 3.1 se muestra todos los parámetros y valores considerados para analizar el efecto de estos en las propiedades mecánicas. Como se puede observar, se tienen cuatro parámetros del proceso con distinto número de valores para cada uno de ellos.

Tabla 3.1. Parámetros y valores seleccionados de fabricación de probetas.

% Relleno	Orientación pieza			Espesor de capa			Patrón de relleno	
20	X	Y	Z	0.14	0.18	0.30	±45°	0°/90°
40	X	Y	Z	0.14	0.18	0.30	±45°	0°/90°
80	X	Y	Z	0.14	0.18	0.30	±45°	0°/90°
100	X	Y	Z	0.14	0.18	0.30	±45°	0°/90°

Una vez investigados los diferentes tipos de diseños de experimentos aplicables se procedió a elegir el que más se ajustara al caso de estudio. Se encontró que los diseños tanto factoriales como Taguchi por lo general se realizan para un número de factores con el mismo número de niveles, es decir, cada factor cuenta con un número igual de niveles. En los diseños Taguchi se pueden estudiar hasta quince factores, sin embargo, el número de niveles es limitado y comúnmente el número máximo de niveles es tres. Para el caso del diseño factorial, del mismo modo puede estudiar gran variedad de factores y en casos no comunes se pueden aplicar niveles mixtos para cada uno de ellos, sin embargo, el número máximo de niveles también es de tres.

Los diseños de experimentos cuentan con un número limitado de niveles para cada factor, debido a que un nivel cuatro genera mucho “ruido” estadísticamente hablando. Es decir, si se implementaran factores con cuatro niveles, aumentaría el error aleatorio; el cual es la variabilidad observada debido a errores experimentales y un pequeño efecto de los factores no estudiados. El aumento en este error o en la variabilidad traerá como consecuencia no poder distinguir el verdadero efecto de los factores en el resultado. De aquí la importancia de no variar libremente ningún factor que pueda influir de manera significativa sobre el comportamiento de la respuesta [48]. Por lo tanto, debido a que en este caso de estudio se tienen 4 factores con diferentes niveles cada uno; de los cuales uno de dichos factores cuenta con 4 niveles no se pueden emplear estos métodos experimentales.

3.2 Combinación de parámetros FDM

De acuerdo a los valores y parámetros del proceso FDM seleccionados, y considerando todas las combinaciones posibles, es necesario fabricar 72 probetas correspondientes a cada una de las combinaciones de los valores seleccionados. La Tabla 3.2 presenta las 72 combinaciones posibles de acuerdo a los valores de los parámetros elegidos. Para contar con una muestra estadísticamente válida, se fabricaron 5 probetas por cada una de las combinaciones mostradas en la Tabla 3.2, por lo que en total se fabricaron 360 probetas.

Tabla 3.2. Combinaciones posibles de parámetros y valores de fabricación de probetas.

COMBINACIONES POSIBLES									
Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14	Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14
Orientación	X	X	X	X	Orientación	X	X	X	X
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18	Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18
Orientación	X	X	X	X	Orientación	X	X	X	X
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30	Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30
Orientación	X	X	X	X	Orientación	X	X	X	X
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14	Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14
Orientación	Y	Y	Y	Y	Orientación	Y	Y	Y	Y
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18	Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18
Orientación	Y	Y	Y	Y	Orientación	Y	Y	Y	Y
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30	Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30
Orientación	Y	Y	Y	Y	Orientación	Y	Y	Y	Y
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14	Espesor de capa	0.14	0.14	0.14	0.14
Orientación	Z	Z	Z	Z	Orientación	Z	Z	Z	Z
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18	Espesor de capa	0.18	0.18	0.18	0.18
Orientación	Z	Z	Z	Z	Orientación	Z	Z	Z	Z
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100
Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30	Espesor de capa	0.30	0.30	0.30	0.30
Orientación	Z	Z	Z	Z	Orientación	Z	Z	Z	Z
Patrón Relleno	±45°	±45°	±45°	±45°	Patrón Relleno	0°/90°	0°/90°	0°/90°	0°/90°
% Relleno	20	40	80	100	% Relleno	20	40	80	100

3.3 Nomenclatura de probetas

Para tener un mayor control de las probetas, cada probeta se identificó de acuerdo a los valores de los parámetros del proceso. La nomenclatura utilizada para la identificación de probetas se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Nomenclatura de las probetas.

NOMENCLATURA			
A	B	C	D
% de Relleno	Orientación	Espesor de capa	Patrón de relleno
20	X	1 = 0.14mm	45 = $\pm 45^\circ$
40	Y	2 = 0.18 mm	90 = $0^\circ/90^\circ$
80	Z	3 = 0.30 mm	
100			

Donde A representa el porcentaje de relleno; B representa las orientación de la pieza; C representa el espesor de capa, en donde 1, 2 y 3 representan los valores de 0.14, 0.18 y 0.30 mm, respectivamente; y D representa el patrón de relleno. Por ejemplo: 20X190, lo cual significa que la probeta cuenta con 20% de relleno, fue fabricada en la orientación X con un espesor de capa de 0.14 mm y una dirección del filamento de relleno de $0^\circ/90^\circ$.

3.4 Probetas estándar

La norma internacional ASTM D638-02a [50], especifica el método de ensayo para la determinación de la resistencia a la tracción bajo carga uniaxial de materiales plásticos. La Figura 3.3 ilustra los dos diferentes tipos de geometrías que pueden ser utilizadas para estos ensayos.

De estas geometrías se optó por la probeta de Tipo I por dos razones: primero porque este tipo se utiliza para plásticos rígidos o semirrígidos, como lo es el PLA; y segundo, ya que esta geometría es la más utilizada y se debe de emplear cuando se pueda disponer de suficiente material que cuente con un espesor de 7 mm o menor. El Tipo II se puede utilizar cuando el material no se rompe en la sección estrecha, mientras que el Tipo V se utiliza cuando se dispone de material limitado con un espesor de 4 mm [50]. En la Tabla 3.4 se presentan las dimensiones de las probetas estándar seleccionadas.

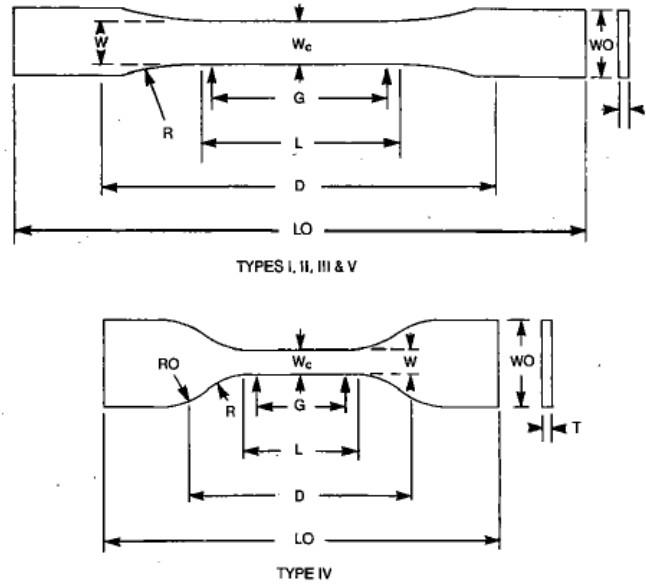


Figura 3.3. Diferentes geometrías para ensayos a tracción según ASTM D638-02a.

Tabla 3.4. Dimensiones utilizadas para el Tipo I.

Dimensión	Valor (mm)
W: ancho de la sección estrecha	13
L: largo de la sección estrecha	57
WO: Ancho total	19
LO: Largo total	165
G: longitud calibrada	50
D: distancia entre agarre	115
R: radio de filete	76
T: espesor	5

3.5 Validación de parámetros de fabricación

El equipo FDM utilizado para fabricar las probetas de PLA fue el FlashForge Creator Pro [51] como se muestra en la Figura 3.4. Previo a la fabricación de las probetas, se realizaron algunas pruebas piloto de validación de los parámetros de fabricación en dicho sistema.



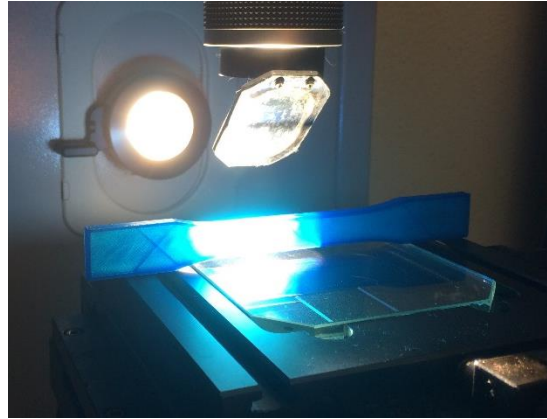
Figura 3.4. FlashForge Creator Pro™.

3.5.1 Espesor de capa

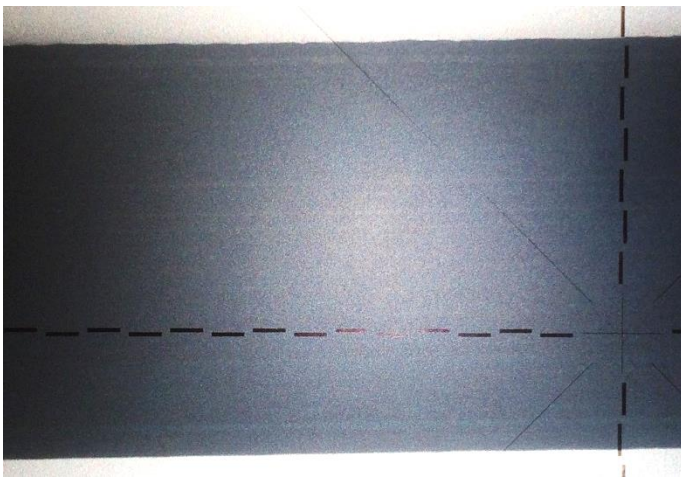
La medición del espesor de capa se realizó utilizando el comparador óptico modelo PJ-2500, número 301-931-1A marca Mitutoyo, como se muestra en la Figura 3.5. Para ello se fabricaron tres probetas FDM con un espesor de capa nominal 0.18 mm, y 1% de relleno para que la luz pudiera traspasarlas (Figura 3.6a); de esta manera se midió la altura de las capas (Figura 3.6b). Se realizaron cinco mediciones por probeta (Figura 3.6c). La Tabla 3.5 presenta los resultados obtenidos, en donde se observa que el parámetro de espesor de capa obtenido es preciso ya que se tiene un promedio total de 0.1813 mm con una desviación estándar total mucho menor a 1.



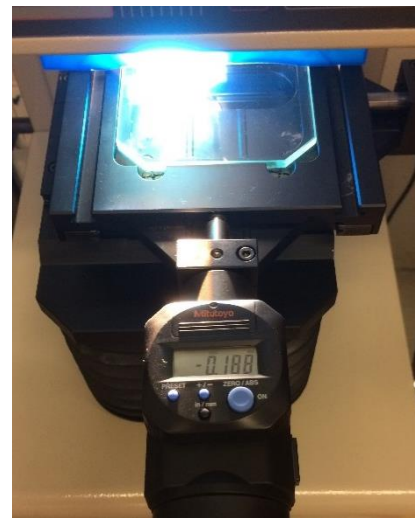
Figura 3.5. Comparador óptico PJ-2500, Mitutoyo.



a)



b)



c)

Figura 3.6. Validación de espesor de capa: a) probeta en comparador óptico, b) vista de capas y c) valor de medición de capas.

Tabla 3.5. Valores de mediciones de espesores de capa para un espesor nominal de 0.18mm.

Probetas	Valores medidos de espesor de capa (mm)					Promedio	Desv. Std.
1	0.188	0.172	0.190	0.170	0.188	0.1816	0.0087
2	0.187	0.188	0.175	0.173	0.182	0.1810	0.0061
3	0.181	0.178	0.188	0.170	0.190	0.1814	0.0072
Promedio total \pm Desv. Std. Total						0.1813 \pm 0.0074	

3.5.2 Dimensiones

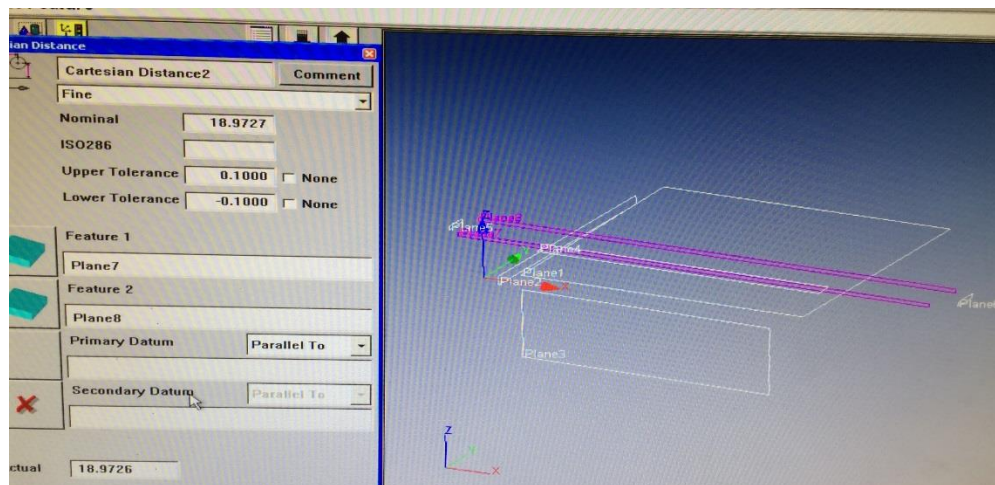
Las dimensiones de las probetas se validaron utilizando una máquina de medición de coordenadas, modelo Vista de la marca ZEISS. Para ello se fabricaron siete probetas diferentes con porcentajes de relleno 20%, 80%, 100%, y con orientaciones de impresión X, Y, y Z. Se realizaron 8 planos en cada una de las caras de las probetas mediante 6 toques en cada plano con la sonda de medición (Figura 3.7a, 3.7b) y después se calculó la distancia entre ellos como se observa en la Figura 3.7c. Cabe hacer mención que las dimensiones de las probetas impresas con orientación Z tuvieron que ser reducidas a un 90% de su dimensión original debido al espacio limitado de la cámara de impresión. Se realizaron tres mediciones por probeta.



a)



b)



c)

Figura 3.7. Validación de dimensiones: a) creación de planos en mesa de coordenadas, b) toque con el punzón en cara y c) cálculo de la distancia entre planos.

Los resultados de las mediciones se presentan en la Tabla 3.6 en donde se observa que la precisión dimensional obtenida en las probetas es buena y aceptable debido a que presenta desviaciones estándar menores a 0.5 en las dimensiones a lo largo, ancho mayor y ancho del cuello de las probetas. Para el caso del espesor, la desviación estándar para la orientación Z y para la orientación X son menores al 0.01, mientras que para la orientación Y la desviación estándar es mayor, llegando a un 0.0239 en el espesor de la probeta. Esto se presenta debido a que en esta orientación la pieza requiere de soportes como los que se muestran en la Figura 3.8, los cuales al ser desprendidos dejan una superficie no uniforme por lo que las dimensiones son mayores. Aun así la desviación estándar no es significativa por lo que se validan las dimensiones.

Tabla 3.6. Resultados de dimensiones para validación de probetas.

Orientación X	Largo (mm)	Ancho Mayor (mm)	Ancho cuello (mm)	Espesor (mm)
20%	164.6182	18.8884	13.0695	5.0114
	164.4532	18.9146	13.0456	5.0116
	163.8976	18.8982	13.0557	5.0055
80%	163.1446	18.8720	13.0687	4.9977
	164.6182	18.8652	13.0236	5.0111
	164.4504	18.9102	13.0581	5.0026
100%	164.4504	18.8862	13.0442	5.0033
	163.8662	18.8329	13.0258	4.9972
	164.5201	18.9128	13.0452	4.9985
Promedio	164.2243	18.8867	13.0485	5.0043
Desv. Std.	0.4659	0.0252	0.0155	0.0056
Orientación Y	Largo (mm)	Ancho Mayor (mm)	Ancho cuello (mm)	Espesor (mm)
20%	164.8492	18.7556	13.3673	5.1418
	164.9564	18.8925	13.1071	5.1926
	164.8902	18.9127	13.1008	5.2082
80%	163.5374	18.9726	13.4546	5.1882
	164.5788	18.9624	13.2381	5.1893
	163.8934	18.8995	13.1353	5.2292
100%	164.8591	18.9049	13.1006	5.2217
	164.7812	18.9058	13.0871	5.1872
	164.8971	18.9236	13.1562	5.2063
Promedio	164.5825	18.9033	13.1941	5.1961
Desv. Std.	0.4816	0.0585	0.1252	0.0239
Orientación Z (90%)	Largo (mm)	Ancho Mayor (mm)	Ancho cuello (mm)	Espesor (mm)
20%	147.9985	17.1131	11.6616	4.4294
	147.9348	17.1341	11.5691	4.4382
	147.9593	17.0892	11.5389	4.4184
Promedio	147.9642	17.1121	11.5899	4.4287
Desv. Std.	0.0262	0.0183	0.0522	0.0081



Figura 3.8. Soportes de probeta impresa en dirección Y.

3.5.3 Porcentaje de relleno

En cuanto al porcentaje de relleno, se fabricaron 60 probetas con una capa de perímetro, variando los tres espesores de capa (0.14, 0.18, 0.30 mm), los cuatro porcentajes de relleno (20, 40, 80, 100%) y una sola dirección de relleno ($0^\circ/90^\circ$). Se fabricaron 5 probetas por cada una de las combinaciones anteriores y se pesaron. El peso se midió en el Laboratorio de Ciencias Ambientales en una báscula marca OHAUS modelo ExplorerPro con el fin de validar y comprobar el porcentaje de relleno real de las probetas. Esto con el objetivo de determinar si el porcentaje de relleno aplicado a la pieza corresponde con el porcentaje depositado en la misma, ya que el parámetro estándar de número de capas de perímetros es de 3, por lo que se necesitaba saber si éstas tienen influencia en el peso de las partes finales y por lo tanto en el porcentaje de relleno real. Para este caso, a la nomenclatura de las probetas se le agregó un 1 después del porcentaje de relleno con el fin de diferenciarlas de las probetas con capas de perímetro estándar. En la Tabla 3.7 se presentan los resultados de las mediciones de peso.

Como se observa en la Tabla 3.7, los pesos no coinciden con el porcentaje de relleno, ya que para las probetas con el 20% de relleno teórico, se encontró que el porcentaje de relleno real anda alrededor de 36% en promedio y las del 40% de relleno en un 52% aproximadamente. Sin embargo para las probetas con mayor porcentaje de relleno, es decir, las de 80%, el porcentaje real si es cercano ya que se encontró que está en 83% aproximadamente. Todas las probetas se compararon contra las del 100% de relleno para calcular dicho porcentaje ya que se consideró que éstas son completamente sólidas. En general la variación presentada por las probetas se debe al proceso mismo, es decir, la programación del equipo, el cual supone un porcentaje de relleno indicado únicamente para el interior de las partes a fabricar sin tomar en cuenta las capas de perímetro tanto laterales como inferiores y superiores. Por este motivo, el porcentaje de relleno real siempre será mayor al teórico. Esta variación se contemplará para el análisis posterior en donde se tomarán en cuenta los porcentajes de relleno reales con el fin de realizar un análisis completo.

Tabla 3.7. Resultados de la medición del peso en probetas con una capa de perímetro.

Probetas	Masa (gr)	Promedio	% Relleno real	Probetas	Masa (gr)	Promedio	% Relleno real
201x190/1	5.4309	5.4310±0.0075	33.31	801x190/1	13.3850	13.3764±0.0117	82.05
201x190/2	5.4168			801x190/2	13.3659		
201x190/3	5.4345			801x190/3	13.3855		
201x190/4	5.4340			801x190/4	13.3869		
201x190/5	5.4389			801x190/5	13.3588		
201x290/1	5.2153	5.1753±0.02333	36.56	801x290/1	11.6151	11.6219±0.0632	82.10
201x290/2	5.1694			801x290/2	11.5177		
201x290/3	5.1768			801x290/3	11.6081		
201x290/4	5.1424			801x290/4	11.6607		
201x290/5	5.1725			801x290/5	11.7080		
201x390/1	5.7487	5.7492±0.0180	38.01	801x390/1	12.7879	12.7827±0.0222	84.52
201x390/2	5.7813			801x390/2	12.7582		
201x390/3	5.7340			801x390/3	12.7944		
201x390/4	5.7302			801x390/4	12.8155		
201x390/5	5.7518			801x390/5	12.7576		
401x190/1	8.2661	8.2412±0.0163	50.55	1001x190/1	16.3358	16.3023±0.0407	100.00
401x190/2	8.2269			1001x190/2	16.3331		
401x190/3	8.2420			1001x190/3	16.2248		
401x190/4	8.2506			1001x190/4	16.3171		
401x190/5	8.2206			1001x190/5	16.3007		
401x290/1	7.5982	7.6159±0.0153	53.80	1001x290/1	14.1050	14.1553±0.0581	100.00
401x290/2	7.6057			1001x290/2	14.1130		
401x290/3	7.6070			1001x290/3	14.1105		
401x290/4	7.6340			1001x290/4	14.2006		
401x290/5	7.6345			1001x290/5	14.2475		
401x390/1	7.8955	7.9188±0.0206	52.36	1001x390/1	15.0859	15.1246±0.0438	100.00
401x390/2	7.9102			1001x390/2	15.1979		
401x390/3	7.9281			1001x390/3	15.1505		
401x390/4	7.9544			1001x390/4	15.1057		
401x390/5	7.9061			1001x390/5	15.0832		

3.6 Caracterización de materia prima

Una vez validados los parámetros de fabricación de las probetas, se realizaron pruebas de tracción a los filamentos de materia prima para determinar sus propiedades estructurales particulares, las cuales serán utilizadas más adelante para efectos de normalización de

resultados. Para ello se analizaron 5 rollos de materia prima; de cada uno de éstos se cortaron seis tramos de filamentos. Estos tramos se agruparon en dos para aplicar el ensayo y se les dio una longitud calibrada. Posteriormente se sometieron a ensayos de tracción. En la Figura 3.9a se muestran los filamentos durante el ensayo y en la Figura 3.9b se muestran los filamentos al final del ensayo en donde se observa que se colocaron 2 tramos de filamentos, esto debido a que las mordazas de la Máquina Universal marca Shimadzu, modelo AG-100KNI, no podían sujetar únicamente uno. Los resultados de los ensayos a tensión se resumen en la Tabla 3.8.



Figura 3.9. Tramos de filamentos de materia prima: a) Filamentos durante ensayo a tracción y b) Filamentos al terminar el ensayo.

Tabla 3.8. Resultados de ensayos a tensión de filamentos de PLA.

Prueba	Max. Carga (N)	Max. Esfuerzo (MPa)	Alargamiento (%)
ROLLO AZUL 1			
PLA 1	122.65	51.00	8.33
PLA 2	156.72	43.44	9.33
PLA 3	102.81	42.75	8.67
Promedio	127.40±22.26	45.73±3.74	8.78±0.42
ROLLO GRIS 1			
PLA 1	Fail	Fail	Fail
PLA 2	134.378	55.86	7.61
PLA 3	137.50	57.16	9.33
Promedio	135.94±1.56	56.51±0.65	8.47±0.86
ROLLO AMARILLO 1			
PLA 1	106.25	44.17	7.61
PLA 2	93.75	38.97	8.20
PLA 3	106.25	44.17	7.76
Promedio	102.08±5.89	42.44±2.45	7.86±0.25
ROLLO AZUL 2			
PLA 1	146.88	61.06	6.39
PLA 2	162.50	67.55	13.49
PLA 3	159.38	66.25	14.88
Promedio	156.25±6.75	64.95±2.81	11.58±3.72
ROLLO AZUL 3			
PLA 1	Fail	Fail	Fail
PLA 2	165.63	68.85	7.73
PLA 3	162.50	67.55	12.54
Promedio	164.06±1.56	68.20±0.65	10.14±2.41

De estos resultados se puede observar que los valores del esfuerzo máximo presentan una variación de 42 a 68 MPa. Estas variaciones se deben a la dependencia de las propiedades a las características particulares del material, en particular el tiempo de envejecimiento y las condiciones ambientales bajo las que se encuentre dicho rollo de material (temperatura, humedad, exposición solar, etc.). Los valores del esfuerzo máximo del primer rollo azul son menores en comparación a los cinco rollos ensayados ya que el material tenía mucho más tiempo en uso que los demás. Además, este primer rollo azul presenta mayor variación en la carga máxima aplicada debido al tiempo de envejecimiento como se mencionó anteriormente. Sin embargo, todos los valores se encuentran dentro del rango nominal del PLA, el cual es de 40 a 70 MPa [28]. En cuanto al alargamiento también se presentan variaciones pero no son tan grandes como las del esfuerzo. Los valores están igualmente dentro del rango nominal del material, el cual es mínimo 6% de elongación [52].

4. Pruebas experimentales del comportamiento estructural

4.1 Metodología experimental general

La metodología utilizada para llevar a cabo el análisis experimental se muestra en la Figura 4.1. Como primer paso se fabricaron todas las probetas FDM para ensayos a tracción de acuerdo a la norma ASTM D638-02a [1]. Posteriormente se procedió a medir las dimensiones y peso de cada probeta. Enseguida se procedió a preparar las probetas para posteriormente realizar los ensayos a tracción. Finalmente los resultados experimentales se analizaron para determinar las propiedades estructurales de las probetas y evaluar la influencia de los parámetros del proceso FDM en las propiedades estructurales de las probetas.

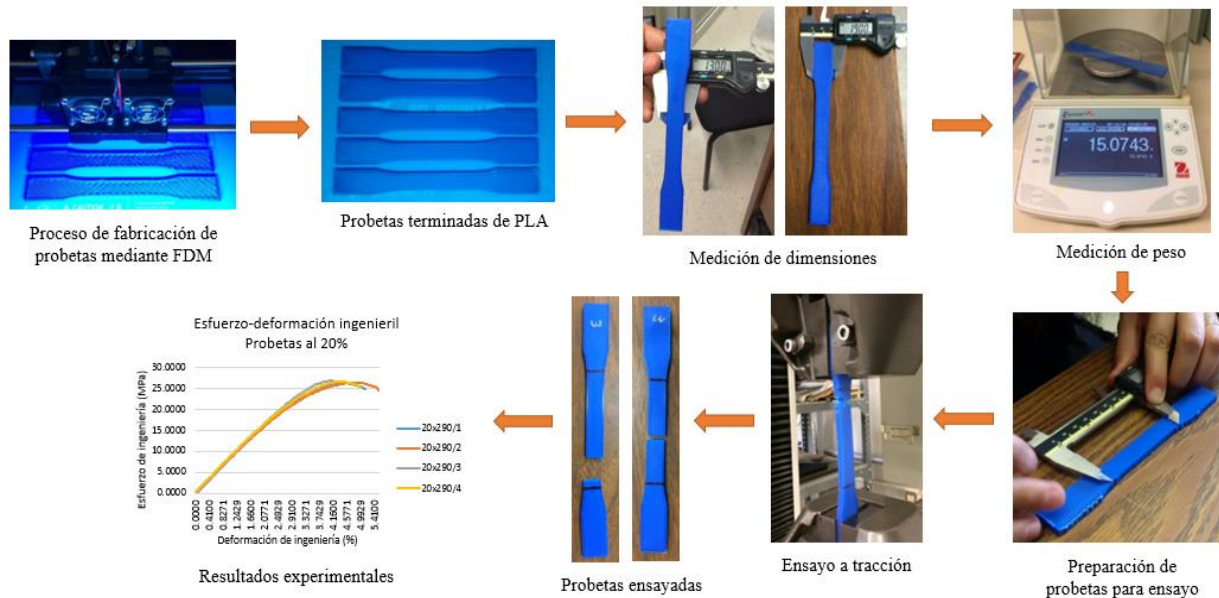


Figura 4.1. Metodología general.

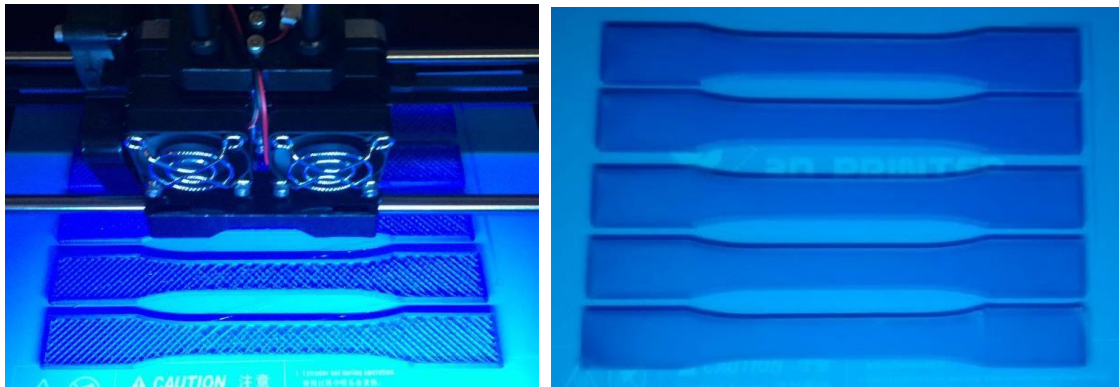
4.2 Fabricación de probetas

Las dimensiones de las probetas fueron definidas con base a la norma ASTM D638-02a [1], como se mencionó en el capítulo anterior. Las probetas fueron fabricadas en el sistema FDM Creator Pro Flashforge™, el cual utiliza el software FlashPrint del fabricante del equipo. El material utilizado fue PLA y se fabricaron 5 probetas por cada combinación de los valores de los parámetros seleccionados, i.e. porcentaje de relleno, espesor de capa, orientación y patrón de relleno, ver Tabla 3.4, además de los parámetros en valores estándar como las capas de perímetro, la temperatura y la velocidad de fabricación los cuales se muestran en la Tabla 4.1. En total se fabricaron 360 probetas, las cuales fueron identificadas de acuerdo a la

nomenclatura descrita en la sección 3.3 del capítulo anterior. La Figura 4.2 muestra el proceso de fabricación de las probetas.

Tabla 4.1. Valores estándar de los parámetros de fabricación utilizados.

Parámetro de fabricación	Valor
Número de capas de perímetro	3
Temperatura de fabricación	200 °C
Temperatura de la plataforma	50 °C
Velocidad de fabricación	80 mm/s



a)

b)

Figura 4.2. Proceso de fabricación de probetas de PLA: a) Probetas durante el proceso y b) Probetas terminadas.

Para el caso de las probetas fabricadas con orientación Z, sus dimensiones se tuvieron que escalar al 70% para que cupieran dentro del espacio de trabajo del equipo, y evitar exceder el espacio disponible como se muestra en la Figura 4.3. Otra razón por la que se escalaron fue debido a que se presentaron dislocaciones entre las capas finales de la probeta como se puede observar en la Figura 4.4. Las dimensiones finales utilizadas para la fabricación de las probetas con orientación Z se muestran en la Tabla 4.2.

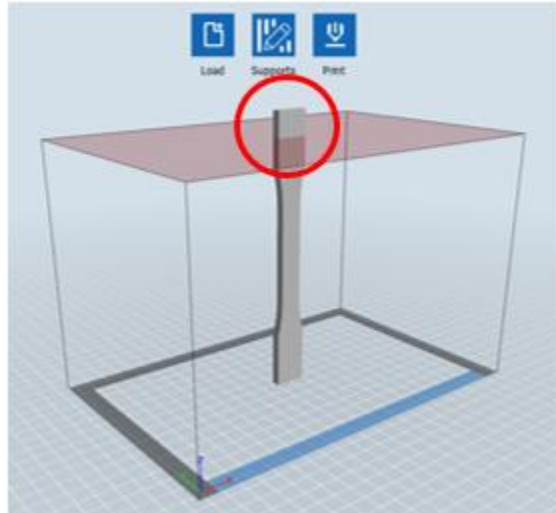


Figura 4.3 Espacio de trabajo del equipo con la probeta con dimensiones originales en orientación Z.

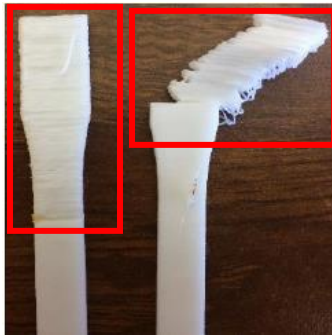


Figura 4.4. Falla de dislocaciones entre las capas en probetas con orientación Z.

Tabla 4.2. Dimensiones utilizadas para las probetas fabricadas con orientación Z.

Dimensión	Valor (mm)
W: ancho de la sección estrecha	9.1
L: largo de la sección estrecha	39.9
WO: Ancho total	13.3
LO: Largo total	115.5
G: longitud calibrada	35
D: distancia entre agarre	80.5
R: radio de filete	53.2
T: espesor	3.5

4.3 Medición de dimensiones

Las dimensiones finales de las probetas fabricadas fueron medidas con el fin de obtener las dimensiones reales de cada una de ellas. Estas dimensiones de las probetas fabricadas se

midieron con un Vernier Mitutoyo No. CD-4” CSX. En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de las mediciones con su correspondiente desviación estándar para las probetas fabricadas con orientación X y Y. Y debido a que para la orientación en Z se escalaron las dimensiones, éstas se muestran por separado en la Tabla 4.4. Adicionalmente, la microestructura y la porosidad de algunas de las probetas fueron medidos con un Microscopio de Tubo Invertido, Marca Leica Mucrosystems CMS GmbH, como se muestra en la Figura 4.5.

Tabla 4.3. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación X y Y.

Probetas	WO (mm)	W (mm)	T (mm)
20x145	19.018 ± 0.049	13.110 ± 0.041	5.078 ± 0.017
40x145	19.000 ± 0.050	13.136 ± 0.051	5.094 ± 0.014
80x145	18.976 ± 0.042	13.146 ± 0.042	4.966 ± 0.015
100x145	19.028 ± 0.066	13.186 ± 0.029	5.124 ± 0.022
20x245	19.064 ± 0.022	13.112 ± 0.037	4.994 ± 0.021
40x245	19.064 ± 0.056	13.152 ± 0.012	5.074 ± 0.021
80x245	19.002 ± 0.051	13.150 ± 0.021	4.874 ± 0.026
100x245	19.088 ± 0.024	13.148 ± 0.030	5.080 ± 0.028
20x345	19.042 ± 0.052	13.186 ± 0.026	5.060 ± 0.022
40x345	19.012 ± 0.041	13.136 ± 0.020	4.988 ± 0.019
80x345	19.098 ± 0.052	13.204 ± 0.034	5.060 ± 0.028
100x345	19.040 ± 0.038	13.222 ± 0.017	5.086 ± 0.019
20x190	18.998 ± 0.034	13.092 ± 0.030	5.022 ± 0.026
40x190	19.040 ± 0.040	13.092 ± 0.013	5.048 ± 0.018
80x190	19.018 ± 0.069	13.174 ± 0.017	4.834 ± 0.019
100x190	19.032 ± 0.041	13.170 ± 0.031	5.086 ± 0.028
20x290	18.968 ± 0.059	13.058 ± 0.027	4.954 ± 0.031
40x290	18.980 ± 0.036	13.124 ± 0.020	5.050 ± 0.027
80x290	18.994 ± 0.034	13.146 ± 0.015	4.966 ± 0.008
100x290	19.090 ± 0.057	13.198 ± 0.032	5.078 ± 0.041
20x390	18.988 ± 0.046	13.178 ± 0.037	4.788 ± 0.025
40x390	19.172 ± 0.044	13.208 ± 0.028	5.024 ± 0.036
80x390	19.036 ± 0.064	13.222 ± 0.018	4.804 ± 0.027
100x390	19.156 ± 0.024	13.198 ± 0.017	5.028 ± 0.047
20y145	18.964 ± 0.019	13.320 ± 0.037	5.086 ± 0.019
40y145	18.950 ± 0.014	13.396 ± 0.034	5.092 ± 0.015
80y145	18.956 ± 0.020	13.258 ± 0.031	5.086 ± 0.019
100y145	18.976 ± 0.038	13.346 ± 0.047	5.126 ± 0.021

Tabla 4.3. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación X y Y (cont.).

Probetas	WO (mm)	W (mm)	T (mm)
20y245	18.954 ± 0.040	13.134 ± 0.043	5.098 ± 0.016
40y245	18.930 ± 0.024	13.230 ± 0.054	5.102 ± 0.015
80y245	18.972 ± 0.033	13.174 ± 0.040	5.098 ± 0.015
100y245	19.016 ± 0.066	13.220 ± 0.030	5.106 ± 0.010
20y345	18.994 ± 0.060	13.160 ± 0.055	5.124 ± 0.019
40y345	19.006 ± 0.029	13.176 ± 0.008	5.124 ± 0.008
80y345	18.958 ± 0.054	13.196 ± 0.014	5.118 ± 0.010
100y345	19.016 ± 0.047	13.186 ± 0.015	5.114 ± 0.016
20y190	19.006 ± 0.033	13.292 ± 0.021	5.102 ± 0.026
40y190	18.986 ± 0.014	13.286 ± 0.046	5.082 ± 0.021
80y190	18.936 ± 0.017	13.202 ± 0.016	5.058 ± 0.017
100y190	19.022 ± 0.066	13.232 ± 0.031	5.130 ± 0.011
20y290	19.024 ± 0.022	13.182 ± 0.025	5.120 ± 0.014
40y290	18.988 ± 0.052	13.166 ± 0.030	5.078 ± 0.017
80y290	18.964 ± 0.039	13.218 ± 0.032	5.102 ± 0.017
100y290	19.008 ± 0.019	13.236 ± 0.022	5.154 ± 0.008
20y390	19.014 ± 0.145	13.310 ± 0.027	5.184 ± 0.015
40y390	18.938 ± 0.030	13.250 ± 0.035	5.148 ± 0.017
80y390	18.908 ± 0.062	13.336 ± 0.031	5.200 ± 0.019
100y390	18.974 ± 0.057	13.304 ± 0.041	5.142 ± 0.017
Promedio global	19.0076±0.053	13.1991±0.071	5.0611±0.088

Tabla 4.4. Dimensiones promedio y desviación estándar de las probetas fabricadas con orientación Z.

Probetas	WO (mm)	W (mm)	T (mm)
20z145	13.332 ± 0.007	9.130 ± 0.011	3.618 ± 0.019
40z145	13.338 ± 0.010	9.126 ± 0.022	3.632 ± 0.013
80z145	13.344 ± 0.023	9.138 ± 0.026	3.640 ± 0.026
100z145	13.364 ± 0.034	9.146 ± 0.023	3.644 ± 0.022
20z245	13.190 ± 0.035	9.100 ± 0.013	3.598 ± 0.026
40z245	13.198 ± 0.032	9.066 ± 0.022	4.217 ± 0.019
80z245	13.276 ± 0.043	9.066 ± 0.033	3.594 ± 0.041
100z245	13.308 ± 0.056	9.120 ± 0.059	3.644 ± 0.040
20z345	13.098 ± 0.012	9.052 ± 0.050	3.636 ± 0.057
40z345	13.102 ± 0.010	9.040 ± 0.021	3.662 ± 0.055
80z345	13.142 ± 0.026	9.032 ± 0.031	3.632 ± 0.049
100z345	13.232 ± 0.041	9.092 ± 0.031	3.712 ± 0.028
20z190	13.328 ± 0.020	9.156 ± 0.027	3.646 ± 0.016
40z190	13.326 ± 0.029	9.120 ± 0.021	3.606 ± 0.008
80z190	13.288 ± 0.012	9.108 ± 0.012	3.600 ± 0.022
100z190	13.374 ± 0.051	9.154 ± 0.033	3.646 ± 0.039
20z290	13.146 ± 0.041	9.066 ± 0.031	3.704 ± 0.065
40z290	13.286 ± 0.079	9.070 ± 0.013	3.622 ± 0.053
80z290	13.176 ± 0.035	9.046 ± 0.022	3.690 ± 0.062
100z290	13.366 ± 0.028	9.160 ± 0.030	3.712 ± 0.067
20z390	13.224 ± 0.108	9.030 ± 0.032	3.826 ± 0.074
40z390	13.164 ± 0.079	9.094 ± 0.028	3.708 ± 0.013
80z390	13.112 ± 0.031	9.004 ± 0.045	3.662 ± 0.012
100z390	13.236 ± 0.026	9.158 ± 0.012	3.712 ± 0.048
Promedio global	13.2479±0.089	9.0948±0.046	3.6564±0.052

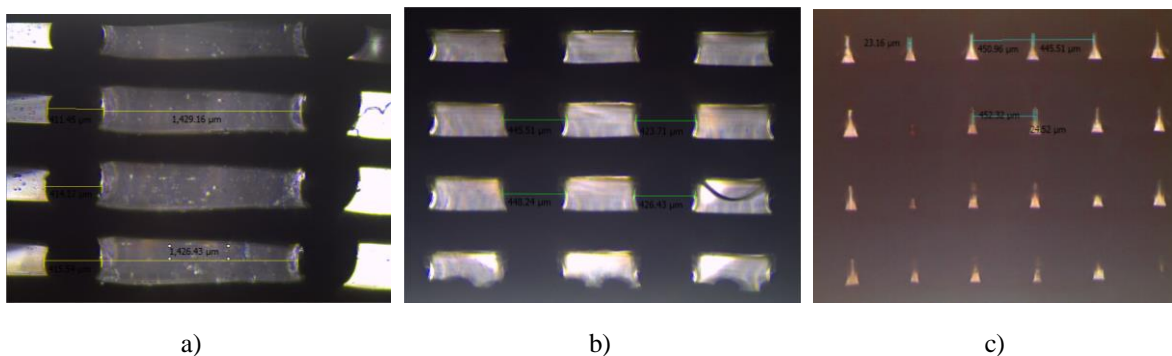


Figura 4.5. Microestructura de las probetas: a) 20% de relleno teórico, b) 40% de relleno teórico y c) 80% de relleno teórico.

De los resultados mostrados en las Tablas 4.3 y 4.4 se puede observar que las dimensiones promedio de las probetas son muy cercanas a las dimensiones nominales, y que los valores de las desviaciones estándar son mínimos. Por lo anterior se puede decir que la precisión del equipo de fabricación es buena. Además, también se puede observar que el porcentaje y patrón de relleno no influyen en la precisión dimensional de las probetas, ya que todos los valores promedio y desviación estándar se encuentran dentro de los mismos rangos.

4.4 Medición de peso

Con el propósito de evaluar el porcentaje de relleno real de las probetas fabricadas, el peso de cada probeta se midió. Posteriormente cada probeta se pesó, utilizando una báscula ExplorerPro, como se muestra en la Figura 4.6. El porcentaje de relleno real se determinó al dividir el valor del peso de la probeta con porcentaje de relleno 20, 40 u 80 %, entre el peso de la probeta sólida (100%) de cada combinación de parámetros. Se considera que el 100% de relleno teórico tiene 100% de densidad real. Esto, como se mencionó anteriormente, se supone, ya que si bien las partes con 100% de relleno aún tienen cierta porosidad, ésta es mínima a comparación de los porcentajes de 20, 40 y 80%. Además se puede demostrar ya que los porcentajes de relleno de 80% en realidad son de alrededor de 93% de relleno real, por lo que el 100% teórico se considera como el 100% real.



Figura 4.6. Medición del peso de probetas.

Los resultados de la medición del peso y cálculo del porcentaje de relleno real se muestran en la Tabla 4.5. De esta tabla se puede observar que los valores reales de relleno no coinciden con el valor nominal seleccionado en el sistema FDM. En general, las probetas con un valor de relleno nominal de 20% tienen un valor real de aproximadamente 56%, las del 40% tienen un valor real de relleno de 70%, y las del 80% tienen un valor real de relleno de 93%. Estas diferencias se deben a los ajustes que el sistema FDM realiza para fabricar las piezas como se mencionó anteriormente. Ya que el sistema no toma en cuenta las capas de perímetro laterales, superiores e inferiores dentro del porcentaje de relleno estipulado por el usuario. Además se puede observar que los porcentajes de relleno varían dependiendo de la

orientación de fabricación, en donde para la orientación en Z, los valores presentan mayor variación dentro del mismo porcentaje de relleno y para el 20% de relleno teórico, el relleno real sobrepasa el 60%. Para el porcentaje de relleno de 80% teórico se obtuvo un porcentaje real de 95% aproximadamente para la misma orientación. En cuanto a las orientaciones X y Y, los valores son mucho más cercanos entre ellos, aunque en Y los valores siempre son mayores a X. El 20% de relleno teórico representa un 55% de relleno real y el 40% es el 73% aproximadamente. Debido a que los valores reales y nominales difieren, se utilizan los valores reales en los análisis posteriores.

Tabla 4.5. Valores promedio de peso y porcentaje de relleno real.

Probetas	Peso (gr)	% Relleno real	Probetas	Peso (gr)	% Relleno real	Probetas	Peso (gr)	% Relleno real
20x145	8.8098	54.15	20y145	11.5205	70.15	20z145	4.9006	85.94
20x245	7.9341	53.76	20y245	11.2314	69.53	20z245	3.9429	71.93
20x345	9.2079	59.96	20y345	9.0345	57.23	20z345	3.7915	69.44
20x190	8.6271	53.73	20y190	11.1772	68.86	20z190	4.9407	86.22
20x290	8.0411	54.67	20y290	10.8215	67.41	20z290	3.7875	66.88
20x390	8.8046	57.77	20y390	11.0774	70.95	20z390	3.7288	66.48
40x145	10.5375	64.77	40y145	12.7824	77.84	40z145	5.2260	91.64
40x245	9.8587	66.80	40y245	12.4500	77.07	40z245	4.3560	79.47
40x345	11.1475	72.59	40y345	11.0757	70.16	40z345	4.1919	76.78
40x190	10.1651	63.31	40y190	12.3434	76.05	40z190	4.9794	86.89
40x290	9.7553	66.32	40y290	11.8125	73.59	40z290	4.1748	73.72
40x390	10.6580	69.93	40y390	11.7729	75.40	40z390	3.5886	63.98
80x145	14.2366	87.50	80y145	15.2542	92.89	80z145	5.5809	97.87
80x245	13.8536	93.87	80y245	14.8548	91.96	80z245	5.1976	94.83
80x345	13.8726	90.34	80y345	14.4528	91.55	80z345	5.0881	93.19
80x190	14.1346	88.04	80y190	15.0822	92.92	80z190	5.4120	94.44
80x290	12.8786	87.56	80y290	15.0256	93.60	80z290	5.3668	94.77
80x390	13.3280	87.45	80y390	14.8613	95.18	80z390	5.3614	95.59
100x145	16.2703	100	100y145	16.4218	100	100z145	5.7024	100
100x245	14.7576	100	100y245	16.1532	100	100z245	5.4812	100
100x345	15.3569	100	100y345	15.7871	100	100z345	5.4597	100
100x190	16.0556	100	100y190	16.2307	100	100z190	5.7304	100
100x290	14.7090	100	100y290	16.0525	100	100z290	5.6633	100
100x390	15.2405	100	100y390	15.6133	100	100z390	5.6086	100

4.5 Ensayo mecánico

Después de medir y pesar las probetas, se procedió a marcar en cada una de éstas una longitud calibrada de 70 mm, para las probetas con orientación X y Y, y una longitud calibrada de 48 mm para las probetas con orientación Z. Posteriormente se sometieron a ensayos a tracción de acuerdo a la norma ASTM D638 y con una velocidad de ensayo de 5 mm/s, como se muestra en la Figura 4.7. El equipo utilizado para las pruebas fue una Máquina Universal marca Shimadzu, modelo AG-100KNI, Figura 4.8.

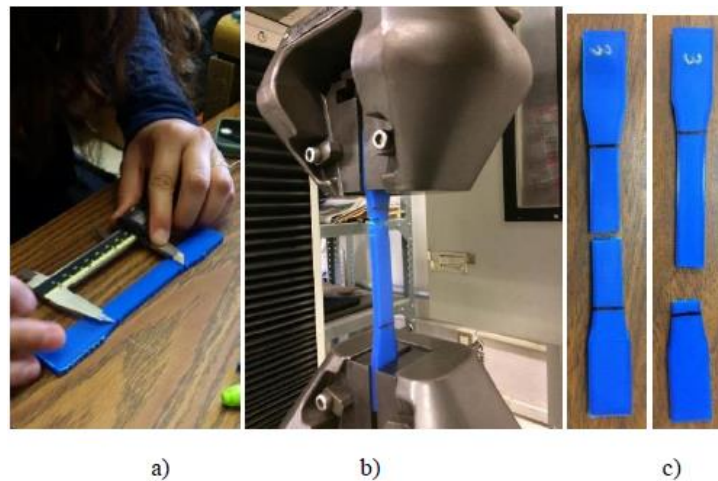
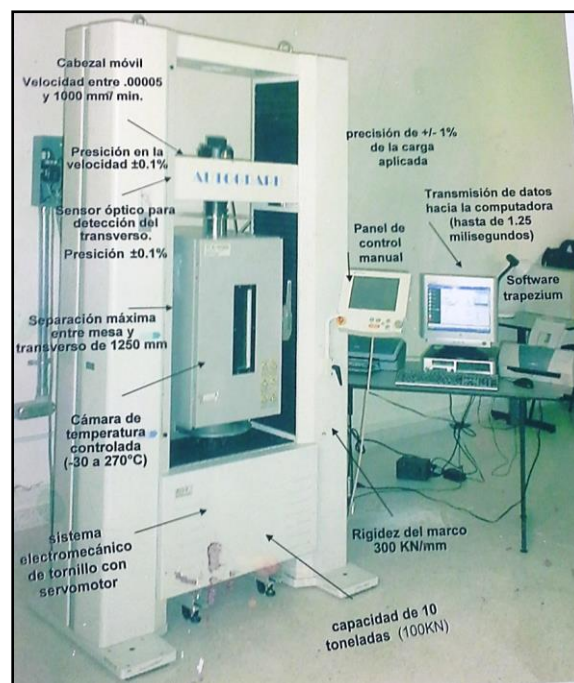


Figura 4.7. Ensayo a tracción de probetas: a) preparación de probetas para ensayo, b) ensayo a tracción y c) probetas después del ensayo.



4.8. Máquina Universal Shimadzu, modelo AG-100KNI.

4.6 Resultados experimentales

Los resultados experimentales fueron analizados en términos de las propiedades mecánicas: módulo elástico (E), resistencia última a la tensión (UTS), y elongación a la ruptura (EB). Estos valores se determinaron a partir de la curva fuerza-elongación obtenida del software utilizado en los ensayos. La Figura 4.9 muestra una curva representativa esfuerzo-deformación para el conjunto de probetas 100X345. El esfuerzo se determinó mediante la ecuación 4-1, en donde se tomó la fuerza de ruptura del ensayo y el área de sección transversal de la probeta. La deformación se determinó mediante la ecuación 4-2, en donde se calculó como el desplazamiento obtenido dividido por la longitud inicial y después multiplicado por 100 para ser un valor en porcentaje. Para el módulo elástico se determinó mediante la ecuación 4-3, en donde se dividió el esfuerzo de ingeniería anteriormente calculado entre la deformación de ingeniería.

$$\sigma = \frac{F_{ensayo}}{A} \quad (4-1)$$

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

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 \quad (4-2)$$

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

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4-3)$$

Donde E es el módulo elástico, σ es el esfuerzo y ϵ es la deformación calculados.

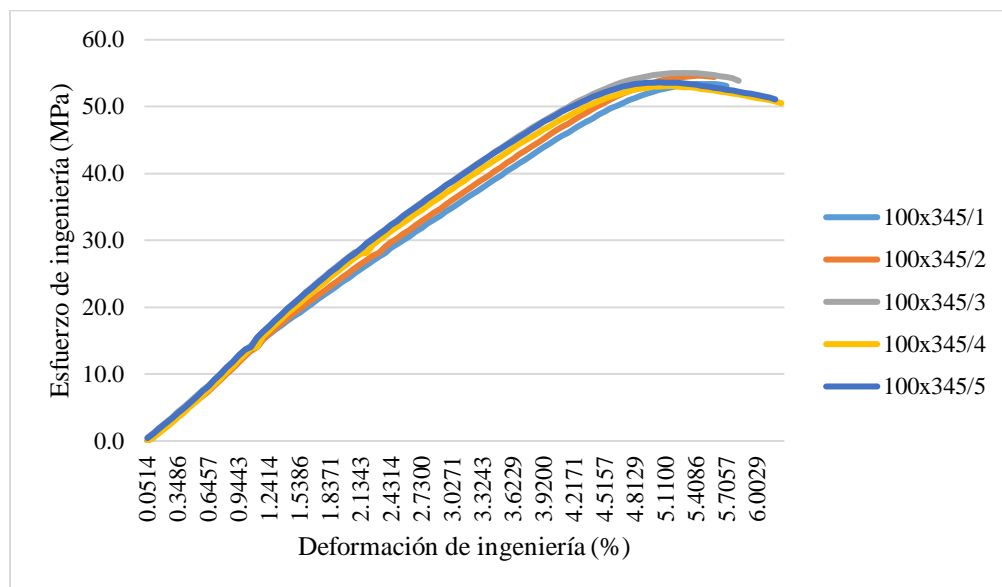


Figura 4.9. Curva esfuerzo-deformación del conjunto de probetas 100X345.

Además, los resultados se normalizaron con respecto a las propiedades de la materia prima o filamento utilizado en la fabricación de las probetas. Esta normalización se realizó con el propósito de poder analizar y comparar los resultados con respecto a otros trabajos de la literatura. Los valores de la materia prima utilizados para la normalización corresponden al promedio de los rollos de filamento PLA utilizados. Estos valores promedio se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores promedio de la materia prima utilizados para normalizar los resultados.

Materia Prima, PLA		
UTS (MPa)	EB (%)	E (MPa)
53.53	9.76	1891.61

4.6.1 Efectos de la orientación de fabricación

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados promedio con sus desviaciones estándar (DS) de las propiedades mecánicas obtenidas, así como sus valores normalizados. Los resultados están agrupados con respecto a la orientación de fabricación X, Y y Z. Los resultados también se encuentran agrupados con respecto al porcentaje de relleno de acuerdo a la Tabla 4.5.

Tabla 4.7. Resultados con respecto a la orientación de fabricación.

% Relleno nominal	% Relleno Real	UTS (MPa)			EB (%)			E (MPa)		
		Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado
Orientación X										
20%	56%	25.4	1.5	0.47	4.9	0.7	0.50	751.9	60.6	0.40
40%	67%	27.1	3.2	0.51	5.2	1.3	0.53	816.8	92.9	0.43
80%	89%	37.4	2.2	0.70	5.3	1.1	0.55	1105.7	66.9	0.58
100%	100%	47.9	3.9	0.89	5.1	0.6	0.52	1418.4	121.2	0.75
Orientación Y										
20%	67%	28.9	3.7	0.54	5.3	0.8	0.55	879.3	113.2	0.46
40%	75%	29.7	2.5	0.55	6.2	1.7	0.63	905.3	93.6	0.48
80%	93%	40.8	2.9	0.76	5.4	1.1	0.55	1248.9	136.6	0.66
100%	100%	49.9	4.1	0.93	6.7	1.4	0.68	1342.1	174.4	0.71
Orientación Z										
20%	76%	13.9	6.9	0.25	2.5	1.1	0.25	687.3	201.8	0.36
40%	76%	14.1	7.9	0.26	2.8	1.1	0.28	753.8	182.6	0.39
80%	95%	21.5	5.9	0.40	3.7	1.1	0.37	923.4	194.6	0.48
100%	100%	22.4	5.1	0.42	3.9	1.8	0.40	939.5	189.1	0.49

De la Tabla 4.7, los valores obtenidos del UTS y el Módulo Elástico (E) para las orientaciones X y Y son muy similares; sin embargo, en la orientación Z los valores son mucho más bajos en comparación con éstos. En cuanto a la elongación (EB), los valores para las orientaciones X y Y son variables independientemente de la orientación y el porcentaje de relleno; mientras que para la orientación Z, los valores de las tres propiedades analizadas se encuentran muy por debajo a comparación de las demás orientaciones de fabricación. Esto se debe a que la unión entre las capas juega un papel importante en dicha orientación. Para poder visualizar de mejor manera los resultados de la Tabla 4.7, éstos se graficaron y se muestran en las Figuras 4.10 a 4.12.

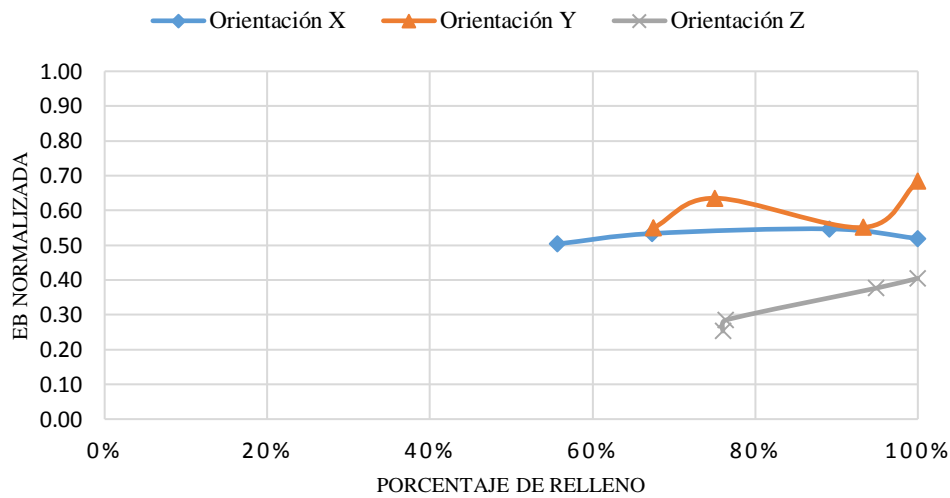


Figura 4.10. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.

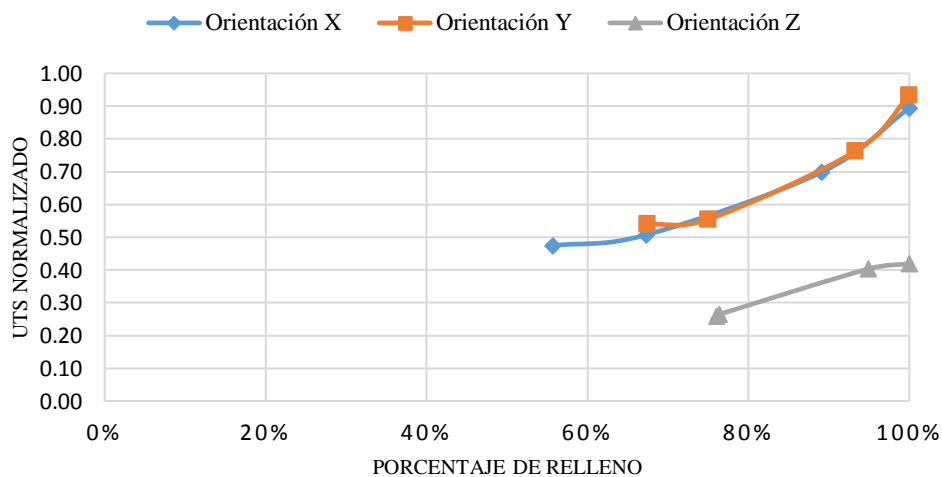
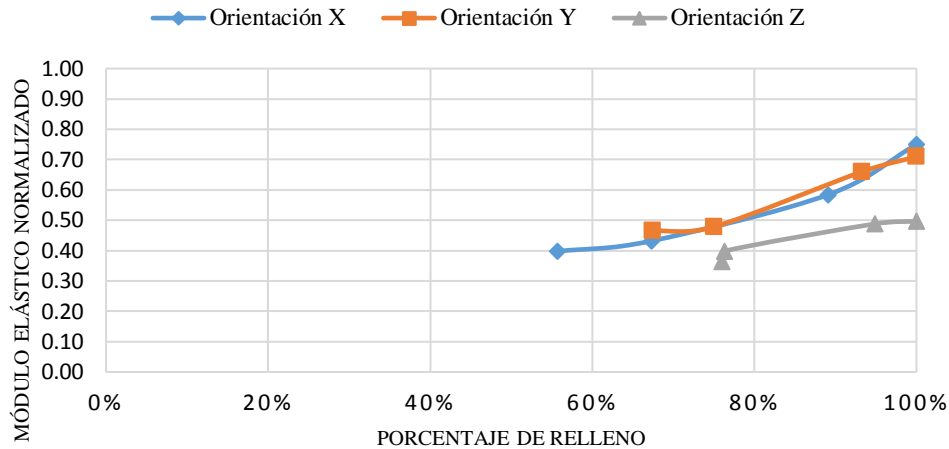


Figura 4.11. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.



4.12. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y orientación de fabricación.

Los resultados anteriores muestran que con respecto a la EB, los valores varían en todos los casos analizados y su comportamiento es muy diferente para estas tres orientaciones de fabricación. Sin embargo, para la orientación en Z, los valores se encuentran muy alejados en comparación con las otras dos orientaciones de fabricación como se mencionó anteriormente. Por otro lado, el comportamiento de la orientación en Y es el que refleja mayor variabilidad, ya que la curva oscila en los 4 porcentajes de relleno analizados, mientras que las curvas de la orientación en X y en Z mantienen una pendiente suave y sin oscilaciones.

Con respecto al UTS y el Modulo Elástico, la tendencia del comportamiento en las orientaciones X y Y es muy similares como se había mencionado anteriormente y en Z en todos los casos, se encuentra por debajo de éstas. Para el UTS se observa que las curvas de las orientaciones en X y Y se traslapan una con otra, lo que significa que su comportamiento mecánico es prácticamente el mismo, con variaciones mínimas en los resultados. Por otro lado, la tendencia de la curva de la orientación en Z tiene una pendiente contraria a las orientaciones restantes, es decir, cóncava hacia abajo y el UTS máximo alcanzado no llega ni a la mitad del UTS de la materia prima, mientras que en X y Y, el valor máximo llega al 90% del obtenido de la materia prima.

Para el caso del Módulo Elástico, el comportamiento reflejado muestra un comportamiento igual al del UTS, ya que de la misma manera, las orientaciones X y Y, llevan la misma tendencia de comportamiento y no se encuentran variaciones significativas entre ellas. Mientras que para la orientación en Z, los valores son mucho menores y la pendiente es inversa a las de las orientaciones restantes. Cabe mencionar que el valor máximo obtenido para la orientación en Z es apenas el 50% del valor obtenido de la materia prima y en las orientaciones X y Y, llega a un 80% aproximadamente del valor obtenido de la materia prima.

Por lo anterior, en cuanto a la EB se puede asumir que no está relacionada al parámetro estudiado ya que varía en todos los casos de manera particular y no depende de la orientación

de fabricación. Sin embargo, se puede decir que la orientación de fabricación afecta significativamente el comportamiento mecánico estructural de las probetas, ya que los valores del UTS y Módulo Elástico presentan grandes variaciones respecto a la orientación de fabricación establecida. Además, las probetas fabricadas en Z se encuentran muy por debajo de los valores de la materia prima, mientras que los resultados de la orientación Y son más cercanos a los valores obtenidos de la materia prima. Esto se relaciona a que en la orientación en Y la carga es paralela al filamento, es decir se encuentra dirigida a lo largo del filamento depositado y en Z la carga es perpendicular al filamento por lo que la adhesión entre capas juega un papel importante en esta dirección.

4.6.2 Efectos del espesor de capa

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados promedio con sus desviaciones estándar (DS) y los valores normalizados del conjunto de probetas agrupadas de acuerdo al espesor de capa seleccionado. Éstos resultados se encuentran divididos en dos grandes grupos: Orientación X-Y y Orientación Z; esto debido a que como se mostró en la sección anterior, los valores para las orientaciones X y Y son muy similares, mientras que para la orientación Z los valores son muy distintos a los anteriores. Para poder apreciar el comportamiento de estos resultados, estos se graficaron como se muestra en las Figuras 4.13 a 4.15.

Tabla 4.8. Resultados promedio considerando el efecto del espesor de capa.

% Relleno nominal	% Relleno Real	UTS (MPa)			EB (%)			E (MPa)		
		Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado
ORIENTACIÓN X-Y										
Esesor 0.14 mm										
20%	63%	27.1	3.0	0.50	5.4	1.1	0.55	822.0	91.9	0.44
40%	70%	27.9	3.1	0.52	5.5	1.5	0.56	871.3	115.4	0.46
80%	91%	39.4	1.9	0.73	5.7	1.0	0.59	1156.2	82.1	0.61
100%	100%	50.7	2.5	0.95	6.2	1.3	0.63	1432.2	175.2	0.75
Esesor 0.18 mm										
20%	61%	27.9	3.8	0.52	5.0	0.7	0.51	781.9	111.4	0.41
40%	72%	28.4	2.7	0.53	6.6	1.8	0.68	808.5	87.7	0.42
80%	92%	39.9	3.7	0.75	4.7	0.6	0.48	1222.5	161.3	0.65
100%	100%	48.8	5.8	0.91	5.4	0.9	0.56	1356.9	93.9	0.72
Esesor 0.30 mm										
20%	61%	26.2	2.6	0.49	5.0	0.7	0.51	828.2	115.4	0.44
40%	72%	28.7	3.6	0.53	4.9	1.1	0.51	890.1	84.1	0.47
80%	91%	37.6	3.1	0.70	5.7	1.2	0.58	1142.8	115.3	0.60
100%	100%	47.1	1.8	0.88	6.0	1.7	0.61	1354.4	174.4	0.71

ORIENTACIÓN Z										
Espesor 0.14 mm										
20%	86%	23.5	2.9	0.44	3.6265	0.5	0.38	919.3	97.7	0.49
40%	88%	21.6	6.3	0.40	3.4925	1.0	0.36	906.5	73.1	0.48
80%	95%	26.2	5.5	0.49	3.7430	0.9	0.38	1073.6	46.1	0.57
100%	100%	28.5	3.8	0.53	3.7158	0.8	0.38	1128.0	79.2	0.60
Espesor 0.18 mm										
20%	69%	8.6	2.0	0.16	1.3	0.2	0.13	689.3	60.7	0.36
40%	76%	9.4	1.1	0.17	1.9	0.5	0.19	698.1	68.4	0.37
80%	95%	17.2	4.8	0.32	3.0	1.0	0.31	813.5	290.9	0.43
100%	100%	18.6	3.4	0.35	4.2	3.0	0.43	844.8	242.1	0.45
Espesor 0.30 mm										
20%	68%	9.9	0.9	0.18	2.9	1.0	0.30	482.6	116.4	0.25
40%	70%	7.9	4.7	0.15	2.7	0.9	0.28	483.2	179.2	0.26
80%	95%	20.4	3.9	0.38	4.1	1.1	0.41	883.1	75.4	0.47
100%	100%	21.4	2.1	0.40	3.8	0.9	0.39	892.8	72.2	0.47

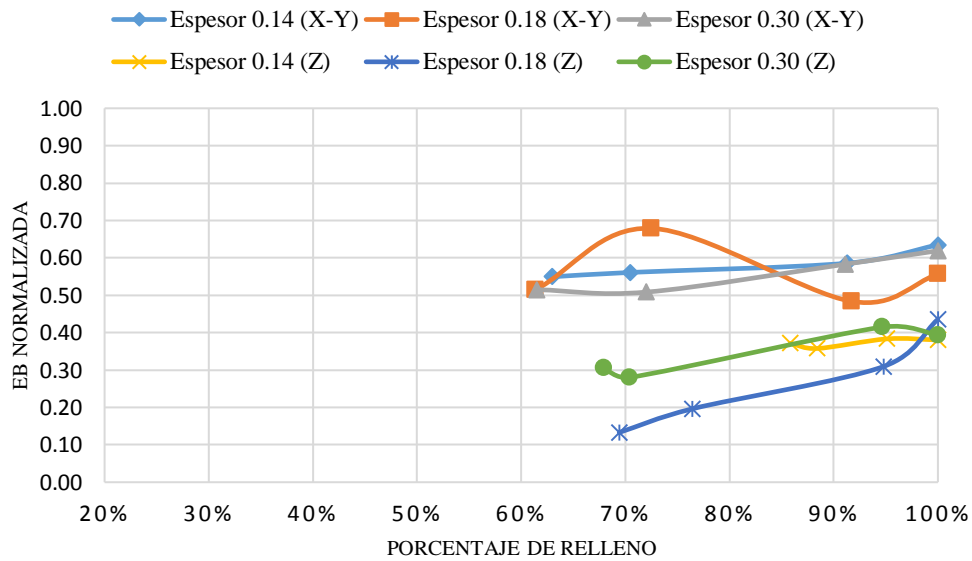


Figura 4.13. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.

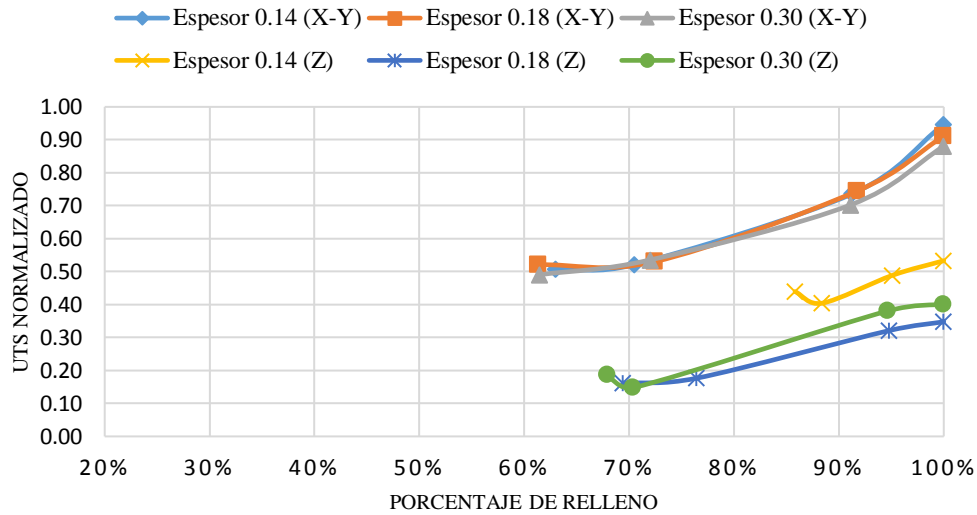
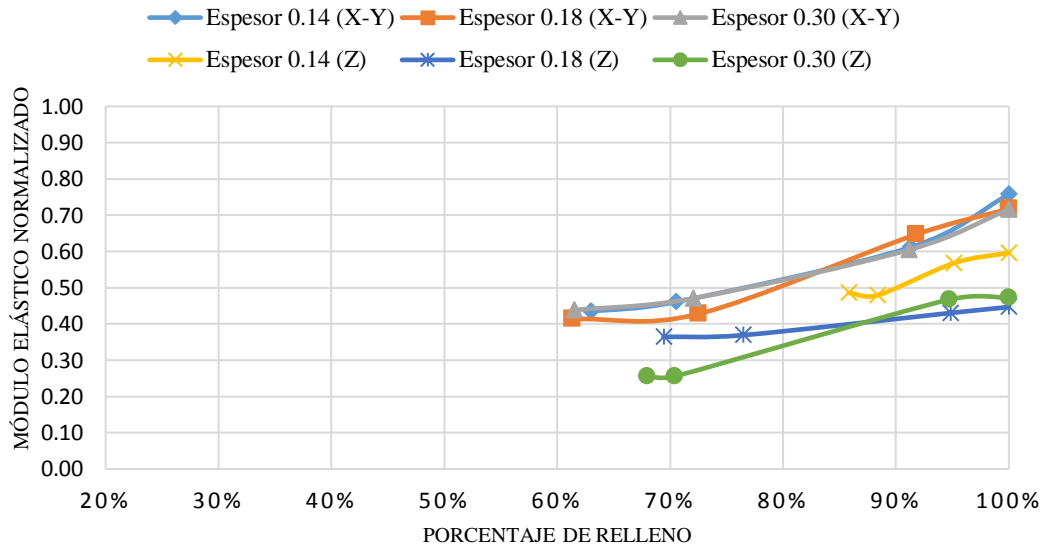


Figura 4.14. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.



4.15. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y espesor de capa.

Como se observa en la Figura 4.13, la elongación es muy variable del mismo modo que en el caso de la orientación de fabricación. Ya que como se muestra el comportamiento para cada espesor y orientación cambia y no tiene dependencia de los parámetros analizados. También se puede observar que para los espesores de 0.14 y 0.30 en orientación X-Y, el comportamiento es similar, ya que las curvas presentan la misma tendencia. Sin embargo para el espesor de capa restante en la orientación X-Y y para los espesores de capa en la orientación Z, el comportamiento no presenta similitud ni tendencias parecidas entre ellas.

Por otro lado, como se muestra en la Figura 4.14, en la Orientación X-Y las curvas del UTS de los tres espesores de capa tienen el mismo comportamiento, es decir, las curvas se traslapan entre ellas y presentan la misma tendencia. Se puede observar que los valores del UTS de los espesores en la orientación X-Y son muy similares y prácticamente no presentan variaciones. Para el caso de los espesores de capa en la orientación Z, el espesor de 0.14 mm presenta valores más altos en el UTS y los espesores de 0.18 mm y 0.30 mm presentan valores similares y una diferencia muy pequeña entre ellos.

Del mismo modo en que se comporta el esfuerzo, el Módulo Elástico tiene la misma tendencia como se observa en la Figura 4.15, en donde las curvas de los tres espesores de capa en la orientación X-Y tienen una variación mínima entre ellos, mientras que en la orientación Z el espesor de 0.14 mm tiene un mayor módulo aunque los espesores de 0.18 mm y 0.30 mm presentan valores con diferencias pequeñas entre ellos. Además se puede observar que si bien el comportamiento es similar con respecto al UTS, los valores máximos alcanzados del Módulo Elástico son menores ya que alcanzan un máximo del 80% con respecto a la materia prima, mientras que para el UTS, los valores llegan hasta un 93% aproximadamente del valor de UTS de la materia prima.

Por lo anterior, se puede concluir que la EB es independiente de los parámetros de espesor de capa y orientación de fabricación ya que depende más de las condiciones del material. Es decir de la antigüedad del plástico, condiciones de humedad y temperatura con las que esté en contacto, etc. También se puede asumir que el parámetro de espesor de capa no tiene influencia en las propiedades mecánicas estructurales (UTS, E) de las piezas finales. Sin embargo, en la Orientación Z, además de que los resultados son bajos, las probetas con el espesor más pequeño presentan una mayor resistencia que los otros dos espesores aunque la tendencia de las curvas es similar. No obstante estos comportamientos anormales se pueden relacionar con la adhesión entre capas.

Como se muestra el parámetro de espesor de capa no tiene una influencia significativa en lo referente al comportamiento mecánico por lo que éste se descarta para realizar el modelo analítico.

4.6.3 Efectos del patrón de relleno

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados promedio con sus desviaciones estándar (DS) y valores normalizados del conjunto de probetas fabricadas agrupadas de acuerdo al patrón de relleno seleccionado, $0^\circ/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$. De igual manera que lo hecho anteriormente, los resultados se han agrupado en dos grandes grupos: orientación X y Y, y orientación Z, esto debido a la gran diferencia que representa la orientación Z con respecto a las otras orientaciones. Los resultados también se han graficado, tal como se muestra en las Figuras 4.16 a 4.18.

Tabla 4.9. Resultados promedio del efecto del patrón de relleno.

% Relleno nominal	% Relleno Real	UTS (MPa)			EB (%)			E (MPa)		
		Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado	Promedio	DS	Normalizado
ORIENTACIÓN X-Y										
Patrón de Relleno 0°/90°										
20%	63%	27.9	2.5	0.52	4.8	0.9	0.49	839.1	105.4	0.44
40%	71%	28.5	2.1	0.53	4.4	0.9	0.45	919.4	71.8	0.49
80%	91%	39.7	3.5	0.74	4.7	0.6	0.48	1228.4	113.8	0.65
100%	100%	47.4	1.9	0.88	5.4	0.7	0.55	1448.3	121.7	0.76
Patrón de Relleno ±45°										
20%	61%	26.3	3.	0.49	5.4	0.7	0.55	787.3	107.3	0.41
40%	73%	28.14	3.9	0.53	6.8	1.2	0.70	800.5	94.5	0.42
80%	91%	38.5	2.5	0.72	6.0	0.9	0.62	1125.4	121.8	0.60
100%	100%	50.3	5.1	0.94	6.3	1.6	0.65	1312.2	154.8	0.70
ORIENTACIÓN Z										
Patrón de Relleno 0°/90°										
20%	73%	13.1	5.1	0.24	3.1	1.1	0.31	636.4	208.4	0.33
40%	75%	10.7	5.1	0.20	2.5	0.6	0.25	702.4	221.1	0.37
80%	95%	23.9	6.0	0.45	4.1	1.0	0.42	889.5	240.9	0.47
100%	100%	22.4	2.4	0.42	4.4	2.3	0.45	889.6	226.1	0.47
Patrón de Relleno ±45°										
20%	80%	14.6	8.2	0.27	2.2	1.1	0.23	738.2	181.3	0.39
40%	82%	17.0	8.7	0.32	3.1	1.3	0.31	796.6	127.8	0.42
80%	95%	18.9	4.7	0.35	3.2	1.0	0.33	965.8	97.2	0.51
100%	100%	22.4	6.7	0.42	3.5	1.2	0.36	981.1	138.4	0.52

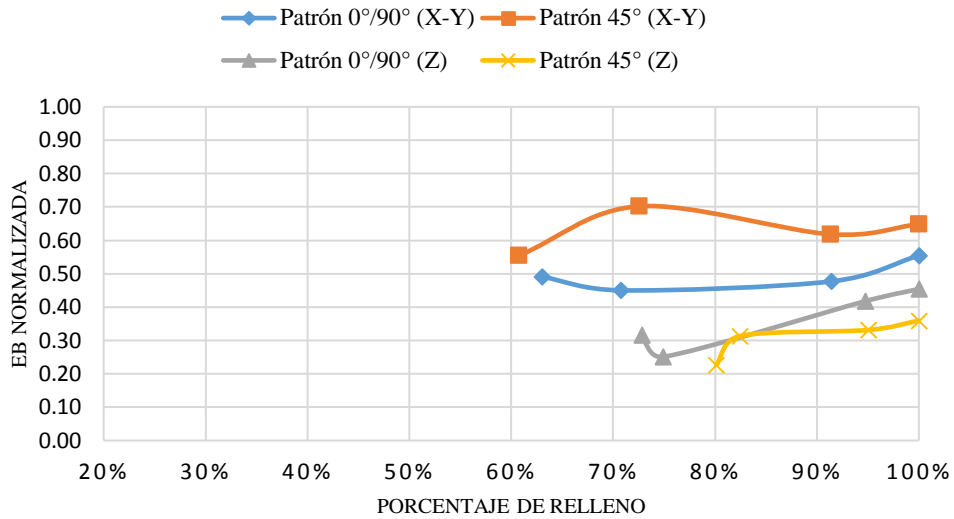


Figura 4.16. EB normalizada vs. porcentaje y patrón de relleno.

Como se muestra en la Figura 4.16, el comportamiento de la elongación sigue siendo variable al igual que los resultados previos. Sin embargo, se puede observar que la elongación tiene dependencia a la dirección de relleno de la pieza, ya que para los diferentes casos mostrados en la Figura 4.16 las curvas encontradas se encuentran muy por debajo de la materia prima en aproximadamente 70% máximo. Además, aunque las curvas no muestran tendencias similares en la orientación X-Y se muestra que las probetas con el patrón de $\pm 45^\circ$ presentaron mayor elongación a diferencia de las de $0^\circ/90^\circ$. Esto debido a que al momento de aplicar la carga, las filamentos cruzados en 45° primero sufren de un desplazamiento el cual no genera una elongación y un momento después se empiezan a estirar los filamentos. En el caso del arreglo $0^\circ/90^\circ$ los filamentos sufren una elongación desde el primer instante en el que se aplica la carga. Cabe mencionar que las probetas en orientación Z presentan un comportamiento distinto debido al papel de la adhesión entre capas.

Como se puede observar en la Figura 4.17, las curvas encontradas de los dos diferentes patrones de relleno en la orientación X-Y presentan un comportamiento y tendencia similar con valores muy cercanos de UTS entre sí. De igual manera se observa que los valores máximos alcanzados con los dos diferentes patrones en la orientación X-Y se encuentran muy cercanos al valor de UTS de la materia prima. Por otro lado, las curvas de la orientación Z no presentan comportamientos similares, esto debido a la influencia que se presenta entre el entrelazamiento de las capas y la carga perpendicular a éstas. También se puede apreciar que los valores en el UTS máximo en la orientación Z están en aproximadamente el 40% valor de la materia prima en las probetas con el 100% de relleno, lo cual es un decremento significativo en el desempeño mecánico de la pieza final.

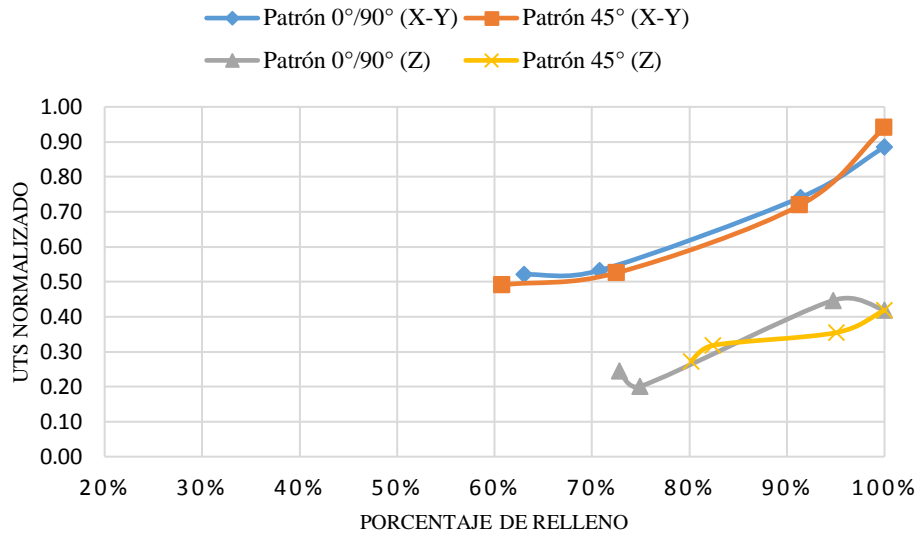


Figura 4.17. UTS normalizado vs. porcentaje y patrón de relleno.

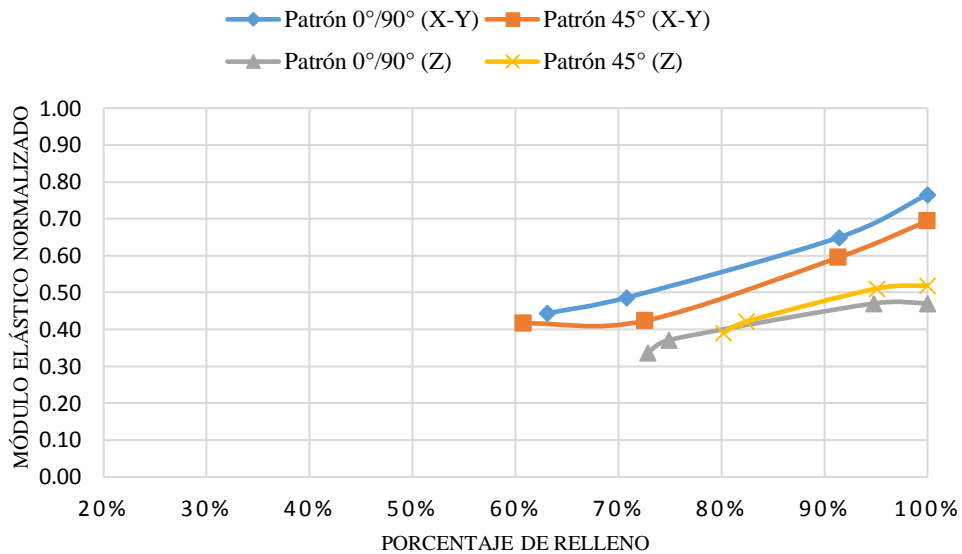


Figura 4.18. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje y patrón de relleno.

En cuanto al módulo elástico equivalente, en la Figura 4.18 se puede observar que si bien las curvas en la orientación X-Y de los dos patrones de relleno presentan mayores diferencias en los valores obtenidos; estas curvas muestran un comportamiento similar. El patrón que presentan mayor módulo elástico es el de 0°/90° debido a que los filamentos en dicha dirección le brindan mayor rigidez a la pieza ya que la carga es longitudinal a éstos. La diferencia en cada uno de los puntos analizados entre estas curvas es de 0.0273, 0.0628,

0.0544, 0.0720 respectivamente. Con respecto a la orientación en Z, a diferencia de los casos anteriores, las curvas obtenidas muestran un comportamiento similar y valores muy cercanos independientemente del patrón de relleno utilizado. Aunque, igual que en los casos anteriores los valores obtenidos son menores a comparación de la orientación X-Y, ya que el valor máximo obtenido del módulo en la orientación Z es de aproximadamente 50% del valor de la materia prima.

Por lo anterior se puede concluir que la elongación, presenta una ligera dependencia de los parámetros de fabricación, aunque el comportamiento se le atribuye mayormente a las propiedades del material. Además, se puede asumir que el patrón de relleno de las piezas no presenta una influencia o efecto significativo en el comportamiento mecánico estructural de las piezas finales. Ya que se ha demostrado que sin importar el patrón de relleno elegido, los valores encontrados en el UTS y Módulo Elástico son prácticamente los mismos y que la tendencia de comportamiento final es igual para cada una de las direcciones de fabricación.

4.6.4 Efectos del porcentaje de relleno

En las Figuras 4.19 a 4.21 se muestran todos los resultados obtenidos para cada propiedad mecánica estructural estudiada en función del porcentaje de relleno.

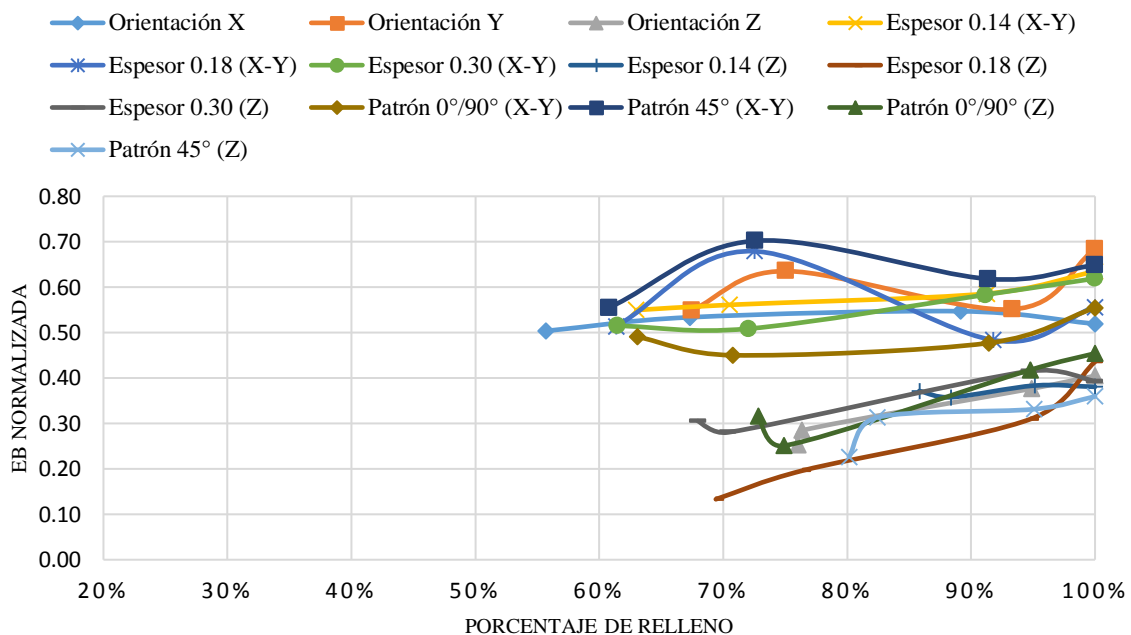


Figura 4.19. EB normalizada vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.

De la Figura 4.19 se puede observar que la elongación se comporta de manera variable y no muestra una dependencia con el porcentaje de relleno ni con los otros parámetros de fabricación. Sin embargo, en las curvas correspondientes a la orientación de fabricación Z,

se puede observar un comportamiento proporcional a la elongación, a mayor porcentaje de relleno la elongación de las probetas parece aumentar en todos los casos. Este comportamiento puede atribuirse a que mientras mayor sea el porcentaje de relleno, la adhesión entre las capas será más fuerte por lo que el material lograra un mayor alargamiento en comparación con menores porcentajes de relleno.

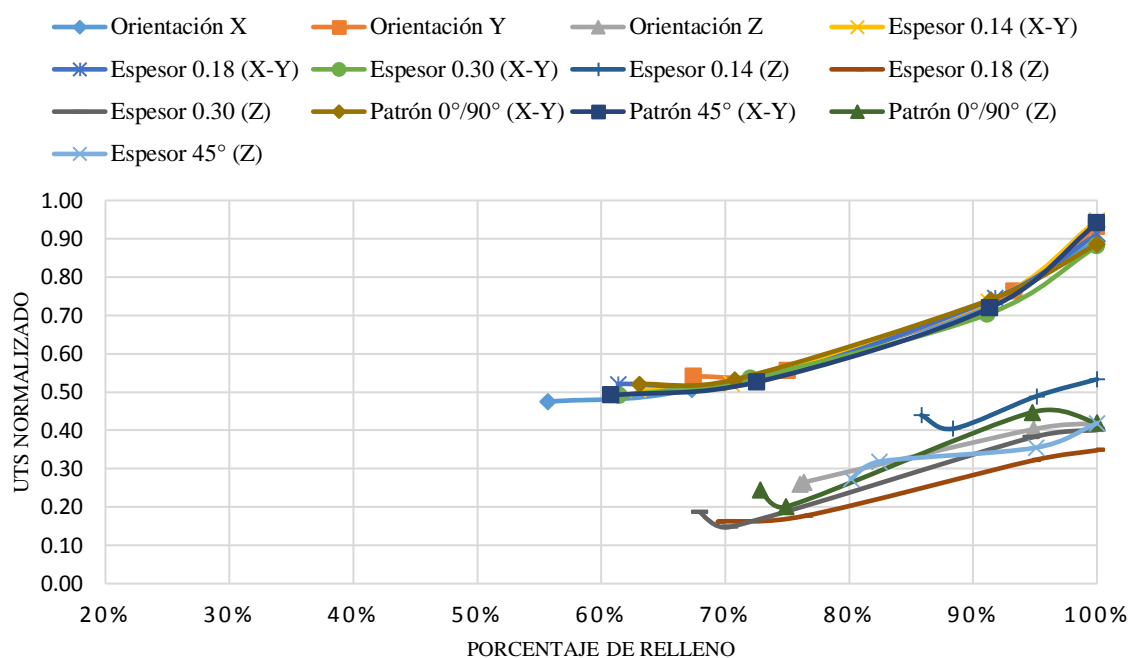


Figura 4.20. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.

La Figura 4.20 muestra que las probetas fabricadas con orientaciones X y Y tienen un valor UTS proporcional al porcentaje de relleno, independientemente de los valores de espesor de capa y patrón de relleno. En el caso de las probetas con 100% de relleno el valor UTS es menor que la materia prima en aproximadamente 5% a 10%. Esta reducción en el valor UTS se puede atribuir al proceso de deposición de la materia prima, ya que, como se ha mencionado anteriormente, aunque se tenga un porcentaje de relleno nominal del 100%, se puede encontrar con una porosidad mínima dentro de la pieza lo que hace que sus propiedades mecánicas disminuyan. En cuanto a la orientación de fabricación Z, se puede observar que el valor UTS también depende del porcentaje de relleno, sin embargo existe una mayor variación en el comportamiento final debido a la adhesión entre las capas y los valores de sus resultados son mucho menores. Esto debido a que la unión entre las capas no es completamente homogénea ya que depende de diversos factores como la temperatura y enfriamiento del material durante el proceso de fabricación. Además de que la superficie de la capa que se adhiere es mínima en comparación con el espesor de capa por lo que al momento de aplicar una carga en dirección perpendicular a los filamentos depositados, la pieza tenderá a fallar en las uniones de capa. Es por esto que mientras mayor sea el porcentaje

de relleno de las piezas en la orientación Z, la resistencia será mayor a comparación con porcentajes de relleno menores, aunque será mucho menor a la resistencia de la materia prima.

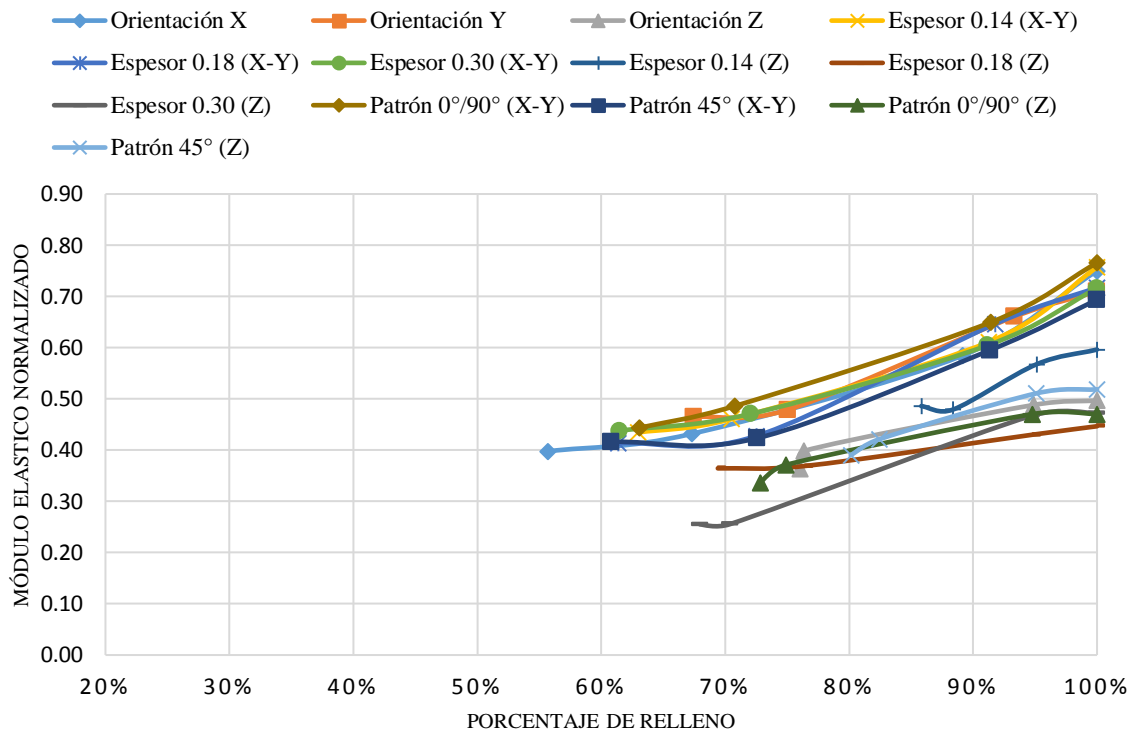


Figura 4.21. Módulo Elástico normalizado vs. porcentaje de relleno y parámetros de fabricación.

Finalmente en la Figura 4.21 se muestran los resultados del Módulo Elástico en función del porcentaje de relleno y los parámetros de fabricación. De estos resultados se puede observar que para las orientaciones de fabricación X y Y, el módulo elástico varía de manera proporcional con el porcentaje de relleno, independientemente de los otros parámetros de fabricación. Sin embargo, existe una mayor variación de los resultados de las probetas al 100% con respecto a los valores de la materia prima; obteniéndose valores por debajo del 80% del valor nominal. Por otro lado, con respecto a la orientación de fabricación Z, existe una mayor dispersión de las curvas, y de igual manera los valores resultantes son menores, aproximadamente el 50% con respecto a la materia prima en las probetas con 100% de relleno. Por lo anterior se puede decir que la propiedad mecánica más afectada por el porcentaje de relleno es el Módulo Elástico. Esta dependencia se puede atribuir a que las propiedades como la resistencia y elongación de los materiales pueden verse afectadas debido a causas como la temperatura y el proceso de manufactura empleado, por lo que la relación entre estas dos propiedades al momento de calcular el Módulo Elástico resulta en un

porcentaje bajo comparado con el UTS. Además, el Módulo Elástico en materiales anisotrópicos, se ve afectado por la dirección de la carga, que es otro factor que puede llegar a influir en el resultado obtenido.

4.7 Análisis y discusión general

De análisis de los resultados experimentales en función de los parámetros seleccionados del proceso FDM, se puede decir que los parámetros con una influencia poco significativa en el comportamiento estructural de las probetas o piezas FDM son el espesor de capa y el patrón de relleno. Por otro lado, los parámetros con mayor influencia en las propiedades mecánicas son el porcentaje de relleno y la orientación de fabricación dentro de la cámara de impresión. En cuanto al porcentaje de relleno, entre mayor sea éste, mayor será la resistencia a la tracción y el módulo elástico de las probetas o piezas. Respecto a la orientación de impresión, no se observó diferencia significativa entre los valores de las propiedades mecánicas obtenidas con las orientaciones de fabricación X y Y. Sin embargo, los valores de dichas propiedades resultaron ser mucho menores para la orientación de fabricación Z. Esta reducción en los valores de las propiedades para la orientación Z se puede deber a que cuando la carga se encuentra en dirección perpendicular a la dirección de los filamentos depositados, el efecto de adhesión entre capas juega un papel importante dentro del comportamiento mecánico final de las piezas. Ya que el modo de falla siempre será en la unión de la capa, es decir al despegarse una de otra y no al romperse el filamento de alguna capa.

En el caso de la elongación los resultados demostraron que esta propiedad mecánica es independiente de los parámetros de fabricación, ya que el comportamiento con respecto a la elongación de cada parte fabricada fue muy distinto entre sí. Se puede asumir entonces, que la propiedad de elongación depende de las condiciones del material y no del proceso de fabricación de la pieza. Por lo que para análisis posteriores, esta propiedad mecánica no se tomará en cuenta.

5. Análisis teórico y numérico del comportamiento estructural

5.1 Modelos teóricos-empíricos

Como se mencionó en el capítulo 1, existen diferentes modelos teórico-empíricos propuestos en la literatura para la caracterización y predicción del comportamiento estructural de materiales porosos. Estos modelos se analizan a continuación para evaluar su desempeño en la predicción del comportamiento estructural de probetas o piezas FDM. Para ello solo se consideraron los dos parámetros FDM que presentaron una influencia significativa en las propiedades estructurales, i.e. el porcentaje de relleno y la orientación de fabricación de las piezas.

Los valores experimentales considerados para la implementación y evaluación de los distintos modelos de predicción, se muestran en la Tabla 5.1. Estos valores se determinaron mediante la aplicación de ensayos a tracción de probetas con diferentes valores de porcentaje de relleno, espesor de capa, orientación de impresión y patrón o dirección de relleno y tres capas de perímetro. Además en la Tabla 5.2 se muestran los valores de la materia prima considerados.

Tabla 5.1. Valores experimentales considerados.

RESULTADOS EXPERIMENTALES			
% relleno nominal	% relleno real	UTS (MPa)	E (MPa)
ORIENTACIÓN EN X			
20%	56%	25.3934	751.9399
40%	67%	27.1408	816.7969
80%	89%	37.4053	1105.7347
100%	100%	47.8717	1418.3910
ORIENTACIÓN EN Y			
20%	67%	28.9029	879.3333
40%	75%	29.6801	905.3490
80%	93%	40.8183	1248.9448
100%	100%	49.8759	1342.1266
ORIENTACIÓN EN Z			
20%	76.03%	13.8621	687.3226
40%	76.35%	14.1468	753.7898
80%	95%	21.5704	923.4519
100%	100%	22.4195	939.5167

Tabla 5.2. Valores de materia prima.

MATERIA PRIMA	
UTS (MPa)	E (MPa)
53.53	1891.61

5.1.1 Ley de Mezclas

Los valores tomados para este modelo, el cual se rige por la ecuación (5-1)

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (5-1)$$

donde E_p es igual a cero, debido a que el material entre los poros es aire; E_c es el módulo elástico de la pieza final, V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas y E_m es el módulo de la materia prima.

Para el caso del UTS, el modelo se rige por la ecuación (5-2)

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_p V_p \quad (5-2)$$

donde σ_p es igual a cero, debido a que el material entre los poros es aire; σ_c es el UTS de la pieza final, V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas y σ_m es el UTS de la materia prima.

En la Tabla 5.3 se muestran los valores resultantes de la aplicación de este modelo para diferentes valores de porcentaje de relleno cada una de las orientaciones y diferentes porcentajes de relleno. Debido a que este modelo es lineal e independiente de la orientación, los valores del UTS y módulo elástico resultantes son iguales para cada una de las orientaciones, como se observa en la Tabla 5.3. En la Figura 5.1 se muestra una comparativa de los resultados del modelo de la Ley de Mezclas con los resultados experimentales del UTS para la orientación en X, Y y Z. De igual manera en la Figura 5.2 se comparan los resultados predichos por el modelo con los resultados experimentales para el módulo elástico y las orientaciones X, Y y Z.

Tabla 5.3. Resultados del modelo de Ley de Mezclas.

ESTIMACIONES						
% de relleno	E (MPa)			UTS (MPa)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	94.581	94.581	94.581	2.677	2.677	2.677
0.10	189.161	189.161	189.161	5.353	5.353	5.353
0.15	283.742	283.742	283.742	8.030	8.030	8.030
0.20	378.322	378.322	378.322	10.706	10.706	10.706
0.25	472.903	472.903	472.903	13.383	13.383	13.383
0.30	567.483	567.483	567.483	16.059	16.059	16.059
0.35	662.064	662.064	662.064	18.736	18.736	18.736
0.40	756.644	756.644	756.644	21.412	21.412	21.412
0.45	851.225	851.225	851.225	24.089	24.089	24.089
0.50	945.805	945.805	945.805	26.765	26.765	26.765
0.55	1040.386	1040.386	1040.386	29.442	29.442	29.442
0.60	1134.966	1134.966	1134.966	32.118	32.118	32.118
0.65	1229.547	1229.547	1229.547	34.795	34.795	34.795
0.70	1324.127	1324.127	1324.127	37.471	37.471	37.471
0.75	1418.708	1418.708	1418.708	40.148	40.148	40.148
0.80	1513.288	1513.288	1513.288	42.824	42.824	42.824
0.85	1607.869	1607.869	1607.869	45.501	45.501	45.501
0.90	1702.449	1702.449	1702.449	48.177	48.177	48.177
0.95	1797.030	1797.030	1797.030	50.854	50.854	50.854
1.00	1891.610	1891.610	1891.610	53.530	53.530	53.530

En la Figura 5.1 se puede observar que el modelo de la Ley de Mezclas presenta un comportamiento lineal, mientras que los resultados tienen un comportamiento exponencial. En relación a los valores del UTS predichos por el modelo para los valores experimentales, los errores de predicción son 18.05%, 32.14%, 27.37% y 11.82% respectivamente para la orientación en X. Del mismo modo para la orientación en Y se observan errores similares en los resultados predichos por el modelo de Ley de Mezclas, 24.09%, 35.27%, 21.96% y 7.33%. Para el caso de la orientación en Z, los resultados predichos por el modelo de Ley de Mezclas se encuentran mucho más alejados que en los casos de la orientación X y Y, con errores de 193.59%, 188.91%, 135.76% y 138.77% para cada uno de los porcentajes experimentales. Esto indica que en esta orientación la adhesión entre las capas y la dirección de la carga aplicada juega un papel muy importante en la resistencia de las piezas finales, fenómeno que el modelo de mezclas no considera.

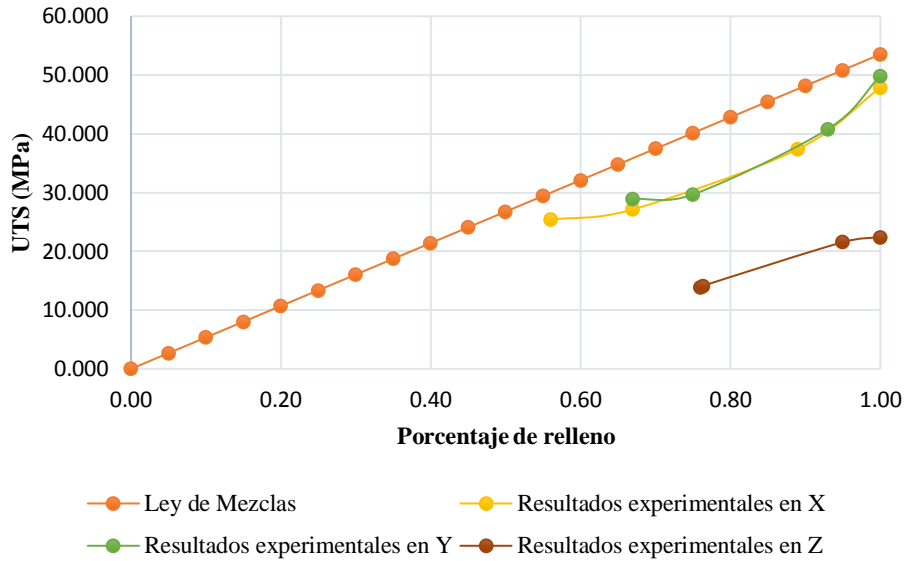


Figura 5.1. Comparativa de resultados del modelo en UTS respecto a todas las orientaciones.

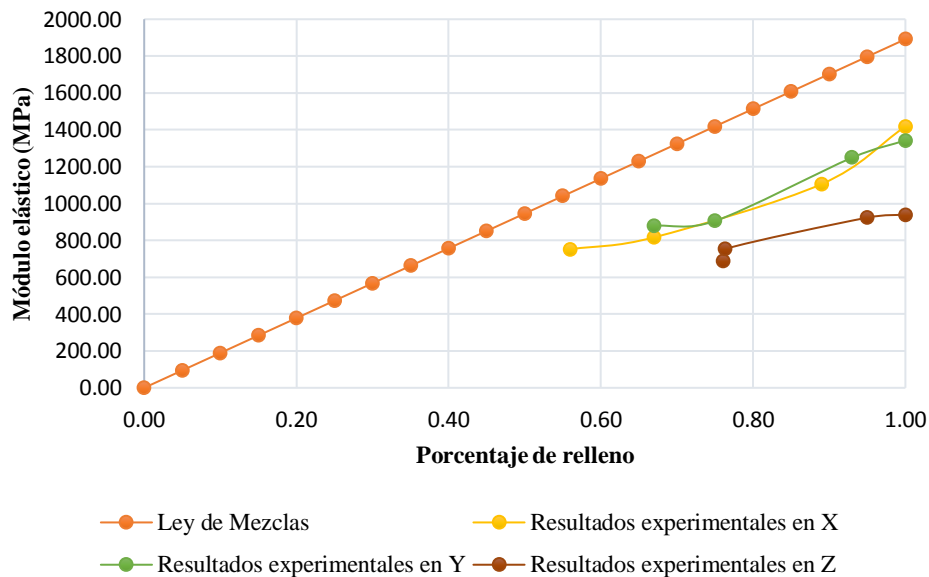


Figura 5.2. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico respecto a todas las orientaciones.

Para el caso del módulo elástico, se puede observar en la Figura 5.2 que los valores predichos por el modelo difieren con los valores experimentales, con errores mayores a los observados para el caso del UTS. Los porcentajes de dichas discrepancias para cada punto de porcentaje experimental en la orientación X son de 40.88%, 55.16%, 52.25% y 33.36% respectivamente. Respecto a los resultados en la orientación Y, los errores con respecto a los valores

experimentales son 44.13%, 56.70%, 40.85% y 40.94%. En el caso de la orientación en Z, los valores experimentales del módulo elástico son mucho menores que en las otras orientaciones, lo cual resulta en errores de predicción más grandes por parte del modelo de Ley de Mezclas, 109.24%, 91.60%, 94.60% y 101.34%, respectivamente.

En general se puede decir que el modelo de la Ley de Mezclas no es adecuado a este caso de estudio, ya que presenta grandes errores de estimación para cada uno de los puntos analizados, además de que, como se puede observar en las Figuras 5.1 y 5.2 los resultados experimentales muestran una tendencia exponencial y el modelo de Ley de Mezclas es lineal por lo que no describe de manera correcta el comportamiento final de las piezas.

5.1.2 Modelo de Ley de Mezclas con eficiencia

Para este modelo, el cual se rige por la ecuación (5-3)

$$E_c = \alpha V_m E_m + \beta V_p E_p \quad (5-3)$$

donde, E_p es igual a cero como en el caso anterior; E_c es el módulo elástico de la pieza final, V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas, E_m es el módulo de la materia prima y α , β , son coeficientes de eficiencia.

Para el caso del UTS, el modelo se rige por la ecuación (5-4)

$$\sigma_c = \alpha V_m \sigma_m + \beta V_p \sigma_p \quad (5-4)$$

donde, σ_p es igual a cero como en el caso anterior; σ_c es el UTS de la pieza final, V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas, σ_m es el UTS de la materia prima y α , β son coeficientes de eficiencia.

Para este modelo, en el caso del módulo elástico, el cálculo del coeficiente de eficiencia α se realizó al despejar dicho coeficiente de la ecuación (5-3), ya que β es igual a cero por el Módulo del poro (aire) por lo que se puede describir en la ecuación (5-5)

$$\alpha = \frac{E_c}{E_m V_m} \quad (5-5)$$

donde E_c es el valor del módulo elástico experimental, E_m es el módulo elástico de la materia prima y V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas.

En cuanto al UTS, el coeficiente de eficiencia α se calculó mediante la ecuación (5-6)

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_m V_m} \quad (5-6)$$

donde σ_c es el valor del UTS experimental, σ_m es el UTS de la materia prima y V_m es el porcentaje de relleno real de las probetas.

Dicho coeficiente, tanto para el módulo elástico como para el UTS, se calculó para cada uno de los puntos experimentales y para cada una de las orientaciones de fabricación. Una vez

obtenidos, se calculó un promedio general para cada propiedad mecánica analizada y para cada una de las orientaciones. En la Tabla 5.4 se muestran dichos valores promedio. De estos resultados se observa que para las orientaciones X y Y los valores de los coeficientes de eficiencia son los mismos.

Tabla 5.4. Valores promedio del coeficiente de eficiencia.

Promedios α	X	Y	Z
Módulo elástico	0.69	0.69	0.50
UTS	0.82	0.82	0.38

En la Tabla 5.5 se muestran los valores resultantes de la aplicación de este modelo para cada una de las orientaciones y porcentajes de relleno de 0 al 100%. En la Figuras 5.3 se muestra una comparativa de los resultados del modelo y los resultados experimentales del UTS equivalente para las orientaciones X, Y y Z. De igual manera, en la Figura 5.4 se muestran dichos resultados pero para el módulo elástico equivalente en las orientaciones X, Y y Z respectivamente.

Tabla 5.5. Resultados del modelo de Ley de Mezclas con eficiencia.

ESTIMACIONES						
% de relleno	E (MPa)			UTS (MPa)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	65.283	65.058	47.536	2.197	2.206	1.024
0.10	130.566	130.116	95.072	4.394	4.412	2.047
0.15	195.849	195.174	142.607	6.591	6.618	3.071
0.20	261.132	260.232	190.143	8.788	8.824	4.094
0.25	326.415	325.290	237.679	10.985	11.030	5.118
0.30	391.698	390.349	285.215	13.182	13.236	6.141
0.35	456.981	455.407	332.751	15.378	15.442	7.165
0.40	522.264	520.465	380.287	17.575	17.648	8.189
0.45	587.547	585.523	427.822	19.772	19.854	9.212
0.50	652.830	650.581	475.358	21.969	22.060	10.236
0.55	718.113	715.639	522.894	24.166	24.266	11.259
0.60	783.396	780.697	570.430	26.363	26.472	12.283
0.65	848.679	845.755	617.966	28.560	28.678	13.307
0.70	913.962	910.813	665.502	30.757	30.884	14.330
0.75	979.245	975.871	713.037	32.954	33.090	15.354
0.80	1044.528	1040.930	760.573	35.151	35.296	16.377
0.85	1109.811	1105.988	808.109	37.348	37.502	17.401
0.90	1175.094	1171.046	855.645	39.545	39.708	18.424
0.95	1240.377	1236.104	903.181	41.742	41.914	19.448
1.00	1305.660	1301.162	950.717	43.939	44.120	20.472

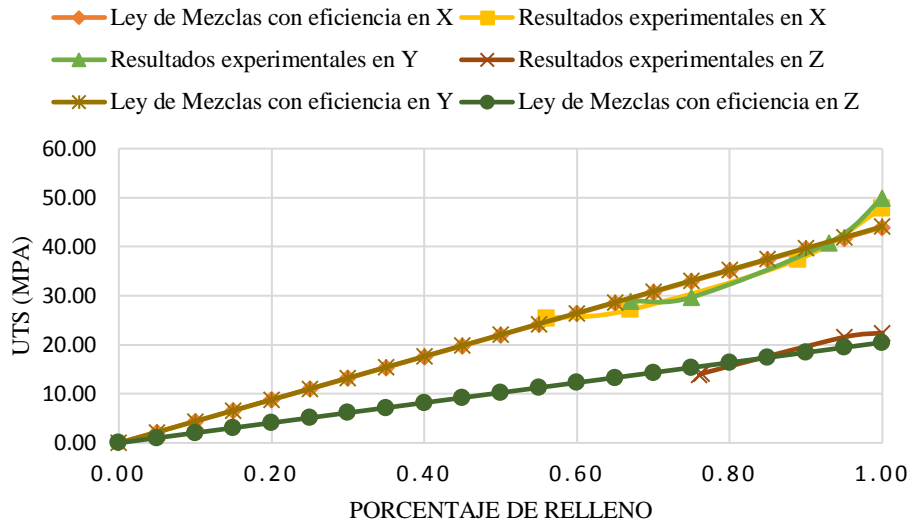


Figura 5.3. Comparativa de resultados del modelo en UTS en las orientaciones X, Y y Z.

Como se muestra en la Figura 5.3 los resultados del modelo se acercan con mucha más precisión que con el modelo anterior. De igual manera el comportamiento del modelo es lineal, sin embargo los errores para los porcentajes experimentales disminuyeron significativamente para cada uno de los puntos. Para la orientación en X estos errores fueron de 3.10%, 8.47%, 4.54% y 8.22% respectivamente. En cuanto a los resultados del modelo en Y se alejan un poco más de los resultados experimentales, sobre todo en el valor del 100% de relleno, aunque en el valor de 93% de relleno el error es mínimo a comparación de otros modelos y orientaciones. Los valores de los errores en la orientación Y son de 2.27%, 11.49%, 0.52% y 11.54% respectivamente. Para la orientación en Z, el valor del error es considerablemente menor que en el modelo anterior y para este caso éstos son de 12.28%, 10.49%, 9.84% y 8.69% para cada porcentaje experimental, sin embargo, dichos valores son mayores a comparación de los errores encontrados en las orientaciones X y Y. Esto debido a que en la orientación Z el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas fue muy variable y dependiente de la adhesión de las capas.

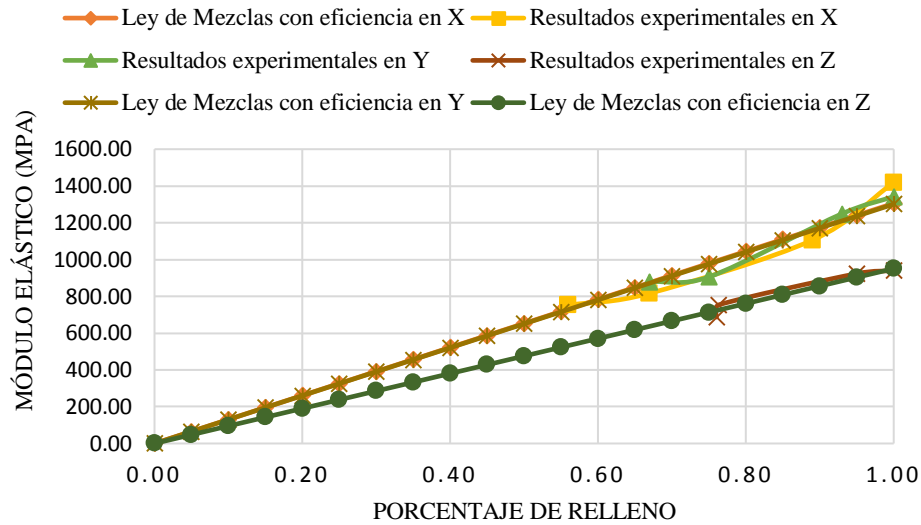


Figura 5.4. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico en las orientaciones X, Y y Z.

Como se muestra en la Figura 5.4, los resultados analíticos y experimentales son muy cercanos en la orientación X al igual que en el UTS compuesto. Las discrepancias entre los valores son menores al 8% en los puntos experimentales, por lo que este modelo se ajusta con mucha más precisión al anterior. De igual manera, se puede observar que la curva del modelo es mucho más precisa en el módulo elástico a comparación del UTS en la orientación en Y. Los errores que se presentan en dicha orientación son de 0.86%, 7.79%, 3.11% y 3.05% respectivamente y éstos son considerablemente menores que los obtenidos para el UTS en Y. Un comportamiento similar del modelo se presenta en la orientación Z, el cual se ajusta con mucha precisión al comportamiento variable del módulo, aunque los valores experimentales sean considerablemente menores a los de las dos orientaciones restantes. Igualmente se presentan errores menores al 5.2% en Z lo cual es un valor considerable de error.

En general se puede decir que el modelo de Ley de Mezclas con eficiencia predice con mayor precisión el comportamiento de las propiedades mecánicas estructurales en todas las orientaciones de fabricación, en comparación con el modelo simple de Ley de Mezclas. Sin embargo, el modelo sigue siendo lineal y el comportamiento de los datos experimentales es no lineal.

5.1.3 Modelo Gibson & Ashby

Este modelo, para el Módulo Elástico, se rige por la ecuación (5-7),

$$\frac{E}{E_s} = C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (5-7)$$

donde E es el módulo elástico de la pieza final, E_s es el módulo elástico de la materia prima, (ρ/ρ_s) es el porcentaje de relleno y C y n son constantes experimentales.

En cuanto al UTS, el modelo se describe por la ecuación (5-8)

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (5-8)$$

donde σ es el UTS de la pieza final, σ_s es el UTS de la materia prima, (ρ/ρ_s) es el porcentaje de relleno y C y n son constantes experimentales.

Para calcular las constantes experimentales C y n , se tomaron los resultados experimentales como valores del módulo elástico equivalente y el UTS equivalente para sustituirlo en las ecuaciones (5-7) y (5,8) respectivamente. Esto fue para cada orientación y porcentaje de relleno, Tabla 5.1. Entonces se calculó la relación del módulo y UTS experimentales dividido por el módulo y UTS de la materia prima. Posteriormente, para encontrar el valor de n , se tomaron dos puntos experimentales y se sustituyeron los valores en las ecuaciones (5-7) y (5-8) para el módulo y UTS, respectivamente. Ya que se tenían dos ecuaciones con dos incógnitas (C y n), se procedió a dividir una ecuación entre la restante y al final se despejó la contante n . Este cálculo se puede observar en la ecuación (5-9). Para el UTS, la constante n se calculó como se muestra en la ecuación (5-10). Esto se realizó para todas las combinaciones posibles de dos ecuaciones con todos los resultados experimentales, es decir, si se tienen 4 resultados experimentales, entonces se formaron 6 pares de ecuaciones para cada propiedad mecánica y orientación de fabricación.

$$n = \frac{\left(\ln \left(\frac{[E/E_s]_1}{[E/E_s]_2} \right) \right)}{\left(\ln \left(\frac{[\rho/\rho_s]_1}{[\rho/\rho_s]_2} \right) \right)} \quad (5-9)$$

$$n = \frac{\left(\ln \left(\frac{[\sigma/\sigma_s]_1}{[\sigma/\sigma_s]_2} \right) \right)}{\left(\ln \left(\frac{[\rho/\rho_s]_1}{[\rho/\rho_s]_2} \right) \right)} \quad (5-10)$$

Una vez encontrados dichos valores de n , se procedió a obtener el valor de la constante C . Para esto, únicamente se substituyó el valor de n encontrado para cada par de ecuaciones y se despejó de la ecuación (5-7) y (5-8) para el módulo y el UTS respectivamente. Una vez obtenidos los distintos valores de C y n , se obtuvo un promedio de cada uno para cada orientación de fabricación y propiedad mecánica.

En la Tabla 5.6 se muestran los valores de las constantes experimentales para cada orientación y propiedad estructural. En este caso todas las constantes experimentales son diferentes para cada orientación y propiedad mecánica.

Tabla 5.6. Valores promedio de las constantes experimentales C y n.

Módulo elástico	X	Y	Z
n	1.162	1.040	0.910
C	0.679	0.68	0.505
UTS	X	Y	Z
n	1.161	1.450	1.626
C	0.81	0.84	0.43

En la Tabla 5.7 se muestran los valores resultantes de la aplicación de este modelo para cada una de las orientaciones y diferentes porcentajes de relleno de 0 a 100%. En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestra una comparativa de los resultados predichos por el modelo de Gibson y Ashby y los resultados experimentales del UTS y módulo elástico, respectivamente, para cada orientación en X, Y y Z.

Tabla 5.7. Resultados del modelo de Gibson y Ashby.

ESTIMACIONES						
% de relleno	E (MPa)			UTS (MPa)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	39.581	57.239	62.574	1.332	0.586	0.176
0.10	88.547	117.698	117.563	2.979	1.601	0.544
0.15	141.816	179.435	170.012	4.770	2.882	1.051
0.20	198.088	242.017	220.876	6.662	4.374	1.678
0.25	256.703	305.235	270.593	8.632	6.046	2.413
0.30	317.256	368.964	319.415	10.668	7.876	3.245
0.35	379.470	433.122	367.505	12.758	9.850	4.170
0.40	443.141	497.649	414.977	14.898	11.955	5.181
0.45	508.115	562.501	461.915	17.082	14.182	6.275
0.50	574.269	627.642	508.384	19.305	16.523	7.448
0.55	641.502	693.044	554.436	21.564	18.973	8.697
0.60	709.732	758.686	600.110	23.856	21.525	10.019
0.65	778.888	824.547	645.442	26.180	24.174	11.412
0.70	848.909	890.611	690.461	28.532	26.917	12.873
0.75	919.745	956.864	735.190	30.912	29.750	14.402
0.80	991.348	1023.295	779.650	33.317	32.669	15.995
0.85	1063.679	1089.892	823.861	35.747	35.672	17.653
0.90	1136.701	1156.646	867.837	38.200	38.755	19.372
0.95	1210.383	1223.549	911.593	40.675	41.917	21.153
1.00	1284.693	1290.593	955.142	43.171	45.154	22.993

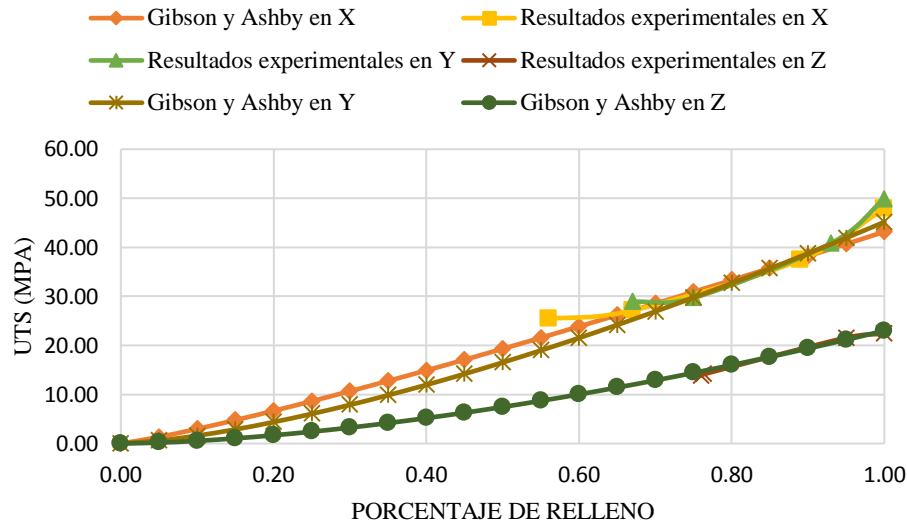


Figura 5.5. Comparativa de resultados del modelo en UTS en las orientaciones X, Y y Z.

En la Figura 5.5 se muestra que el modelo de Gibson y Ashby tiene un comportamiento diferente a los anteriores ya que muestra un efecto exponencial. De este modo este modelo cubre los puntos experimentales intermedios, sin embargo, en los extremos se observa una diferencia ya que los resultados experimentales se encuentran por encima de los estimados. Los valores de error estimados para cada punto en la orientación en X son 13.29%, 0.09%, 0.81% y 9.82% respectivamente, en donde el error en los puntos intermedios es mínimo. Para la orientación en Y, el modelo sigue el mismo comportamiento que en la orientación en X, los extremos quedan por debajo de los resultados experimentales y los puntos intermedios caen directamente en la curva. El error obtenido para cada punto en la orientación Y es de 12.60%, 0.24%, 0.43% y 9.47% en donde dichos valores son menores que en la orientación X.

En el caso de la orientación en Z, se observa que las curvas del modelo y los resultados experimentales no se empalman, como en los casos anteriores, esto debido a que los valores experimentales en esta orientación se encuentran muy por debajo de las orientaciones restantes. Sin embargo, las diferencias que se presentan entre los puntos experimentales y el modelo de Gibson y Ashby son menores a comparación de los modelos anteriores. Estas diferencias son de 6.22%, 4.80%, 1.94% y 2.56% respectivamente.

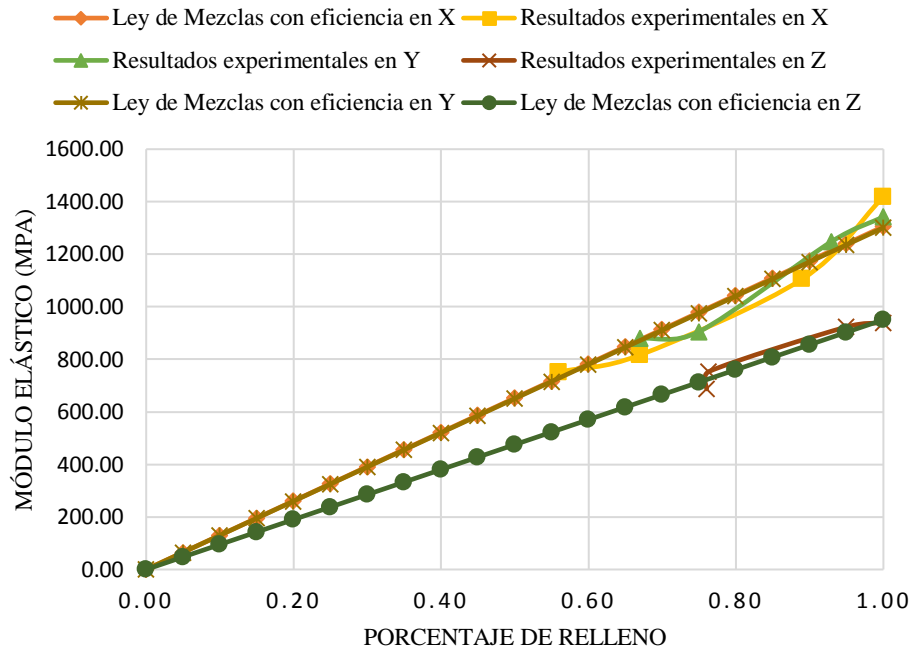


Figura 5.6. Comparativa de resultados del modelo en el módulo elástico en las orientaciones X, Y y Z.

Como se observa en la Figura 5.6, el comportamiento del modelo y los resultados experimentales presentan la misma tendencia que la Figura 5.5, en la que se evaluó el UTS. Los errores encontrados en los puntos experimentales de orientación en X son de 12.88%, 1.22%, 1.47% y 9.43%, respectivamente. Para la orientación en Y, el comportamiento del modelo no se ajusta a la curva del módulo elástico experimental como en los casos anteriores. Sin embargo, los errores son menores a comparación del caso anterior, alrededor de 4.24% en general.

En la orientación en Z se muestra que el modelo y el comportamiento experimental presentan las mismas tendencias, al igual que en la Figura 5.5, en donde los puntos experimentales del UTS equivalente se empalman con los valores analíticos obtenidos. Por lo tanto, las diferencias que se presentan son mínimas como se puede apreciar y menores que los modelos anteriores.

En general se puede decir que el modelo de Gibson y Ashby predice con mayor precisión el comportamiento final de las piezas en las dos propiedades mecánicas. Este modelo que tiene una tendencia no lineal cumple y se ajusta a los valores experimentales con errores aceptables y mínimos para todas las orientaciones de fabricación en comparación con los modelos anteriores.

5.1.4 Otros modelos

Se aplicaron otros modelos de predicción además de los mencionados anteriormente, sin embargo los resultados de éstos no se acercaron a los resultados experimentales. Algunos de los modelos considerados fueron el modelo de Reuss y Ravichandran, los cuales se describen en la sección 1.7.1 del capítulo 1 de esta tesis.

Para el caso del modelo de Reuss, los valores predichos por el modelo se muestran en la Tabla 5.8. De estos resultados se puede observar que los valores estimados por el modelo Reuss son muy distintos a los valores experimentales. Lo anterior se debe a que el E_p (módulo elástico de la partícula) se encuentra directamente multiplicando en el numerador como describe la ecuación (1-3). Dado que para este caso E_p es igual a cero (ya que el espacio entre los filamentos es aire), para aplicar este modelo se supuso un valor muy cercano a dicho valor. Por esta razón, los valores obtenidos para el modelo fueron muy pequeños y cercanos a cero, lo que no concuerda con el comportamiento final de las piezas.

Tabla 5.8. Resultados del modelo de Reuss para los porcentajes experimentales.

ESTIMACIONES		
% de relleno real	Módulo Elástico (MPa)	UTS (MPa)
Orientación X		
0.56	1.136E-05	2.273E-06
0.67	1.515E-05	3.030E-06
0.89	4.545E-05	9.091E-06
1.00	5.000E-02	9.998E-03
Orientación Y		
0.67	1.52E-05	3.030E-06
0.75	2.00E-05	4.000E-06
0.93	7.14E-05	1.429E-05
1.00	5.00E-02	9.998E-03
Orientación Z		
0.7603	2.086E-05	4.172E-06
0.7635	2.114E-05	4.229E-06
0.95	1.000E-04	2.000E-05
1.00	5.000E-02	9.998E-03

En cuanto al modelo de Ravichandran, los valores predichos por el modelo se muestran en la Tabla 5.9, los cuales son iguales para las tres orientaciones ya que no cuenta con constantes experimentales para cada una de ellas. De estos resultados se puede observar que los valores predichos no se encuentran tan alejados de los valores experimentales como los valores del modelo de Reuss, sin embargo no presenta la misma precisión como los anteriormente analizados. El modelo, Ravichandran cuenta con curvas de valores de predicción superior e

inferior, y V_p es el inverso del porcentaje de relleno. En la Figura 5.7 se comparan los resultados predichos por el modelo Ravichandran y los resultados experimentales con respecto al UTS para comparar la exactitud de éste. De igual manera en la Figura 5.8 se comparan los resultados del módulo elástico.

Tabla 5.9. Resultados del modelo de Ravichandran.

ESTIMACIONES						
% Relleno	Módulo Elástico (MPa)				UTS (MPa)	
	Vp	C	ORIENTACIÓN X,Y,Z		ORIENTACIÓN X,Y,Z	
			El	Eu	σ_l	σ_u
0.00	1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.95	0.0172	63.5911	64.6503	1.7995	1.8295
0.10	0.90	0.0357	128.3084	132.5732	3.6310	3.7516
0.15	0.85	0.0557	194.2360	203.8831	5.4966	5.7696
0.20	0.80	0.0772	261.4699	278.6854	7.3992	7.8864
0.25	0.75	0.1006	330.1203	357.0729	9.3420	10.1047
0.30	0.70	0.1262	400.3148	439.1215	11.3284	12.4265
0.35	0.65	0.1544	472.2022	524.8851	13.3627	14.8535
0.40	0.60	0.1856	545.9590	614.3888	15.4499	17.3864
0.45	0.55	0.2205	621.7961	707.6217	17.5960	20.0247
0.50	0.50	0.2599	699.9704	804.5271	19.8082	22.7670
0.55	0.45	0.3050	780.7996	904.9917	22.0956	25.6100
0.60	0.40	0.3572	864.6861	1008.8315	24.4694	28.5486
0.65	0.35	0.4190	952.1529	1115.7748	26.9446	31.5749
0.70	0.30	0.4938	1043.9030	1225.4403	29.5410	34.6783
0.75	0.25	0.5874	1140.9241	1337.3081	32.2866	37.8440
0.80	0.20	0.7100	1244.6885	1450.6777	35.2230	41.0522
0.85	0.15	0.8821	1357.5881	1564.6018	38.4179	44.2761
0.90	0.10	1.1544	1484.0750	1677.7616	41.9973	47.4784
0.95	0.05	1.7144	1634.8790	1788.1618	46.2649	50.6026

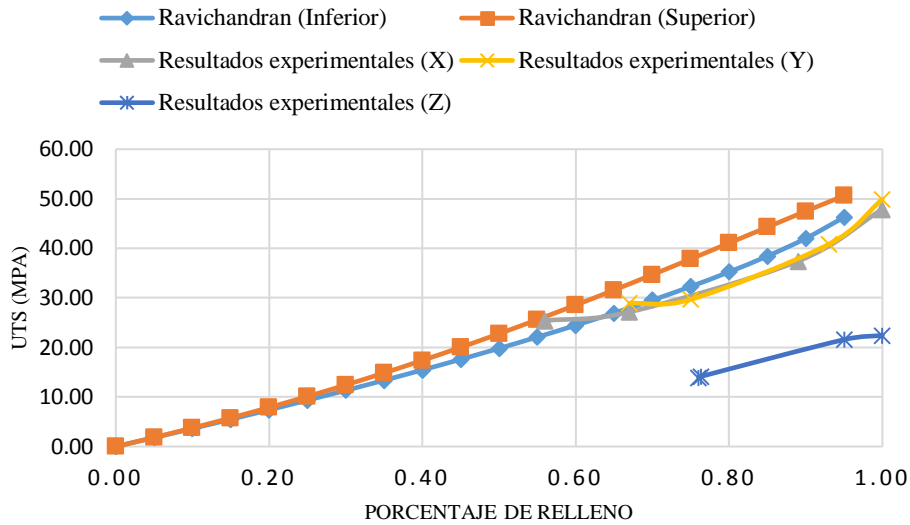


Figura 5.7. Comparativa de resultados UTS del modelo Ravichandran y los experimentales.

Como se muestra en la Figura 5.7, los valores superiores estimados del modelo se encuentran por encima de los resultados experimentales en todas las orientaciones y únicamente pasa un punto de la orientación en X por dicha curva. Por otro lado, la curva de los valores inferiores estimados es la más cercana a los resultados experimentales únicamente para las orientaciones en X y en Y, ya que para la orientación Z los valores experimentales se encuentran muy alejados de ambas curvas del modelo.

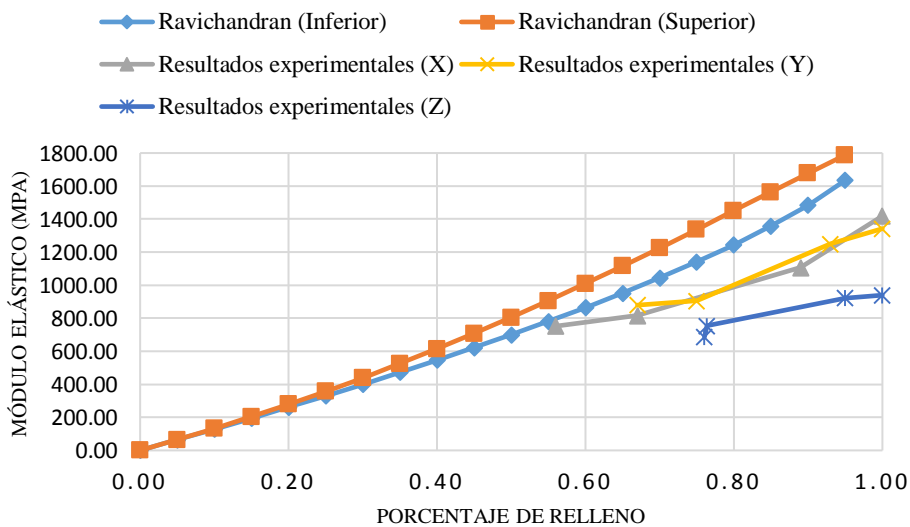


Figura 5.8. Comparativa de resultados del módulo elástico del modelo Ravichandran y los experimentales.

Respecto a la Figura 5.8, las curvas tanto superior como inferior del modelo se encuentran por encima de los resultados experimentales en todas las orientaciones de fabricación, lo que muestra que el modelo no es lo suficientemente exacto como los demás. La curva inferior del modelo está muy cercana únicamente a un punto del módulo elástico experimental en la orientación X, sin embargo en los puntos siguientes se aumenta la distancia entre dichas curvas.

En general se puede decir que modelo de Reuss no es aplicable para este caso de estudio ya que los valores estimados presentan diferencias exageradamente grandes con los resultados experimentales y no reflejan para nada al comportamiento final de las piezas. En el caso del modelo de Ravichandran, los valores estimados son mayores a los resultados experimentales en ambas curvas (superior e inferior). Aunque se acerca en algún punto a los valores experimentales, no es lo suficientemente exacto y preciso como los modelos anteriores.

5.2 Modelado numérico

Con el propósito de evaluar la factibilidad de predecir el comportamiento estructural de las probetas y piezas FDM mediante métodos numéricos, se procedió a desarrollar un modelo numérico de simulación mediante el método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés). Dicho modelo se desarrolló utilizando dos paquetes computacionales, ANSYS Workbench y Comsol.

Para realizar el modelo CAD y el análisis numérico se realizaron las siguientes consideraciones:

- Los filamentos extruidos de PLA tienen propiedades estructurales isotrópicas iguales al filamento PLA de la materia prima.
- La adhesión entre capas es perfecta, es decir las capas se encuentran unidas perfectamente, por lo que no se modela la unión entre capas.
- La geometría de los poros se modela de acuerdo a los poros reales, pero de manera simplificada y evitando esquinas muy agudas. Por lo anterior no se consideran el esfuerzo máximo y concentraciones de esfuerzo en las esquinas de los poros.
- Se considera simetría del modelo para reducir el tiempo computacional requerido. Solo se modela una sección de la probeta.
- El desempeño mecánico de las partes fabricadas se analiza en el régimen elástico.
- Se considera únicamente una capa de perímetro y se realiza una proporción de la misma con el fin de que el modelo tenga una parte proporcional de poros y parte sólida (perímetro).

Cabe hacer mención que estas consideraciones no restan confiabilidad al modelo, sin embargo mejoran el desempeño del modelo y simulación numérica.

5.2.1 Modelo geométrico

Los modelos geométricos fueron creados considerando la microestructura y porosidad reales de las probetas experimentales. Para el caso del análisis numérico mediante ANSYS Workbench, la geometría modelada se realizó en SolidWorks® tomando en cuenta que el corte transversal de dicha geometría sería en un poro, es decir, en un espacio vacío. La Figura 5.9 presenta una comparación entre los modelos reales vistos en el microscopio y los modelos CAD realizados para este caso. De esta Figura se puede observar que la geometría de los poros es muy similar entre los modelos reales y CAD. El porcentaje de relleno de los modelos CAD fue medido y los valores obtenidos se presentan en la Figura 5.9. Debido a que las técnicas de modelado CAD tienen ciertas limitaciones en cuanto a reproducir exactamente la densidad y figura geométrica de los modelos, se puede observar que los porcentajes de los modelos CAD difieren de los porcentajes de relleno reales de las probetas. El porcentaje de relleno de los modelos CAD también fue calculado como la razón entre el peso del modelo poroso dividido entre el peso del modelo sólido. Las dimensiones y porcentajes de relleno de los modelos CAD se muestran en la Tabla 5.10.

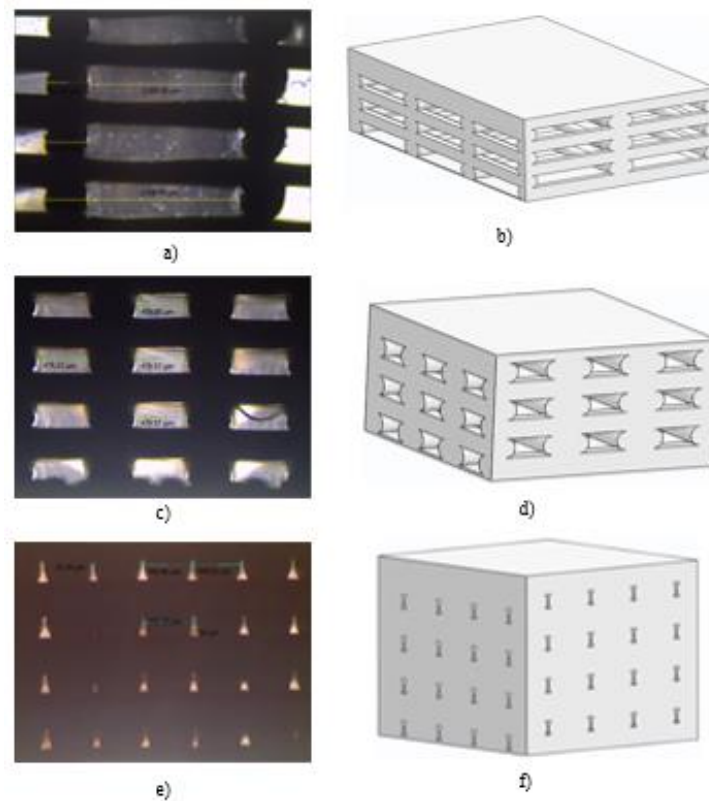


Figura 5.9. Microestructura y porosidad de las probetas FDM experimentales (izquierda) y modelos CAD ANSYS (derecha): a) 36% relleno, b) 37.58% relleno, c) 53% relleno, d) 65.7% relleno, e) 82% relleno y f) 96.61% relleno.

Tabla 5.10. Dimensiones y porcentajes de relleno de los modelos CAD.

Modelo CAD	Relleno (%)	Dimensiones (mm)		
		Ancho (w)	Espesor (t)	Longitud (l)
1	37.58	5.20	1.28	3.35
2	65.70	2.46	1.20	2.37
3	96.61	1.99	1.53	1.88

En el caso del análisis MEF en Comsol, los modelos geométricos se realizaron en el mismo software de manera paramétrica. En estos modelos se consideró que el corte de la sección transversal se realiza en un hilo transversal por lo que la carga axial se aplica directamente en los hilos longitudinales y a los hilos transversales de la primera y última fila. En la Figura 5.10 se presentan los modelos utilizados para este análisis, así como sus respectivos valores de porcentaje de relleno.

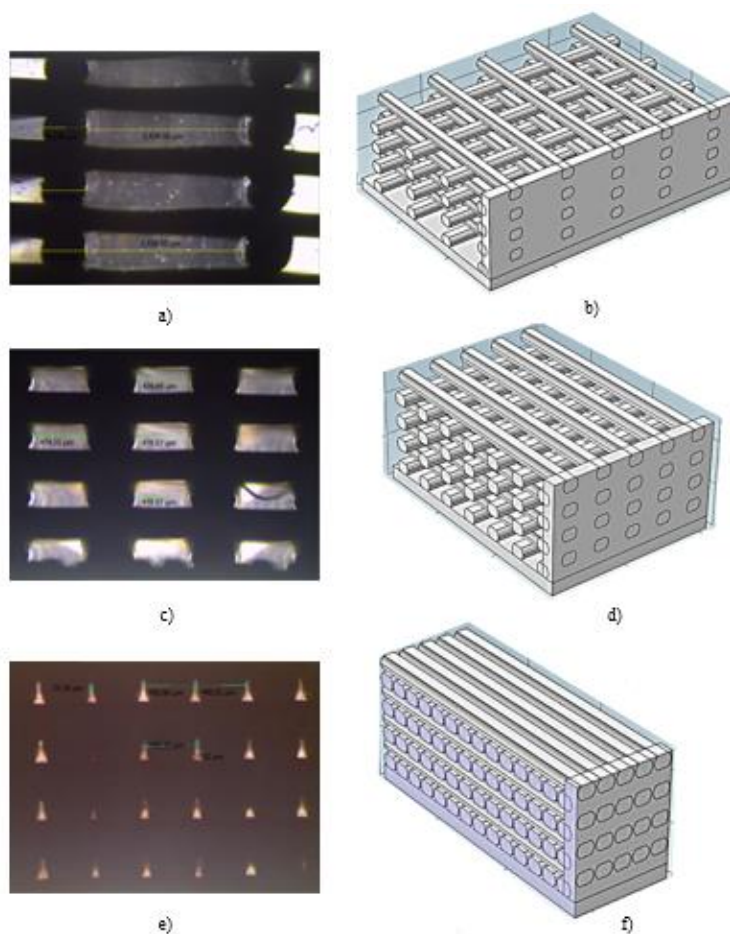


Figura 5.10. Microestructura y porosidad de las probetas FDM experimentales (izquierda) y modelos Comsol (derecha): a) 36% relleno, b) 34.14% relleno, c) 53% relleno, d) 49% relleno, e) 82% relleno y f) 83.66% relleno.

5.2.2 Material

El material considerado para el análisis y simulación numérica es PLA, con las propiedades mostradas en la Tabla 5.11. Estos valores corresponden a los obtenidos en las pruebas de tensión de la materia prima PLA, anteriormente mencionados, y el coeficiente de Poisson y la densidad se obtuvieron de la literatura [51].

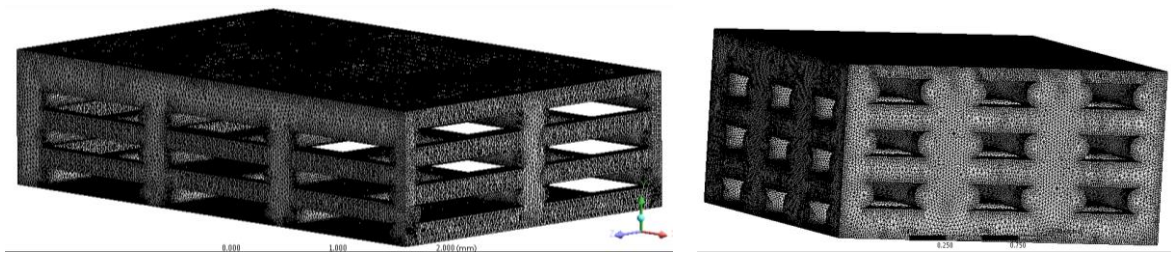
Tabla 5.11. Propiedades del PLA.

Propiedad	Valores
Densidad, ρ (g/cm ³)	1.24
Módulo Elástico, E (MPa)	1763.06
Coficiente Poisson, ν	0.36
UTS (MPa)	49.48
Elongación (%)	8.17

5.2.3 Modelo FEM

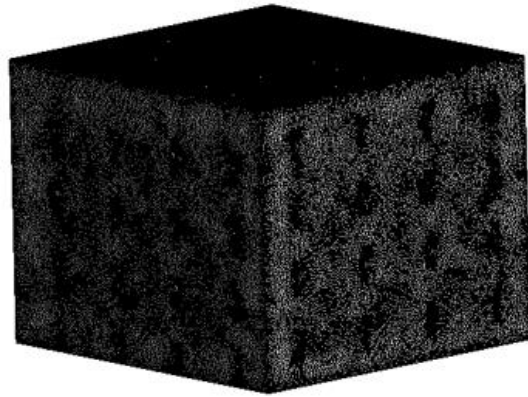
Los modelos geométricos en ANSYS se mallaron utilizando el elemento MESH 200, el cual corresponde a un tetraedro de orden cuadrático con 10 nodos. Posteriormente se llevaron a cabo análisis de convergencia para determinar el número de elementos y el tamaño de mallado óptimo, obteniéndose un error de convergencia máximo de 0.3%. La Figura 5.11 muestra los tres diferentes mallados de los modelos ANSYS y en Comsol. En Comsol se mallaron con un elemento tetraédrico y un tamaño de malla fino.

En cuanto a las condiciones de frontera, éstas fueron asignadas en ambos casos simulando un ensayo a tracción. Un extremo se fijó en un punto y en el plano opuesto a donde se aplicó el desplazamiento. Esto con el fin de perimir la contracción del material en la dirección vertical. Y como ya se mencionó, al extremo opuesto se le asignó un desplazamiento prescrito de 0.05 mm como se muestra en la Figura 5.12.

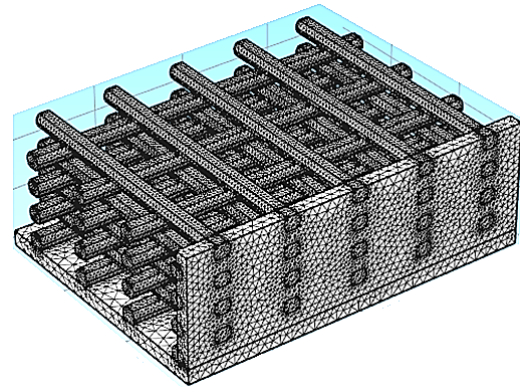


a)

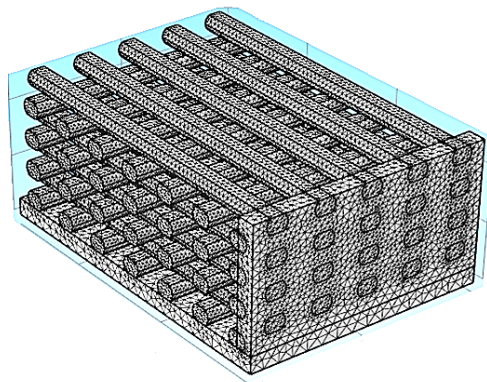
b)



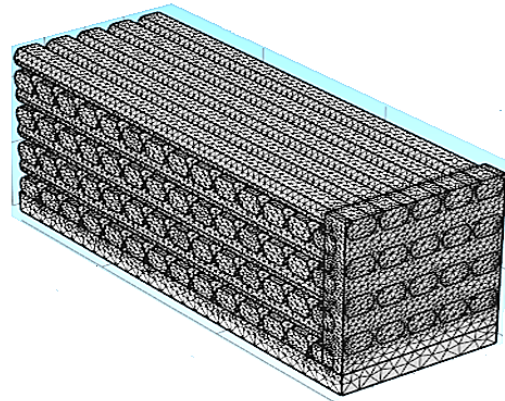
c)



d)



e)



f)

Figura 5.11. Modelos FEM ANSYS y Comsol: a) modelo con 37.58% relleno, 536 978 elementos ANSYS, b) modelo con 65.7% relleno, 588 291 elementos ANSYS, c) modelo con 96.61% relleno, 705 377 elementos ANSYS, d) modelo con 34.14% relleno, 1 582 137 grados de libertad Comsol, e) modelo con 49% relleno, 1 681 524 grados de libertad Comsol y f) modelo con 83.66% relleno, 2 700 000 grados de libertad Comsol.

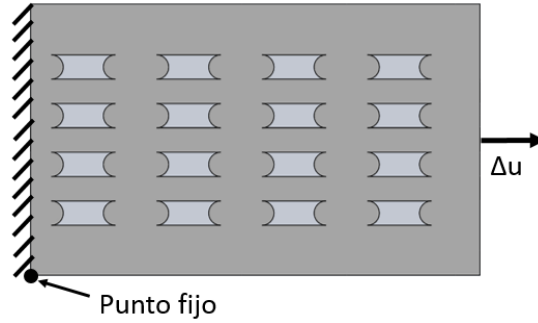


Figura 5.12. Condiciones de frontera FEM.

5.2.4 Simulación

Se realizaron las simulaciones FEM para cada modelo y programa considerados. En el caso de la simulación en ANSYS, se determinó la fuerza de reacción en el extremo fijo, la cual fue utilizada posteriormente para determinar el esfuerzo equivalente y el módulo elástico equivalente. El módulo elástico equivalente se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{\epsilon_{eq}} \quad (5-11)$$

donde E_{eq} es el módulo elástico equivalente, σ_{eq} es el esfuerzo equivalente y ϵ_{eq} es la deformación equivalente. El esfuerzo equivalente se determina como:

$$\sigma_{eq} = \frac{F_{reacción}}{A_{eq}} = \frac{F_{reacción}}{(w)(t)} \quad (5-12)$$

donde $F_{reacción}$ es la fuerza de reacción, A_{eq} es el área equivalente, w es el ancho y t es el espesor de la sección transversal. Por otro lado, la deformación equivalente puede calcularse como:

$$\epsilon_{eq} = \frac{\Delta u}{l_0} \quad (5-13)$$

donde Δu es el desplazamiento prescrito en la simulación FEM, y l_0 es la longitud inicial de la muestra.

En el caso de las simulaciones en Comsol el procedimiento de cálculo fue el mismo que en ANSYS, excepto que la fuerza de reacción se determinó mediante la integral de la fuerza de reacción en la superficie fija.

5.2.5 Resultados

Con base en las ecuaciones anteriores se determinó el módulo elástico equivalente para cada modelo FEM y cada grupo de probetas experimentales. Los resultados se presentan en la Tabla 5.12. En esta Tabla se puede observar que para los casos tanto experimental como FEM en ANSYS y Comsol, el porcentaje de relleno afecta significativamente el comportamiento estructural de las piezas, afectando directamente el valor del módulo elástico equivalente. A mayor porcentaje de relleno, mayor módulo elástico equivalente. También se puede observar que todos los valores obtenidos del módulo elástico equivalente son menores que el módulo elástico de la materia prima (1763.06 MPa). Por lo tanto, se puede decir que el porcentaje de relleno afecta el comportamiento estructural de piezas fabricadas mediante FDM, lo cual concuerda con la literatura [2], [3], [4].

Tabla 5.12 Resultados del Módulo Elástico Equivalente para cada grupo de probetas.

Probetas	Relleno (%)	Módulo Elástico Equivalente (MPa)
Experimental 1	36.0	397.12
Experimental 2	53.0	477.14
Experimental 3	82.0	911.43
Ansys 1	37.6	517.34
Ansys 2	65.7	768.43
Ansys 3	96.6	1559.76
Comsol 1	34.1	460.50
Comsol 2	49.0	605.70
Comsol 3	83.7	956.70
Comsol 4	88.6	1009.00
Comsol 5	90.3	1057.00
Comsol 6	93.7	1281.00

5.2.6 Análisis y discusión

Los resultados numéricos y experimentales se comparan en la gráfica de la Figura 5.13. En esta gráfica se agregaron los resultados de un conjunto de pruebas experimentales adicionales, las cuales fueron realizadas con probetas de 3 capas de perímetro. De estos resultados se puede observar que tanto los resultados experimentales y los resultados FEM en Ansys tienen la misma tendencia de comportamiento independientemente del número de capas de perímetro; el módulo elástico equivalente varía de manera directa con el porcentaje de relleno. En cuanto a los resultados FEM en Comsol, se puede observar un comportamiento lineal de los resultados en el rango de 33 a 86% de relleno, y comportamiento exponencial para valores de relleno por encima del 90%. También se puede observar que los resultados FEM en Ansys presentan pequeños errores (10% aproximadamente) con respecto a los

valores experimentales para porcentajes de relleno entre 60% y 70%. Sin embargo este error incrementa (25% aproximadamente) para valores de porcentaje de relleno fuera de este rango. Para los resultados de Comsol, se puede observar que se presentan errores de aproximadamente 35% para valores de porcentaje de relleno entre 30% y 60% y fuera de este rango el valor del error disminuye. Estas diferencias entre los resultados experimentales y numéricos se pueden atribuir a las consideraciones hechas en los modelos FEM, en particular al modelado no fehaciente de la geometría real del filamento depositado, así como el número de perímetros utilizados. Así mismo el modelado de la unión entre capas o filamentos puede ser otro factor que influya y justifique la diferencia entre ambos resultados. En la realidad la unión entre capas o filamentos no es una unión perfecta, sino que es más débil que el material sólido, lo cual influye en el comportamiento mecánico de la pieza.

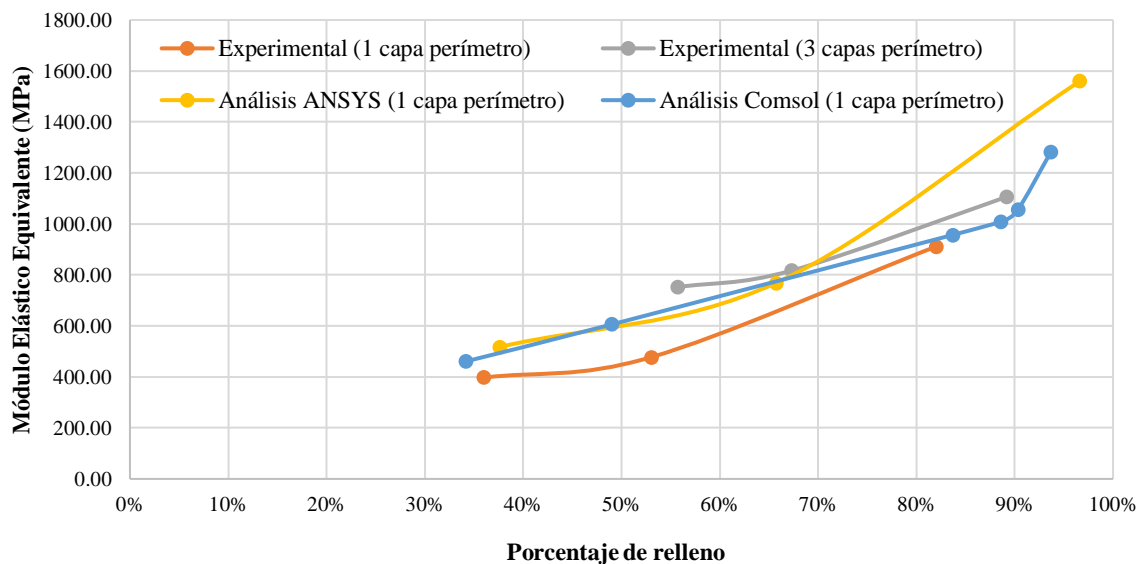


Figura 5.13. Módulo Elástico Equivalente vs. Porcentaje de relleno.

Los resultados FEM también demuestran que cuando el porcentaje de relleno se acerca al 100%, los valores del módulo elástico equivalente se aproximan al valor nominal de la materia prima (1763.06 MPa), lo cual confirma la suposición de que un modelo FEM completamente sólido con las mismas propiedades, dimensiones y desplazamiento aplicados dará como resultado ideal el valor del módulo elástico del material de extrusión. No obstante, en la realidad el módulo elástico equivalente de probetas al 100% se reduce con respecto al de la materia prima; lo cual refleja el efecto de la unión no perfecta entre capas o filamentos. Finalmente se puede señalar que el comportamiento mecánico de una pieza solida uniforme es diferente a aquellas que presentan porosidades y adhesión de capa tras capa. La adhesión imperfecta y no uniforme debilita la pieza en comparación con el material sólido.

Finalmente se puede mencionar que las diferencias observadas entre las soluciones obtenidas en Ansys y Comsol, pueden atribuirse a diferentes causas o situaciones, como son:

1. Los modelos geométricos son diferentes para cada programa. En el modelo de Ansys el corte transversal se hace justo a la mitad de los hilos transversales, mientras que en el modelo de Comsol, el corte transversal se hace a la mitad del espacio entre hilos transversales. Esta diferencia cambia la rigidez del modelo ya que el área transversal (que se fija y que se desplaza) cambia de un modelo a otro, y además en el caso de Ansys se halan los hilos transversales junto con los hilos longitudinales; es decir la aportación de los hilos transversales a la rigidez del modelo es más alta en Ansys que en el modelo de Comsol. Lo anterior tiene como resultado que el modelo de Comsol se comporte como un modelo lineal en donde los hilos longitudinales se halan sin tener mucho aporte de los hilos transversales, mientras que en el modelo de ANSYS la aportación de los hilos transversales es mayor, resultando en una rigidez mayor.
2. La transferencia de carga del hilo axial al transversal se mejora cuando la proporción entre espesor y longitud axial del contacto (ancho del hilo) se va disminuyendo. Debido a que el modelo de Ansys cambia esta proporción, ya que se considera como sólido por lo tanto, la rigidez efectiva va comportándose de manera no lineal.
3. En el modelo Comsol la rigidez incrementa linealmente con el número de hilos. Los hilos perpendiculares no aportan a la rigidez, y siguen sin aportar mientras que no se tocan entre ellos. El único aporte que tienen es el aporte en la zona de contacto, cuyo aporte depende de la proporción entre el espesor y el ancho del hilo, pero es limitado. Es decir, la eficiencia se mantiene en 50% mientras que no se tocan los hilos; por lo tanto, se crea una tendencia lineal. Al momento en que la situación cambia y la rigidez se incrementa, los hilos se empiezan a tocar, y debido a este contacto, los hilos se empiezan a cargar directamente entre ellos y no a través de los hilos axiales, esta carga va proporcional con el área de contacto, lo cual incrementa muy rápido. Por lo tanto, la eficiencia incrementa (de todo el volumen poroso) de 50% a 100%, por la carga que empiezan a llevar los hilos perpendiculares (50% del volumen sólido). El ancho de los hilos en los modelos ANSYS son como 2 hilos que se interconectan, por lo que esta interconexión entre hilos es el principal mecanismo que incrementa la rigidez.

Los resultados y observaciones anteriores reflejan la necesidad de continuar con el trabajo de investigación para poder desarrollar modelos numéricos más robustos y precisos, pero que a su vez sean simples de implementar. Lo anterior con el objetivo de poder predecir de manera numérica el comportamiento estructural de piezas o componentes fabricados mediante el proceso FDM o cualquier otro proceso de manufactura aditiva (AM).

6. Análisis y discusión de resultados

6.1 Resultados experimentales

Los resultados obtenidos de las pruebas experimentales a probetas FDM (ver Capítulo 4) demostraron que los parámetros con mayor influencia en el comportamiento estructural son el porcentaje de relleno y la orientación de fabricación de las piezas. Estos resultados experimentales obtenidos fueron comparados con algunos de los resultados reportados en la literatura. En las Figuras 6.1 y 6.2 se comparan los resultados experimentales y los resultados de la literatura para el UTS y el módulo de elasticidad, respectivamente. Cabe mencionar que los resultados de la literatura fueron normalizados con el fin de poder compararlos con los experimentales, independientemente de los materiales y equipos utilizados en cada caso.

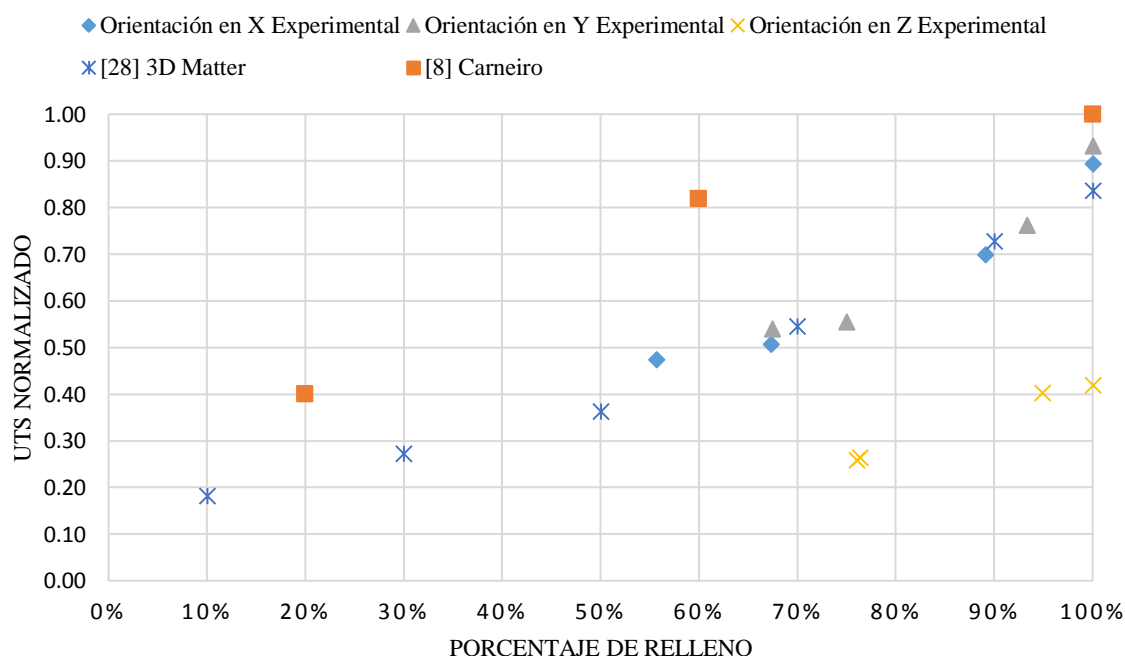


Figura 6.1. UTS normalizado vs. porcentaje de relleno en orientaciones X, Y, Z.

En la Figura 6.1, se puede observar que los resultados experimentales para las orientaciones de fabricación X y Y, y los resultados de la literatura [28], tienen la misma tendencia y variación con respecto al porcentaje de relleno; i.e. a mayor porcentaje de relleno mayor será la resistencia de la pieza. Del mismo modo, los resultados obtenidos en [8] muestran la misma tendencia, aunque los valores se encuentran por encima de los resultados experimentales

obtenidos y de [28]. Estos resultados sugieren que el comportamiento experimental obtenido de las probetas FDM es válido y concuerda con los resultados obtenidos en la literatura obtenidos por otros equipos FDM y en diferentes condiciones de fabricación. En el caso de la orientación de fabricación en Z, los resultados demuestran que a mayor porcentaje de relleno mayor será la resistencia de la pieza, sin embargo para esta orientación de carga, la resistencia mecánica será menor debido a la influencia de la adhesión entre capas, que en general es menor que la resistencia del material. Finalmente se puede decir la resistencia mecánica de las piezas FDM que el comportamiento estructural de las piezas FDM es ortotrópico, mostrando valores iguales en el plano de la capa (X, y Y), pero valores reducidos en la dirección perpendicular a las capas (dirección Z).

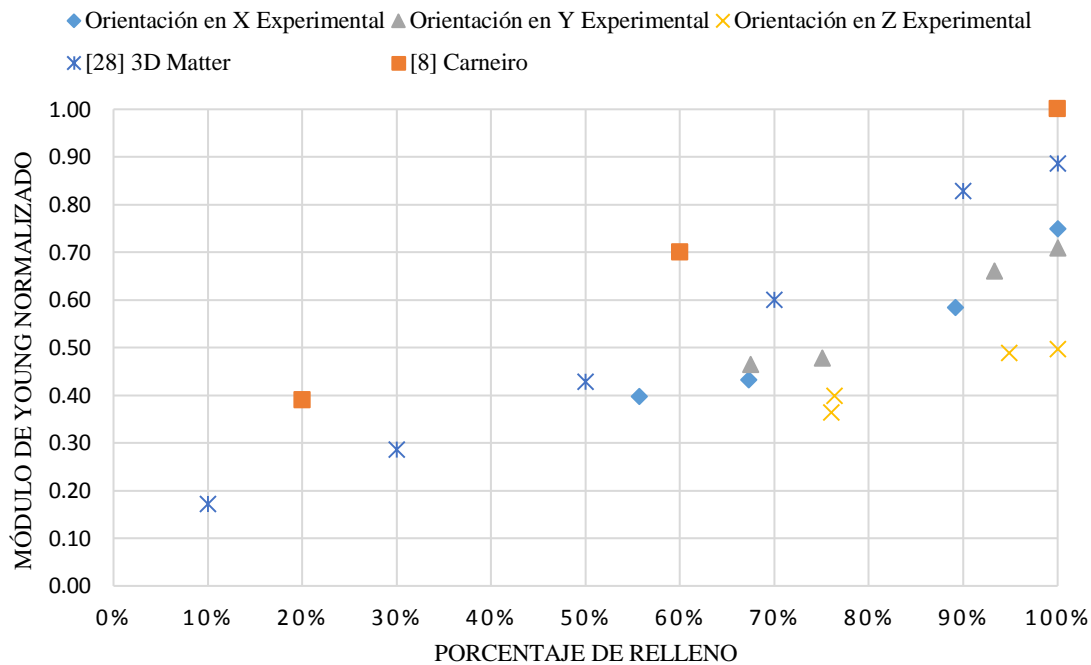


Figura 6.2. Módulo elástico normalizado vs. porcentaje de relleno en orientaciones X, Y, Z.

En el caso del módulo elástico, Figura 6.2, los resultados experimentales obtenidos en este trabajo tienen la misma tendencia que los obtenidos en la literatura. Aun cuando los valores experimentales son menores a los reportados en la literatura, las tendencias son las mismas. Este comportamiento se puede deber a las condiciones de fabricación y a las propiedades de la materia prima que pueden ser diferentes y variables de acuerdo al grado de envejecimiento y condiciones de humedad, temperatura, etc. Las propiedades de la materia prima normalmente se encuentran dentro de un rango y no se precisa de manera exacta para cada rollo. Sin embargo, es evidente que los valores experimentales reproducen con buena precisión la tendencia de los resultados en la literatura. Similar al comportamiento del UTS, los valores del módulo elástico en las orientaciones de fabricación X y Y son prácticamente iguales, pero en la orientación Z sus valores son menores a éstos.

6.2 Modelos teórico-experimental

El análisis de los modelos teórico-experimentales propuestos en la literatura (ver Capítulo 5), arrojó como resultado que el modelo de Gibson y Ashby es el que mejor reproduce los resultados experimentales del comportamiento estructural de las probetas FDM. Con el propósito de mejorar la precisión en la predicción del comportamiento estructural de las piezas FDM, se propusieron tres nuevos modelos los cuales se describen a continuación.

6.2.1 Modelo lineal-exponencial

El modelo lineal-exponencial propuesto es un modelo híbrido que combina el comportamiento lineal del modelo de Ley de Mezclas con eficiencia y el modelo exponencial de Gibson y Ashby. La ecuación que describe a este modelo es:

$$E_{eq} = E_s (\alpha V_m + C V_m^n) \quad (6-1)$$

donde E_{eq} y E_s son el módulo elástico equivalente y el módulo elástico de la materia prima, respectivamente; α es un coeficiente de eficiencia; C y n son constantes experimentales; y V_m es el porcentaje de relleno de la pieza. Este mismo modelo aplicaría para el caso del UTS.

Para resolver las constantes del modelo se requerían tres puntos experimentales. Dado que el sistema de ecuaciones se resolvió numéricamente y se observó que no existía una solución exacta, se optó por realizar iteraciones dando valores a n desde -100 hasta 300 en intervalos de 0.1. De esta manera se evaluó la función y en donde ésta pasara por cero o los valores fueran muy cercanos al mismo se calcularon los valores de C y α . Se consideraron los valores experimentales correspondientes a las diferentes orientaciones de fabricación. Los resultados normalizados obtenidos de la predicción de las propiedades estructurales utilizando el modelo lineal-exponencial se presentan en las Tablas 6.1 a 6.3 para las diferentes orientaciones de fabricación y valores de los parámetros del modelo.

Tabla 6.1. Estimaciones del modelo lineal-exponencial para la orientación X.

% relleno	ESTIMACIONES					
	$n=1.1,$ $C=-3.83,$ $\alpha=4.32$	$n=1.1,$ $C=-5.29,$ $\alpha=5.84$	$n=0.9,$ $C=3.47,$ $\alpha=-2.97$	$n=1.05,$ $C=-10.32,$ $\alpha=10.87$	$n=1.05,$ $C=-7.47,$ $\alpha=7.967$	$n=1.2,$ $C=-2.77,$ $\alpha=3.32$
	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.0743	0.0959	0.0857	0.0994	0.0768	0.0898
0.10	0.1282	0.1637	0.1401	0.1675	0.1309	0.1568
0.15	0.1734	0.2195	0.1841	0.2230	0.1759	0.2130
0.20	0.2127	0.2671	0.2217	0.2701	0.2148	0.2615
0.25	0.2474	0.3085	0.2547	0.3109	0.2492	0.3039
0.30	0.2785	0.3448	0.2840	0.3466	0.2798	0.3412
0.35	0.3065	0.3767	0.3104	0.3780	0.3074	0.3742
0.40	0.3317	0.4049	0.3343	0.4058	0.3324	0.4032
0.45	0.3546	0.4298	0.3560	0.4303	0.3549	0.4288
0.50	0.3753	0.4517	0.3759	0.4519	0.3754	0.4513
0.55	0.3940	0.4744	0.3975	0.4744	0.3975	0.4744
0.60	0.4109	0.4875	0.4107	0.4875	0.4109	0.4876
0.65	0.4261	0.5070	0.4318	0.5070	0.4318	0.5070
0.70	0.4398	0.5141	0.4401	0.5142	0.4399	0.5139
0.75	0.4521	0.5243	0.4530	0.5246	0.4523	0.5237
0.80	0.4629	0.5326	0.4648	0.5333	0.4634	0.5313
0.85	0.4725	0.5392	0.4756	0.5403	0.4733	0.5370
0.90	0.4809	0.5432	0.4836	0.5447	0.4804	0.5401
0.95	0.4881	0.5473	0.4945	0.5496	0.4897	0.5427
1.00	0.4942	0.5490	0.5027	0.5520	0.4964	0.5429

Tabla 6.2. Estimaciones del modelo lineal-exponencial para la orientación Y.

	ESTIMACIONES					
	$n=1.1,$ $C=-1.61,$ $\alpha=2.14$	$n=1.05,$ $C=-12.01,$ $\alpha=12.58$	$n=0.9,$ $C=1.51,$ $\alpha=-0.96$	$n=1.1,$ $C=-6.11,$ $\alpha=6.67$	$n=1.05,$ $C=-3.17,$ $\alpha=3.70$	$n=1.2,$ $C=-3.16,$ $\alpha=3.72$
% relleno	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.0908	0.1119	0.1082	0.1074	0.0946	0.0994
0.10	0.1544	0.1874	0.1734	0.1823	0.1587	0.1730
0.15	0.2064	0.2482	0.2243	0.2433	0.2105	0.2342
0.20	0.2505	0.2993	0.2663	0.2949	0.2542	0.2866
0.25	0.2886	0.3431	0.3020	0.3393	0.2918	0.3321
0.30	0.3218	0.3809	0.3327	0.3778	0.3244	0.3718
0.35	0.3508	0.4137	0.3594	0.4113	0.3529	0.4065
0.40	0.3762	0.4423	0.3826	0.4404	0.3778	0.4368
0.45	0.3984	0.4671	0.4029	0.4657	0.3995	0.4632
0.50	0.4177	0.4885	0.4206	0.4876	0.4184	0.4859
0.55	0.4344	0.5068	0.4360	0.5063	0.4348	0.5054
0.60	0.4486	0.5224	0.4493	0.5222	0.4488	0.5218
0.65	0.4649	0.5399	0.4649	0.5399	0.4649	0.5399
0.70	0.4706	0.5460	0.4705	0.5461	0.4706	0.5461
0.75	0.4786	0.5545	0.4786	0.5545	0.4786	0.5545
0.80	0.4848	0.5608	0.4853	0.5607	0.4849	0.5604
0.85	0.4893	0.5652	0.4905	0.5648	0.4896	0.5641
0.90	0.4921	0.5677	0.4945	0.5670	0.4927	0.5656
0.95	0.4931	0.5684	0.4963	0.5674	0.4939	0.5655
1.00	0.4933	0.5677	0.4990	0.5660	0.4947	0.5624

Tabla 6.3. Estimación del modelo lineal-exponencial para la orientación Z.

	ESTIMACIONES		
	$n=1,$ $C= 3.02e14,$ $\alpha=-3.02e14$	$n=4.8, C=0.96,$ $\alpha= 0.001$	$n=4.9, C=0.9612,$ $\alpha=0.0105$
% relleno	Eeq	σ_{eq}	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.0254	0.0001	0.0005
0.10	0.0508	0.0002	0.0011
0.15	0.0781	0.0004	0.0017
0.20	0.1016	0.0008	0.0025
0.25	0.1250	0.0017	0.0037
0.30	0.1563	0.0035	0.0058
0.35	0.1719	0.0068	0.0093
0.40	0.2031	0.0125	0.0150
0.45	0.2188	0.0216	0.0239
0.50	0.2500	0.0353	0.0374
0.55	0.2813	0.0554	0.0571
0.60	0.3125	0.0837	0.0850
0.65	0.3125	0.1226	0.1233
0.70	0.3750	0.2590	0.2590
0.75	0.3750	0.2642	0.2642
0.80	0.4063	0.3304	0.3305
0.85	0.4375	0.4416	0.4424
0.90	0.4375	0.5806	0.5831
0.95	0.5000	0.7522	0.7576
1.00	0.5000	0.9619	0.9718

Como se puede observar en los resultados anteriores, los valores estimados para módulo elástico con el 100% de relleno son menores al de la materia prima, como ocurre en las pruebas experimentales, sin embargo dichos valores se encuentran muy por debajo de los obtenidos experimentalmente. Estos valores estimados se encuentran en aproximadamente el 50% del valor nominal de la materia prima en todas las orientaciones. Para el UTS, se puede observar que los valores para el 100% de relleno en las orientaciones X y Y se encuentran de igual manera muy por debajo de los resultados experimentales, sin embargo para la orientación en Z, las estimaciones muestran que para el 100% de relleno, los valores son muy cercanos al valor nominal de la materia prima. Cabe mencionar, que para la orientación Z, los valores para el UTS estimados en porcentajes de relleno del 5 hasta el 60% son mínimos relacionados a los resultados experimentales y el valor UTS nominal de la materia prima.

6.2.2 Modelo Euleriano

Con el objetivo de lograr predecir el comportamiento de los resultados experimentales, el modelo Euleriano propuesto considera un comportamiento exponencial, descrito de la siguiente manera:

$$E_{eq} = C e^{V_m^n} E_s \quad (6-2)$$

donde E_{eq} y E_s son el módulo elástico equivalente y el módulo elástico de la materia prima, respectivamente; C y n son constantes experimentales; y V_m es el porcentaje de relleno de la pieza. Este mismo modelo se aplica para el esfuerzo equivalente. Para este modelo se requieren dos puntos experimentales para encontrar los coeficientes C y n . Sin embargo, al no haber solución exacta del sistema de ecuaciones, se realizaron iteraciones suponiendo valores de n . Una vez hecho esto, se evaluó la función en donde ésta pasara por cero o se acercara a cero y se tomaron los valores de n y C correspondientes. Los resultados normalizados predichos por el modelo Euleriano se muestran en las Tablas 6.4 a 6.6 para cada una de las orientaciones de fabricación analizadas.

Tabla 6.4. Estimación del modelo Euleriano para la orientación X.

ESTIMACIONES		
% relleno	$n=0.65,$ $C= 0.2001$	$n=0.5,$ $C=0.2244$
	E_{eq}	σ_{eq}
0.00	0.2002	0.2245
0.05	0.2309	0.2807
0.10	0.2504	0.3079
0.15	0.2679	0.3306
0.20	0.2844	0.3510
0.25	0.3005	0.3701
0.30	0.3162	0.3882
0.35	0.3318	0.4056
0.40	0.3474	0.4225
0.45	0.3630	0.4390
0.50	0.3786	0.4552
0.55	0.3975	0.4744
0.60	0.4102	0.4870
0.65	0.4327	0.5089
0.70	0.4424	0.5182
0.75	0.4588	0.5336
0.80	0.4754	0.5490
0.85	0.4922	0.5643
0.90	0.5059	0.5766
0.95	0.5266	0.5949
1.00	0.5442	0.6101

Tabla 6.5. Estimaciones del modelo Euleriano para la orientación Y.

	ESTIMACIONES			
	$n=0.3,$ $C= 0.1915$	$n=0.3,$ $C=0.2224$	$n=0.26,$ $C= 0.1887$	$n=0.26,$ $C=0.2193$
% relleno	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}
0.00	0.1915	0.2224	0.1888	0.2193
0.05	0.2877	0.3342	0.2987	0.3470
0.10	0.3161	0.3672	0.3271	0.3799
0.15	0.3373	0.3918	0.3477	0.4038
0.20	0.3549	0.4123	0.3646	0.4234
0.25	0.3704	0.4303	0.3792	0.4404
0.30	0.3844	0.4465	0.3922	0.4556
0.35	0.3973	0.4615	0.4041	0.4694
0.40	0.4094	0.4755	0.4151	0.4822
0.45	0.4207	0.4886	0.4254	0.4942
0.50	0.4315	0.5012	0.4352	0.5054
0.55	0.4418	0.5131	0.4444	0.5161
0.60	0.4516	0.5246	0.4532	0.5264
0.65	0.4649	0.5399	0.4649	0.5399
0.70	0.4703	0.5463	0.4697	0.5455
0.75	0.4793	0.5567	0.4775	0.5546
0.80	0.4879	0.5667	0.4851	0.5634
0.85	0.4964	0.5766	0.4924	0.5719
0.90	0.5046	0.5861	0.4995	0.5802
0.95	0.5095	0.5918	0.5037	0.5850
1.00	0.5206	0.6047	0.5132	0.5961

Tabla 6.6. Estimaciones del modelo Euleriano para la orientación Z.

	ESTIMACIONES			
	$n=1.1,$ $C= 0.1734$	$n=1.15,$ $C= 0.1751$	$n=3.2,$ $C=0.1708$	$n=16.2,$ $C=0.2559$
% relleno	Eeq	Eeq	σ_{eq}	σ_{eq}
0.00	0.1734	0.1752	0.1708	0.2559
0.05	0.1800	0.1808	0.1708	0.2559
0.10	0.1877	0.1880	0.1709	0.2559
0.15	0.1963	0.1961	0.1712	0.2559
0.20	0.2056	0.2050	0.1718	0.2559
0.25	0.2156	0.2146	0.1729	0.2559
0.30	0.2262	0.2250	0.1745	0.2559
0.35	0.2376	0.2362	0.1769	0.2559
0.40	0.2498	0.2482	0.1802	0.2559
0.45	0.2627	0.2611	0.1846	0.2559
0.50	0.2765	0.2749	0.1905	0.2559
0.55	0.2911	0.2896	0.1980	0.2559
0.60	0.3067	0.3054	0.2076	0.2560
0.65	0.3232	0.3222	0.2198	0.2562
0.70	0.3634	0.3634	0.2590	0.2590
0.75	0.3646	0.3646	0.2604	0.2592
0.80	0.3792	0.3797	0.2787	0.2629
0.85	0.4002	0.4015	0.3096	0.2750
0.90	0.4225	0.4248	0.3488	0.3068
0.95	0.4462	0.4496	0.3991	0.3956
1.00	0.4714	0.4761	0.4644	0.6957

De los resultados anteriores se puede observar que los valores de las propiedades predichas por el modelo para 0% de relleno se encuentran por arriba de cero, lo cual debe ser en la realidad. Este problema se debe a que la constante matemática del número de Euler elevado a un valor de cero es igual a uno, por lo que los resultados obtenidos para 0% de relleno corresponden al producto de la constante experimental C y el módulo elástico o UTS de la materia prima. De igual manera se puede observar que los valores predichos para el 100% de relleno siguen siendo menores a los experimentales.

6.2.3 Modelo Tangencial

Este modelo considera la función trigonométrica tangente debido a la curva que describe dicha función, la cual se asemeja al comportamiento experimental de las piezas. De esta manera el modelo tangencial propuesto es:

$$E_{eq} = C \tan(V_m^n) E_s \quad (6-3)$$

donde E_{eq} y E_s son el módulo elástico equivalente y el módulo elástico de la materia prima respectivamente; C y n son constantes experimentales y V_m es el porcentaje de relleno de la pieza. Para el caso de la resistencia a la tensión (UTS) el modelo se aplica de la misma manera que el módulo elástico. Para este modelo se requieren dos puntos experimentales y al igual que en los anteriores, la solución numérica no es exacta por lo que se realizó el mismo procedimiento. Se realizaron estimaciones de los valores de C considerando un rango de valores de n . Una vez evaluada la función, en donde ésta pasara por cero o los valores de la función se aproximarán a éste se tomaron los valores de C y n correspondientes. Los resultados normalizados de las estimaciones realizadas utilizando el modelo tangencial se muestran en las Tablas 6.7 a 6.9 para las tres orientaciones de fabricación.

Tabla 6.7. Estimación para el Modelo Tangencial en orientación X.

	ESTIMACIONES			
	$n=0.26,$ $C=0.3422$	$n=0.26,$ $C=0.4426$	$n=0.3,$ $C=0.3561$	$n=0.2,$ $C=0.434$
% relleno	E_{eq}	σ_{eq}	E_{eq}	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.1691	0.2187	0.1535	0.2656
0.10	0.2096	0.2711	0.1951	0.3170
0.15	0.2395	0.3098	0.2262	0.3540
0.20	0.2645	0.3421	0.2526	0.3843
0.25	0.2867	0.3708	0.2762	0.4107
0.30	0.3070	0.3971	0.2980	0.4345
0.35	0.3260	0.4216	0.3185	0.4564
0.40	0.3440	0.4449	0.3382	0.4769
0.45	0.3613	0.4673	0.3572	0.4964
0.50	0.3780	0.4889	0.3757	0.5150
0.55	0.3975	0.5142	0.3975	0.5363
0.60	0.4103	0.5307	0.4119	0.5501
0.65	0.4322	0.5590	0.4367	0.5735
0.70	0.4415	0.5710	0.4473	0.5833
0.75	0.4568	0.5909	0.4650	0.5993
0.80	0.4721	0.6107	0.4827	0.6151
0.85	0.4873	0.6303	0.5005	0.6306
0.90	0.4995	0.6461	0.5147	0.6428
0.95	0.5177	0.6696	0.5363	0.6609
1.00	0.5329	0.6893	0.5545	0.6759

Tabla 6.8. Estimaciones para el Modelo Tangencial en orientación Y.

	ESTIMACIONES					
	$n=0.1,$ $C= 0.3249$	$n=0.1,$ $C=0.3774$	$n=0.15,$ $C= 0.3382$	$n=0.15,$ $C=0.3929$	$n=0.5,$ $C=0.4350$	$n=0.5,$ $C= 0.5052$
% relleno	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}	Eeq	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.2974	0.3454	0.2508	0.2914	0.0989	0.1149
0.10	0.3308	0.3842	0.2896	0.3363	0.1423	0.1653
0.15	0.3533	0.4104	0.3166	0.3678	0.1774	0.2061
0.20	0.3709	0.4308	0.3384	0.3930	0.2086	0.2423
0.25	0.3856	0.4479	0.3570	0.4146	0.2377	0.2760
0.30	0.3984	0.4627	0.3735	0.4338	0.2654	0.3082
0.35	0.4098	0.4759	0.3884	0.4512	0.2923	0.3395
0.40	0.4201	0.4880	0.4023	0.4673	0.3188	0.3703
0.45	0.4296	0.4990	0.4152	0.4823	0.3452	0.4010
0.50	0.4385	0.5093	0.4274	0.4964	0.3717	0.4318
0.55	0.4468	0.5189	0.4390	0.5099	0.3985	0.4629
0.60	0.4546	0.5280	0.4501	0.5228	0.4257	0.4945
0.65	0.4649	0.5399	0.4649	0.5399	0.4649	0.5399
0.70	0.4691	0.5448	0.4710	0.5470	0.4821	0.5599
0.75	0.4758	0.5527	0.4809	0.5586	0.5115	0.5941
0.80	0.4823	0.5602	0.4906	0.5698	0.5420	0.6295
0.85	0.4886	0.5675	0.5000	0.5807	0.5736	0.6663
0.90	0.4946	0.5745	0.5091	0.5914	0.6066	0.7046
0.95	0.4981	0.5785	0.5145	0.5976	0.6272	0.7285
1.00	0.5061	0.5878	0.5269	0.6120	0.6775	0.7869

Tabla 6.9. Estimación para el Modelo Tangencial en orientación Z.

	ESTIMACIONES			
	$n=0.5,$ $C= 0.3053$	$n=0.65,$ $C=0.3277$	$n=1.15,$ $C=0.2895$	$n=1.5,$ $C= 0.3316$
% relleno	Eeq	Eeq	σ_{eq}	σ_{eq}
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.05	0.0694	0.0471	0.0092	0.0037
0.10	0.0999	0.0746	0.0205	0.0105
0.15	0.1245	0.0983	0.0328	0.0193
0.20	0.1464	0.1201	0.0459	0.0297
0.25	0.1668	0.1410	0.0596	0.0417
0.30	0.1862	0.1613	0.0741	0.0550
0.35	0.2052	0.1814	0.0893	0.0697
0.40	0.2238	0.2015	0.1053	0.0857
0.45	0.2423	0.2219	0.1222	0.1033
0.50	0.2609	0.2427	0.1401	0.1224
0.55	0.2797	0.2640	0.1593	0.1433
0.60	0.2988	0.2860	0.1798	0.1663
0.65	0.3183	0.3089	0.2021	0.1917
0.70	0.3634	0.3634	0.2590	0.2590
0.75	0.3647	0.3650	0.2608	0.2612
0.80	0.3804	0.3846	0.2828	0.2883
0.85	0.4026	0.4128	0.3163	0.3305
0.90	0.4258	0.4430	0.3545	0.3805
0.95	0.4501	0.4754	0.3988	0.4410
1.00	0.4755	0.5105	0.4510	0.5165

Los resultados estimados muestran que los valores predichos para un 100% de relleno son mayores que el modelo lineal-exponencial aunque menores que los resultados experimentales. Los valores máximos estimados de este modelo y los dos anteriores no sobrepasan el 60% del valor de la materia prima tanto en el módulo como en el UTS. Además, se puede observar que para los valores en las orientaciones X y Y, los valores de C y n, son parecidos o muy cercanos entre sí, sin embargo, para el caso de la orientación en Z, estos valores de C y n cambian con respecto a las orientaciones anteriores, siendo éstos más grandes.

6.2.4 Análisis comparativo de modelos

En las Figuras 6.3 a 6.8 se comparan los resultados de los diferentes modelos teórico-experimentales y los resultados experimentales, para las tres direcciones de fabricación, y para el valor UTS y el módulo elástico.

6.2.4.1 Orientación X

Como se aprecia en la Figura 6.3, los modelos que mejor reproducen los resultados experimentales para el UTS con orientación X son el modelo de Ley de Mezclas con eficiencia, el de Gibson & Ashby y el de Ravichandran Lower. Se observa que la curva del modelo de Gibson & Ashby se traslapa en los dos puntos intermedios y en los extremos se aleja, mientras que el de Ley de Mezclas con eficiencia se encuentra dentro de un rango aceptable y cercano a todos los puntos experimentales. En cuanto al modelo de Ravichandran Lower, éste va cercano a los valores intermedios, sin embargo, para el final de la curva éste se aleja considerablemente de lo experimental, aunque la tendencia de esta curva es similar a la obtenida en los ensayos únicamente desfasada en los porcentajes de relleno.

En el caso de los modelos de Ley de Mezclas y Ravichandran Upper, éstos no reproducen el comportamiento de los resultados experimentales, ya que sus valores se encuentran muy alejados de los obtenidos experimentalmente. Adicionalmente, el comportamiento de las curvas descritas por estos modelos no se apega al comportamiento experimental. En cuanto a los nuevos modelos propuestos, ninguno de los tres describe de manera precisa la tendencia del comportamiento experimental presentado. Los valores de las curvas estimadas se traslapan en alguno de los puntos experimentales, sin embargo el resto de los puntos de las curvas se alejan quedando por debajo de los puntos experimentales con mayor porcentaje de relleno. Además, las curvas de cada uno de los modelos se traslapan entre ellas en los valores con porcentajes de relleno mayor, lo cual indica que la variación que se presenta al utilizar cualquiera de los valores de la constante experimental n obtenidos, no es significativa.

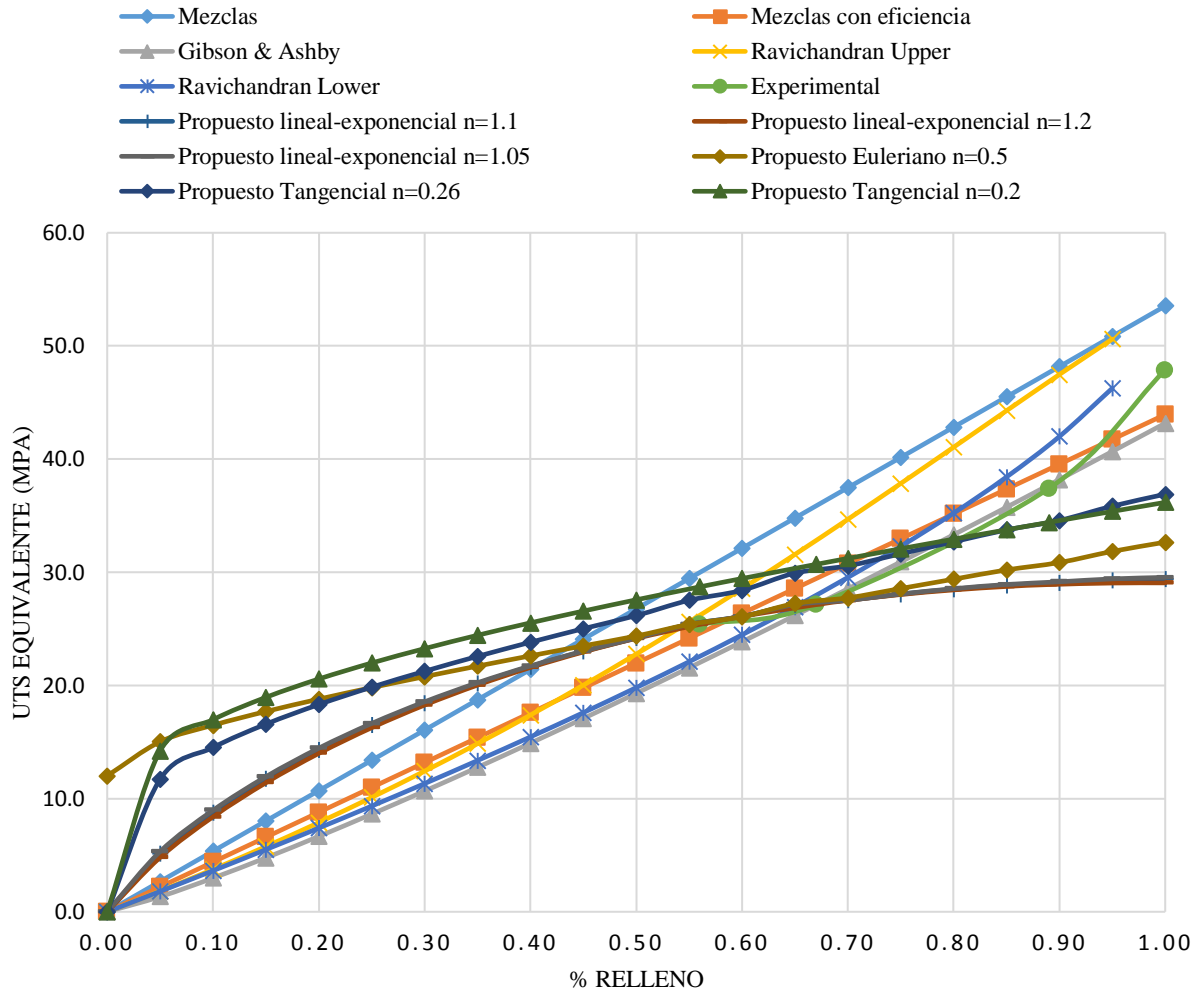
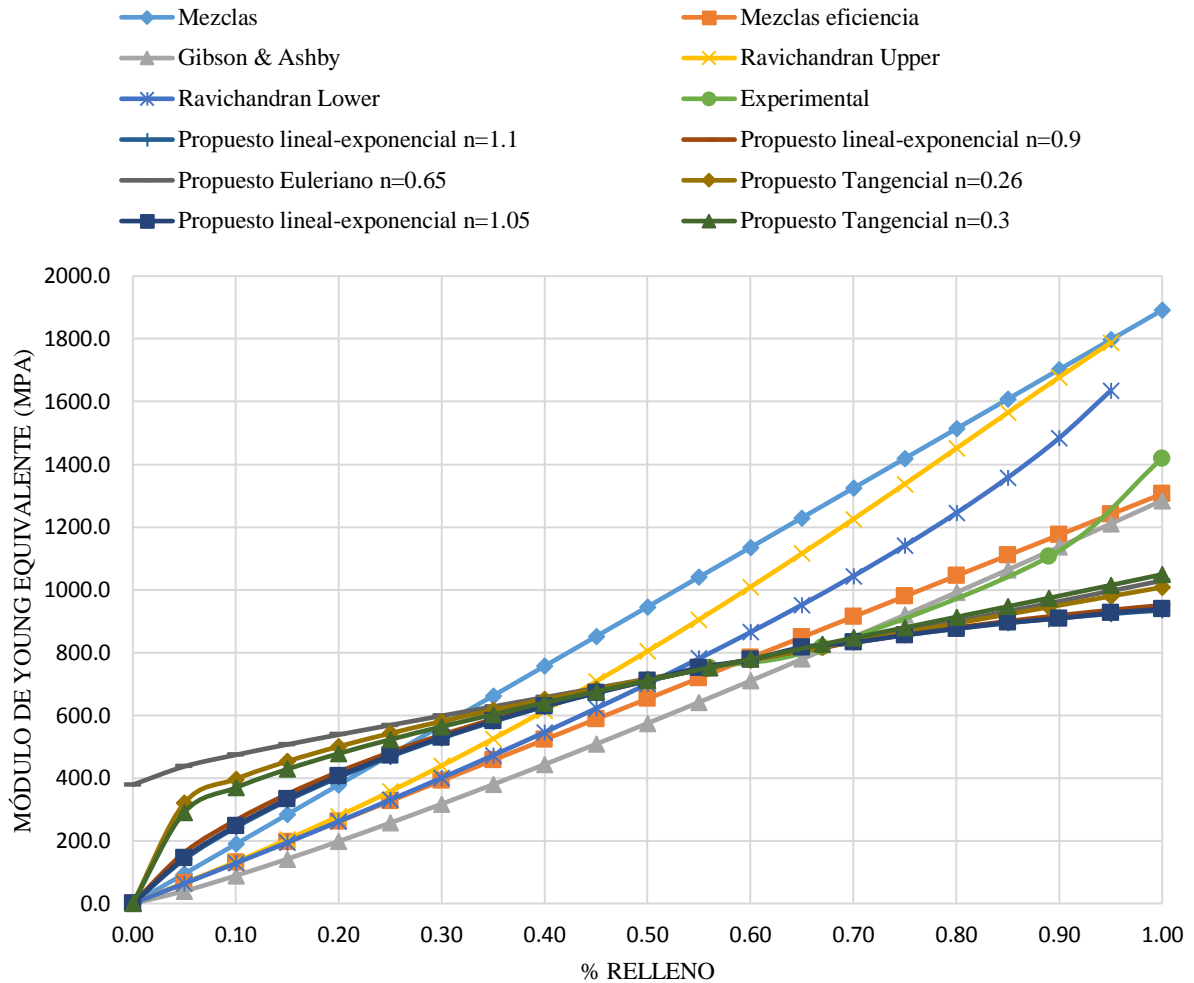


Figura 6.3. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación X.

En el caso del módulo elástico para la orientación X, la Figura 6.4 muestra que los modelos que mejor reproducen el comportamiento real de las piezas son el modelo de Ley de Mezclas con eficiencia y el de Gibson & Ashby. Por otro lado, los modelos que se encuentran más alejados del comportamiento experimental son la Ley de Mezclas y el de Ravichandran. En cuanto a los modelos propuestos, el modelo Tangencial las curvas únicamente pasan por un punto intermedio de los resultados experimentales para después caer y quedar por debajo de los valores con mayor porcentaje de relleno. En cuanto a las curvas del modelo Euleriano, éstas pasan por el primer punto experimental y su tendencia sigue creciendo aunque con una pendiente muy pequeña por los que de igual manera se quedan por debajo de los últimos valores experimentales. En el caso del modelo lineal-exponencial, de igual manera las curvas pasan por el primer punto experimental y después la curva cae para quedar mucho más abajo que los modelos anteriores.



6.4. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación X.

La Tabla 6.10 presenta la evaluación del error de predicción para cada uno de los modelos teórico-experimental en relación a los resultados experimentales. Como se puede apreciar en esta Tabla 6.10, los modelos con mayor precisión con respecto al UTS son el de Ley de Mezclas con eficiencia y el de Gibson & Ashby ya que éstos tienen errores promedio de 6.08% y 6.00% para el UTS respectivamente. Los modelos de menor precisión es el de Ley de Mezclas ya que cuenta con un error promedio de 22.35% y el Ravichandran Upper con un error de 15.27%, además del modelo propuesto Lineal-exponencial el cual cuenta con un error de 15.22%.

En el caso del módulo elástico, los modelos con mayor precisión son el de Ley de Mezclas con eficiencia y el modelo Gibson & Ashby, tal como en el caso del UTS. Dichos modelos presentan errores promedio de 6% aproximadamente. Los modelos que presentan los

mayores errores para esta propiedad son el de Ley de Mezclas con un error de 45.41% y el de Ravichandran Upper con un error de 37.02%.

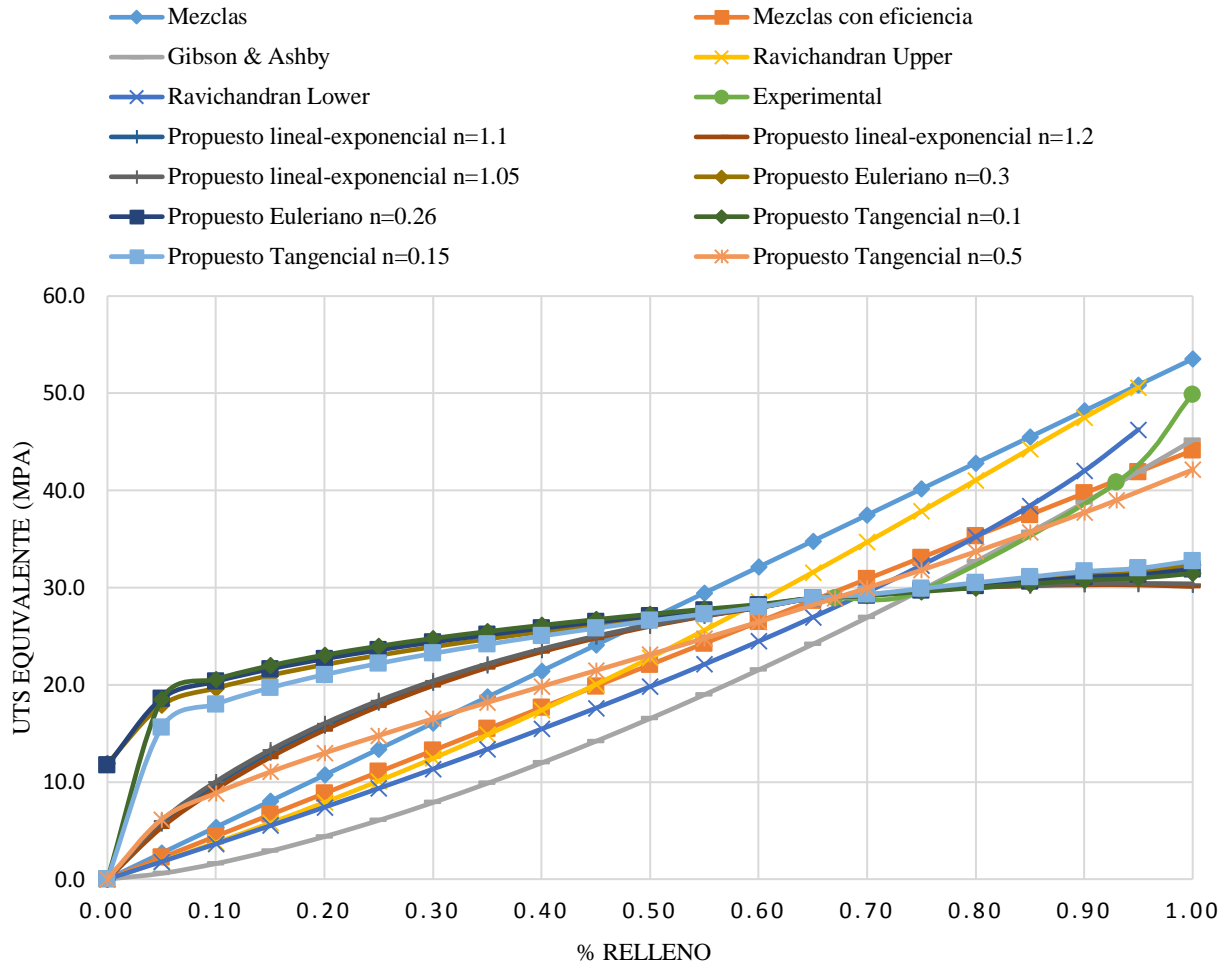
Esto demuestra que aunque los valores del error del modelo de Gibson & Ashby intermedios son mucho menores que los de Mezclas con eficiencia, los valores de los extremos tienen mayor influencia ya que se alejan considerablemente de los valores experimentales y la curva de Mezclas con eficiencia como se comentó anteriormente siempre se encuentra en un rango cercano a los puntos experimentales.

Tabla 6.10. Error de predicción para la orientación X.

Error de predicción (%)																
Relleno (%)	Mezclas		Mezclas con eficiencia		Gibson & Ashby		Ravichandran Lower		Ravichandran Upper		Lineal-Exponencial		Euleriano		Tangencial	
	UTS	E	UTS	E	UTS	E	UTS	E	UTS	E	UTS	E	UTS	E	UTS	E
56	18.05	40.88	3.10	2.76	13.29	12.88	11.15	6.03	3.14	23.08	5.6e-14	0.00	0.00	0.00	13.06	0.00
67	32.14	55.16	8.47	7.10	0.09	1.22	3.05	21.00	20.88	41.94	9.2e-14	8.34e-14	0.36	0.21	13.11	0.09
89	27.37	52.25	4.54	5.09	0.81	1.47	10.25	31.80	25.23	49.70	22.26	18.00	17.49	13.46	8.01	14.55
100	11.82	33.36	8.22	7.95	9.82	9.43	11.58	33.08	11.81	33.35	38.61	34.09	31.78	27.43	24.43	28.93
Promedio	22.35	45.41	6.08	5.73	6.00	6.25	9.01	22.98	15.27	37.02	15.22	13.02	12.41	10.28	14.65	10.89

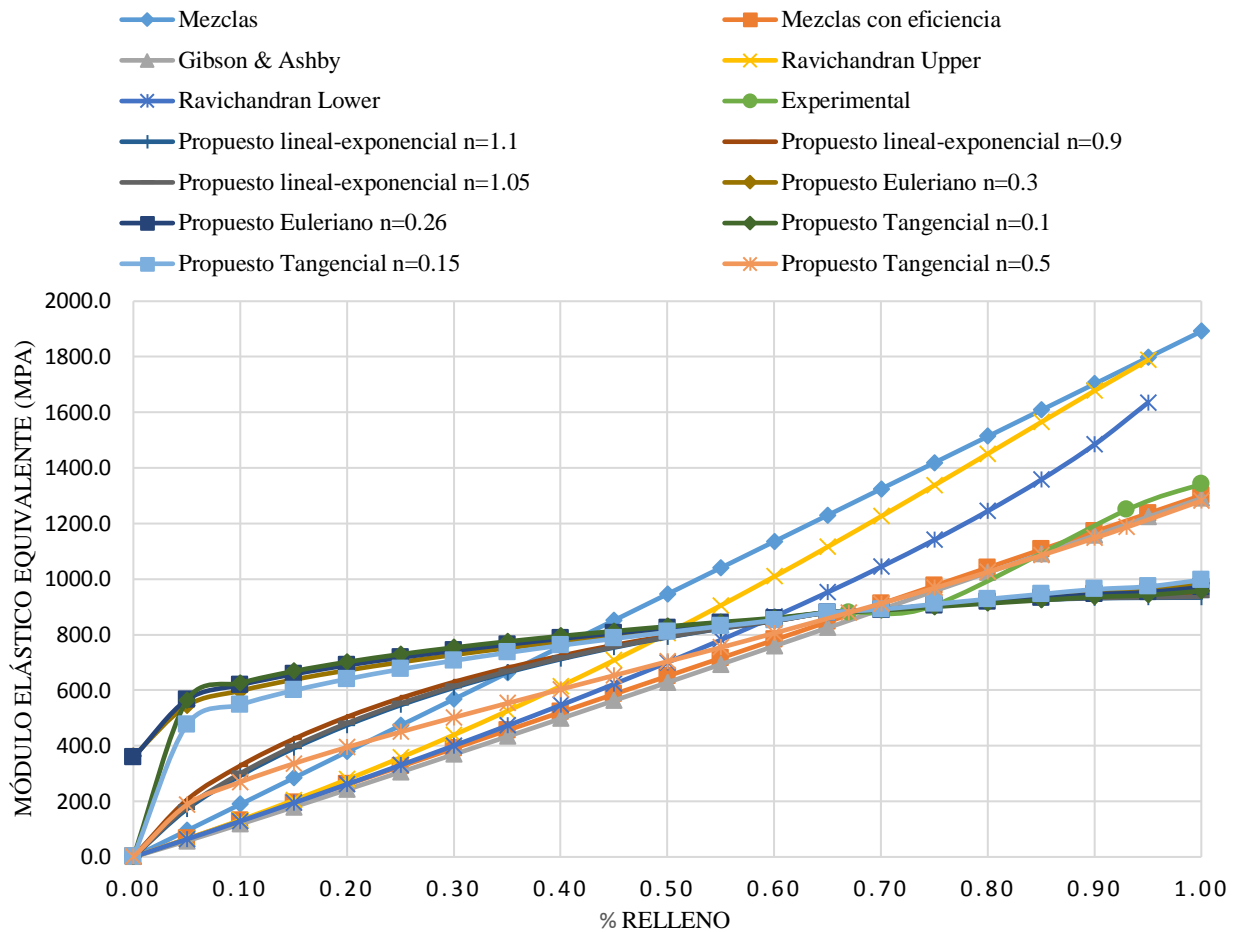
6.2.4.2 Orientación Y

Con respecto a la orientación en Y, los valores de los modelos analíticos obtenidos para el UTS se presentan en la Figura 6.5, en donde se observa que los modelos que mejor reproducen el comportamiento experimental son el de Ravichandran Lower, el de Mezclas con eficiencia, el de Gibson & Ashby y el propuesto Tangencial con $n=0.5$, los cuales se encuentran cercanos a la curva experimental. Para el caso del modelo de Gibson y Ashby, éste se asemeja al comportamiento de la orientación en X, en donde la curva reflejada se traslapa en los puntos intermedios y se aleja en los extremos. Por otro lado, los modelos de mezclas, el de Ravichandran Upper y los modelos propuestos restantes, no reproducen adecuadamente el comportamiento experimental, sino que sus curvas se encuentran alejadas de los valores experimentales. Además, en el caso de los modelos propuestos, para el lineal-exponencial la tendencia y pendiente de las curvas pasan cercanas a los primeros dos puntos experimentales al igual que las curvas del modelo Euleriano. De igual manera que en la orientación en X, las curvas de los modelos propuestos en los mayores porcentajes de relleno se encuentran por debajo de los experimentales y las tendencias de las mismas no cumplen con el comportamiento real. Sin embargo, para el caso del modelo Tangencial con el valor de n igual a 0.5 la curva además pasa por el primer punto experimental y en los puntos posteriores queda muy cercana.



6.5. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Y.

En cuanto al módulo elástico para la orientación de fabricación Y, en la Figura 6.6 se puede apreciar que los modelos que se acercan con mucha precisión a la curva experimental son el de mezclas con eficiencia, el de Gibson & Ashby y el Tangencial con $n=0.5$, los cuales se traslapan con ésta o quedan muy cercano a la misma. Por el contrario, los otros modelos analíticos se alejan significativamente de dicha curva, ya que para el caso del modelo de Mezclas, éste cuenta con una gran diferencia ya que los valores obtenidos están muy por encima de los experimentales. Para el caso de los modelos propuestos, las curvas del modelo lineal-exponencial y del modelo Euleriano pasan por los primeros dos puntos y después se alejan considerablemente del comportamiento experimental. Para las curvas de los valores de n restantes del modelo Tangencial, éstas se encuentran por debajo de los valores experimentales y sus curvas no concuerdan con el comportamiento real al igual que en los dos modelos propuestos anteriormente mencionados.



6.6. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Y.

En la Tabla 6.11 se presentan los valores del error de predicción obtenido con los diferentes modelos en comparación con los resultados experimentales, y para la orientación de fabricación Y. De esta tabla se puede observar que el caso del UTS, el modelo con el menor error de predicción es el de Gibson & Ashby, cuyos valores en los puntos intermedios son menores al 0.5%, y en los extremos son de 11% en promedio aproximadamente, y un error promedio global de 5.68%. Además, este modelo se ajusta con mucha precisión a la curva experimental. En el caso del modelo de mezclas con eficiencia y Ravichandran Lower, los errores promedio 6.46% y 7.00%, respectivamente, lo cual para este caso es un valor aceptable de error. De igual manera para el modelo propuesto Tangencial con n igual a 0.5 se encontró un error promedio de 6.79%, lo cual es muy cercano al error de los modelos anteriores, lo que da una buena perspectiva a la predicción analítica.

Para el módulo elástico, los modelos que se encuentran muy cercanos a la curva experimental son el de Gibson & Ashby, el de Mezclas con eficiencia y el propuesto Tangencial con n igual a 0.5, los cuales presentan errores promedio de 4.24%, 3.70% y 4.10% respectivamente. Esto demuestra que para este caso, el que se ajusta mejor para el comportamiento del módulo elástico es el modelo de Mezclas con eficiencia. Sin embargo, el modelo propuesto Tangencial con n igual a 0.5 presenta un error bastante aceptable ya que se encuentra por debajo del error promedio de Gibson & Ashby, además de ser menor al 5%. En el caso de los modelos propuestos restantes, éstos se ajustan bien a los primeros dos puntos experimentales, sin embargo se alejan considerablemente de los últimos dos. Por el contrario, el modelo que no se ajusta para nada a la curva experimental es el de Mezclas, ya que como se observó en las Figuras anteriores, éste tiene un comportamiento lineal mientras que la curva experimental presenta un comportamiento un tanto exponencial por lo que el error promedio en este modelo llegan a ser de 45.66%.

Tabla 6.11. Error de predicción para la orientación Y.

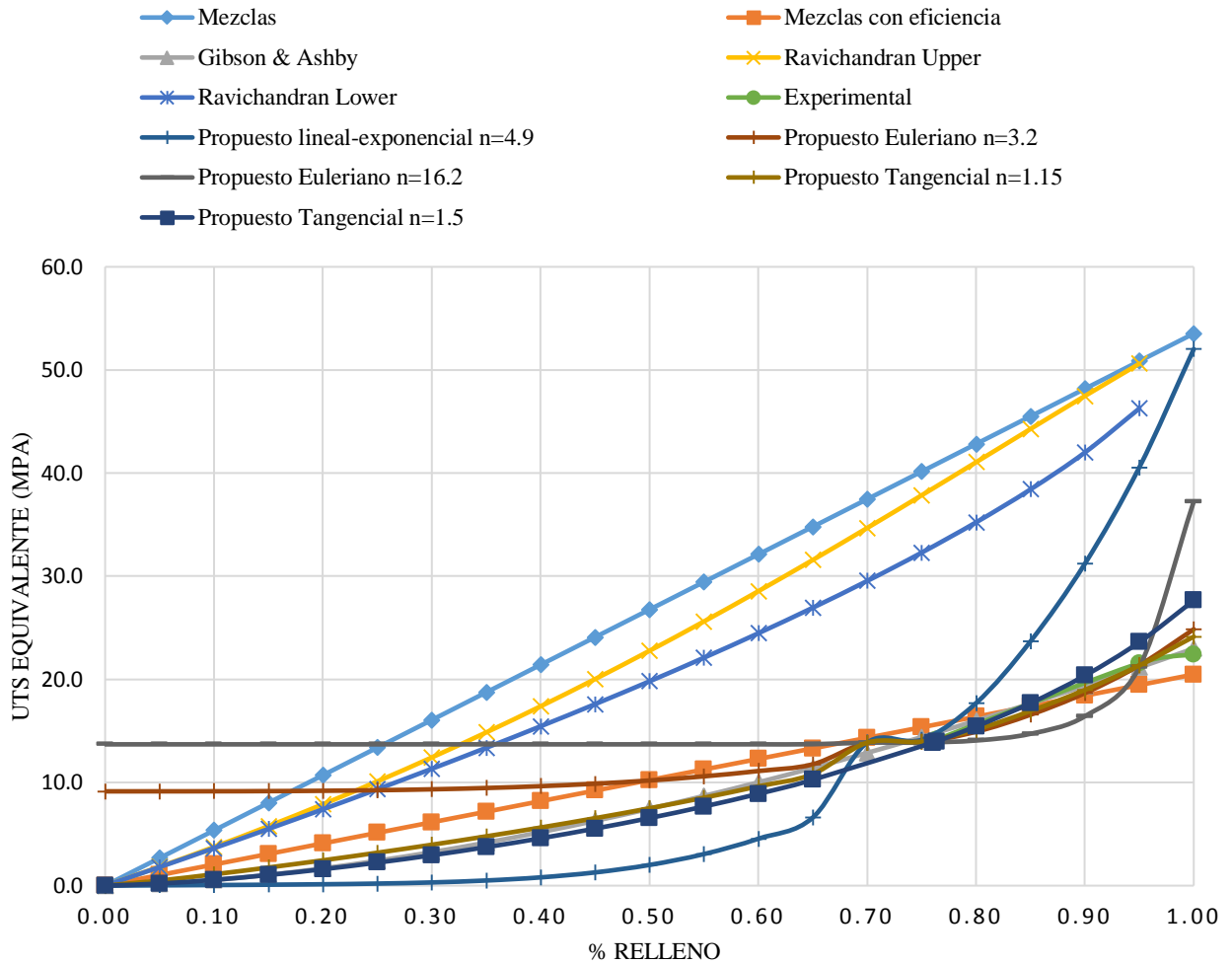
Error de predicción (%)																		
% relleno	Mezclas		Mezclas con eficiencia		Gibson & Ashby		Ravichandran Lower		Ravichandran Upper		Lineal-Exponencial		Euleriano		Tangencial n=0.5		Tangencial	
	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq
67%	24.09	44.13	2.27	0.86	12.60	3.23	3.24	12.39	13.51	31.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.91	0.00
75%	35.27	56.70	11.49	7.79	0.24	5.69	8.78	26.02	27.51	47.71	0.00	0.00	0.40	0.14	0.74	0.48	13.26	0.48
93%	21.96	40.85	0.52	3.11	0.43	4.18	8.87	25.73	20.94	39.68	25.45	24.82	22.39	22.83	21.63	22.07	32.52	22.07
100%	7.33	40.94	11.54	3.05	9.47	3.84	7.10	40.64	7.32	40.93	39.07	29.67	35.10	26.63	34.32	25.74	43.45	25.74
Promedio	22.16	45.66	6.46	3.70	5.68	4.23	7.00	26.20	17.32	40.04	16.13	13.62	14.47	12.40	6.79	4.10	14.17	12.07

6.2.4.3 Orientación Z

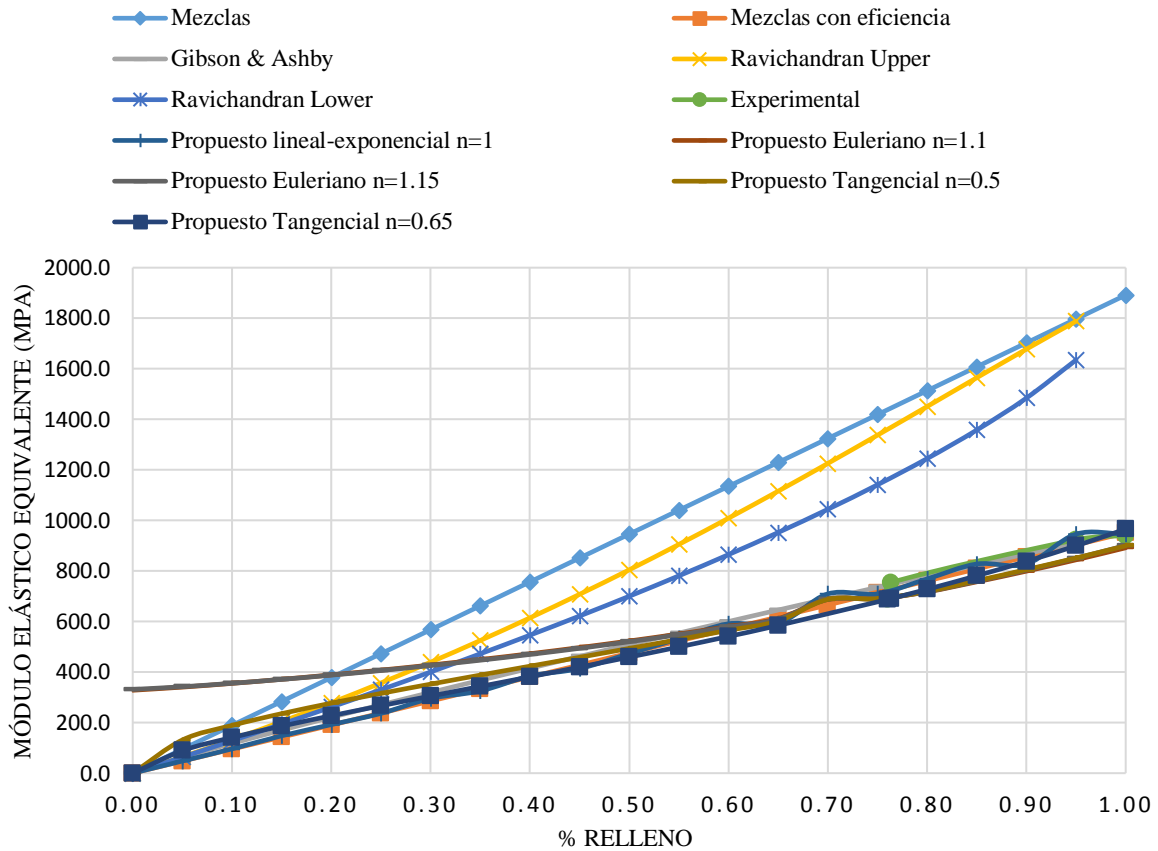
En la Figura 6.7 correspondiente al comportamiento del UTS para la orientación de fabricación Z, se puede observar que la curva experimental se traslapa con distintos modelos analíticos y no solo con el de Gibson & Ashby. Los modelos que se encuentran significativamente por encima de la curva experimental son el de Mezclas y las dos curvas de Ravichandran. También se muestra que la curva del modelo propuesto lineal-exponencial tiene un comportamiento completamente diferente del comportamiento experimental como la curva del modelo Euleriano con n igual a 16.2. Esto se puede deber a que el comportamiento real no es tan estable como para las orientaciones de fabricación en X y Y.

Por otro lado los modelos propuestos se encuentran más cercanos a los valores experimentales que en las orientaciones anteriores, tal es el caso de las curvas del modelo Tangencial con n igual 1.15 e igual a 1.5. De igual manera, la curva del modelo Euleriano con n igual a 3.2 se encuentra muy cercana a los valores experimentales. El traslape de los modelos propuestos se debe a que éstos presentan valores mucho menores con respecto a la

materia prima, lo que ocurre con las piezas en esta dirección, las cuales presentan muy poca resistencia a comparación de las anteriores.



6.7. UTS vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Z.



6.8. Módulo elástico equivalente vs. porcentaje de relleno para todos los modelos y orientación Z.

Con respecto al Módulo Equivalente, se puede apreciar en la Figura 6.8 que las curvas de los modelos de Mezclas con eficiencia, Gibson & Ashby y todos los modelos propuestos se empalman con la curva experimental, mientras que los modelos que no reflejan dicho comportamiento son el de Mezclas y las curvas de Ravichandran. Para el modelo lineal-exponencial con n igual a 1 y el modelo Euleriano con n igual 1.15, aunque las curvas se encuentran cerca a los datos experimentales, éstas presentan ligeras oscilaciones que no corresponden al comportamiento real. Por otro lado, la curva del modelo Tangencial con n igual a 0.5 refleja un comportamiento que se ajusta muy bien al experimental quedando muy cerca de los puntos experimentales. La precisión de los modelos propuestos en esta orientación, se debe a que los valores experimentales son mucho menores por lo que se pueden acoplar de una mejor manera, además de que la tendencia y pendiente del comportamiento de las piezas finales son muy distintos en comparación con las orientaciones anteriores. En la Tabla 6.12 se presentan los resultados de las discrepancias obtenidos de todos los modelos para las propiedades estructurales.

Tabla 6.12. Error de predicción para la orientación Z.

Error de predicción (%)																
% relleno	Mezclas		Mezclas con eficiencia		Gibson & Ashby		Ravichandran Lower		Ravichandran Upper		Lineal-Exponencial		Euleriano		Tangencial	
	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq	UTS	Eeq
76.03%	193.59	109.24	12.28	5.16	6.22	8.30	137.14	69.01	177.74	97.95	0.01	3.21	0.00	0.002	0.01	0.003
76.35%	188.91	91.60	10.49	3.70	4.80	0.87	133.69	54.98	173.62	81.46	0.01	5.90	1.93	8.49	1.16	8.39
95%	135.76	94.60	9.84	2.20	1.94	1.28	114.48	77.04	134.59	93.64	88.02	2.42	1.82	7.90	9.43	2.61
100%	138.77	101.34	8.69	1.19	2.56	1.66	138.25	100.9	138.74	101.32	132.03	0.67	66.10	4.13	23.33	2.78
Promedio	164.25	99.20	10.32	3.06	3.88	3.03	130.89	75.48	156.17	93.59	55.02	3.05	17.49	5.13	8.48	3.45

Como se presenta en la Tabla 6.12 con respecto al UTS, los errores que se presentan para el modelo de Mezclas son extremadamente grandes ya que el valor promedio del error es de hasta un 164.25%, al igual que los de Ravichandran que andan en un promedio de 150% . Si bien se había mencionado que las curvas de los modelos propuestos eran mucho más cercanas a la experimental, sin embargo, los errores obtenidos en esta propiedad demuestran que el modelo lineal-exponencial es el más alejado ya que cuenta con un error de predicción promedio de 55.02%. El modelo Tangencial es el que tiene una mayor precisión ya que cuenta con un error promedio de 8.48%. Para esta propiedad se observa que el modelo que se apega mejor a la curva experimental obteniendo los menores errores es el de Gibson & Ashby con un error promedio de 3.88%.

Por otra parte, los modelos que demuestran mayor precisión para el módulo elástico son el de Mezclas con eficiencia, Gibson & Ashby, el Lineal-Exponencial y el Tangencial, los cuales tienen un error promedio de 3.06%, 3.03%, 3.05% y 3.45% respectivamente. Los que tienen mayores errores son los mismos modelos que para el caso del UTS los cuales andan alrededor de 90%.

6.3 Experimental, teórico, numérico

En la Figura 6.9 se muestran los resultados obtenidos de la literatura, experimental y teóricos para el UTS en todas las direcciones de fabricación. Mientras que en la Figura 6.10 se muestran los resultados de la literatura, experimental, numéricos y teóricos para el módulo elástico.

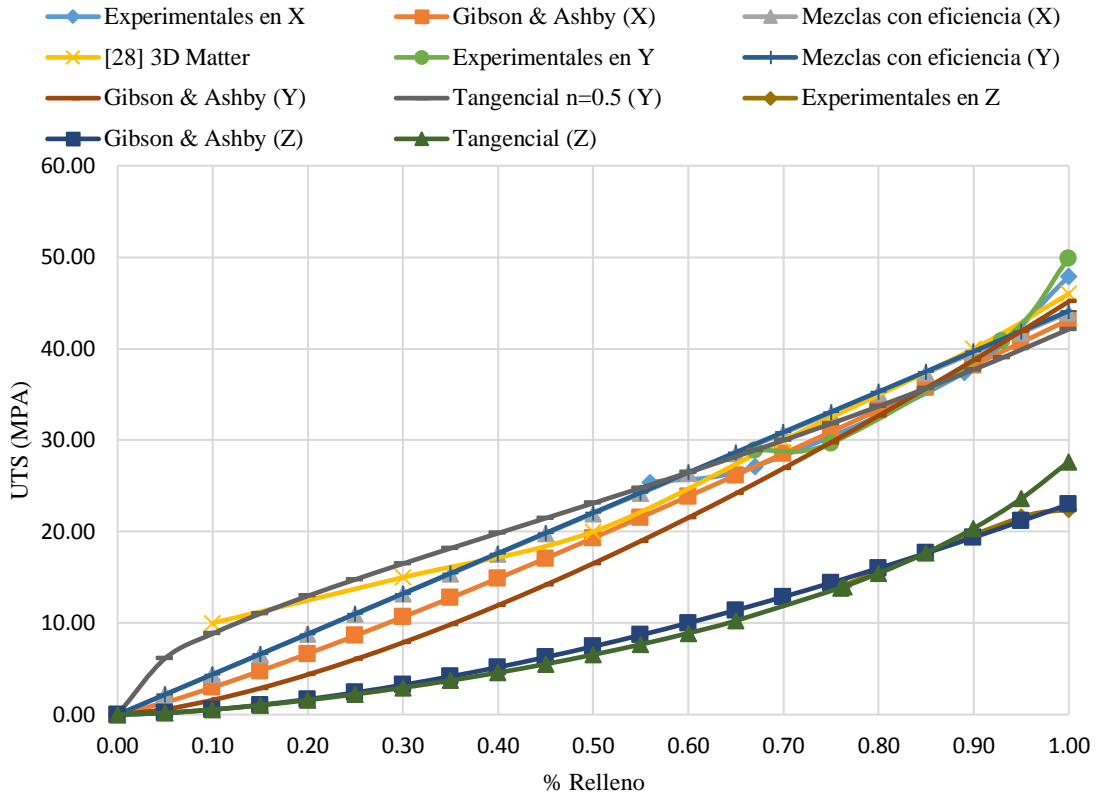


Figura 6.9. UTS vs. porcentaje de relleno para todas las orientaciones de fabricación, resultados de literatura y modelos analíticos principales para cada orientación.

En la Figura 6.9 se muestra que los resultados tanto de los modelos analíticos con mayor precisión como los de la literatura se encuentran dentro de un rango aceptable a comparación de los resultados experimentales. También se puede observar que las orientaciones en X y Y, tienden a comportarse de la misma manera, por lo que los modelos analíticos no presentan mucha variación entre las dos orientaciones. Cabe mencionar que las diferencias principales de los modelos analíticos destacan en el comportamiento descrito por las curvas en valores de porcentaje de relleno menores a 40%.

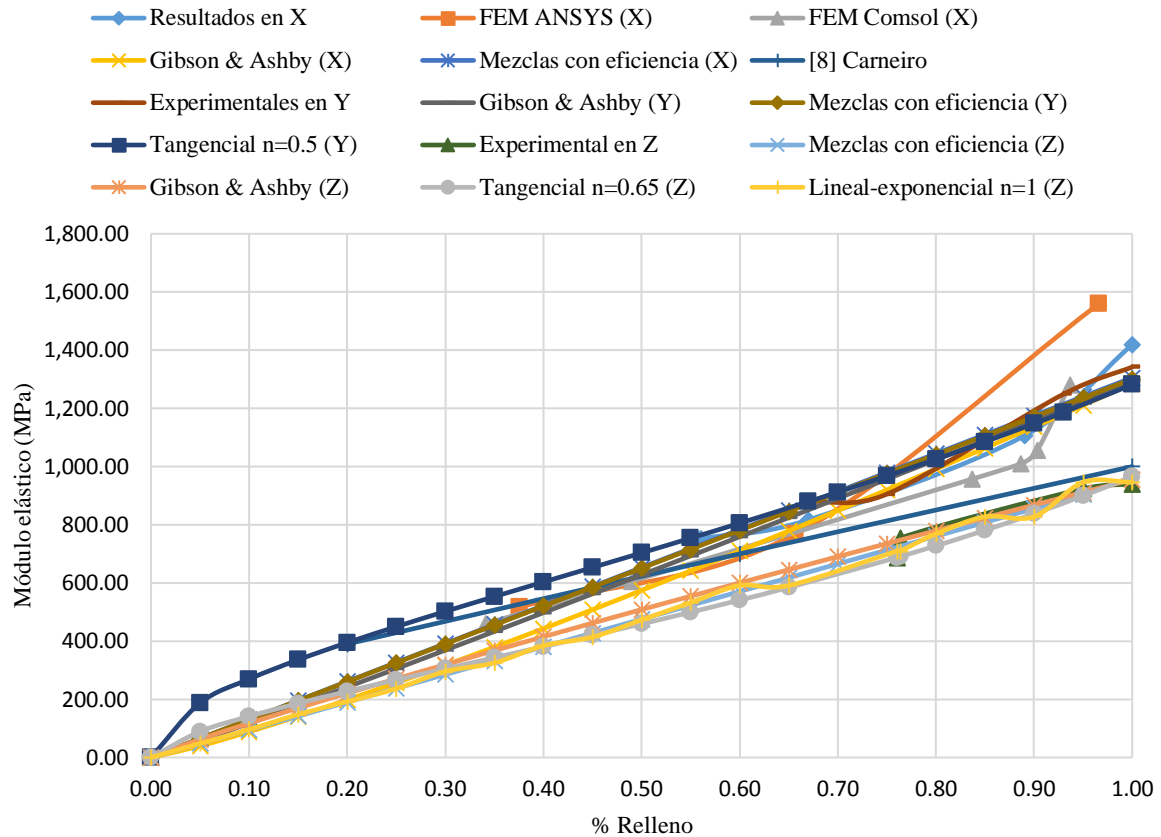


Figura 6.10. Módulo elástico vs. porcentaje de relleno para todas las orientaciones de fabricación, resultados de literatura y modelos analíticos principales para cada orientación.

En la Figura 6.10 se puede observar que los resultados del análisis numérico presentan resultados prometedores ya que van en la dirección correcta en la predicción del comportamiento mecánico de las piezas finales. Además se muestra que los modelos propuestos y los modelos analíticos utilizados describen de manera precisa el comportamiento real para todas las orientaciones de fabricación.

6.4 Discusión

De acuerdo al análisis de los resultados, se puede decir que los resultados obtenidos tanto experimentalmente, como analítica y numéricamente son congruentes entre sí, y dan una aportación positiva al estudio de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante el Modelado por Deposición Fundida. Para el caso experimental, los resultados fueron convincentes y capaces de reflejar con gran precisión el comportamiento de las piezas ya que se demostró que comparados con datos experimentales de la literatura éstos se encuentran dentro de rangos aceptables. Del mismo modo los resultados fueron capaces de aclarar que ciertos parámetros de fabricación no son lo suficientemente influyentes en el comportamiento

mecánico final de las piezas y resaltaron los parámetros que tienen gran importancia a la hora de su fabricación.

En el caso de los modelos analíticos, es necesario el perfeccionamiento de dichos modelos, ya que si bien cumplen con la tendencia experimental aun no son lo suficientemente confiables para poder predecir las propiedades finales. Esto debido a que los errores obtenidos no son lo suficientemente pequeños y a que el comportamiento final es variable dependiendo de muchos factores externos. Considerando los modelos propuestos, se encontraron algunos que cumplen con el comportamiento experimental, sin embargo es necesario trabajar más en su desarrollo para poder lograr un modelo robusto y confiable.

Considerando los modelos y simulación numérica, estos lograron reflejar en cierta manera el comportamiento de las piezas variando los parámetros de fabricación. Sin embargo, como ya se ha mencionado en casos anteriores, se necesita mayor investigación para poder desarrollar un modelo que sea capaz de integrar el concepto de adhesión de las capas y el perímetro utilizado en la fabricación de piezas mediante esta tecnología.

Conclusiones

Con 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 del proceso estudiados se encuentran el espesor de capa, la orientación de fabricación, el arreglo del relleno y el porcentaje de relleno. Las propiedades mecánicas consideradas en el estudio fueron la resistencia última a la tensión, el módulo elástico, y elongación máxima a la ruptura. La metodología utilizada contempló pruebas experimentales, desarrollo de modelos teórico-experimentales, y el desarrollo de modelos numéricos. Los resultados demostraron que el comportamiento de los valores experimentales se asemeja a los encontrados en la literatura; además, los resultados analíticos concuerdan con los resultados experimentales y los resultados numéricos reflejaron un comportamiento muy cercano al real.

En general se puede decir que los resultados del comportamiento mecánico de las piezas FDM, permiten la toma de decisiones al momento de elegir los parámetros de fabricación de acuerdo a las condiciones o requerimientos de desempeño mecánico particulares de la pieza o componente en cuestión.

Comportamiento mecánico de probetas FDM

Se realizaron ensayos a tensión a los conjuntos de probetas fabricadas con diferentes valores de parámetros del proceso FDM y utilizando PLA como materia prima. Los resultados experimentales demostraron que los parámetros de más influencia en la resistencia a la tensión y el módulo elástico son la orientación de fabricación y el porcentaje de relleno. El espesor de capa y el arreglo del relleno mostraron poca influencia en dichas propiedades estructurales. El porcentaje de relleno tiene una influencia directa no lineal en las propiedades estructurales; i.e. a mayor porcentaje de relleno mayor el valor de las propiedades estructurales. Por otro lado los resultados experimentales también demostraron que en el caso de las probetas fabricadas con un 100% de relleno (probetas sólidas), sus propiedades estructurales son menores a la materia prima. Estos resultados demuestran que aun cuando los componentes FDM sean fabricados con 100% de relleno, sus propiedades estructurales no corresponderán a las propiedades de la materia prima debido a la influencia que tiene la unión entre capas en el desempeño estructural.

La orientación de fabricación tiene un efecto de reducción de las propiedades estructurales en la dirección normal al plano de la capa de material (dirección Z). En el plano de la capa (plano X-Y) las propiedades estructurales son prácticamente iguales, pero en la dirección normal al plano, dichas propiedades son menores. Este comportamiento de propiedades reducidas en dirección Z corresponde a una anisotropía normal, y se debe a que en esta dirección la adhesión entre capa y capa influyen directamente en las propiedades estructurales; entre más débil sea la unión entre capas, menor será la resistencia a la tensión y modulo elástico del componente en la dirección normal a las capas.

En el caso de la elongación máxima a la ruptura, los resultados experimentales mostraron que no existe una influencia notable de los parámetros del proceso en los valores de la elongación. La elongación no se ve afectada por los valores de los parámetros del proceso. Sin embargo, en dirección Z la elongación mostro valores reducidos debido al efecto de unión entre capas.

En cuanto al porcentaje de relleno, se encontró que los valores nominales elegidos para la fabricación de las probetas no coinciden con el porcentaje de relleno de la pieza final. Esto es debido a que el perímetro de las piezas no está considerado dentro del porcentaje de relleno nominal, por lo que éste tiene una gran influencia en el porcentaje de relleno real y en la rigidez de las piezas finales.

Modelos teórico-experimentales

Se realizaron estimaciones del comportamiento experimental con diferentes modelos analíticos y se propusieron tres modelos con el fin de poder predecir el comportamiento mecánico final real. Los resultados demostraron que es posible desarrollar un modelo que ayude a predecir las propiedades finales de las piezas. Sin embargo, para esto es necesario un análisis más completo, es decir, perfeccionarlos y analizarlos con más puntos experimentales para que los modelos desarrollados puedan ser lo suficientemente confiables y robustos...Se encontró que los modelos más precisos para todos los casos fueron el de Gibson & Ashby y el de Ley de Mezclas con eficiencia, los cuales presentaron errores de alrededor de 6%.

En cuanto a los modelos propuestos, se encontraron algunas diferencias en el comportamiento final descrito en comparación de los resultados experimentales. Sin embargo, para algunos casos el modelo Tangencial fue el que se acercó más a las tendencias y valores encontrados.

Modelos numéricos

Se realizó un análisis por elemento finito del comportamiento de una probeta con diferentes porcentajes de relleno simulando un ensayo a tracción. Los resultados encontrados reflejaron un comportamiento similar al comportamiento experimental ya que a mayor porcentaje de relleno mayor es el módulo elástico de la pieza final. Sin embargo se encontraron diferencias entre los dos software utilizados (ANSYS y Comsol) debido a diversos factores, uno de los cuales fueron las consideraciones realizadas al momento de diseñar los modelos CAD, entre otras. No obstante, los resultados marcaron una pauta positiva en la predicción de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva.

Contribuciones

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

- ❖ Se logró caracterizar la materia prima PLA del proceso FDM utilizado.

- ❖ Se logró medir y determinar el porcentaje de relleno real en las piezas fabricadas mediante FDM.
- ❖ Se lograron obtener las propiedades mecánicas de probetas fabricadas para diferentes valores de porcentajes de relleno y otros parámetros de fabricación.
- ❖ Se lograron evaluar la influencia de los parámetros del proceso en el desempeño mecánico final de las piezas FDM.
- ❖ Se desarrollaron modelos MEF para simular y analizar el comportamiento mecánico de piezas FDM.
- ❖ Se analizaron y desarrollaron modelos teórico-experimentales para determinar y predecir el comportamiento mecánico de piezas FDM.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se consideran las siguientes actividades:

- Analizar las propiedades estructurales de probetas fabricadas con valores menores de porcentajes de relleno y variando el número de capas de perímetro. Lo anterior para complementar la información experimental y poder analizar en todo el rango de valores del porcentaje de relleno.
- Mejorar el diseño y consideraciones realizadas en los modelos utilizados para el análisis por elemento finito para brindar mayor precisión en los resultados.
- Realizar un estudio más profundo del comportamiento mecánico de piezas FDM que conduzca al desarrollo de modelos matemáticos más robustos para la predicción de dicho comportamiento. Es decir, realizar un estudio a piezas con valores menores de porcentaje de relleno nominal para poder contar con una perspectiva más amplia del comportamiento en general.

Referencias

- [1] Steve Upcraft Richard Fletcher (2003), “The rapid prototyping technologies”, *Assembly Automation*, Vol. 23 pp. 318-330.
- [2] Anna Bellini Selçuk Güçeri, (2003), “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9 Iss 4 pp. 252 – 264.
- [3] Steffany N. Cerda-Avila, Hugo I. Medellín-Castillo, Dirk F. de Lange, (2017), “Análisis experimental y simulación numérica del desempeño estructural de probetas FDM con diferentes porcentajes de relleno”, *Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM*.
- [4] Samuel H. Huang, Peng Liu, Abhiram Mokasdar, Liang Hou, (2013), “Additive manufacturing and its societal impact: a literature review”, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 67 pp. 1191-1203.
- [5] Zaragoza Siqueiros Jorge, (2014), “Revisión y análisis de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido”, *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría*.
- [6] Nannan Guo, Ming C. Leu, (2013), “Additive manufacturing: technology, applications, and research needs”, *Front. Mech. Eng.*, Vol. 8 Iss. 3 pp. 215-243. [4] Jonathan Torres, Matthew Cole, Allen Owji, Zachary DeMastry, Ali P. Gordon, (2016), “An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22 Iss. 2 pp. 387-404.
- [7] José F. Rodríguez, James P. Thomas, John E. Renaud, (2001), “Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7 Iss. 3 pp. 148-158. [6] O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, (2015), “Fused deposition modeling with polypropylene”, *Materials & Design*, Vol. 83 pp. 768-776.
- [8] O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, (2015), “Fused deposition modeling with polypropylene”, *Materials & Design*, pp. 768-776.
- [9] Ismail Durgun, Rukiye Ertan, (2014), “Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20 Iss. 3 pp. 228-235.
- [10] Antonio Lanzotii, Marzio Grasso, Gabriele Staiano, Massimo Martorelli, (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 Iss. 5 pp. 604-617.
- [11] Farzad Rayegani, Godfrey C. Onwubolu, (2014), “Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)”, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 73 pp. 509-519.

- [12] Bertoldi M., Yardimci M.A., Pistor C.M., Güceri S. I., Sala G., (1998), "Mechanical characterization of Parts Processed via Fused Deposition", Proceedings of the 1998 Solid Freeform Fabrication Symposium, pp.557-566.
- [13] Eric Fodran, Martin Koch, Unny Menon, (1996), "Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles", Proceedings of the 1996 Solid Freeform Fabrication Symposium, pp.419-442.
- [14] Robert W. Gray IV, Donald G. Baird, Jan Helge Bøhn, (1998), "Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts", Rapid Prototyping Journal, Vol. 4 Iss. 1 pp. 14-25.
- [15] C.S. Lee, S.G. Kim, H.J. Kim, S.H. Ahn, (2007), "Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188 pp. 627-630.
- [16] Ker Chin Ang, Kah Fai Leong, Chee Kai Chua, Margam Chandrasekaran, (2006), "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures", Rapid Prototyping Journal, Vol. 12, Iss. 2 pp. 100-105.
- [17] José F. Rodriguez, James P. Thomas, John E. Renaud, (2000), "Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6 Iss. 3 pp. 175-186.
- [18] José F. Rodriguez, James P. Thomas, John E. Renaud, (1999), "Maximizing the strength of the Fused-Deposition ABS Plastic Parts", Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, pp.335-342.
- [19] Filip Górski, Wiesław Kuczko, Radosław Wichniarek, (2015), "Computation of Mechanical Properties of Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling Using Finite Element Method", 10th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing 368, pp.403-413.
- [20] Dietmar Drummer, Sandra Cifuentes-Cuéllar, Dominik Rietzel, (2012), "Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling", Rapid Prototyping Journal, Vol.18 Iss. 6 pp.500-507.
- [21] M.H. Too, K.F. Leong, C.K. Chua, Z.H. Du, S.F. Yang, C.M. Cheah, S.L. Ho, (2002), "Investigation of 3D Non-Random Porous Structures by Fused Deposition Modelling", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 19 pp.217-223.
- [22] Miquel Domingo-Espin, Josep M. Puigoriol-Forcada, Andres-Amador Garcia-Granada, Jordi Llumà, Salvador Borros, Guillermo Reyes, (2015), "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts", Materials & Design, Vol. 83 pp. 670-677.

[23] Nevin Hill, Mehrdad Haghi, (2014), “Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.20 Iss. 3 pp. 221-227.

[24] Anoop Kumar Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, (2010), “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts”, *Materials and Design*, Vol. 31 Iss. 1 pp. 287-295.

[25] L.M. Galantucci, F. Laveccia, G. Percoco, (2008), “Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57 pp. 243-246.

[26] Ognjan Lužanin, Dejan Movrin, Miroslav Plančak, (2014), “Effect of layer thickness, deposition angle and infill on maximum flexural force in FDM-built specimens”, *Journal for Technology of Plasticity*, Vol. 39 Iss. 1 pp. 49-58.

[27] Kenny L. Alvarez C., Rodrigo F. Lagos C., Miguel Aizpun, (2016), “Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts”, *Ingeniería e Investigación*, Vol. 36 Iss. 3 pp. 110-116.

[28] 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 16 Agosto 2016].

[29] R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan, (2001), “Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118 pp. 385-388.

[30] T. Nancharaiah, D. Ranga Raju, V. Ramachandra Raju, (2010), “An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components”, *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1 Iss. 2 pp. 106-111.

[31] Che Chung Wang, Ta-Wei Lin, Shr-Shiung Hu, (2007), “Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13 Iss. 5 pp. 304-315.

[32] B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan, (2005), “Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169 pp. 54-61.

[33] H. Rezayat, W. Zhou, A. Siriruk, D. Penumadu & S.S. Babu, (2015), “Structure-mechanical property relationship in fused deposition modelling”, *Materials Science and Technology*, 31:8, 895-903.

[34] R.H. Hambali, H.K. Celik, P.C. Smith, A.E.W. Rennie, M. Ucar, (2010), “Effect of Build Orientation on FDM parts: a Case Study for Validation of Deformation Behaviour by

FEA”, IDECON 2010- International Conference on Design and Concurrent Engineering, pp. 224 - 228.

[35] H. Li, G. Taylor, V. Bheemreddy, O. Iyibilgin, M. Leu, K. Chandrashekhara, (2015), “Modeling and characterization of fused deposition modeling tooling for vacuum assisted resin transfer molding process”, Additive Manufacturing, Vol. 7 pp. 64-72.

[36] R.M. Christensen, (2000), “Mechanics of cellular and other low-density materials”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 37 pp. 93-104.

[37] A.P. Roberts, E.J. Garboczi, (2002), “Computation of the linear elastic properties of random porous materials with a wide variety of microstructure”, Proc. R. Soc. Lond. A, Vol. 458 pp. 1033-1054.

[38] B. Mouhmid, A. Imad, N. Benseddic, S. Benmedakène, A. Maazouz, (2006), “A study of the mechanical behavior of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation”, Polymer Testing, Vol. 25 pp. 544-552.

[39] J.L. Hernández-Rivera, H.I. Medellín-Castillo, D.F. de Lange, (2016), “Numerical and theoretical modeling of the elasto-plastic response of aluminum-graphite composites during straining”, Materials Science & Engineering A, Vol. 650 pp. 323-334.

[40] Kulkarni, P. and Dutta, D. (1997), “Deposition strategies and resulting part stiffnesses in layered manufacturing”, #DAC3987, Proc. 1997 ASME Design Engr. Tech. Conf., Sacramento, CA.

[41] Enrique Gallegos-Nieto, Hugo I. Medellín-Castillo, Dirk F. de Lange, (2015), “A complete structural performance analysis and modelling of hydroxyapatite scaffolds with variable porosity”, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 18 Iss. 11, pp. 1225-1237.

[42] Gibson LJ, Ashby MF, (1988), “Cellular solids: structure and properties”, Oxford: Pergamon Press.

[43] N. Chawla, X. Deng, (2005), “Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels”, Materials Science & Engineering A, Vol. 390 pp. 98-112.

[44] Jonathan Torres, Matthew Cole Allen Owji Zachary DeMastry Ali P. Gordon, (2016), “An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 22, Iss. 2 pp. 1-56.

[45] Antonio Armillota, (2006), Assessment of surface quality on textured FDM prototypes, Rapid Prototyping Journal, Vol. 12 Iss 1 pp. 35-41.

[46] Sung-Hoon Ahn, Michael Montero, Dan Odell, Shad Roundy, Paul K. Wright, (2002), Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Iss. 4, pp. 248-257.

[47] Douglas C. Montgomery, (2012), “Diseño y análisis de experimentos”, 2da. Edición, México, Limusa Wiley.

[48] Humberto Gutiérrez Pulido, Román de la Vara Salazar, (2005), “Análisis y diseño de experimentos”, 1era edición, México, McGraw-Hill Interamericana.

[49] Instituto Tecnológico de Aguascalientes. (2002). Los diseños de Taguchi contra los diseños de experimentos. Available at: <http://www.redalyc.org/pdf/944/94401906.pdf> [Accessed 03 Yan. 2017].

[50] ASTM International, D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

[51] Flashforge 3D printer, (2012-2016), FlashForge Creator Pro [en línea] Disponible en: <http://www.flashforge.com/creator-pro-3d-printer/> [Acceso Agosto 2017]

[52] MatWeb, NatureWorks® Ingeo™ 2002D Extrusion Grade PLA [en línea] Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1e288619764846d2b794bd077e7f1bba&ckck=1> [Acceso 03 Enero 2017].