



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA PARA PIEZAS REFORZADAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA

Alumno: Antonio Francisco Calles Valero

Tutor: Prof. D. Diego Carou Porto
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2019



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Diego Carou Porto, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Optimización del proceso de fabricación aditiva para piezas reforzadas en función de la resistencia mecánica, que presenta Antonio Francisco Calles Valero, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, junio de 2019

El alumno:

El tutor:

Antonio Francisco Calles Valero

Diego Carou Porto

Lista de acrónimos

ABS: del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

AJ: del inglés *Aerosol Jet*

ANOVA: del inglés *Analysis of Variance*

AM: del inglés *Additive Manufacturing*

ASTM: del inglés *American Society of Testing Methods*

CAD: del inglés *Computer Aided Design*

CFRP: del inglés *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

CN: control numérico

CMC: del inglés *Ceramic Matrix Composite*

DMD: del inglés *Direct Metal Deposition*

FDM: del inglés *Fused Deposition Modeling*

FFF: del inglés *Fused Filament Fabrication*

LENS: del inglés *Laser Engineered Net Shaping*

LOM: del inglés *Laminated Object Manufacturing*

MMC: del inglés *Metal Matrix Composite*

PC: del inglés *Polycarbonate*

PLA: del inglés *Polylactic Acid*

PMC: del inglés *Polymer Matrix Composite*

SLA: del inglés *Stereolithography*

SLM: del inglés *Selective Laser Melting*

SLS: del inglés *Selective Laser Sintering*

SMS: del inglés *Selective Mask Sintering*

STL: del inglés *Standard Triangle Language*

UAM: del inglés *Ultrasonic Additive Manufacturing*

3DP: del inglés *3D Printing*

ppm: partes por millón

Índice de tablas

Tabla 2.1. Años de comercialización de algunos procesos de fabricación aditiva (Wendel <i>et al.</i> , 2008).....	9
Tabla 2.2. Categorías de la fabricación aditiva, según la norma ISO-ASTM 52900 (Pinkerton, 2016).....	10
Tabla 2.3. Clasificación de algunas categorías de procesos de fabricación aditiva en función del estado inicial del material (Guo <i>et al.</i> , 2013).....	15
Tabla 2.4. Materiales comerciales actuales en función de la categoría de proceso de fabricación aditiva (Bourell <i>et al.</i> 2017) (Pérez, 2018).	16
Tabla 3.1. Parámetros, niveles y nomenclatura para el experimento 1.....	37
Tabla 3.2. Planificación del experimento 1.	39
Tabla 3.3. Dimensiones (mm) de las probetas de tracción tipo 1A y 1AV (UNE 116005, 2012).....	41
Tabla 4.1. Características del filamento de PLA virgen (Smartmaterials, 2019) (Impresoras3D, 2019) (Pérez, 2018).	47
Tabla 4.2. Características del PLA reforzado con fibra de carbono (Proto-pasta, 2019).....	49
Tabla 4.3. Características de impresión BIBO 2 Touch Dual Extruders (Ourbibo, 2019).	52
Tabla 4.4. Características de la máquina de ensayos universales MTS Criterion Model 43 (Mts, 2019).....	54
Tabla 4.5. Definición de parámetros y niveles (experimento 1).	62
Tabla 4.6. Planificación experimental para ambos materiales (experimento 1).....	62
Tabla 4.7. Medición de carga para probetas de PLA virgen (experimento 1).....	63
Tabla 4.8. Medición de carga para probetas de PLA reforzado (experimento 1).	63
Tabla 4.9. Resultados del experimento 1 para el PLA virgen.	64
Tabla 4.10. Resultados del experimento 1 para el PLA reforzado.	64
Tabla 4.11. Comparación entre PLA virgen y reforzado con fibra de carbono.	64
Tabla 4.12. Parámetros, niveles y nomenclatura (experimento 2).	69

Tabla 4.13. Planificación del experimento 2.	70
Tabla 4.14. Definición de parámetros y niveles para el experimento 2	72
Tabla 4.15. Definición de la planificación del experimento 2 para ambos materiales.....	73
Tabla 4.16. PLA virgen - Orientación horizontal.	74
Tabla 4.17. PLA virgen - Orientación de canto.	75
Tabla 4.18. PLA virgen - Orientación vertical.....	76
Tabla 4.19. PLA reforzado - Orientación horizontal.	77
Tabla 4.20. PLA reforzado - Orientación de canto.....	78
Tabla 4.21. PLA reforzado - Orientación vertical.	79
Tabla 4.22. Incremento de resistencia entre ambos materiales.....	82
Tabla 4.23. Código de significación definido por el software R.....	82
Tabla 4.24. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (PLA virgen).....	83
Tabla 4.25. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (PLA reforzado).	83
Tabla 4.26. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (ambos materiales).	86
Tabla 4.27. Contribución de cada factor a la variabilidad de la resistencia mecánica final de la pieza.....	87
Tabla 4.28. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA del PLA virgen.	88
Tabla 4.29. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA del PLA reforzado.....	88
Tabla 4.30. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA de ambos materiales.	88

Índice de figuras

Figura 2.1. Evolución de la fabricación aditiva (Jakus, 2019).	8
Figura 2.2. Principales componentes de una impresora FDM (Singh <i>et al.</i> , 2017).....	11
Figura 2.3. Proceso de triangulación para aproximar la curvatura en CAD a líneas rectas en STL (Roschli <i>et al.</i> , 2018).....	13
Figura 2.4. Proceso de impresión 3D según Gibson <i>et al.</i> (2015).....	13
Figura 2.5. Envíos aproximados de compuestos de polímeros en 1995 (Kaw, 2006).....	18
Figura 2.6. Las cuatro familias básicas de materiales según Haghshenas (2016).....	21
Figura 2.7. Esquema de materiales compuestos reforzados con partículas (Staab, 2015)....	24
Figura 2.8. Algunas configuraciones de refuerzos en forma de fibra (Haghshenas, 2016). ..	27
Figura 2.9. Comparación de algunas propiedades físicas y mecánicas de los compuestos con el acero y el aluminio (Haghshenas, 2016).....	28
Figura 3.1. Probeta 1A. Posición horizontal (UNE 116005, 2012)	35
Figura 3.2. Probeta 1A. Posición de canto (UNE 116005, 2012).....	36
Figura 3.3. Probeta 1AV. Posición vertical (UNE 116005, 2012).....	36
Figura 3.4. Esquema de la probeta (UNE 116005, 2012).....	40
Figura 3.5. Probeta de PLA horizontal en proceso de impresión con tipo de adherencia “Falda”.....	43
Figura 3.6. Probeta de PLA reforzado impresa en dirección de canto con soporte.....	44
Figura 3.7. Probeta de PLA reforzado impresa en dirección vertical con tipo de adherencia “Balsa”.....	44
Figura 4.1. Bobina de PLA virgen Ivory White (Smartmaterials, 2019).	48
Figura 4.2. PLA reforzado con fibra de carbono Proto-pasta (Proto-pasta, 2019).....	50
Figura 4.3. Filamento de limpieza Smart Clean (Smartmaterials, 2019).	51
Figura 4.4. Impresora 3D (Ourbibo, 2019).....	53
Figura 4.5. Programa de bloques creado para realizar los ensayos.	55

Figura 4.6. Toma de datos durante la realización del ensayo a tracción.....	55
Figura 4.7. Máquina de ensayos universales MTS Criterion Model 43.	56
Figura 4.8. Ensayos a tracción: a) PLA virgen y b) PLA reforzado.	56
Figura 4.9. Entorno de trabajo de CATIA V5.	57
Figura 4.10. Interfaz Ultimaker Cura 4.0.0.....	59
Figura 4.11. Spray fijador Dimafix (Smartmaterials, 2019).....	59
Figura 4.12. Aguja Shenlong.....	60
Figura 4.13. Probetas de PLA virgen impresas en dirección vertical (experimento 1).....	62
Figura 4.14. Probetas de PLA reforzado impresas en dirección vertical (experimento 1).	63
Figura 4.15. Carga máxima a tracción frente a altura de capa y velocidad de impresión (PLA virgen).....	65
Figura 4.16. Carga máxima a tracción frente a altura de capa y velocidad de impresión (PLA reforzado).....	65
Figura 4.17. Comparación entre PLA virgen y PLA reforzado.	66
Figura 4.18. Tipos de patrón de relleno utilizados.	71
Figura 4.19. Probetas de PLA virgen impresas en las tres direcciones para el experimento 2.	80
Figura 4.20. Probetas de PLA reforzado impresas en las tres direcciones para el experimento 2.	80
Figura 4.21. Comparativa para los distintos niveles de densidad y contornos (PLA virgen)..	81
Figura 4.22. Comparativa para los distintos niveles de densidad y contornos (PLA reforzado).....	81
Figura 4.23. Comparativa entre las distintas orientaciones para los dos materiales.	82
Figura 4.24. Sección de rotura de probeta vertical g_10. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.....	89
Figura 4.25. Sección de rotura de probeta vertical g_11. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.....	90

Figura 4.26. Sección de rotura de probeta vertical g_12. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.....	90
Figura 4.27. Probetas ensayadas a tracción con buena y mala rotura, para ambos materiales.	103
Figura 4.28. Boquilla usada para imprimir PLA reforzado.....	104
Figura 4.29. Boquilla usada para imprimir PLA virgen	104
Figura 4.30. Falta de material en la zona de curvatura en probetas horizontales (PLA reforzado).....	105

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Composición	2
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Introducción	5
2.2. Fabricación aditiva	6
2.2.1. Marco histórico.....	6
2.2.2. Categorías de los procesos.....	8
2.2.3. Modelado por deposición fundida.....	10
2.2.4. Procedimiento de fabricación	12
2.3. Materiales	14
2.3.1. Materiales reforzados.....	17
2.3.1.1. Marco histórico.....	17
2.3.1.2. Descripción	18
2.3.1.3. Clasificación.....	20
2.4. Propiedades mecánicas	28
2.4.1. Definiciones principales.....	29
2.4.2. Propiedades a tracción	30
3. METODOLOGÍA	33
3.1. Introducción	33
3.2. Planificación pre-experimental	33
3.2.1. Identificación y declaración del problema.....	33
3.2.2. Elección de parámetros, niveles y rangos	34

3.2.3.	Selección de la variable de respuesta	37
3.3.	Elección del diseño experimental	38
3.4.	Ejecución del experimento	39
3.4.1.	Preparación de las probetas	40
3.4.2.	Proceso de impresión 3D	41
3.4.3.	Ensayo de tracción.....	44
3.5.	Análisis estadístico.....	45
3.6.	Conclusiones	46
4.	APLICACIONES Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	47
4.1.	Introducción	47
4.2.	Equipo experimental	47
4.2.1.	Materiales de impresión	47
4.2.2.	Máquinas	51
4.2.3.	Software para impresión 3D.....	57
4.2.4.	Material de apoyo.....	59
4.3.	Definición de los experimentos.....	60
4.3.1.	Experimento 1.....	60
4.3.1.1.	Análisis de los resultados.....	63
4.3.2.	Experimento 2.....	67
4.3.2.1.	Metodología	67
4.3.2.2.	Definición	70
4.3.2.3.	Análisis de los resultados.....	73
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	93
5.1.	Conclusiones	93

5.2. Trabajos futuros	95
Referencias.....	97
ANEXO	103

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva es una de las tecnologías emergentes que más crecimiento ha experimentado en las últimas décadas. Desde su invención en los 1980, las técnicas de impresión en tres dimensiones (3D), más conocidas formalmente como fabricación aditiva, han sido desarrolladas, maduras y utilizadas en diversas aplicaciones por un gran número de investigadores y empresas industriales de todo el mundo (Wang *et al.*, 2017).

La fabricación aditiva consiste en un grupo de tecnologías de fabricación modernas que se utilizan para producir piezas tridimensionales a partir de la conceptualización de estas en CAD, empleando un software de planificación tridimensional y llevando a cabo un correcto establecimiento de los parámetros de impresión (Prakash, 2018) (Saptarshi *et al.*, 2019). En sus primeros años, se utilizaba, principalmente, como una técnica de creación rápida de prototipos. Actualmente, está revolucionando significativamente la fabricación, así como la estructura y las operaciones de los negocios internacionales, debido al desarrollo de nuevos procesos de producción, materiales y aplicaciones (Wang *et al.*, 2017). Sus principales ventajas que hacen esto posible son: la libertad de diseño, la personalización masiva, la minimización de residuos y la capacidad de fabricar estructuras complejas (de una sola pieza, sin necesidad de ensamblajes), así como la creación rápida de prototipos, anteriormente mencionada (Ngo *et al.*, 2018).

Por otra parte, el desarrollo de nuevos materiales posibilita la ampliación del rango de aplicación de la fabricación aditiva. Concretamente, existe un especial interés en la incorporación a la fabricación aditiva de materiales de mayor resistencia mecánica, como pueden ser los polímeros reforzados con fibra.

Los materiales reforzados con fibra ofrecen rendimientos mecánicos muy interesantes en comparación con los materiales convencionales. Es por esto que el mayor impulso en el uso de materiales compuestos en la industria se debe a su baja densidad, además de unas excelentes propiedades de resistencia y rigidez. Esto ofrece una amplia gama de aplicaciones, lo que conlleva a que estén presentes en

muchas aplicaciones, desde bienes de consumo como utensilios de cocina hasta componentes de la estructura de un avión (Sapuan, 2017) (Bleyer, 2018).

1.1. Objetivos

La necesidad de conocer las propiedades y limitaciones mecánicas de las piezas impresas en 3D es cada vez más importante para poder ampliar el campo de aplicación de esta tecnología. Actualmente, hay una cantidad limitada de literatura e investigación sobre el tema, ya que la tecnología todavía es bastante nueva, de ahí la realización de este Trabajo de Fin de Grado (Raney *et al.*, 2017).

De especial interés es el empleo de materiales reforzados en la fabricación aditiva, pues estos ofrecen una resistencia mecánica mejorada, uno de los puntos débiles a suplir de las piezas obtenidas mediante impresión 3D y uno de los requisitos esenciales de un producto. Es por esto que el principal objetivo de este trabajo es el estudio de un proceso de fabricación aditiva, concretamente uno de extrusión de material, dentro del cual se va a emplear la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM, del inglés *Fused Deposition Modeling*), de materiales reforzados desde un punto de vista teórico/experimental. Así, se pretende estudiar es el grado de influencia de los parámetros del proceso impresión en la resistencia mecánica de la pieza, de forma que se puedan obtener configuraciones óptimas de estos a fin de lograr la mayor resistencia mecánica posible.

1.2. Composición

Este Trabajo de Fin de Grado va constar de cinco capítulos más una lista de referencias. Estos son los siguientes:

Introducción: aquí se introducirá brevemente el concepto de fabricación aditiva y el contexto en el que se encuentra actualmente, así como los materiales reforzados, hablando también sobre los objetivos del presente trabajo y de su estructura.

Estado del arte: este apartado engloba la mayor parte teórica del trabajo, pues aquí se hará una revisión literaria exhaustiva a fin de conocer con profundidad los temas de estudio, como son el de la fabricación aditiva y el de los materiales reforzados. Se presentará la fabricación aditiva en su contexto histórico, explicando el

procedimiento general que se sigue para la fabricación de piezas y las distintas tecnologías existentes de fabricación aditiva, entrando en mayor detalle en la explicación de la tecnología de modelado por deposición fundida, que es el proceso de fabricación que se empleará.

Después de lo anterior, se analizarán los materiales empleados, con mayor énfasis en los materiales reforzados o compuestos, para los que se presenta una extensa clasificación. Finalmente, se explicará qué son las propiedades mecánicas, particularmente la tensión mecánica, pues es la propiedad de las piezas que interesa mejorar.

Metodología: se presenta la estrategia a seguir para abordar la parte experimental del trabajo. Se procederá a estudiar los principales parámetros de impresión existentes, de los cuales se seleccionarán los más críticos según la revisión de artículos realizada para esta parte. A partir de aquí, se desarrollará un plan de experimentos, lo que permitirá posteriormente realizar un análisis estadístico y obtener resultados concluyentes.

Aplicaciones y análisis de los resultados: se desarrollarán los planes detallados de experimentos del punto anterior, así como los equipos utilizados y materiales empleados. Aquí, se realizará el análisis estadístico previamente comentado, interpretando los resultados obtenidos y llevando estos a una representación gráfica.

Conclusiones y trabajos futuros: tras finalizar toda la parte experimental, se sacarán las conclusiones de los resultados obtenidos, justificando estos, ya sean los esperados o no. Asimismo, se mencionarán observaciones que pueden llegar a mejorar el proceso de impresión de materiales reforzados con fibra y que sería interesante estudiarlas detenidamente.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

La reducción del coste y el tiempo total del proceso, así como la obtención de un alto grado de calidad, son los objetivos primordiales en el campo de la fabricación. Para la consecución de estos objetivos, se debe mejorar el rendimiento del proceso de fabricación y determinar los valores óptimos de todos los parámetros que intervienen en el procedimiento. Esto es de especial importancia para las industrias en los países desarrollados a fin de mantener una ventaja competitiva (Yamazaki, 2016) (Pérez, 2018).

Las tecnologías avanzadas de fabricación combinadas con un adecuado conocimiento sobre sus potencial y limitaciones, es lo que puede marcar la diferencia entre las empresas y sus competidores (Niaki *et al.*, 2019). Surge así la rápida expansión de la fabricación aditiva, implantándose, cada vez más, en diversos sectores de la industria. Pero, a pesar de sus beneficios, todavía existen factores de calidad, como la precisión dimensional, la resistencia mecánica y la rugosidad superficial, y productividad que deben ser mejorados para poder cumplir con los requisitos del producto (Durão *et al.*, 2017).

Según Anderson (2012), se espera que en un futuro próximo exista una impresora 3D en cada hogar. Así, gracias al fácil acceso a materiales, máquinas y software digital, las personas podrán tener la posibilidad de diseñar y fabricar sus propias creaciones. Estos factores también brindan oportunidades significativas para la creación conjunta que pueden ser potenciados mediante el desarrollo de redes de comunicación avanzadas como las redes 5G. Esto permite que las empresas, diseñadores y los propios clientes puedan compartir el diseño o la fabricación de sus productos, con una importante aceleración de las conexiones entre usuarios y un aumento de la implantación del Internet de las Cosas. De ahí que pueda resultar de especial interés la introducción de la tecnología blockchain, con la finalidad de poder asegurar un cierto nivel de transparencia y confianza a la hora de intercambiar diseños o productos de creación propia. Esta idea provocará que la línea entre consumidor y productor se vuelva borrosa, lo que llevaría a la democratización de la fabricación y al

aumento de la competencia, pudiendo los límites de la industria incluso desaparecer (Li *et al.*, 2018) (Kapetanidou *et al.*, 2018).

2.2. Fabricación aditiva

2.2.1. Marco histórico

La historia de la fabricación aditiva puede parecer muy corta, debido a su gran irrupción en las recientes décadas. Sin embargo, esta tecnología tiene más de cien años. La primera solicitud de patente fue en 1882 por Joseph E. Blanton, quien registró un método para producir mapas de contorno topográfico cortando láminas de cera, que se fueron apilando. Esta idea fue la base para el concepto de fabricación aditiva que existe en la actualidad (Schmid, 2018).

Ciraud, en una patente de 1972, introdujo el concepto de fabricación de capas metálicas mediante la fusión selectiva de polvos utilizando un haz de electrones, láser o plasma (Murr *et al.*, 2017). Casi una década más tarde, en 1981, Hideo Kodama de Nagoya, publicó el primer artículo que describió por primera vez lo que hoy se conoce como el proceso de estereolitografía (SLA, del inglés *Stereolithography*). Este proceso se basa en el principio de fotopolimerización con el fin de crear modelos 3D a partir de una resina que es sensible a los rayos ultravioleta (UV), solidificando esta mediante el paso de un láser capa por capa (Sánchez, 2019) (Jakus, 2019).

A mitad de los 1980, las tecnologías de impresión 3D experimentan un desarrollo y comienzan a despegar. Charles Hull, fundador de “3D Systems”, es a menudo acreditado como el inventor de la impresión 3D, pues en 1984 registra su primera patente comercial de su aparato de estereolitografía. Pero no fue el primer creador del proceso, como se puede ver en el trabajo anterior de Hideo Kodama, así como una solicitud anterior de patente francesa presentada por Alain Le Méhauté, Jean-Claude André y Olivier de Witt. A pesar de esto, Charles Hull desarrolló el formato de archivo para SLA, el .STL, que sigue siendo hoy en día el archivo predominante. En 1986, Carl Deckard (junto a otros investigadores), desarrolló las ideas de Hull y presentó una patente de sinterización selectiva por láser con base en polvo (SLS, del inglés *Selective Laser Sintering*), a la que le seguiría, unos años después, en 1989, una patente de modelado basado en deposición fundida, por Steven Scott Crump (cofundador de Stratasys Inc) (Hayagrivan, 2018) (Balletti *et al.*, 2017) (Jakus, 2019).

Estas tres tecnologías, SLA, SLS y FDM, proporcionaron una importante base tecnológica y, hoy en día, se continúan usando frecuentemente. Durante este período, y continuando a través de los años 1990 y principios de los años 2000, los procesos de impresión 3D eran más conocidos como prototipado rápido, pues se utilizaron predominantemente para la creación de modelos y prototipos de productos que finalmente serían fabricados mediante métodos tradicionales (Jakus, 2019).

El hardware (impresora 3D) aún no estaba efectivamente emparejado con el software. Durante el periodo entre los 1990 y 2005, las capacidades de cálculo y almacenamiento de datos comenzaron a aumentar exponencialmente. Se fundaron empresas de software y modelos, incluido Materialise, que sigue siendo un actor global importante. Este período también fue testigo de la maduración de las tecnologías de creación de prototipos originales SLA, SLS y FDM, así como de los primeros ejemplos de nuevos procesos, como la unión por chorro de aglutinante (1993) y chorro de polímero (1998) (Jakus, 2019).

En 2005 se expandió rápidamente el conocimiento sobre la impresión 3D debido a la expiración de las patentes originales de la década de 1980, el surgimiento y la adopción generalizada de las redes sociales (Jakus, 2019), y la fundación del Proyecto RepRap (del inglés *Replicating Rapid Prototyper*), por Adrian Bowyer, cuyo objetivo era la creación de una impresora 3D capaz de imprimir por sí sola la mayoría de sus componentes (Horvath, 2014). Por otra parte, las patentes de FDM se hicieron públicas en el año 2009 y abrieron las puertas a una gran ola de innovación de esta tecnología (Hayagrivan, 2018).

En la actualidad, gracias a los principales desarrollos, liderados principalmente por la creación de nuevos materiales avanzados, altamente funcionales e imprimibles en 3D, la fabricación aditiva ha ido alejándose de la fabricación de prototipos hechos con plásticos y metales simples para su aplicación a la producción en masa de productos complejos, así como productos que podrían reparar o regenerar tejidos biológicos (Jakus, 2019).

Ha de añadirse que gracias al avance de la industria 4.0, se está llevando a cabo la integración progresiva de sistemas de producción inteligente y tecnologías avanzadas. Consecuentemente, la fabricación aditiva es una pieza fundamental en

esta corriente, teniendo un futuro prometedor y con un impacto impredecible sobre la industria convencional (Pérez, 2018).

En la Figura 2.1 se puede observar la evolución de la impresión 3D a lo largo de su historia, donde se pueden distinguir seis periodos importantes, agrupados en dos generaciones. Esta distinción está hecha de acuerdo a Jakus (2019).

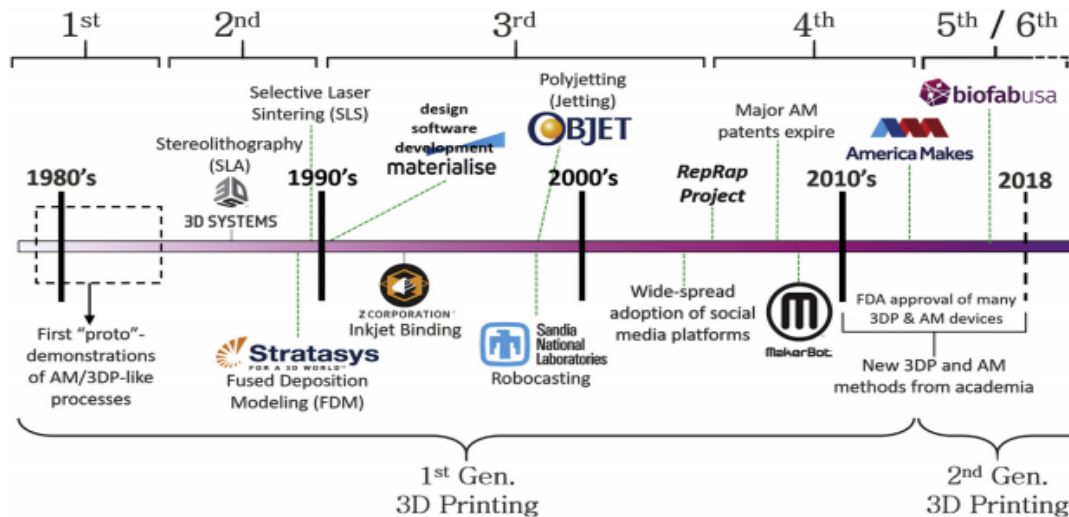


Figura 2.1. Evolución de la fabricación aditiva (Jakus, 2019).

2.2.2. Categorías de los procesos

Los procesos de fabricación aditiva son generalmente similares entre sí en que añaden y unen materiales para formar objetos tridimensionales (Prakash *et al.*, 2018).

Los procesos de fabricación aditiva se dividen en siete categorías según la norma ISO-ASTM 52900 (Pinkerton, 2016):

- Chorro de aglutinante: se deposita selectivamente un agente aglomerante para unir material en polvo.
- Deposición de energía dirigida: los materiales son fundidos, al mismo tiempo que se depositan, gracias a una fuente de energía térmica concentrada.
- Extrusión de material: el material es dispensado de manera selectiva a través de una boquilla u orificio.
- Chorro de material: se depositan selectivamente gotas del material de producción.

- Fusión de lecho de polvo: con ayuda de energía térmica, se funden selectivamente regiones de un lecho de polvo.
- Laminación de hojas: se aglutinan hojas de material para conformar un objeto.
- Fotopolimerización en tanque o cuba: el fotopolímero líquido se cura de forma selectiva en una cuba mediante un proceso de polimerización activada mediante luz.

En las dos siguientes tablas se pueden observar los años de comercialización de algunos procesos de fabricación aditiva y la categoría a la que pertenecen, según la clasificación expuesta, respectivamente.

Procesos	Comercialmente disponibles desde
Estereolitografía	1987
Fabricación de objetos laminados	1990
Modelado por deposición fundida	1991
Sinterización selectiva con láser	1991
Impresión en tres dimensiones	1998
Sinterización selectiva con mascarilla	2005

Tabla 2.1. Años de comercialización de algunos procesos de fabricación aditiva (Wendel *et al.*, 2008).

Categoría	Procesos
Chorro de aglutinante	Unión selectiva o impresión en tres dimensiones (3DP)
Deposición de energía dirigida	Deposición directa de metal (DMD), deposición directa de láser, modelado neto de ingeniería láser (LENS), revestimiento láser de múltiples capas
Extrusión de material	Modelado por deposición fundida (FDM) o fabricación de filamento fundido (FFF)
Chorro de material	Chorro de polímero, chorro de aerosol (AJ)
Fusión de lecho de polvo	Fusión selectiva con láser (SLM), sinterización selectiva con láser (SLS), sinterización selectiva con mascarilla (SMS)
Laminación de hojas	Fabricación aditiva con ultrasonido (UAM), fabricación de objetos laminados (LOM)
Fotopolimerización en tanque o cuba	Estereolitografía (SLA)

Tabla 2.2. Categorías de la fabricación aditiva, según la norma ISO-ASTM 52900 (Pinkerton, 2016).

2.2.3. Modelado por deposición fundida

El modelado por deposición fundida, también conocido como fabricación de filamento fundido (FFF), fue comercializado por Stratasys INC en 1991 y registrado como FDM, siendo actualmente el principal fabricante de estos sistemas. Esta se ha convertido en una de las tecnologías de fabricación aditiva más extendidas e importantes hoy en día, pues una de sus grandes ventajas reside en el uso de materiales semielaborados, que pueden ser procesados simplemente mediante extrusión. Gracias a esto, permite crear prototipos rápidos y piezas funcionales de una manera económica. Lo que incluye también un mantenimiento más sencillo y un ambiente de trabajo más seguro, pues otros procesos de fabricación aditiva que utilizan resinas o polvos, crean un ambiente muy dañino para la máquina e incluso atmósferas tóxicas. Es por todo esto que este sistema de impresión se ha convertido

en una de las opciones más adecuadas para tener en casa (Hayagrivan, 2018) (Wendel *et al.*, 2008) (Gordon *et al.*, 2015).

El modelado por deposición fundida consiste en un proceso que deposita un hilo de material fundido, por lo general de un filamento de termoplástico, mediante el uso de una cabeza móvil. El material se calienta a una temperatura ligeramente superior a su punto de fusión en el extrusor, dentro de la cabeza, luego se extruye a través de una boquilla a una plataforma o cama, y se enfría hasta que solidifica y forma una capa. Gracias a los avances en la investigación de esta tecnología, se han creado sistemas de FDM con múltiples boquillas, donde cada una puede depositar un material diferente para fabricar objetos con propiedades novedosas (Guo *et al.*, 2013).

En cuanto a los parámetros de impresión, según Wendel *et al.* (2008), para piezas con altura de capa de 0,1 mm el espesor de pared mínimo que se puede obtener mediante FDM es de 0,5 mm. Los materiales disponibles comercialmente para este proceso incluyen ABS, PC, polifenilensulfona (PPSU) y una mezcla de PC/ABS. Tales materiales se proporcionan como bobinas de filamento (diámetros de $1,75 \pm 0,03$ mm y $2,85 \pm 0,5$ mm) en varios colores estándar.

A continuación, se muestra, en la Figura 2.2 un esquema de una impresora de FDM, identificando sus principales componentes.

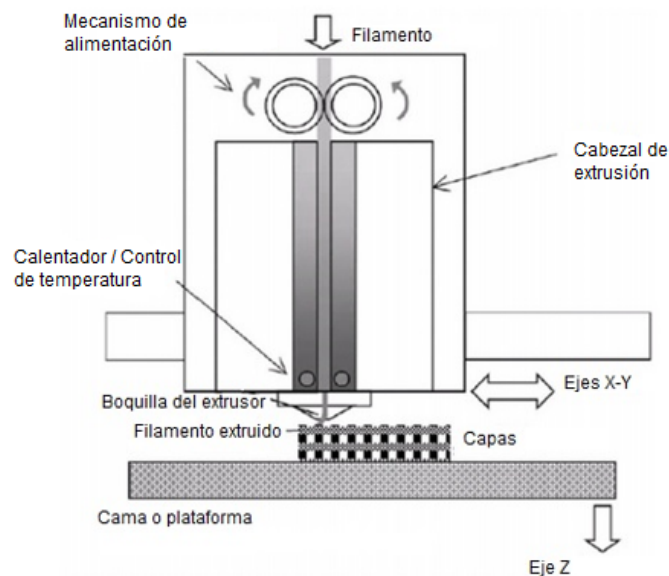


Figura 2.2. Principales componentes de una impresora FDM (Singh *et al.*, 2017).

2.2.4. Procedimiento de fabricación

Todos los productos fabricados mediante impresión 3D siguen unos pasos en común en lo que respecta al proceso de fabricación. El procedimiento que se sigue se puede diferenciar en varias etapas:

- Primero. Desarrollo de un modelo 3D computarizado, normalmente con ayuda de programas como Solidworks, Fusion 360 o Rhino, generando un archivo CAD (del inglés *Computer Aided Design*), obteniendo así una completa descripción de la geometría externa de la pieza (Roschli *et al.*, 2018)(Gibson *et al.*, 2015).
- Segundo. Conversión a un formato de archivo fabricación aditiva legible por el software de la máquina. Normalmente, el archivo predominante es el .STL, aunque hay que añadir que la norma ISO 10303 recomienda el archivo .STEP (del inglés *Standard for the Exchange of Product*). El formato .STL es un archivo de estereolitografía que se sirve de triángulos para aproximar las superficies complejas del archivo CAD, como se puede observar en la Figura 2.3 (Roschli *et al.*, 2018) (Pérez, 2018).
- Tercero. El archivo puede ser cargado en un software de corte o segmentación (en algunas ocasiones está integrado en el propio software de aplicación de modelado de la máquina) que divide el archivo STL en capas (conocidas como capas de segmentación) y crea trayectorias de la herramienta, almacenándose como G-Code (*Geometry Code*, lenguaje de programación más extendido en CN). El corte se realiza mediante la intersección de un plano horizontal con el archivo STL y el movimiento continuo del plano, siguiendo una dirección vertical, por altura de capa, definiendo así el espesor de estas, hasta que se corta la pieza completa. Cada vez que el plano se encuentra con el borde de un triángulo en el archivo STL, se crea un punto. Todos esos puntos forman de manera conjunta un polígono que actúa como el límite para esa capa. A partir de ahí, la cortadora de datos ajusta las trayectorias a cada polígono para formar la capa (Roschli *et al.*, 2018). Hay que añadir que la segmentación del archivo STL se realiza una vez se han configurado los parámetros de impresión deseados, es decir, una vez se ha establecido, por ejemplo, una altura de capa, una velocidad de impresión, una densidad de relleno y una temperatura de impresión (Gibson *et al.*, 2015).

- Cuarto. Después de que se genere el código, se carga en una impresora 3D para indicarle cómo construir la pieza (Roschli *et al.*, 2018). Gracias a esto, el objeto está listo para ser impreso capa por capa. La impresora 3D lee cada capa moviéndose de acuerdo con los ejes tridimensionales, lográndose, finalmente, el objeto físico deseado (Magisetty *et al.*, 2018).

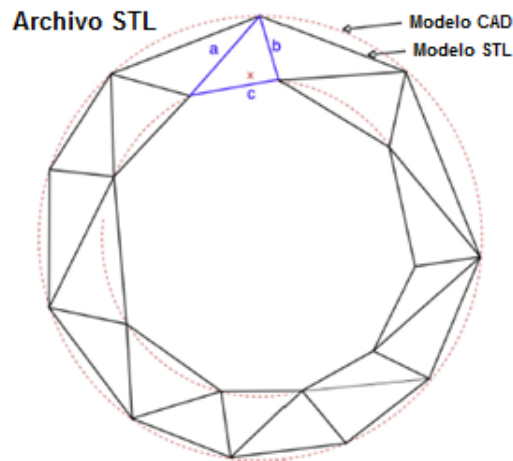


Figura 2.3. Proceso de triangulación para aproximar la curvatura en CAD a líneas rectas en STL (Roschli *et al.*, 2018).

En la Figura 2.4 se puede observar de un modo esquemático los pasos a seguir para obtener una pieza mediante impresión 3D.

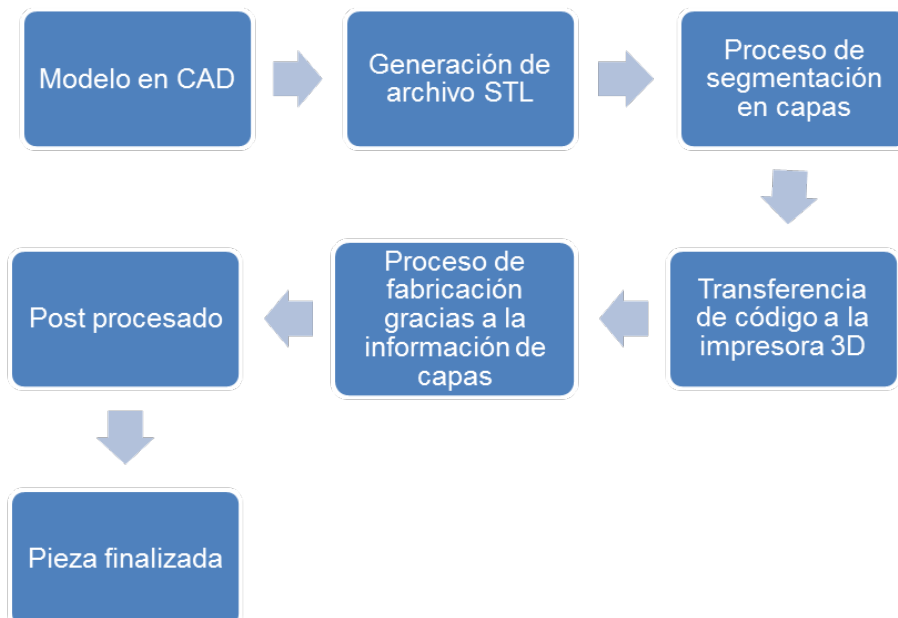


Figura 2.4. Proceso de impresión 3D según Gibson *et al.* (2015).

2.3. Materiales

Un parámetro clave para seleccionar un proceso de fabricación es la materia prima utilizada, que debe ser compatible con el proceso en cuestión. Los requisitos de los materiales para la fabricación aditiva incluyen: procesamiento adecuado del material por parte de la técnica de fabricación aditiva, capacidad de ser post-procesado de manera aceptable para mejorar la geometría y las propiedades de la pieza final, y manifestación de una buena actuación en servicio (Bourell *et al.*, 2017).

En su desarrollo inicial, la fabricación aditiva se aplicó a la producción de prototipos de plástico. Después de un intenso desarrollo y una profunda exploración, la tecnología de fabricación aditiva ha ido alcanzando progresivamente la capacidad de producir fabricadas con metales, cerámicos y polímeros (Guo *et al.*, 2013).

Los polímeros se han convertido en una clase de materiales ampliamente estudiados para su aplicación en la fabricación aditiva. Esto es, según González-Henríquez *et al.* (2019), gracias a la versatilidad y adaptabilidad sintética, así como a la amplia gama de propiedades que pueden lograrse utilizando estos materiales. Estos se pueden encontrar en forma de filamentos termoplásticos, monómeros reactivos, resinas o polvos. El ácido poliláctico (PLA, del inglés *Polylactic Acid*) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) son los principales polímeros utilizados en la impresión 3D de composites o materiales compuestos.

En lo que respecta a los metales y aleaciones avanzadas, se utilizan normalmente en el sector aeroespacial dado que los procesos tradicionales suponen un mayor consumo de tiempo, coste y una mayor dificultad. Por otro lado, los cerámicos se utilizan principalmente en la impresión 3D de andamios para huesos y dientes. Además, existe la aplicación del hormigón como principal material en la fabricación aditiva aplicada a la construcción. Todos estos se suelen encontrar en forma de polvos (Ngo *et al.*, 2018).

En la industria, la fabricación de productos puede darse a partir de una sola materia prima o mediante combinación de varias, en función de las propiedades finales que se deseen. Aunque se han experimentado grandes avances en la fabricación aditiva, la selección de materiales en ella todavía es algo limitada, lo que

se espera suplir con una futura generación de impresoras 3D mejoradas (Pérez, 2018). En lo que respecta al estado inicial del material, este es un parámetro influyente en la clasificación de los procesos de fabricación, pudiendo encontrarlo en estado sólido (filamentos, polvos y hojas) o líquido (polímero líquido, material fundido) (Wendel *et al.*, 2008). En las Tablas 3 y 4 se puede observar el estado inicial del material empleado en algunas de las categorías de proceso existentes en la fabricación aditiva, así como los materiales comerciales más comunes que existen actualmente, clasificándolos en función de estas categorías, respectivamente.

Estado inicial del material	Categoría de proceso de fabricación
Líquido	SLA
Filamento	FDM, FFF
Polvo	SLM, SLS, 3DP
Láminas sólidas	LOM

Tabla 2.3. Clasificación de algunas categorías de procesos de fabricación aditiva en función del estado inicial del material (Guo *et al.*, 2013).

	Chorro de aglutinante	Deposición de energía dirigida	Extrusión de material	Chorro de material	Fusión de lecho de polvo	Laminación de hojas	Fotopolimerización en tanque o cuba
ABS, policarbonato (PC), mezcla de PC/ABS, PLA, polieterimida			✓				
Acrílicos, acrilatos, epoxy				✓			✓
Poliamida (Nylon) 11 y 12, poliestireno, polipropileno, poliéster, polieteretercetona (PEEK), poliuretano termoplástico					✓		
Chocolate			✓				
Papel						✓	
Aleaciones de Al	✓	✓			✓		
Aleaciones de Co-Cr, Aleaciones de Ni	✓	✓			✓		
Oro, plata					✓		
Acero inoxidable, Titanio comercial puro, Ti-6Al-4V	✓	✓			✓	✓	
Acero para herramientas	✓	✓			✓		

Tabla 2.4. Materiales comerciales actuales en función de la categoría de proceso de fabricación aditiva (Bourell et al. 2017) (Pérez, 2018).

2.3.1. Materiales reforzados

2.3.1.1. Marco histórico

Cualquiera que sea el campo de aplicación, el desarrollo tecnológico estará limitado por el avance de los materiales. Es aquí donde los compuestos juegan un papel muy importante, pues brindan la oportunidad de contar con infinitas variaciones de combinaciones de materiales y con infinitas propiedades de funcionamiento (Chawla, 2012) (Haghshenas, 2016).

Estrictamente hablando, la idea de material compuesto no es una idea innovadora o reciente. Estos han existido desde hace muchos siglos, pudiendo observar cómo la naturaleza ha desarrollado, aparte de en los seres humanos, compuestos naturales tanto en animales como en plantas, como son la madera, el hueso y el músculo, entre otros muchos (Chawla, 2012) (Haghshenas, 2016).

Algunos de los registros más antiguos del uso de estos materiales por parte del hombre se remonta a la época de los egipcios, a los que se les atribuye la introducción de la madera contrachapada, el papel maché y el uso de paja en el barro para fortalecer los ladrillos, mezcla conocida como adobe. Las civilizaciones mayas e incas también se ayudaban de fibras vegetales para fortalecer los ladrillos y las cerámicas, así como los esquimales utilizan musgo para fortalecer el hielo en las construcciones de los iglús. De la misma forma, tampoco es extraño encontrar pelo de caballo en el yeso a modo de fibra de refuerzo (Staab, 2015).

Las industrias automotriz y aeroespacial introdujeron el uso de compuestos, especialmente de polímeros, a gran escala, con una notable aplicación en el Chevrolet Corvette de 1953 y en los aviones de combate, respectivamente (Fan *et al.*, 2016). Sin embargo, fue a principios de la década de 1960 cuando se experimentó un gran crecimiento en la demanda de estos materiales, extendiéndose su uso a otros sectores como el de la energía y la construcción civil. El principal motivo fue la carrera por llegar al espacio, de modo que muchos aspectos de la investigación y el desarrollo de la época fueron dominados por ese fin (Chawla, 2012) (Staab, 2015).

No fue hasta 1969 cuando se aplicaron materiales de carbono/epoxy a las estructuras de aviones de combate operativos. Los compuestos de matriz metálica

(MMC, del inglés *Metal Matrix Composites*), como el boro / aluminio, se introdujeron en 1970. DuPont desarrolló fibras de Kevlar a principios de los años 1970. A partir de finales de la década de 1970, la aplicación de materiales compuestos aumentó considerablemente, extendiéndose su uso a raquetas de tenis, tuberías de paredes, palos de golf, componentes de automóviles, etc., todo esto debido al desarrollo de nuevas fibras como el carbono, boro y nanotubos y nuevos sistemas compuestos con matriz hecha de polímeros y metales (Qin, 2015). Asimismo, el programa de Iniciativa de Defensa Estratégica (IDE) en EE.UU. en la década de 1980 impulsó el crecimiento de las actividades de investigación en el desarrollo de nuevos sistemas de materiales (Chawla, 2012) (Staab, 2015).

En la Figura 2.5 se puede observar, representado en un diagrama de sectores, el número aproximado de envíos de compuestos de polímeros realizados a distintos campos de aplicación en el año 1995.

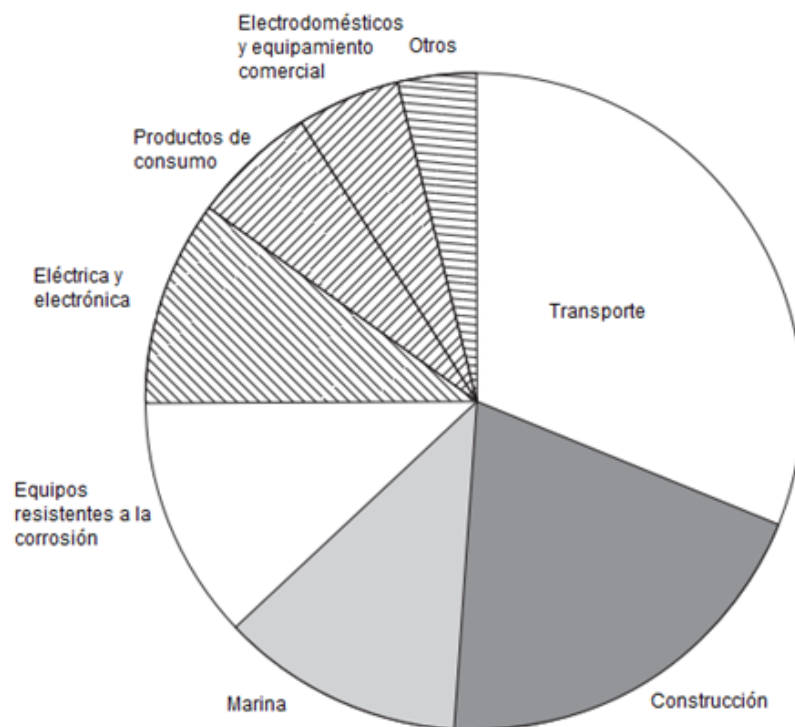


Figura 2.5. Envíos aproximados de compuestos de polímeros en 1995 (Kaw, 2006).

2.3.1.2. Descripción

Un material compuesto, consta de dos constituyentes, la matriz o fase continua y el refuerzo o fase discontinua. Una de las definiciones de material compuesto

establece que una combinación de los materiales resultaría en propiedades mejores que las de los componentes individuales por separado (Abramovich, 2017).

Las principales ventajas de los materiales compuestos sobre otros materiales existentes, como el metal o los plásticos, son su alta resistencia y rigidez, combinadas con una baja densidad, lo que permite la reducción de peso en la pieza terminada. Es por esto, que el principal uso de estos materiales está destinado al sector aeroespacial (Abramovich, 2017). No obstante, estos materiales no solo son utilizados para productos de alto rendimiento, sino que están siendo introducidos cada vez más en aplicaciones convencionales, como el reemplazo de envases de alimentos a base de poliestireno, siendo este otro gran potencial de los materiales compuestos pues, si se hace una correcta elección de la matriz y el refuerzo, se pueden abordar problemas ambientales (Sapuan, 2017). Aunque existen materiales compuestos naturales como son la madera o el hueso, la mayoría de los que se encuentran en la actualidad son diseñados y fabricados por el ser humano (Stupenengo, 2011).

En general, los refuerzos son mucho más fuertes y más rígidos que la matriz. No obstante, ambos componentes juegan un papel de especial importancia, pues cada uno debe realizar tareas específicas a fin de que el compuesto desempeñe exitosamente la función prevista (Staab, 2015). Es importante entender sus características y cómo se relacionan:

- Matriz

Es la fase continua (material aglutinante) que soporta, separa y protege (de posibles daños durante su manufactura) al refuerzo, transmitiéndole las cargas y proporcionándole cohesión. Además, es el constituyente más determinante a la hora de controlar las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el empleo a altas temperaturas del compuesto. Este papel pueden llevarlo a cabo tanto materiales metálicos, como cerámicos y polímeros, siendo estos últimos los empleados con más frecuencia. La matriz también determinará algunas características geométricas del material como el acabado superficial y la conformabilidad (Staab, 2015) (Stupenengo, 2011).

- Refuerzo

Es la fase discontinua o dispersa que se agrega a la matriz a fin de conseguir un compuesto final con mejores propiedades que las que ofrece esta. Generalmente, se consigue un aumento de la resistencia y rigidez mecánicas, aunque también se utilizan refuerzos para mejorar el comportamiento a elevadas temperaturas y/o la resistencia a la abrasión (Stupenengo, 2011). Los más utilizados son el boro, el vidrio, grafito (a menudo denominado simplemente como carbono) y Kevlar (polímero totalmente aromático fabricado solo en forma de fibra, que no se puede fundir y que es químicamente muy similar al nylon T), pero hay otros tipos refuerzos tales como alúmina, aluminio, carburo de silicio, nitruro de silicio y titanio (Staab, 2015).

Por otra parte, de especial importancia es la interfase (zona de contacto entre matriz y refuerzo) para obtener un compuesto con unas buenas propiedades mecánicas. La razón de esto es que, si la interfase es débil, es decir, no hay suficiente adhesión entre los constituyentes del compuesto, la transferencia de cargas de la matriz al refuerzo no será óptima, soportando la matriz el mayor porcentaje de estas, la cual acabará fallando, pues cuenta con una menor resistencia. Una interfase débil también supone el origen de huecos entre matriz y refuerzo, dando lugar a concentradores de tensiones, lo que llevará a la rotura de la pieza. Conseguir una buena adhesión entre los constituyentes es una tarea compleja, dado que normalmente la matriz y el refuerzo provienen de familias distintas de materiales. Es por esto que se utilizan aditivos para recubrir el material del refuerzo y lograr así un mejor grado de compatibilidad con el material de la matriz (Stupenengo, 2011).

2.3.1.3. Clasificación

En lo que respecta a la clasificación de los materiales compuestos, dos niveles son distinguidos frecuentemente. El primero suele hacer referencia a la matriz. Las principales clases de materiales compuestos incluyen los de matriz de polímero, matriz metálica y los de matriz cerámica. Como se verá posteriormente también existen compuestos de carbono-carbono (Fan *et al.*, 2016).

En la Figura 2.6 se pueden observar las familias principales de materiales, obteniéndose la cuarta, que es la que corresponde a los materiales compuestos, mediante combinación de las otras.

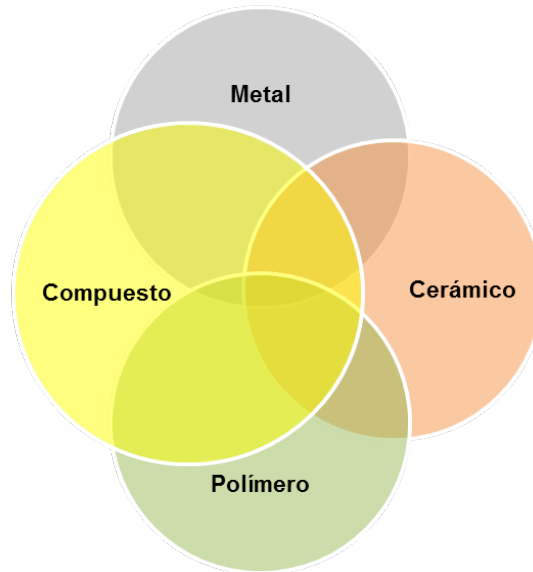


Figura 2.6. Las cuatro familias básicas de materiales según Haghshenas (2016).

- Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC, del inglés *Polymer Matrix Composite*): las matrices poliméricas son las más comunes y menos costosas. Estos materiales constan de una matriz de polímero termoestable (como epoxy y fenoles) o termoplástico (como policarbonato, policloruro de vinilo, nylon y acrílicos), en la que se encuentran incrustadas fases de refuerzo, como pueden ser, por ejemplo, partículas o fibras de carbono, cristal, metal o Kevlar (Haghshenas, 2016) (Qin, 2015). Los de matriz de polímero termoplástico son más usados en automoción, mientras que los de polímero termoestable predominan en la industria aeroespacial (Fan *et al.*, 2016). Los polímeros son fáciles de procesar, ofrecen buenas propiedades mecánicas, generalmente los refuerzos están bien húmedos y proporcionan una buena adherencia. Son un material de baja densidad. Debido a las bajas temperaturas de procesamiento, se pueden usar muchos refuerzos orgánicos, como el Kevlar, mencionado anteriormente (Staab, 2015).
- Materiales compuestos carbono-carbono (C/C): están formados por una matriz de carbono en la que se encuentran incrustadas fibras de carbono. Este material es excelente para altas temperaturas utilizado en una atmósfera inerte o no oxidante, pudiendo ser la temperatura de trabajo tan alta como 2000 °C. Las aplicaciones típicas de alta temperatura incluyen roturas para aeronaves y automóviles, troqueles para su uso en sujetadores de alta temperatura de

prensado en caliente, elementos de calefacción en hornos y tubos de protección y conos de punta de transbordadores espaciales (Qin, 2015).

- Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC, del inglés *Ceramic Matrix Composite*): los constituyen una matriz cerámica (por ejemplo, SiC, Al₂O₃ o SiN) y refuerzos, a modo de fibra, de otros materiales cerámicos (Haghshenas, 2016). Estos compuestos ofrecen una alta resistencia y dureza a temperaturas muy elevadas, por lo que los límites de temperatura de servicio son altos, además de poseer una baja densidad, ventaja común a todos los materiales compuestos. Por esto, la aplicación de estos materiales se encuentra en campos que requieren confiabilidad a muy altas temperaturas y resistencia a la corrosión y al desgaste como, por ejemplo, componentes para turbinas de gas a alta temperatura o componentes para quemadores (Qin, 2015).
- Materiales compuestos de matriz metálica (MMC, del inglés *Metal Matrix Composite*): constituidos por una matriz de metal (Al, Mg, Fe, Co, Cu) y por un refuerzo de material metálico, como el Pb, W (wolframio o tungsteno) o Mb, u otro tipo de material, como son los óxidos, carburos y compuestos orgánicos (Qin, 2015). Estos materiales compuestos son especialmente buenos para un servicio a alta temperatura bajo una atmósfera oxidante, destacando también por su rigidez y resistencia específicas mejoradas y una baja densidad (Meola *et al.*, 2018).

El segundo nivel de clasificación se refiere a la geometría del refuerzo, donde principalmente se distinguen dos tipos: compuestos reforzados con partículas y compuestos reforzados con fibra (Fan *et al.*, 2016) (Aleksendrić *et al.*, 2015).

- Compuestos reforzados con partículas:

Consisten en partículas sumergidas en matrices tales como aleaciones y cerámicas. Suelen tener un comportamiento isotrópico dado que las partículas son agregadas a la matriz aleatoriamente, pudiendo tener cualquier forma, tamaño o configuración. Estos materiales compuestos cuentan con ventajas como resistencia mejorada, aumento de la temperatura de servicio y resistencia a la oxidación, entre otras. Hay que añadir que, según Stupenengo (2011), este refuerzo será más efectivo a medida que las partículas cuenten con un menor tamaño y su disposición en la matriz sea más homogénea. Los ejemplos más típicos incluyen el uso de partículas de aluminio en el caucho, partículas de carburo de silicio en aluminio y grava, arena y cemento para fabricar hormigón (Kaw, 2006). Se pueden encontrar dos subclases de compuestos reforzados con partículas según Staab (2015):

- Copos: estos compuestos consisten en refuerzos planos, en forma de plaqueta, con una geometría principalmente bidimensional con resistencia y rigidez en dos direcciones. Los copos se disponen en la matriz de forma paralela entre sí, lo que da como resultado una mayor densidad que en los compuestos reforzados con fibra. A pesar de contar con ventajas como una alta resistencia y un bajo coste, este tipo de refuerzo no puede ser orientado de manera sencilla y solo un número limitado de materiales están disponibles para su uso. Los principales son la mica (junto a matrices vídrias, da lugar a compuesto fácilmente mecanizables, destacando su uso en aplicaciones eléctricas), el aluminio (frecuentemente usado en pinturas y recubrimientos en los que las partículas se orientan de forma paralela a la superficie) y la plata (usados para aplicaciones que requieren de una buena conductividad, ya sea térmica o eléctrica) (Kaw, 2006) (Qin, 2015).
- Lleno/esquelético: un compuesto relleno/esquelético se compone de una matriz esquelética continua llena por un segundo material (relleno), como puede ser un núcleo de panal de abeja relleno con un material aislante. Los rellenos son partículas o polvos agregados al material para cambiar y mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos. También se utilizan para reducir el consumo de un material aglutinante más caro. En

particular, los rellenos se utilizan para modificar o mejorar propiedades como la conductividad térmica, resistividad eléctrica, fricción, resistencia al desgaste y resistencia a la llama. Los materiales típicos son carbonato de calcio, óxido de aluminio, cal (también conocido como óxido de calcio), sílice pirógena, arcillas tratadas y perlas de vidrio huecas (Staab, 2015) (Qin, 2015).

En la siguiente imagen se muestra un esquema de los compuestos reforzados con partículas.

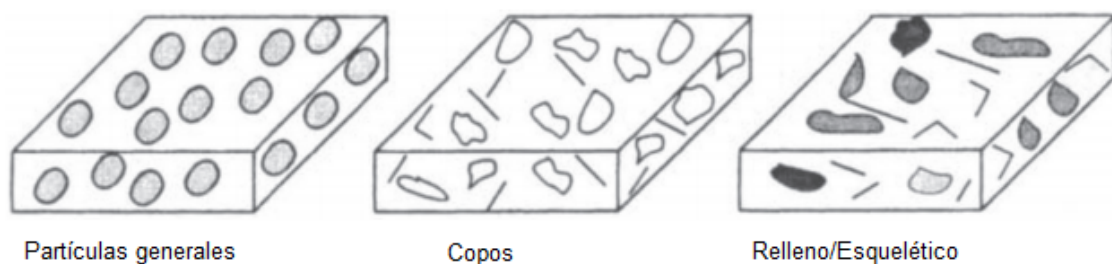


Figura 2.7. Esquema de materiales compuestos reforzados con partículas (Staab, 2015).

- Compuestos reforzados con fibra:

Históricamente el uso de la fibra ha predominado en el sector de la industria textil, produciendo con ellas productos como prendas de ropa, cuerdas, etc. Gradualmente, su uso se fue extendiendo más en el mundo de la ingeniería, teniendo como claro ejemplo los cinturones de seguridad de los transportes (Chawla *et al.*, 2018).

Una fibra puede definirse como un material alargado que tiene una sección transversal más o menos equiaxiada y uniforme, de diámetro o grosor inferior a 250 μm y una relación de aspecto, definida como la relación entre la longitud de la fibra y el grosor, o diámetro de la sección transversal de la fibra, mayor que, aproximadamente, 100. Esta es una definición puramente geométrica y se aplica a cualquier material (Chawla *et al.*, 2018). Hay que añadir que se habla de grosor o diámetro de la fibra porque la sección transversal de estas puede ser circular, cuadrada y hexagonal, de acuerdo con Qin (2015).

Los materiales en forma de fibra son considerablemente más fuertes y más rígidos que en su forma masiva. Se cree que esto fue demostrado científicamente por primera vez en 1920 por Griffith, quien midió la resistencia a tracción de varillas de vidrio y fibras de vidrio de diferentes diámetros, observando que, a medida que las varillas y las fibras se hacían más delgadas, se hacían más fuertes (Gibson, 2012). Esto, según Kaw (2006) se debe básicamente a tres factores:

- La resistencia real de los materiales es menor que la teórica debido al número de fallas inherentes, de manera que eliminando estas imperfecciones se consigue aumentar la resistencia del material. Por esta razón, dado que a medida que se reduce el diámetro de la fibra hay menor probabilidad de que aparezcan imperfecciones internas en esta, la resistencia aumenta.
- Para una mayor ductilidad y dureza, y una mejor transferencia de cargas de la matriz al refuerzo, los compuestos requieren una mayor superficie de la interfase, la cual es inversamente proporcional al diámetro de la fibra.
- En la fabricación de materiales compuestos se requieren fibras capaces de doblarse sin romperse. La capacidad de doblarse es inversamente proporcional al diámetro de la fibra, por lo que aumenta con una disminución en el diámetro de esta y es medida como flexibilidad.

Estos materiales consisten en inclusiones lineales cortas o largas incrustadas en una matriz circundante. Estos ofrecen rendimientos mecánicos extremadamente interesantes en comparación con los materiales más convencionales. Las propiedades óptimas se logran mediante el cuidadoso diseño de muchos parámetros, como la fracción de volumen de fibra, la orientación de la fibra (este es uno de los más importantes, pues en la orientación de las fibras, el material tendrá una mayor resistencia y rigidez, mientras que, en dirección perpendicular a ellas, las propiedades mecánicas se verán muy mermadas), la relación de aspecto de la fibra, la ductilidad o la fragilidad de cada fase, la calidad de la interfase y muchos más. Obviamente, esto ofrece una amplia gama de comportamientos mecánicos que deben entenderse bien para cada aplicación industrial en particular. Cabría destacar, entre las principales ventajas, el aumento de la resistencia a la tracción y el módulo de Young (Bleyer, 2018) (Kaw, 2006).

En lo que respecta a su clasificación, el refuerzo puede encontrarse en forma de fibras continuas o discontinuas (bigotes) (Staab, 2015), como bien se ha mencionado previamente:

- Fibras continuas: estos compuestos están formados por una matriz reforzada por una fase dispersa en forma de fibras continuas, de diámetro, normalmente, entre 3 y 200 μm según Staab (2015). Estas fibras son fáciles de orientar y procesar. Además, proporcionan muchos beneficios sobre las fibras cortas, entre los que destacan resistencia al impacto, baja contracción, acabado superficial mejorado y estabilidad dimensional (Kaw, 2006). Los compuestos reforzados de fibra larga se clasifican además en fibras orientadas de forma unidireccional y bidireccional (esto es, tejido) (Haghshenas, 2016).
- Fibras discontinuas: estos compuestos están formados por una matriz reforzada por una fase dispersa en forma de fibras cortas (de diámetro entre 3 y 100 μm). Estas fibras son difíciles de manipular para conseguir de manera completa una correcta orientación. No obstante, tienen algunas ventajas sobre las continuas, y es que posibilitan una reducción de costes, son fáciles de trabajar y tienen procedimientos de fabricación de tiempo de ciclo rápidos. Además, tienen menos defectos y por lo tanto tienen una mayor resistencia, tanto a tracción como a compresión (Kaw, 2006). Los materiales compuestos reforzados de fibra corta se clasifican a su vez en fibras orientadas aleatoriamente y fibras preferentemente orientadas (Haghshenas, 2016).

En la siguiente imagen se puede observar la clasificación anterior, donde el tejido liso vendría a ser un conjunto de fibras continuas dispuestas en dos direcciones, fibras continuas bidireccionales. Además, también se muestran otros dos tipos de tejido, 3D y 2D.



Figura 2.8. Algunas configuraciones de refuerzos en forma de fibra (Haghshenas, 2016).

Finalmente, con respecto al material de las fibras, se puede distinguir entre los principales, de acuerdo con Qin (2015):

- Fibra de vidrio: consiste principalmente en elementos modificadores de dióxido de silicio y óxido metálico y, generalmente, se produce mediante estirado mecánico de vidrio fundido a través de un pequeño orificio. Son ampliamente utilizadas debido a su bajo costo y alta resistencia a la corrosión, y se suelen encontrar combinadas con matrices de resina de poliéster. Su comportamiento con respecto a la tracción es comparable al de las fibras de carbono y de aramida, pero con menor módulo de Young y resistencia a la compresión que estas, aunque posee mayor ductilidad que ambos. Entre las aplicaciones más usuales entre este tipo de fibra se encuentran las cañas de pescar, tanques de almacenamiento y partes de aviones (Qin, 2015) (Stupenengo, 2011).
- Fibra de aramida: la aramida es un filamento orgánico procedente de derivados del petróleo. Este tipo de fibra tiene una mayor resistencia específica y es más liviana que el vidrio, y más dúctil que el carbono. Algunos ejemplos de aplicaciones industriales son armaduras, ropa de protección y artículos deportivos (Qin, 2015) (Stupenengo, 2011).
- Fibra de carbono: se fabrica a partir de un poliacrilonitrilo (PAN) oxidado o a través de polímeros carbonizados por pirólisis. Se caracteriza por su alta resistencia mecánica y su elevada rigidez, aunque pobre resistencia a la

fricción y al impacto. Esta puede tener un módulo de Young tan alto como 950 GPa, con una baja densidad. Su diámetro suele ser entre 5 y 8 μm , más pequeño que un cabello humano (50 μm) (Qin, 2015) (Stupenengo, 2011).

- Fibra de boro, que generalmente tiene una alta rigidez, buena resistencia a la compresión y grandes diámetros (0,05–0,2 mm). Los compuestos con fibras de boro se usan ampliamente en estructuras aeroespaciales donde se necesita una alta rigidez.
- Fibra de carburo de silicio: se usa generalmente en compuestos de matriz cerámica y metal de alta temperatura debido a su excelente resistencia a la oxidación, alto módulo de Young y resistencia en atmósfera de alta temperatura. (Qin, 2015).

En la Figura 2.7 se muestran algunas propiedades de los materiales compuestos, en morado, en comparación con las de otros dos materiales de uso muy común, acero y aluminio.

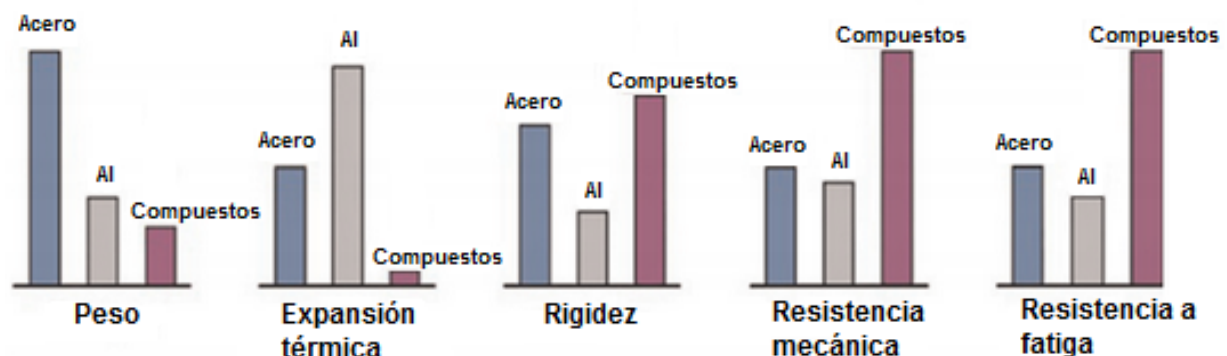


Figura 2.9. Comparación de algunas propiedades físicas y mecánicas de los compuestos con el acero y el aluminio (Haghshenas, 2016).

2.4. Propiedades mecánicas

En el diseño de una estructura o un componente, el ingeniero cuenta con una amplia gama de materiales. Para elegir el más adecuado se requieren mediciones precisas de las propiedades mecánicas, con el fin de diseñar una estructura o producto que cumpla con los requisitos de su aplicación prevista. Los ingenieros utilizan este conocimiento para tomar decisiones sobre la elección de materiales tanto en diseños críticos de seguridad como no críticos. Estas propiedades se determinan utilizando

estándares de medición aceptados, bases de datos certificadas o materiales de referencia. Los estándares de prueba aplicables se determinan según el uso final del material, la debilidad inherente en el diseño, los requisitos de durabilidad y los factores de seguridad (Ashby *et al.*, 2012) (Forster, 2015).

En cuanto a las propiedades mecánicas, a menudo se definen en términos de comportamiento en cargas que no producen fallo o de comportamiento de fallo en sí mismo. Para sólidos, el primer caso se caracteriza generalmente por módulos que se definen como la tensión dividida por la deformación que esta produce. Los módulos se pueden medir con varios modos de carga diferentes: tracción, compresión, flexión, cizallamiento o torsión y, en la región lineal, con constantes de proporcionalidad (Forster, 2015).

2.4.1. Definiciones principales

A continuación, se mostrarán las definiciones básicas asociadas al módulo elástico de un material, según Ashby *et al.* (2012) y la norma española UNE-EN ISO 527-1 (2012):

- Tensión o esfuerzo: se define como la magnitud de una fuerza dividida por el área de la superficie sobre la que actúa. Se mide en MPa. Se tienen dos tipos de esfuerzos en función de cada componente de la fuerza:
 - Esfuerzo o tensión normal σ : el grado de esfuerzo o tensión normal se mide mediante la relación entre la fuerza perpendicular a una superficie y el área de esa superficie.

$$\sigma = \frac{F_n}{A}$$

(Fórmula 2.1)

Donde:

F_n = fuerza normal a la superficie

A = área de la superficie

- Tensión tangencial o esfuerzo cortante: queda definida mediante la componente tangencial de la fuerza, que es tangente a la superficie. Esta fuerza, dividida por el área, permite obtener el esfuerzo cortante.

$$\tau = \frac{F_t}{A}$$

(Fórmula 2.2)

Donde:

F_t = fuerza tangente a la superficie

A = área de la superficie

Una vez definidos estos conceptos, hay que añadir que, según la dirección de aplicación de las cargas, existen tensiones simples, biaxiales y triaxiales, siendo la presión hidrostática un caso particular de estas últimas, en el que un objeto está sometido a una compresión igual por todas sus partes.

- Deformación: es la respuesta de los materiales como consecuencia del esfuerzo que soportan. Se distinguen tres tipos de deformaciones, entre otras, las cuales se miden de distinto modo:
 - Deformación longitudinal: es producida por un esfuerzo normal (tensión simple). Se mide como el incremento de longitud entre la longitud inicial.
 - Deformación tangencial: producida por un esfuerzo tangencial. Se define como la tangente del ángulo de deformación.
 - Dilatación volumétrica: producida por un estado triaxial de tensiones. Se define como la variación de volumen entre el volumen inicial.

2.4.2. Propiedades a tracción

Un esfuerzo de tracción es aquel que viene dado por la aplicación de fuerzas con igual dirección, pero de sentido contrario, y perpendiculares a la sección transversal del elemento sobre el que actúan. Esto es, un esfuerzo normal que provoca una deformación longitudinal, la cual se basa en una elongación o alargamiento del elemento.

Mediante un ensayo de tracción, se pueden determinar las siguientes propiedades (Forster, 2015) (McKeen, 2019):

- Módulo de Young (E): es la pendiente de la curva tensión/deformación en la zona de deformación elástica. Se expresa en MPa y se define como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

(Fórmula 2.3)

Donde:

σ = fuerza tangente a la superficie

ε = deformación longitudinal

Definiéndose ε como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o}$$

(Fórmula 2.4)

Donde:

Δl = variación de longitud

l_o = longitud inicial

- Coeficiente de Poisson (ν): es la relación, en valor negativo, de la deformación transversal, la cual produce un estrechamiento de la sección, y la deformación longitudinal.
- Límite elástico (σ_y): valor a partir del cual el material abandona la zona de comportamiento elástico y se inicia la deformación plástica de este.
- Punto de fluencia: se trata de un punto que aparece tras el límite elástico, a partir del cual un aumento de la deformación no supone un aumento de la tensión.
- Esfuerzo último (σ_u): primero hay que entender que la resistencia mecánica de un cuerpo es la capacidad de este de soportar la aplicación de cargas sin llegar a romper. En un ensayo a tracción se habla de resistencia a tracción, que es el esfuerzo o tensión de tracción correspondiente a una elongación específica. En

este caso, el esfuerzo último es la resistencia a tracción máxima o última, pues es el máximo esfuerzo que soporta el material antes de fallar.

- Esfuerzo de rotura (σ_r): corresponde a la carga de rotura, que será menor que la carga máxima que soporta el elemento.

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

Antes de definir la metodología a desarrollar, es preciso presentar el concepto de experimento, que se puede definir como una prueba o una serie de pruebas en las que se realizan cambios intencionados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que exista la posibilidad de identificar las razones de los cambios que se pueden observar en la respuesta de salida (Montgomery, 2001).

A la hora de realizar un plan experimental es necesario que todas las personas involucradas en el mismo tengan una idea previa clara de qué parámetros van a ser estudiados, de cómo va a ser recopilada la información y, finalmente, cómo va a ser analizada. Para ello, se seguirá el siguiente desarrollo según Montgomery (2001):

- Primero. Identificación y declaración del problema
- Segundo. Elección de parámetros críticos, niveles y rangos
- Tercero. Selección de la variable de respuesta
- Cuarto. Elección del diseño experimental
- Quinto. Ejecución del experimento
- Sexto. Análisis estadístico de la información
- Séptimo. Conclusiones y recomendaciones

Los tres primeros pasos se corresponden con la planificación pre-experimental. En la práctica, el segundo y el tercero suelen realizarse simultáneamente.

3.2. Planificación pre-experimental

3.2.1. Identificación y declaración del problema

Es necesario recordar que, a pesar de todas las ventajas que proporciona la fabricación aditiva, todavía cuenta con limitaciones en ciertos aspectos, entre ellas, la resistencia mecánica, que debe ser mejorada para poder ampliar el campo de aplicación de esta tecnología.

Los materiales reforzados ofrecen una mayor resistencia mecánica que los convencionales. Se pretende estudiar qué parámetros, a la hora de realizar el proceso

de impresión 3D, tanto con material virgen como con ese mismo material reforzado con fibra, pueden afectar a las propiedades mecánicas de la pieza fabricada. Para ello, se fabricarán probetas de ambos materiales, siguiendo el mismo proceso de fabricación para cada uno, que serán ensayadas a tracción. Esto es debido a que, según Lanzotti *et al.* (2015) el comportamiento de la pieza a tracción es más crítico que el comportamiento a compresión, debido al proceso de fabricación y a la rugosidad superficial. De esta manera, se podrá examinar cómo influyen los distintos factores de impresión sobre el comportamiento mecánico de cada material.

3.2.2. Elección de parámetros, niveles y rangos

La caracterización y comprensión de los efectos que los parámetros de impresión tienen en las propiedades finales de las piezas impresas en 3D desempeñan un papel importante en la capacidad de estas para ser utilizadas en aplicaciones de ingeniería (Naranjo-Lozada *et al.*, 2019).

En este segundo paso, se procederá a seleccionar los posibles parámetros influyentes en el comportamiento mecánico, así como los niveles y rangos que se establecen para cada uno de ellos.

En el proceso de fabricación aditiva existe un elevado número de factores que pueden alterar las propiedades mecánicas, siendo los principales (Durão *et al.*, 2017) (Naranjo-Lozada *et al.*, 2019) (Chacón *et al.*, 2017) (Lanzotti *et al.*, 2015):

- Parámetros de deposición de capas: altura de capa, grosor de la pared (grosor de capa de la pared), número de contornos o perímetros, densidad o porcentaje de relleno (relacionado directamente con la porosidad), patrón de relleno (que define el ángulo de relleno de cada capa, tomando valores de 0° a $\pm 180^\circ$), flujo de material, espesor de la primera capa y espesor de la última capa.
- Extrusor: velocidad de impresión, diámetro del extrusor, ancho de extrusión (el límite máximo es normalmente un 130% del diámetro de la boquilla, según Hayagrivan (2018)), ángulo de inclinación del extrusor, temperatura de extrusión y vibración.
- Cámara: temperatura de la plataforma, temperatura ambiente, nivelación de la plataforma, distancia entre el extrusor y la plataforma y evacuación de calor.

- Material extruido: tipo de material, viscosidad, tensión superficial, calor específico, conductividad térmica, temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea (Blok *et al.*, 2018).

Por otra parte, los materiales utilizados en fabricación aditiva presentan propiedades de anisotropía, lo que quiere decir que según la orientación en que se imprima la pieza tendrá un mejor o peor comportamiento mecánico. La orientación de impresión se refiere a cómo y en qué dirección se coloca una muestra en la plataforma de la impresora.

A continuación, se muestran las tres direcciones de impresión: horizontal (Figura 3.1), canto (Figura 3.2) y vertical (Figura 3.3).

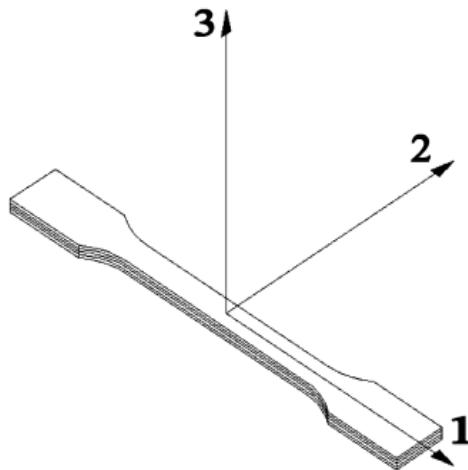


Figura 3.1. Probeta 1A. Posición horizontal (UNE 116005, 2012)

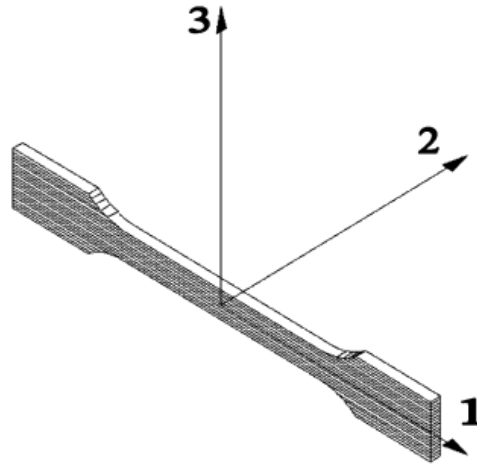


Figura 3.2. Probeta 1A. Posición de canto (UNE 116005, 2012).

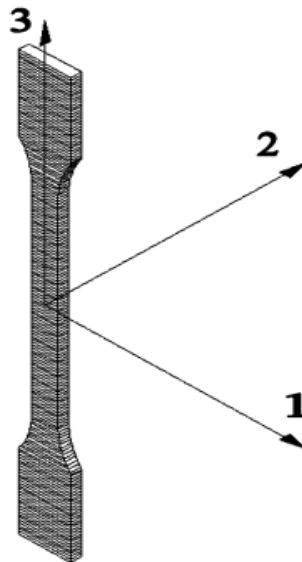


Figura 3.3. Probeta 1AV. Posición vertical (UNE 116005, 2012).

De acuerdo con lo anterior, se considera adecuada la realización de un estudio dividido en dos ensayos para reducir el coste de la realización de los ensayos en términos de material, tiempo y esfuerzo. Con este objetivo, el estudio consta de dos ensayos: experimento 1 y experimento 2.

El experimento 1 tiene como finalidad estudiar la influencia de la altura de capa y la velocidad de impresión para probetas impresas verticalmente. Esto es porque se pretende verificar el experimento realizado por Chacón *et al.* (2017), según el cual, la orientación vertical muestra las propiedades mecánicas más bajas, mientras que las posiciones plana y de canto muestran la mayor resistencia y rigidez. Desde el punto

de vista de la altura de capa y la velocidad de impresión, se observa que el esfuerzo de tracción aumenta a medida que lo hace la altura de capa y disminuye a medida que aumenta la velocidad de impresión para la orientación vertical. Sin embargo, las variaciones en las propiedades mecánicas con la altura de capa y la velocidad de avance son de poca importancia para las orientaciones plana y de canto, excepto en el caso particular de una altura de capa baja, a partir de 0,12 mm hacia abajo.

Se estudiará el grado de influencia de la altura de capa con mayor nivel de detalle que la influencia de la velocidad de impresión, contando con tres y dos niveles, respectivamente. Con esto se pretende contemplar la posibilidad de reducir el número de parámetros críticos de estudio.

En la siguiente tabla se muestran los distintos factores del experimento, identificando también los principales factores del experimento de un único nivel, así como sus niveles y nomenclatura, siendo los factores de estudio.

Parámetro	Nivel	Nomenclatura
Altura de capa (h)	3	$h1, h2, h3$
Velocidad de impresión (v)	2	$v1, v2$
Temperatura de impresión (T)	1	$T1$
Número de contornos (c)	1	$c1$
Densidad de relleno (ρ)	1	$\rho1$
Patrón de relleno (r)	1	$r1$

Tabla 3.1. Parámetros, niveles y nomenclatura para el experimento 1.

El experimento 2 dependerá de los resultados obtenidos en el experimento 1, pues existe la posibilidad de despreciar el estudio los dos parámetros de impresión (altura de capa y velocidad de impresión), de uno de ellos solamente o de ninguno. A estos, se les sumarán otros distintos factores a analizar, los cuales se escogerán en función de una revisión de la literatura existente. Por lo anterior, la metodología final seguida en el experimento 2 se expondrá en el punto 4.

3.2.3. Selección de la variable de respuesta

Para la selección de la variable de respuesta se ha de tener una idea clara y una cierta seguridad sobre qué variable proporciona información relevante sobre el estudio

(Montgomery, 2001). Por este motivo, se va a emplear la carga máxima a tracción para poder valorar cómo influyen los parámetros críticos del proceso de fabricación, escogidos anteriormente, sobre el comportamiento de la pieza a tracción, de manera que se pueda obtener una adecuada configuración de estos que proporcione una resistencia máxima. Cabría la posibilidad de seleccionar como alternativa la carga de rotura, básicamente para probetas impresas en dirección vertical, pues es muy cercana a la tensión máxima, ya que se produce una rotura bastante frágil. No obstante, dado que las capas de las probetas impresas horizontalmente y de canto se adhieren mejor unas con otras y, lo más importante, están en el mismo plano que el de carga, la rotura va a ser más dúctil, por lo que la tensión máxima va a ser bastante superior a la última de rotura.

3.3. Elección del diseño experimental

Según Montgomery (2001), la elección del diseño experimental involucra la consideración del tamaño de la muestra, la selección de un adecuado orden para los ensayos experimentales y la identificación de si existen o no restricciones de aleatorización.

Por otra parte, es de especial importancia tener en mente los objetivos fijados anteriormente, con el fin de poder estudiar de la mejor manera posible cómo afectan los distintos factores a la variable de respuesta (Montgomery, 2001). Como objetivo principal se tiene el de encontrar la mejor configuración de parámetros de impresión posible a fin de obtener una resistencia a tracción máxima, especialmente para el material reforzado que se empleará, que es realmente el tema principal de estudio.

Es importante saber que, en cualquier experimento, la variabilidad que surge de un factor de ruido (*nuisance*) puede afectar los resultados, definiéndose este como un factor de diseño que no interesa estudiar pero que probablemente afecte a las respuestas de los ensayos. En los procesos de fabricación aditiva existen infinidad de parámetros, muchos de los cuales no se pueden controlar y muchos otros que no se conocen, lo que da lugar a factores *nuisance* desconocidos e incontrolables. Es por esto que surge la necesidad de adoptar la técnica de aleatorización como principal solución para protegerse de estos factores (Montgomery, 2001).

Para el estudio del experimento 1 se obtienen seis combinaciones, como se muestra en la Fórmula 3.1. Todas ellas serán consideradas, imprimiendo una probeta por combinación, para cada material de estudio.

$$\text{Número de combinaciones} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ ensayos}$$

(Fórmula 3.1)

A continuación, se presenta la Tabla 3.2, mediante la cual se muestra la planificación del experimento 1, tomando como respuesta la carga máxima a tracción (F). Hay que aclarar que para este experimento no se ha usado la técnica de aleatorización previamente mencionada, pues cuenta con un bajo número de ensayos.

Ensayos	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	F (kN)
e_1	1	1	1	$F1$
e_2	1	2	1	$F2$
e_3	1	1	2	$F3$
e_4	1	2	2	$F4$
e_5	1	1	3	$F5$
e_6	1	2	3	$F6$

Tabla 3.2. Planificación del experimento 1.

3.4. Ejecución del experimento

Durante la realización de un experimento es de vital importancia revisar todo el proceso cuidadosamente para asegurarse de que todo vaya ejecutándose de acuerdo al plan experimental previamente establecido (Montgomery, 2001).

Cualquier proceso, en particular la fabricación aditiva, se puede concebir como una caja negra, en la que se conocen las variables de entrada, obteniendo unas de salida, pero no controlando otras variables que intervienen en el proceso, como son los factores de ruido. Por consiguiente, hay que seguir el mismo procedimiento durante todo el experimento a fin de encontrarse siempre en las mismas condiciones con el fin de poder aislar ese ruido todo lo posible.

A continuación, se explicará el procedimiento general seguido para llevar a cabo los experimentos, los cuales se dividen en tres etapas: preparación de las probetas, proceso de impresión de la pieza y ensayo de tracción.

3.4.1. Preparación de las probetas

A la hora de diseñar el archivo CAD de las probetas, se escogerán las dimensiones de estas de acuerdo a la norma UNE 116005 (2012). Según esta norma, existen dos tipos de probetas para realizar los ensayos a tracción, siendo estas las probetas 1A y 1AV. La primera de ellas corresponde al diseño de aquellas probetas que se imprimirán en orientación horizontal y de canto, y el otro tipo se utilizará para las probetas impresas en dirección vertical.

En la Figura 3.4 se puede observar el diseño de estos tipos de probetas, siendo igual para ambos y variando únicamente en las dimensiones, como se muestra en la Tabla 3.3.

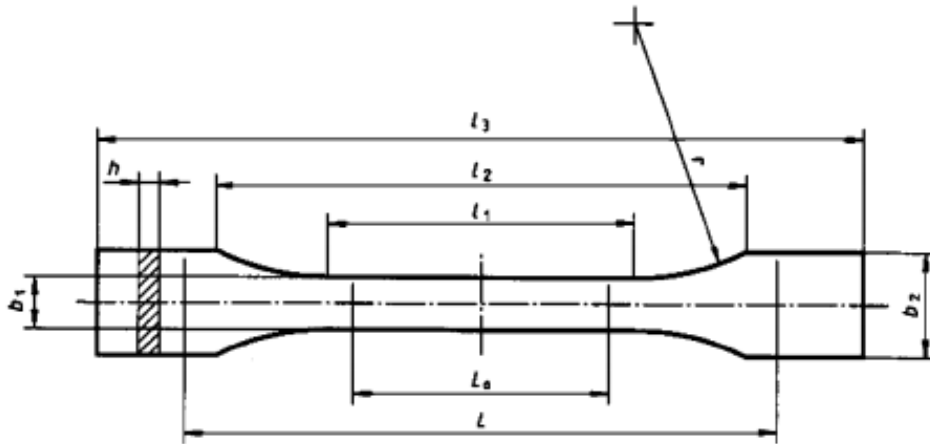


Figura 3.4. Esquema de la probeta (UNE 116005, 2012).

Tipo de probeta	1A	1AV
l_1 , longitud de la zona paralela estrecha	80 ± 2	
l_2 , longitud entre zonas paralelas anchas	104 a 113	74 a 83
l_3 , longitud total	≥ 150	≥ 120
r , radio	20 a 25	
b_1 , anchura en la zona estrecha	$10 \pm 0,2$	
b_2 , anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$	
H	$4 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$
L_0	$50 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$
L	115 ± 1	85 ± 1

Tabla 3.3. Dimensiones (mm) de las probetas de tracción tipo 1A y 1AV (UNE 116005, 2012).

3.4.2. Proceso de impresión 3D

Para imprimir las probetas a ensayar, tanto para el experimento 1 como para el experimento 2, se emplea la técnica de modelado por deposición fundida, variando la configuración de los parámetros de impresión.

El procedimiento general que se desarrolla en los siguientes pasos:

- Primero. Se diseña un modelo CAD de las probetas a imprimir mediante un software de diseño. Para ello se ha utilizado CATIA V5.
- Segundo. Una vez generado el modelo en CAD, se convierte el archivo a formato .STL. Esto se hace de manera sencilla con el programa de CATIA, que da la opción de guardar el archivo con este formato.
- Tercero. El archivo STL se carga en un software de segmentación, en este caso en el Ultimaker Cura 4.0.0. De esta manera se pueden configurar los parámetros de impresión deseados y realizar todas las combinaciones establecidas.
- Cuarto. Se guarda el *gcode* que genera el software de segmentación en una tarjeta SD o *pendrive*, transfiriéndolo, así, a la impresora.
- Quinto. Antes de comenzar con la impresión hay que calibrar la cama mediante la opción “*Levelling*” y precalentar tanto el extrusor como la cama con la opción “*Preheat*”. Debe conocerse que la calibración de la cama es de suma importancia

si se quiere imprimir un objeto con éxito, pues las primeras capas deberán adherirse perfectamente a ella.

- Sexto. Ahora se procede a introducir el filamento de material en el cabezal del extrusor, para lo cual es necesario utilizar la opción “*Extrusion*”, y dentro de esta se seleccionar “*In*” para cargar el filamento, el cual, en un principio, deberá ser guiado y ayudado para lograr con éxito la extrusión de material. Además, a medida que se carga se irán extruyendo algunos milímetros de hilo, lo cual posibilita limpiar la boquilla de restos anteriores de material si los hubiese y mejorar algo la fluidez durante el proceso de extrusión.
- Séptimo. Se añade a la cama, o placa de impresión, spray para poder mejorar la fijación de las primeras capas depositadas sobre esta.
- Octavo. Se selecciona mediante la pantalla táctil de la impresora el archivo *.gcode* que se desee imprimir.
- Noveno. Una vez impresa la pieza, se retira mediante la ayuda de una espátula, siendo recomendable esperar a que se reduzca ligeramente la temperatura de la cama para poder realizar esta acción con menos dificultades. A cada probeta finalizada se le va asignando su correspondiente identificador de ensayo.

Hay que añadir a lo anterior que, tras la impresión de cada probeta se ha pasado una varilla de limpieza por dentro de la boquilla del extrusor y limpiado con papel los restos de material fundido que quedasen por fuera de esta. Además, cada seis probetas se introdujo un filamento de limpieza para eliminar posibles acumulaciones de material dentro de la boquilla. Esto se llevó a cabo exactamente de la misma manera para cada material para minimizar las variaciones en los resultados debidas al estado de la boquilla. No obstante, es preciso destacar que siempre existen parámetros difíciles de controlar, como la temperatura ambiente o las vibraciones de la máquina, y otros que se desconocen.

Con respecto a los parámetros de impresión, el software Ultimaker Cura 4.0.0 ofrece una opción llamada “Adherencia de la placa de impresión”, la cual permite que la pieza se adhiera mejor a la cama y no se despegue en mitad del proceso de fabricación. Hay que especificar que para las probetas horizontales se escogió un tipo

distinto que para las probetas de canto y verticales. Además, para las probetas de canto se eligió la opción de “Generar soporte”. Tanto el tipo de adherencia como el soporte serán retirados una vez se extraiga la pieza de la impresora. A continuación, se aclaran las especificaciones que se han seguido para cada probeta:

- Orientación horizontal: el tipo de adherencia seleccionado para este caso es el de “Falda”, que aparece en la Figura 3.5. Especialmente se ha utilizado para mejorar la calibración de la cama, pues extruye material, con un margen de separación, alrededor de la probeta, indicando el número de vueltas deseadas. De esta manera se podrá observar el grosor de las líneas, viendo si por un lado se aplasta más o menos el material. Además, con esas primeras vueltas se pueden evitar posibles imperfecciones en la pieza debido a la existencia de escoria en la boquilla.

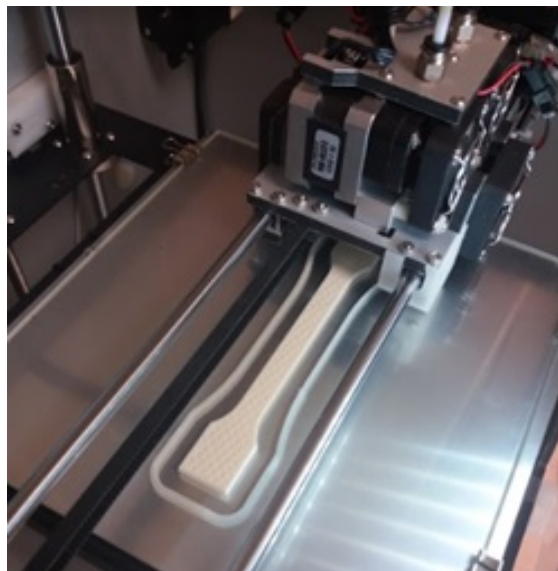


Figura 3.5. Probeta de PLA horizontal en proceso de impresión con tipo de adherencia “Falda”.

- Orientación de canto: aquí se ha seleccionado como tipo de adherencia “Balsa”, creándose una base, con una margen adicional alrededor del modelo, de unas cuatro capas sobre las que se imprimirá la pieza. Por otro lado, el soporte lo genera automáticamente el software, indicándole el patrón de relleno de este y la densidad, la cual es recomendable dejar una en torno a un 35-40% para que el voladizo quede lo más perfecto posible. Este tipo de soporte se puede observar en la imagen siguiente.

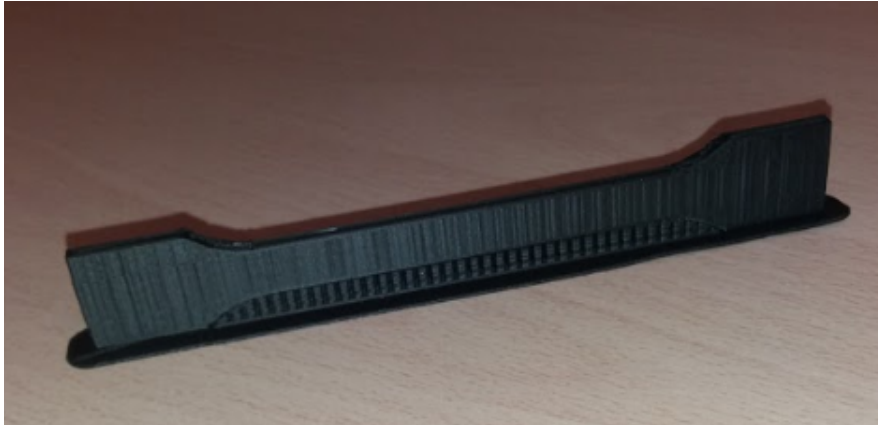


Figura 3.6. Probeta de PLA reforzado impresa en dirección de canto con soporte.

- Orientación vertical: se ha utilizado también el tipo “Balsa”, el cual se muestra en la Figura 3.7, aumentando el margen adicional de esta, de 5 mm (para las de canto) a 10 mm, pues se necesita una mayor adherencia a la cama ya que la probeta se encuentra en una posición más inestable.

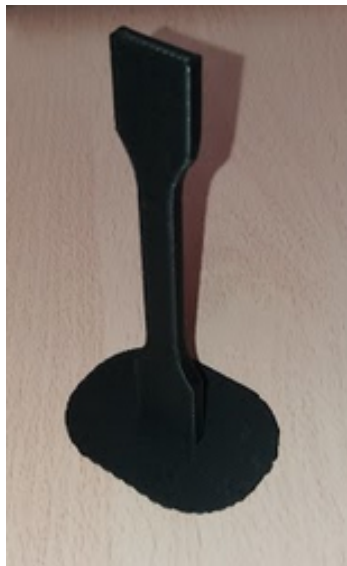


Figura 3.7. Probeta de PLA reforzado impresa en dirección vertical con tipo de adherencia “Balsa”.

3.4.3. Ensayo de tracción

Una vez impresas todas las probetas correspondientes a cada experimento, para poder medir la resistencia última a tracción de cada una de ellas se realiza un ensayo de tracción. En este tipo de ensayo la probeta se somete a unas cargas de tracción a velocidad constante, hasta que rompe, en este caso particular, pues se ha realizado un ensayo destructivo (UNE-EN ISO 527-1, 2012).

El procedimiento seguido para la realización de este ensayo es el que se expone a continuación:

- Primero. Se debe marcar, en todas las probetas, la distancia inicial entre mordazas según la norma española UNE 116005 (2012).
- Segundo. Mediante el software TW Elite, se crea un programa de bloques para definir el ensayo y poder lanzar la simulación, definiendo la velocidad de separación de las mordazas. Según la norma UNE-EN ISO 527-1 (2012), se recomienda que la velocidad de ensayo sea de 0,5 mm/min.
- Tercero. Se enciende la máquina utilizada y desbloquea el control manual para poder separar las mordazas y ajustar la distancia entre ellas.
- Cuarto. Se colocan las probetas lo mejor alineadas posible con el eje vertical de las mordazas y siempre de la misma manera, tomando como referencia la cara sobre la que se ha señalado la marca de sujeción de las mordazas. Se ajustan la sujeción de las probetas aplicando, aproximadamente, el mismo par de apriete en cada mordaza, esto es, intentando replicar el número de vueltas, tratando de no dañar excesivamente la probeta mediante aplastamiento.
- Quinto. Una vez colocada la probeta, se bloquea el control manual y mediante el software se inicia el ensayo.
- Sexto. Cuando rompe la probeta, finaliza el ensayo. El programa pregunta si devuelve las mordazas a su posición original, para lo que es recomendable, primero, retirar la probeta ensayada y, después, aceptar esa reposición.
- Séptimo. Finalmente, se guardan los datos de cada simulación, los cuales se extraen mediante la opción "*Export raw data*", obteniendo un archivo de texto con tres columnas de datos: tiempo de duración de cada ensayo, cargas aplicadas durante este y elongación sufrida por la pieza correspondiente a cada carga.

3.5. Análisis estadístico

Los métodos de análisis estadístico pueden usarse para analizar toda la información obtenida de los experimentos a fin de conseguir resultados y conclusiones de la forma más objetiva posible. Es por esto que los métodos estadísticos

combinados con un adecuado conocimiento del proceso y sentido común, conducen generalmente a conclusiones sólidas (Montgomery, 2001).

En este apartado se realizará el análisis estadístico del experimento 2, pues el experimento 1 cuenta con un número de ensayos reducido, por lo cual será suficiente analizar los resultados por métodos más sencillos. Para el experimento 1 solo se realizará el cálculo de porcentajes de incrementos y algunas representaciones gráficas.

Con respecto al experimento 2 se procederá a realizar un Análisis de Varianza (ANOVA, del inglés *Analysis of Variance*), que es un proceso general para aislar fuentes de variabilidad en un conjunto de medidas (Girden, 1992). Este estudio se realizará mediante el software de análisis estadístico R, el cual calcula los siguientes valores, de cada una de las fuentes de variación y de los residuales:

- Grados de libertad.
- Suma de cuadrados.
- Cuadrados medios.
- Estimador F.
- p-valor.

3.6. Conclusiones

Una vez ha sido analizada toda la información, se podrán establecer unas conclusiones prácticas sobre los resultados obtenidos, lo que será de especial ayuda para poder mejorar el experimento, pues se tendrá un mayor conocimiento de este. Esto lleva a abrir nuevas líneas de investigación para posibles trabajos futuros (Montgomery, 2001).

4. APLICACIONES Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Introducción

En este punto del trabajo se procederá a presentar tanto el material como los equipos utilizados para realizar los ensayos experimentales. Asimismo, se definirán ambos experimentos, mostrando el valor que se ha asignado a cada nivel de cada parámetro. Finalmente, se llevará acabo el análisis estadístico de los datos obtenidos y se presentarán algunas observaciones.

4.2. Equipo experimental

4.2.1. Materiales de impresión

Para la realización de las probetas se han empleado dos termoplásticos distintos, uno es PLA virgen y otro es PLA reforzado con fibra de carbono (Hayagrivan, 2018).

- PLA ($C_2H_4O_2$)_n: El PLA es un bioplástico derivado de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de sava o caña de azúcar. Sus características se muestran a continuación, en la Tabla 4.1.

PLA Ivory White	
Composición	Resina de PLA 99% CAS: 9051-89-2
Temperatura de la cama (opcional)	0-60 °C
Temperatura de impresión	220 ± 20 °C
Velocidad de impresión	30-90 mm/s
Ventilador de capa	Activado 100%
Densidad	1,24 g/cm ³
Diámetro del filamento	1,75 ± 0,03 mm
Material higroscópico. Máxima cantidad de agua contenida aceptable	50 ppm

Tabla 4.1. Características del filamento de PLA virgen (Smartmaterials, 2019) (Impresoras3D, 2019) (Pérez, 2018).

Debido a su baja contracción, alrededor de 2-5%, no es obligatorio el uso de cama caliente. También es un material, generalmente, fácil de imprimir, pues cuenta con una baja temperatura de fusión y con un rango amplio de velocidades de impresión. Además, es reciclable. Debido a propiedades como esta, y por ser un

Desafortunadamente, los biopolímeros no pueden competir con los polímeros en campos como la ingeniería. El PLA tiene buenas propiedades mecánicas (particularmente, alta resistencia a la tracción y módulo de Young), que son incluso más altas que las del poliestireno, polipropileno, polietileno u otros polímeros. La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del PLA son comparables a los del polietileno tereftalato (PET), pero desafortunadamente, el PLA es muy frágil, con menos del 10% de alargamiento a la rotura y baja tenacidad, lo que limita su uso en aplicaciones que necesitan deformación plástica bajo alta tensión (Murarius *et al.*, 2016).

A large spool of Smartfil 3D filament. The filament is a light cream color and is wound in a dense, uniform layer around a central hub. The hub is made of clear plastic and has a circular label on top. The label features the Smartfil logo, a QR code, and technical specifications: 'Fil. A 1 (Fluoropolymer)', 'diam. 1.75 mm', 'weight: 15.000kg', and 'length: 2000 m'. Below this, it says 'THE SMART 3D FILAMENT' and provides a website URL. A colorful triangular sticker is also attached to the label. The spool is mounted on a metal frame with two visible support arms.

- PLA reforzado con fibra de carbono:

Los compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) ofrecen unas importantes ventajas sobre los materiales metálicos ya que son ligeros, poseen una gran resistencia y rigidez, y son resistentes a la corrosión y a la fatiga. Los

filamentos reforzados con fibra de carbono, tanto con fibras continuas como cortas, suponen un desarrollo prometedor en materiales utilizados en modelado por deposición fundida. Esto es porque son compatibles, prácticamente, con todas las impresoras, 3D cuyo proceso de fabricación se basa en la extrusión de material, que cuentan con una cama caliente y con una boquilla de acero (Van de Werken *et al.*, 2019).

A continuación, en la Tabla 4.2. se muestran las características del material empleado para la fabricación de las probetas, que es producido por NatureWorks.

Proto-pasta Carbon Fiber PLA	
Composición	Resina de PLA 4043D, complementada con fibras de carbono en un 15% de peso
Temperatura de la cama	60 °C
Temperatura de impresión	210-230 °C
Velocidad de impresión	40-80 mm/s
Ventilador de capa	Activado (100%)
Densidad	1,3 g/cm ³
Diámetro del filamento	1,75 ± 0,03 mm
Diámetro de boquilla mínimo recomendado	0,5 mm

Tabla 4.2. Características del PLA reforzado con fibra de carbono (Proto-pasta, 2019).

Hay que añadir que cuenta con una mayor resistencia que el PLA a altas temperaturas para mantener sus propiedades. Además, el filamento de este material es muy frágil, debiendo tener especial cuidado en su manipulación en el proceso de alimentación de la impresora. Por otra parte, al igual que el PLA, este material es higroscópico, es decir, absorbe humedad, por lo que es necesario conservarlos en un ambiente seco, con una temperatura ambiente entre unos 10 °C y 40 °C, evitando la exposición a la luz solar y con la ayuda de una bolsa de gel de sílice en el lugar de almacenamiento.

La bobina de filamento de este material empleada se muestra en la imagen siguiente.



Figura 4.2. PLA reforzado con fibra de carbono Proto-pasta (Proto-pasta, 2019).

Aparte de estos dos materiales, se ha utilizado un tercer tipo de filamento, denominado Smart Clean. Se trata de un filamento de limpieza, de $1,75 \pm 0,03$ mm de diámetro, cuya composición es: resina de PLA – 69% CAS: 9051-89-2 y CaCO_3 – 30% CAS: 1317-65-3. Este se emplea al cambiar de material para eliminar los restos que se quedan en la boquilla y también entre piezas del mismo material para limpiar la posible acumulación de este en el interior de la boquilla del extrusor, especialmente tras imprimir probetas de PLA reforzado con fibra de carbono. De este modo se consigue un flujo más regular y también se puede aumentar la vida de la boquilla. Por otro lado, cuenta con una densidad de $1,1 \text{ g/cm}^3$ (Smartmaterials, 2019) (Filament2print, 2019).

Con respecto a la extrusión del filamento de Smart Clean, este se extruye a la misma temperatura que el material previamente utilizado. El procedimiento de limpieza de la boquilla es simple:

- Primero. Se calienta de nuevo la boquilla hasta la temperatura de extrusión del material que se está utilizando, pues una vez que acaba la impresión de la pieza, la temperatura del extrusor desciende rápidamente.
- Segundo. Mediante la opción “*Extrusion*” que da la impresora, se selecciona “*Out*”. Justo después se introduce el filamento de limpieza y selecciona “*In*”, extruyendo al menos unos 60 mm para asegurarse que se limpia la boquilla lo mejor posible. Hay que añadir que es recomendable cortar siempre el extremo del filamento al retirarlo de la impresora, para reducir posibles problemas al cargar de nuevo el material.

- Tercero. Finalmente, se retira el material de limpieza de la misma forma que se hizo con el anterior y se vuelve a cargar el material que se desea.

En la Figura 4.3 se puede observar la bobina de filamento de este tipo de material.

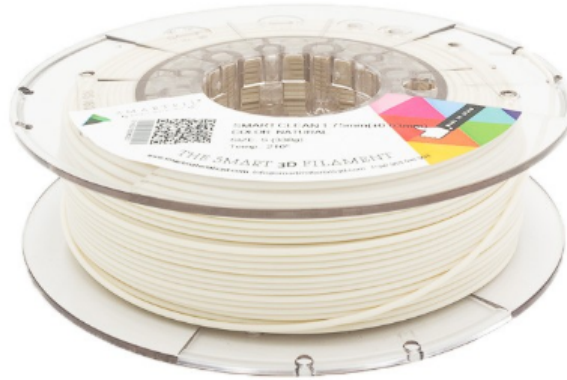


Figura 4.3. Filamento de limpieza Smart Clean (Smartmaterials, 2019).

4.2.2. Máquinas

Se han utilizado dos máquinas distintas, una para cada parte del experimento. Una impresora 3D para la fabricación de las probetas y un banco de ensayos a tracción para la determinación de la resistencia última a tracción:

- Impresora 3D BIBO 2 Touch Dual Extruders:

Las características de la máquina son las siguientes (Ourbibo, 2019):

- Doble extrusor con ventilador para cada uno de ellos.
- Cama caliente de vidrio extraíble.
- Estructura de panel compuesto de aluminio de 6 mm de espesor.
- Pantalla táctil a todo color y control WiFi.
- “*Copyprinting*”: permite extruir dos piezas idénticas al mismo tiempo con distinto material.
- Conectividad: tarjeta SD, unidad Flash USB, USB y WiFi.
- Dimensiones: (X)467 x (Y)357 x (Z)374 mm.

- Peso de 16 kg.

Por otra parte, se muestran las características que posee de impresión mediante la Tabla 4.3.

BIBO 2 Touch Dual Extruders	
Dimensiones de impresión	(X)214 x (Y)186 x (Z)160 mm
Precisión posicional	X e Y : 0,011 mm ; Z: 0,0025 mm
Altura de capa	0,05-0,3 mm
Boquillas	Latón, de diámetro 0,4 mm
Máximo caudal de material	24 cm ³ /min
Máxima temperatura de la boquilla	270 °C
Software de segmentación compatibles	Repetier-Host, Ultimaker Cura, Simplify3D y Makerware
Compatibilidad	Windows, Mac, Linux
Formato de archivo	.STL, .OBJ, .DAE, .AMF, .BMP, .JPG, .JPEG, .PNG, .GCODE
Tipo de filamento	ABS, PLA, filamento soluble (como el acetato de polivinilo), filamento flexible (como el poliuretano termoplástico)
Diámetro de filamento	1,75 ± 0,03 mm

Tabla 4.3. Características de impresión BIBO 2 Touch Dual Extruders (Ourbibo, 2019).

Las boquillas de latón, que vienen con la impresora, fueron retiradas y sustituidas por unas boquillas de acero endurecido de 0,6 mm de diámetro, necesarias para poder extruir un material reforzado con fibra de carbono. Es necesario especificar que las probetas de PLA reforzado fueron impresas con una boquilla y las de PLA virgen con otra distinta, aunque son el mismo modelo,

En la Figura 4.4 se muestra el diseño de la impresora con la que se ha trabajado.

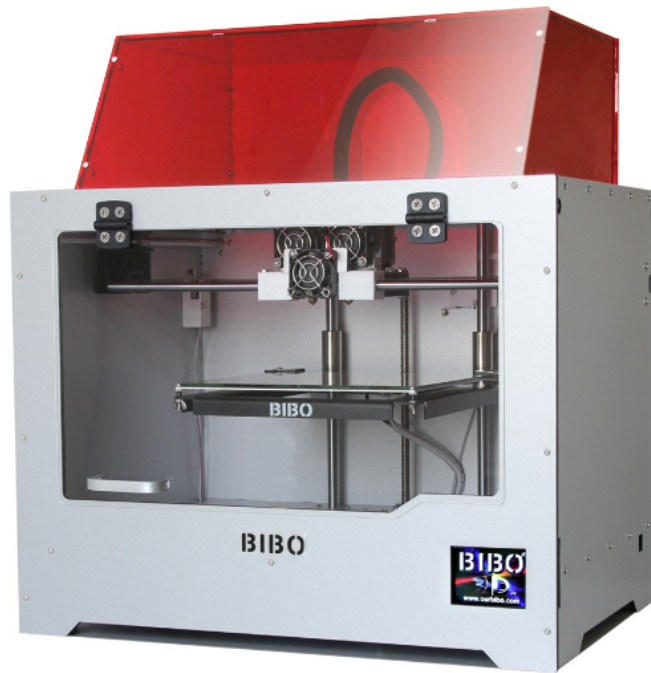


Figura 4.4. Impresora 3D (Ourbibo, 2019).

- MTS Criterion. Model 43

Los sistemas de ensayo universales (los cuales incluyen pruebas de tracción y compresión) de la serie 40 de MTS Criterion son altamente confiables y fáciles de operar. Estos emplean accionamientos electromecánicos MTS de baja vibración y alta velocidad y controles de bucle cerrado digitales integrados para ensayar el control de carga y posición a capacidades de fuerza que van desde 1 N hasta 600 kN (Mts, 2019).

Estos sistemas cuentan con células de carga de alta precisión, las cuales ofrecen una alta rigidez y estabilidad. Estas son detectadas por el propio equipo de manera automática, recopilando la información necesaria para una específica calibración. Hay que resaltar que la célula de carga usada para los experimentos realizados era de 10 kN. También se componen de controladores digitales de alta resolución, lo cual permite extraer una gran cantidad de datos de cada ensayo. Por último, cabe destacar el mando de control manual, mediante el cual se facilita considerablemente la tarea de realizar el montaje inicial de cada ensayo (gracias al ajuste posicional de las mordazas), además de mostrar información durante la realización de este y ofrecer la opción de pararlo, pausarlo o iniciarlo (Mts, 2019).

Es de especial importancia resaltar que el equipo tiene unos límites ajustables mecánicamente. En lo referente al modelo 43, usado para llevar a cabo ensayos a

tracción, estos límites se utilizan para detener la separación entre mordazas en puntos determinados. Esto es una medida de seguridad para no superar la carga máxima que puede dar la célula y así evitar que esta colapse.

En la siguiente tabla se muestran las características del modelo utilizado.

Configuración del marco de carga	Dos columnas, tablero de mesa integrado, configuración electromecánica
Capacidad de fuerza	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2,5 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN, 50 kN
Espacio de prueba	Zona única
Muestras típicas	Plásticos reforzados, metales, alambre, compuestos, elastómeros, productos de madera, textiles, biomateriales, productos de papel, adhesivos, espuma

Tabla 4.4. Características de la máquina de ensayos universales MTS Criterion Model 43 (Mts, 2019).

En lo que respecta al software, se utiliza el TW Elite. Este es el motor que impulsa la realización de los ensayos. Incluye la capacidad de definición de todo tipo de pruebas y la flexibilidad que necesitan los diseñadores para crear y editar secuencias de pruebas personalizadas a la vez que satisfacen las necesidades específicas de tiempo de ejecución. A continuación, se muestran algunas imágenes de la interfaz de este software y de la toma de datos durante los ensayos a tracción.

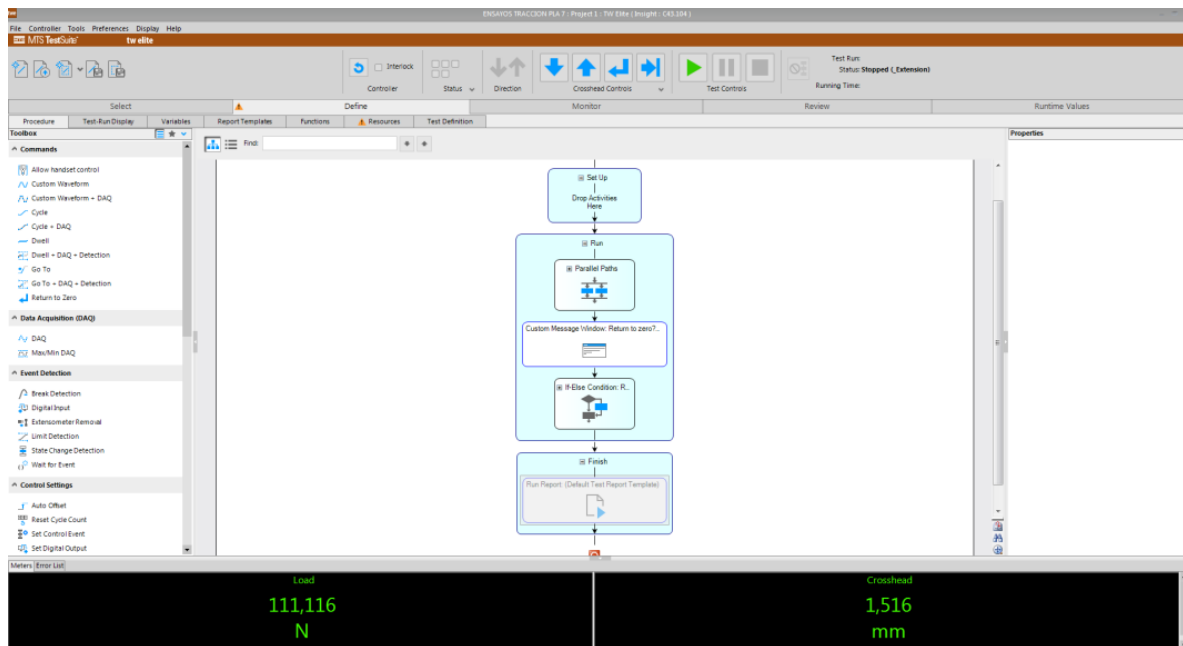


Figura 4.5. Programa de bloques creado para realizar los ensayos.

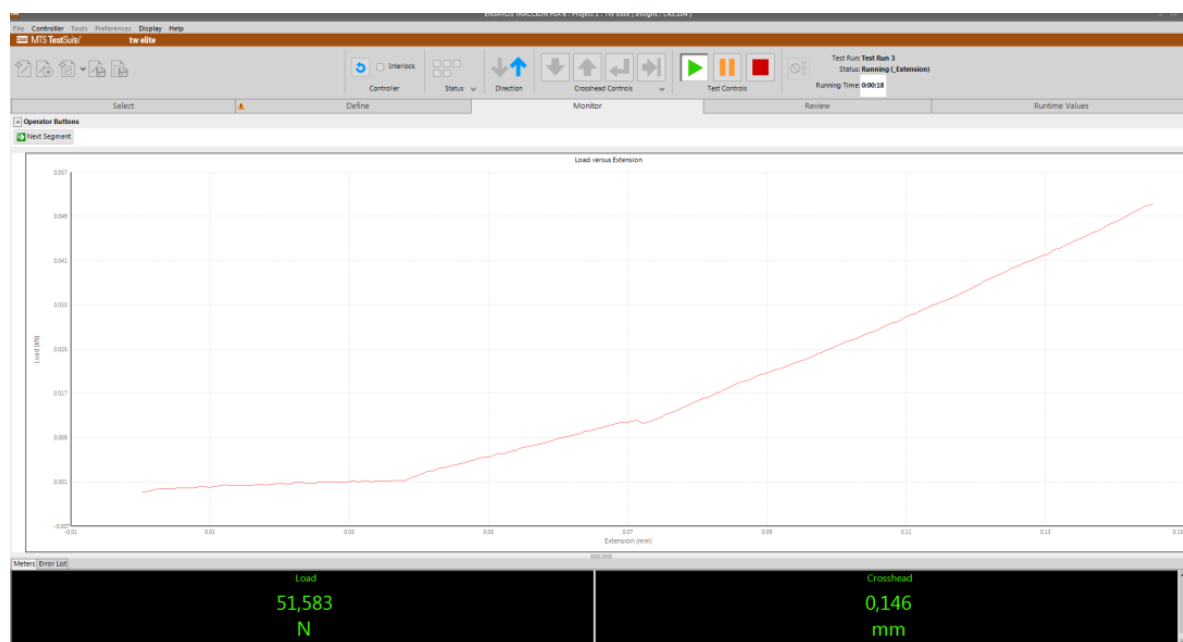


Figura 4.6. Toma de datos durante la realización del ensayo a tracción.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se puede observar el equipo utilizado en el laboratorio así como los ensayos a los que se sometieron las probetas.



Figura 4.7. Máquina de ensayos universales MTS Criterion Model 43.

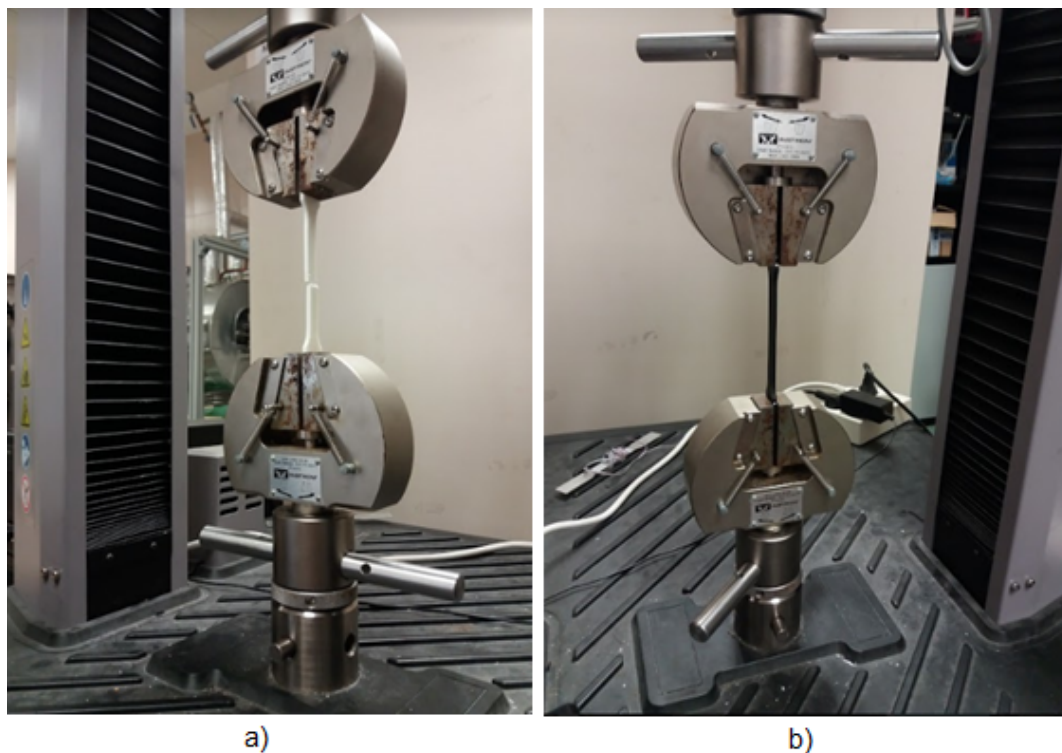


Figura 4.8. Ensayos a tracción: a) PLA virgen y b) PLA reforzado.

4.2.3. Software para impresión 3D

Se han utilizado dos software para realizar la segunda parte de los experimentos, la de la impresión 3D: uno para diseñar el modelo de las probetas en CAD y convertirlo a archivo .STL (CATIA V5), y otro para realizar la segmentación de estas, generando el gcode necesario para su impresión (Ultimaker Cura 4.0.0):

- CATIA V5:

Este es un programa de diseño asistido por ordenador mediante el cual se realiza el diseño de la probeta que se quiera imprimir en 3D, en formato CAD. Además permite la opción de convertir este archivo a .STL. Concretamente se ha utilizado la versión educacional. En la siguiente imagen se puede observar la interfaz del programa así como el diseño de una de las probetas.

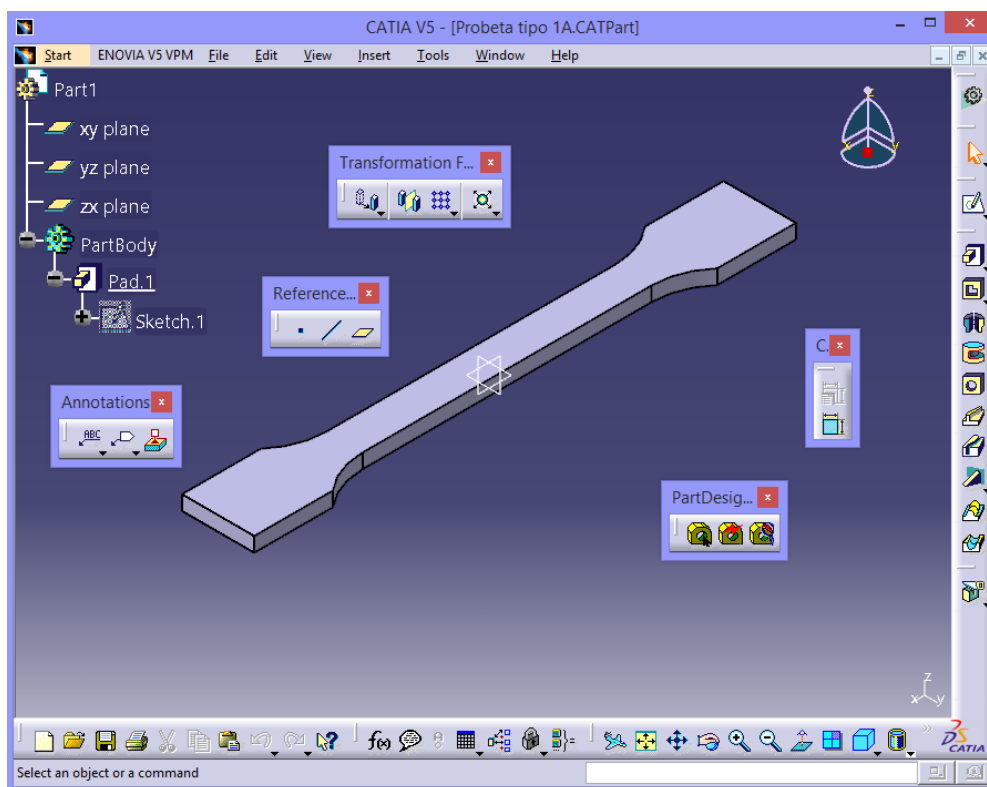


Figura 4.9. Entorno de trabajo de CATIA V5.

- Ultimaker Cura 4.0.0:

Este es un software de segmentación (Figura 4.10) mediante el cual se puede configurar los parámetros de impresión deseados, simulando un espacio de trabajo

en tres dimensiones del mismo tamaño que el de la impresora. El procedimiento seguido con este programa es el siguiente.

- Primero. Se selecciona en el programa el material empleado y la impresora que se vaya a utilizar, para obtener información sobre las características de esta. Dentro de la opción “Administrar impresoras”, se selecciona “Ajustes de máquina”, donde hay que especificar el tamaño de las boquillas que se van a usar, como en este caso en el que no se utilizaron las originales, pues afectará a la hora de establecer la configuración de impresión.
- Segundo. Se carga el modelo, en formato .STL, de la pieza que se vaya a imprimir, orientándola en la dirección de impresión que se haya elegido y centrándola en la plataforma.
- Tercero. Ahora se debe elegir el extrusor con el que se quiera trabajar ya que la impresora utilizada cuenta con dos extrusores. Es muy importante, seleccionar la pieza y asignarle uno de los dos extrusores, eligiendo la combinación de parámetros deseada.
- Cuarto. Finalmente, se selecciona la opción de “Segmentación” a fin de generar el *gcode* necesario para aportar toda la información, de los parámetros de impresión configurados, de cada capa depositada por la impresora.

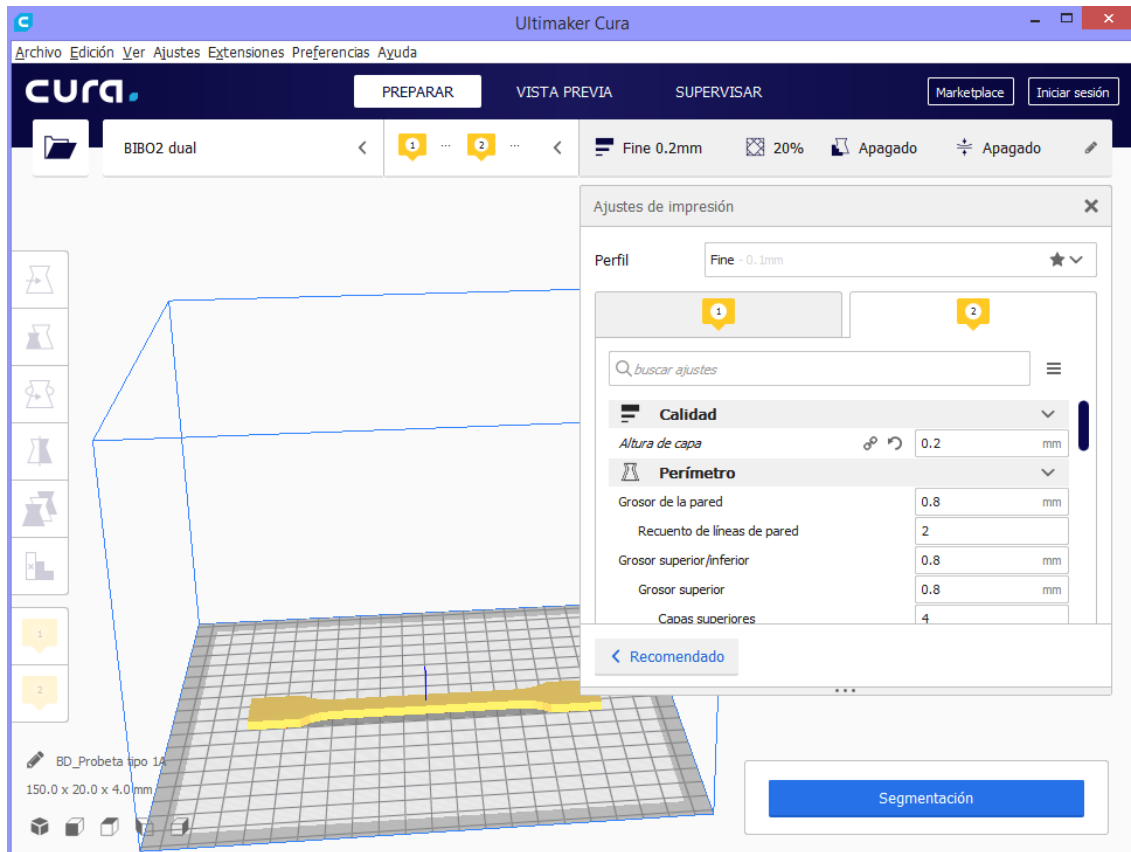


Figura 4.10. Interfaz Ultimaker Cura 4.0.0.

4.2.4. Material de apoyo

Como material de apoyo cabe destacar el empleo de spray fijador Dimafix (Figura 4.11) sobre la cama justo antes de cada impresión, para mejorar la adherencia de las primeras capas, y el uso de agujas Shenlong (Figura 4.12) utilizadas como varillas de limpieza, las cuales se pasaban un par de veces por el interior de la boquilla una vez había finalizado la pieza, manteniendo la temperatura del extrusor a la del proceso de fabricación.



Figura 4.11. Spray fijador Dimafix (Smartmaterials, 2019).



Figura 4.12. Aguja Shenlong.

4.3. Definición de los experimentos

4.3.1. Experimento 1

Para este primer experimento se definen los valores de los siguientes parámetros de impresión:

- Temperatura de impresión (T): es la temperatura a la que se extruye el material. Este factor se fijará a un solo nivel, encontrando un valor óptimo de este, situado en el rango recomendado por el fabricante. Esta temperatura está en 210 °C para el PLA comercial y en 250 °C para el PLA reforzado con fibra de carbono. Para establecer ese valor se ha partido de unas temperaturas algo menores y se ha ido extruyendo hilos de material, aumentando la temperatura poco a poco de 10 en 10 °C, hasta encontrar el valor adecuado. Al fin y al cabo, dado que cada material se extruye a su temperatura óptima, supuestamente ambos se están procesando en las mismas condiciones, pues el valor del resto de parámetros es exactamente el mismo para cada material.
- Velocidad de impresión (v): es la velocidad con la que se desplaza el extrusor mientras deposita capas de material. Equivale a la velocidad de avance en una operación de fresado según Arribas (2016). Para este factor se establecen dos niveles, 40 mm/s y 80 mm/s, que son los dos valores extremos del rango de velocidades recomendado por la impresora.
- Altura de capa (h): es el espesor de cada capa depositada por la boquilla. Se han establecido tres niveles para este parámetro a fin de estudiar más detalladamente su influencia en la resistencia mecánica de la pieza. Los valores escogidos son

0,15 mm, 0,20 mm y 0,25 mm. Según el experimento realizado por Lanzotti *et al.* (2015), a medida que aumenta la altura de capa, lo hace también la resistencia a tracción, aumentando desde 0,15 mm hasta 0,20 mm (teniendo su máximo valor aquí), y disminuyendo conforme se aleja de ese valor de altura de capa óptimo.

- Número de contornos (c): el número de contornos cuantifica el grosor de las paredes exteriores (Durão *et al.*, 2017), por lo que, en función estos, se tendrá un número específico de capas inferiores y superiores, las cuales conforman las paredes inferiores y superiores de la pieza, del mismo grosor que la pared lateral. Según Noorani (2018) el grosor adecuado de la pared debe ser, como mínimo, el doble del diámetro de la boquilla del extrusor, siendo el de la impresora de 0,6 mm, por lo que, como cada contorno tiene el mismo espesor que el diámetro, el número de contornos mínimo recomendado es 2. Para este experimento se ha fijado el número de contornos a 2 (al que le corresponde un grosor de pared de 1,2 mm).
- Densidad de relleno (ρ): es uno de los factores más importantes a tener en cuenta. La densidad de relleno es el porcentaje de material que conforma la parte interior de la pieza, no teniendo nada que ver con el grosor de la pared y los grosores superior e inferior. A medida que se incrementa el porcentaje de relleno, mejores serán las propiedades mecánicas de la pieza, pero también aumentarán el tiempo y los costes de producción, pues se utiliza una mayor cantidad de material (Lanzotti *et al.*, 2015). En este caso, se ha fijado la densidad de relleno en 60%, a fin de consumir menos material y agilizar los ensayos.
- Patrón de relleno (r): define el patrón de movimientos que sigue la herramienta para realizar el relleno interior de la pieza. Se ha fijado un solo nivel, siendo el patrón utilizado para este experimento el de “Líneas”, un patrón de relleno simple para agilizar el proceso.

Hay que añadir que, aparte de esos parámetros, también se ha fijado la temperatura de la cama a 60 °C, manteniendo una temperatura uniforme del material a medida que se va depositando en forma de capas. Este factor ayuda ligeramente a mejorar la adhesión de las primeras capas depositadas y contar así con una mayor seguridad de que la pieza no se va a separar de la placa (Arribas, 2016).

En la siguiente tabla se muestran los valores de los parámetros de este experimento.

Parámetro	Nivel		
Altura de capa (h)	0,15 mm	0,20 mm	0,25 mm
Velocidad de impresión (v)	40 mm/s		80 mm/s
Temperatura de impresión (T)	210 °C (PLA) , 250 °C (PLA reforzado)		
Número de contornos (c)	2		
Densidad de relleno (ρ)	60%		
Patrón de relleno (r)	Líneas		

Tabla 4.5. Definición de parámetros y niveles (experimento 1).

A continuación, se puede observar la planificación experimental definida para el experimento 1, tanto para PLA virgen como para PLA reforzado.

Ensayos	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)
e_1	210/250	40	0,15
e_2	210/250	80	0,15
e_3	210/250	40	0,20
e_4	210/250	80	0,20
e_5	210/250	40	0,25
e_6	210/250	80	0,25

Tabla 4.6. Planificación experimental para ambos materiales (experimento 1).

En las siguientes imágenes aparecen las probetas impresas para este experimento.



Figura 4.13. Probetas de PLA virgen impresas en dirección vertical (experimento 1).

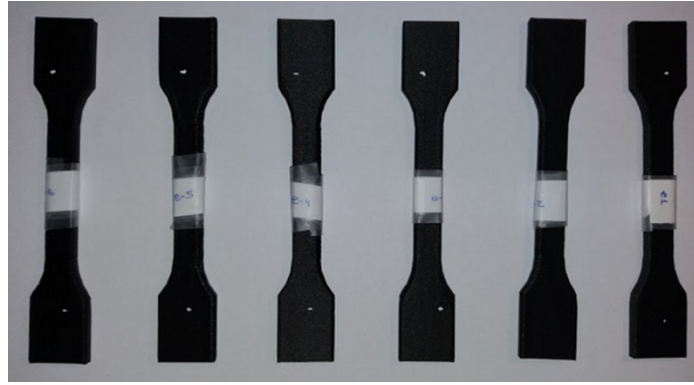


Figura 4.14. Probetas de PLA reforzado impresas en dirección vertical (experimento 1).

4.3.1.1. Análisis de los resultados

Tras realizar los ensayos a tracción de estas doce probetas, seis de cada material, se obtiene la carga máxima a tracción correspondiente a cada ensayo, como se muestra en las tablas siguientes.

Ensayos	$T (^{\circ}\text{C})$	$v \text{ (mm/s)}$	$h \text{ (mm)}$	$F \text{ (kN)}$
e_1	210	40	0,15	0,919
e_2	210	80	0,15	0,917
e_3	210	40	0,2	0,970
e_4	210	80	0,2	0,999
e_5	210	40	0,25	1,005
e_6	210	80	0,25	1,011

Tabla 4.7. Medición de carga para probetas de PLA virgen (experimento 1).

Ensayos	$T (^{\circ}\text{C})$	$v \text{ (mm/s)}$	$h \text{ (mm)}$	$F \text{ (kN)}$
e_1	250	40	0,15	0,993
e_2	250	80	0,15	1,023
e_3	250	40	0,2	0,941
e_4	250	80	0,2	0,968
e_5	250	40	0,25	0,896
e_6	250	80	0,25	0,929

Tabla 4.8. Medición de carga para probetas de PLA reforzado (experimento 1).

Ahora procede a calcular porcentajes de incrementos para observar la variabilidad de la carga máxima a tracción con las distintas configuraciones. Concretamente, se calcula el incremento entre ensayos con la misma velocidad, variando solamente la altura de capa (la cual provoca un mayor variación de la

resistencia), por ejemplo, incremento entre e_1 y e_3, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Valor final} - \text{Valor inicial}}{\text{Valor inicial}} \cdot 100$$

(Fórmula 4.1)

Estos cálculos se recogen en las Tablas 4.9 y 4.10.

Ensayos	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	F (kN)	Incremento
e_1	210	40	0,15	0,919	0%
e_2	210	80	0,15	0,917	0%
e_3	210	40	0,2	0,970	5,6%
e_4	210	80	0,2	0,999	9,0%
e_5	210	40	0,25	1,005	3,6%
e_6	210	80	0,25	1,011	1,2%

Tabla 4.9. Resultados del experimento 1 para el PLA virgen.

Ensayos	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	F (kN)	Incremento
e_1	250	40	0,15	0,993	0%
e_2	250	80	0,15	1,023	0%
e_3	250	40	0,2	0,941	-5,2%
e_4	250	80	0,2	0,968	-5,4%
e_5	250	40	0,25	0,896	-4,8%
e_6	250	80	0,25	0,929	-4,0%

Tabla 4.10. Resultados del experimento 1 para el PLA reforzado.

También se ha realizado una comparación entre la carga máxima que soporta cada material, como se puede observar a continuación.

Ensayos	Incremento entre materiales
e_1	8,10%
e_2	11,62%
e_3	-2,97%
e_4	-3,16%
e_5	-10,85%
e_6	-8,07%

Tabla 4.11. Comparación entre PLA virgen y reforzado con fibra de carbono.

Con el objetivo de poder analizar estos resultados de una forma más visual, se presentan las siguientes gráficas, correspondientes a cada una de las tres tablas anteriores.

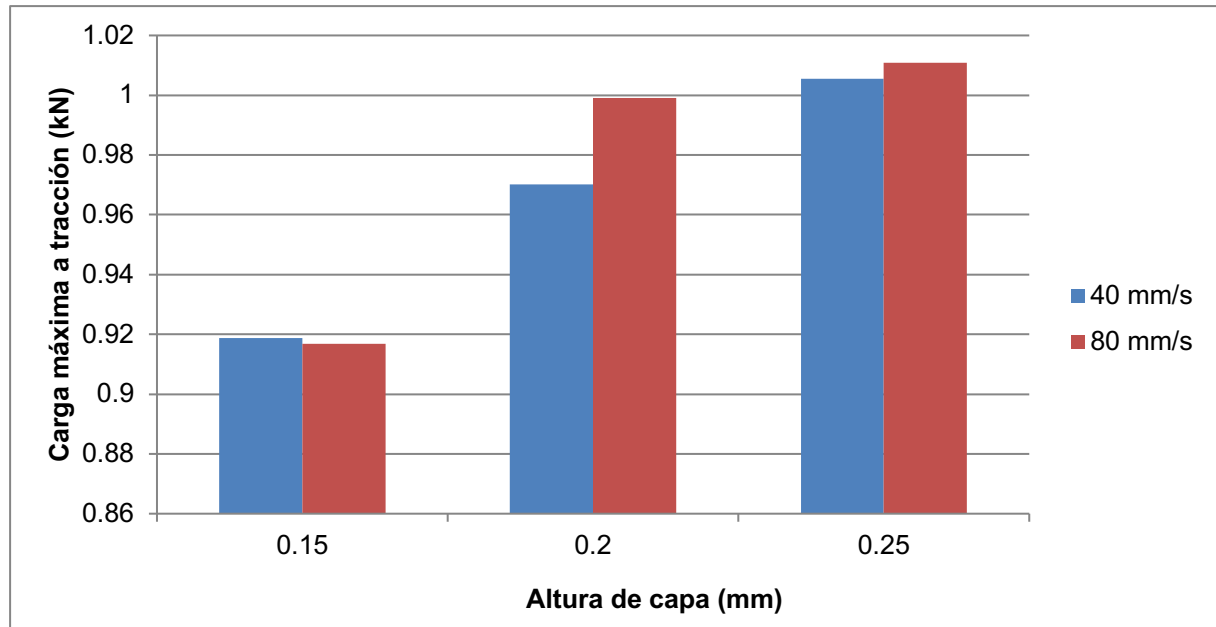


Figura 4.15. Carga máxima a tracción frente a altura de capa y velocidad de impresión (PLA virgen).

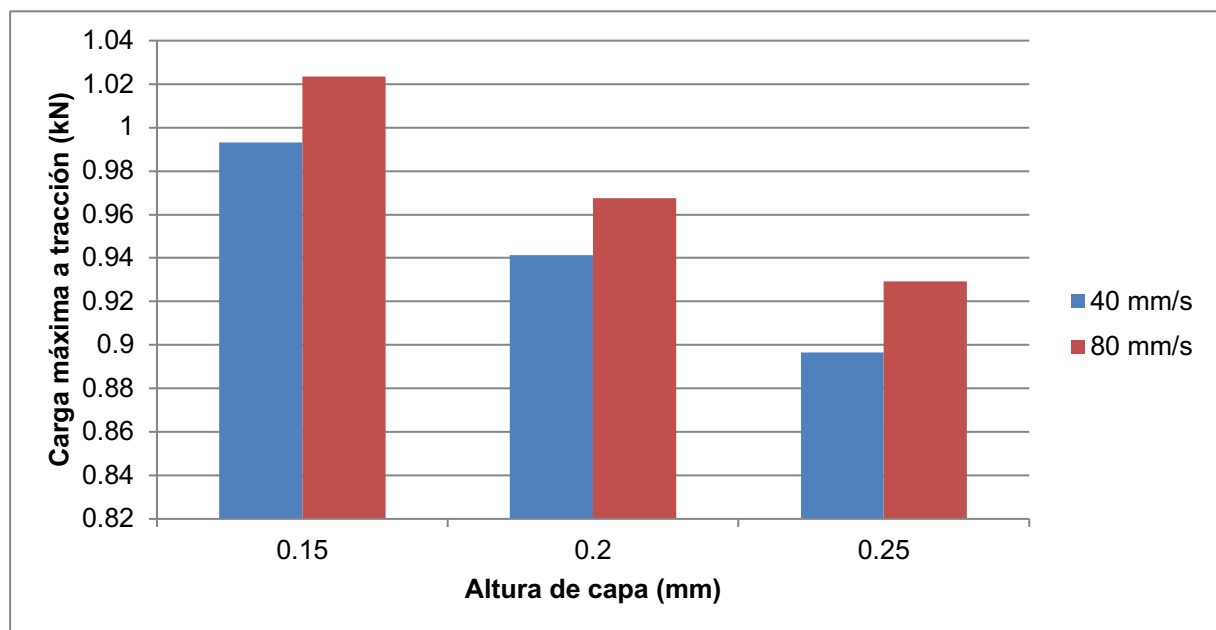


Figura 4.16. Carga máxima a tracción frente a altura de capa y velocidad de impresión (PLA reforzado).

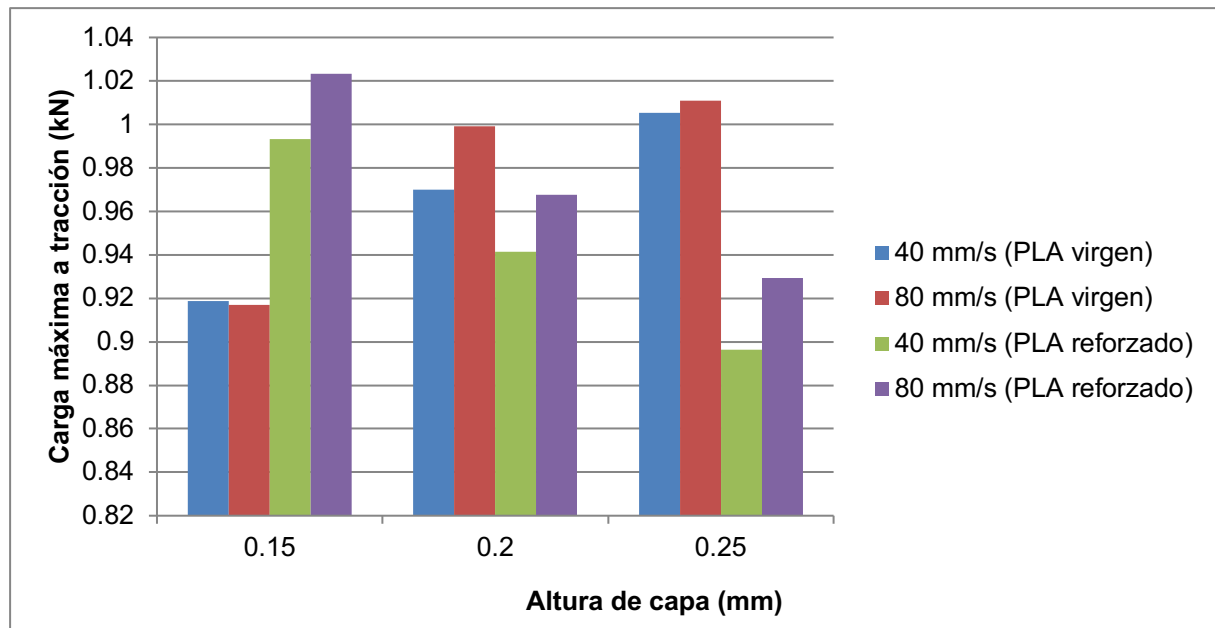


Figura 4.17. Comparación entre PLA virgen y PLA reforzado.

Parece ser que con el PLA virgen se cumple la afirmación de Chacón *et al.* (2017), pues se observa una clara tendencia (Figura 4.15) de que al aumentar la altura de capa aumenta la resistencia de la probeta, observando un mayor incremento de esta cuando se pasa de una altura de capa de 0,15 mm a 0,2 mm, aumentando en menor medida cuando se pasa de 0,2 mm a 0,25 mm, lo que da a entender que en torno a 0,25 mm puede encontrarse el valor de altura de capa que proporcione una máxima resistencia mecánica. Para el PLA reforzado se da la máxima carga para la menor altura de capa, disminuyendo la resistencia a medida que aumenta la altura de capa (Figura 4.16). Esto, probablemente, se deba a la existencia de ruido tanto en el proceso de impresión como durante el ensayo a tracción.

Por otra parte, se puede apreciar que el hecho de aumentar la velocidad de impresión afecta ligeramente a la carga máxima que soporta la probeta, pero no del modo que establecía Chacón *et al.* (2017). Estos autores sostenían que a medida que aumentaba la velocidad de impresión, disminuía la resistencia a tracción, justo al contrario de lo que ocurre en el presente estudio, pues aumenta al incrementar la velocidad, excepto en el caso del ensayo 2, como se muestra en la Figura 4.15, cuya probeta podría contar con más fallos de impresión que las otras. Además, tanto para el PLA como para el reforzado, el incremento de esta resistencia es de pequeña magnitud.

Se puede finalizar concluyendo que los resultados obtenidos deben analizarse con prudencia, pues solo se han realizado doce ensayos. Por ello, probablemente, pueden identificarse variaciones con respecto a la literatura estudiada que pudieran ser debidos a errores de impresión. No obstante, de estos resultados se puede concluir de forma objetiva que las variaciones que provoca la velocidad de impresión sobre la resistencia mecánica final de la pieza son muy pequeñas (para ambos materiales). Con respecto al aumento de la altura de capa, es más apreciable el incremento de la resistencia. No obstante, el valor máximo de este incremento es del 9 % (lo que supone menos de 100 N), por lo que se considera un valor de pequeña magnitud. Como consecuencia, se acaba desechando el estudio de la influencia de estos dos parámetros de impresión.

4.3.2. Experimento 2

Para el experimento 2, una vez realizado el experimento 1 y analizados los resultados, se procederá a explicar la metodología seguida para diseñarlo, mostrando qué parámetros de impresión se desean estudiar y la planificación experimental que se seguirá. A continuación, en el apartado siguiente se definirán los valores que se le han dado a cada nivel, justificándolos del mismo modo que se ha hecho en la definición del experimento 1

4.3.2.1. Metodología

La metodología a desarrollar para la realización del experimento 1 se divide en las dos etapas siguientes:

- Selección de parámetros de impresión a estudiar:

Según el ensayo realizado por Alafaghani *et al.* (2017), se demostró que las propiedades mecánicas están influenciadas significativamente por la orientación de impresión, y no por los patrones de relleno, para altos porcentajes de densidad de relleno, y la velocidad de impresión. También mejoran las propiedades a medida que se aumenta la densidad de relleno. Es muy importante la orientación de fabricación, pues hace que las capas y la dirección de la carga estén en el mismo plano, de manera que la resistencia a tracción, entre otras propiedades mecánicas, sea la máxima. Para resaltar la importancia de los patrones de relleno es necesario utilizar densidades de

relleno más bajas, pues en este ensayo todas las probetas en las que se variaron los patrones fueron impresas con una densidad del 100%.

Por otra parte, según Naranjo-Lozada (2019), el patrón de relleno tiene más importancia que la densidad de relleno, según su ensayo con materiales reforzados con fibra. Especialmente bueno es el patrón triangular. La densidad de relleno se puede reducir, pues a pesar de la consiguiente disminución de las propiedades mecánicas, se reduce bastante más el tiempo de fabricación y, además, se consigue una mayor ligereza en las piezas, ahorrando así una buena fracción de material. Todo esto supone una reducción de los costes de impresión.

Además, según Lanzotti *et al.* (2015), a medida que se incrementa el número de contornos y, por consiguiente, el grosor de la pared, la resistencia a tracción de la pieza lo hace también.

Lo que se busca con este segundo experimento es estudiar la influencia de los parámetros previamente mencionados, tras ser contrastados con varios artículos. Por tanto, se les va a dar tres niveles al patrón de relleno y a la densidad de relleno, y dos niveles al número de contornos, para poder analizar con mayor detalle su influencia en la resistencia mecánica final de la pieza.

Hay que añadir que se va a imprimir una probeta en cada dirección, aunque, según la norma española UNE 116005 (2012), deben realizarse cinco probetas mínimo en cada dirección de ensayo (pudiendo aumentar el número si se desea contar con una mayor precisión en la obtención del valor medio de las tres direcciones). Esta decisión se justifica por el gran gasto de material y la cantidad de tiempo que conlleva.

En la siguiente tabla se muestran los factores del experimento 2, con sus correspondientes niveles y nomenclaturas.

Parámetro	Nivel	Nomenclatura
Altura de capa (h)	1	$h2$
Velocidad de impresión (v)	1	$v1$
Temperatura de impresión (T)	1	$T1$
Número de contornos (c)	2	$c1, c2$
Densidad de relleno (ρ)	3	$\rho1, \rho2, \rho3$
Patrón de relleno (r)	3	$r1, r2, r3$

Tabla 4.12. Parámetros, niveles y nomenclatura (experimento 2).

- Elección del diseño experimental:

Para la realización del experimento 2, se harán un total de 18 combinaciones, mostradas en la Tabla 4.13, lo que se traduce en 18 probetas, impresas en cada una de las tres direcciones y para ambos materiales. Por tanto, se fabricarán 54 probetas por cada material.

$$\text{Número de combinaciones} = 3 \cdot 3 \cdot 2 = 18 \text{ combinaciones}$$

(Fórmula 4.2)

$$\text{Número de ensayos} = 18 \text{ probetas} \cdot 3 \text{ direcciones de impresión} = 54 \text{ ensayos}$$

(Fórmula 4.3)

En la Tabla 4.13 se presenta la planificación del experimento 2 una vez se ha empleado la técnica de aleatorización explicada en el punto 3.3.

Ensayos	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r
g_1	1	1	2	1	1	1
g_7	1	1	2	2	1	1
g_2	1	1	2	1	1	2
g_11	1	1	2	2	2	2
g_15	1	1	2	3	1	3
g_8	1	1	2	2	1	2
g_13	1	1	2	3	1	1
g_3	1	1	2	1	1	3
g_10	1	1	2	2	2	1
g_17	1	1	2	3	2	2
g_4	1	1	2	1	2	1
g_6	1	1	2	1	2	3
g_12	1	1	2	2	2	3
g_9	1	1	2	2	1	3
g_18	1	1	2	3	2	3
g_16	1	1	2	3	2	1
g_14	1	1	2	3	1	2
g_5	1	1	2	1	2	2

Tabla 4.13. Planificación del experimento 2.

Esta planificación experimental es exactamente igual para ambos materiales y para cada una de las tres direcciones de impresión.

4.3.2.2. Definición

Del mismo modo que se procedió con el experimento 1, se definen los valores fijados de los parámetros de impresión correspondientes al experimento 2:

- Temperatura de impresión (T): se han asignado los mismos valores que en el experimento 1, pues se observó que eran óptimos.
- Velocidad de impresión (v): se ha fijado una velocidad de 60 mm/s (un valor medio de las dos velocidades de impresión empleadas en el experimento 1), pues, como se observó tras analizar los resultados del experimento 1, este factor no influye sobre la resistencia mecánica de la pieza. Para escoger este valor se probó,

inicialmente, a imprimir probetas horizontales y de canto, que hasta ahora no se habían fabricado, a 80 mm/s, pues a 40 mm/s el tiempo de impresión crecía bastante. Sin embargo, dado que cuentan con unas dimensiones mayores, esta velocidad tan alta dificultaba el proceso de extrusión de material. Es por ello que se optó por un valor más conservador dentro del rango establecido para el primer experimento.

- Altura de capa (h): tras analizar los resultados del experimento 1 se concluyó que la altura de capa, aunque se pueda apreciar su gran influencia en la calidad superficial de la pieza, tampoco afecta a la resistencia mecánica final. Es por esto que su valor se fija, de una forma más conservadora (al igual que se ha hecho con la velocidad de impresión), en 0,2 mm, un término medio de los niveles definidos para el primer experimento.
- Número de contornos (c): se han escogido dos niveles para estudiar la influencia de este parámetro, siendo el primero un solo contorno (que es corresponde a un grosor de pared de 0,6 mm) y el segundo dos contornos (con un grosor de pared de 1,2 mm), cogiendo el valor mínimo recomendado y la mitad de ese valor.
- Densidad de relleno (ρ): para estudiar este parámetro de una forma más detallada, se han establecido tres niveles: 60%, 80% y 100%.
- Patrón de relleno (r): se han definido tres niveles, al igual que para la densidad de relleno, para estudiar con mayor detalle la influencia de este factor. Se ha probado con los tipos “Rejilla”, “Octeto” y “Triángulos”, presentados en la Figura 4.18. Estos se han escogido de acuerdo a Lifehacks3D (2019), donde se sostiene que los patrones de “Rejilla” y “Triángulos” son utilizados para piezas de resistencia estándar, mientras que el patrón de “Octeto” se emplea para crear piezas funcionales de alta resistencia.

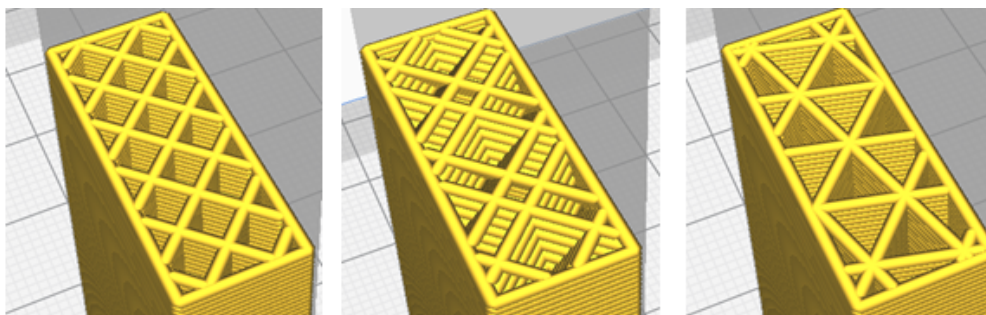


Figura 4.18. Tipos de patrón de relleno utilizados.

Al igual que para el experimento 1, la temperatura de la cama de impresión se ha fijado a 60 °C.

En la siguiente tabla se recogen los valores fijados para cada parámetro.

Parámetro	Nivel
Altura de capa (h)	0,20 mm
Velocidad de impresión (v)	60 mm/s
Temperatura de impresión (T)	210 °C (PLA) , 250 °C (PLA reforzado)
Número de contornos (c)	1, 2
Densidad de relleno (ρ)	60%, 80%, 100%
Patrón de relleno (r)	Rejilla, Octeto, Triángulos

Tabla 4.14. Definición de parámetros y niveles para el experimento 2

Una vez establecidos estos valores, se puede presentar la Tabla 4.15 que muestra la planificación del experimento 2.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r
g_1	210/250	60	0,20	60	1	Rejilla
g_7	210/250	60	0,20	80	1	Rejilla
g_2	210/250	60	0,20	60	1	Octeto
g_11	210/250	60	0,20	80	2	Octeto
g_15	210/250	60	0,20	100	1	Triángulos
g_8	210/250	60	0,20	80	1	Octeto
g_13	210/250	60	0,20	100	1	Rejilla
g_3	210/250	60	0,20	60	1	Triángulos
g_10	210/250	60	0,20	80	2	Rejilla
g_17	210/250	60	0,20	100	2	Octeto
g_4	210/250	60	0,20	60	2	Rejilla
g_6	210/250	60	0,20	60	2	Triángulos
g_12	210/250	60	0,20	80	2	Triángulos
g_9	210/250	60	0,20	80	1	Triángulos
g_18	210/250	60	0,20	100	2	Triángulos
g_16	210/250	60	0,20	100	2	Rejilla
g_14	210/250	60	0,20	100	1	Octeto
g_5	210/250	60	0,20	60	2	Octeto

Tabla 4.15. Definición de la planificación del experimento 2 para ambos materiales.

4.3.2.3. Análisis de los resultados

Tras realizar los ensayos a tracción de todas las probetas, se obtiene la resistencia mecánica máxima de cada una, al igual que en el experimento 1. Estas mediciones se recogen en las siguientes tablas.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	210	60	0,20	60	1	Rejilla	0,702
g_7	210	60	0,20	80	1	Rejilla	0,972
g_2	210	60	0,20	60	1	Octeto	0,989
g_11	210	60	0,20	80	2	Octeto	1,536
g_15	210	60	0,20	100	1	Triángulos	1,220
g_8	210	60	0,20	80	1	Octeto	1,214
g_13	210	60	0,20	100	1	Rejilla	1,290
g_3	210	60	0,20	60	1	Triángulos	0,881
g_10	210	60	0,20	80	2	Rejilla	1,575
g_17	210	60	0,20	100	2	Octeto	1,750
g_4	210	60	0,20	60	2	Rejilla	1,491
g_6	210	60	0,20	60	2	Triángulos	1,495
g_12	210	60	0,20	80	2	Triángulos	1,444
g_9	210	60	0,20	80	1	Triángulos	1,044
g_18	210	60	0,20	100	2	Triángulos	1,663
g_16	210	60	0,20	100	2	Rejilla	1,611
g_14	210	60	0,20	100	1	Octeto	1,532
g_5	210	60	0,20	60	2	Octeto	1,506

Tabla 4.16. PLA virgen - Orientación horizontal.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	210	60	0,20	60	1	Rejilla	0,744
g_7	210	60	0,20	80	1	Rejilla	0,858
g_2	210	60	0,20	60	1	Octeto	0,978
g_11	210	60	0,20	80	2	Octeto	1,617
g_15	210	60	0,20	100	1	Triángulos	0,906
g_8	210	60	0,20	80	1	Octeto	1,097
g_13	210	60	0,20	100	1	Rejilla	1,234
g_3	210	60	0,20	60	1	Triángulos	0,586
g_10	210	60	0,20	80	2	Rejilla	1,387
g_17	210	60	0,20	100	2	Octeto	1,663
g_4	210	60	0,20	60	2	Rejilla	1,376
g_6	210	60	0,20	60	2	Triángulos	1,219
g_12	210	60	0,20	80	2	Triángulos	1,397
g_9	210	60	0,20	80	1	Triángulos	0,835
g_18	210	60	0,20	100	2	Triángulos	1,365
g_16	210	60	0,20	100	2	Rejilla	1,435
g_14	210	60	0,20	100	1	Octeto	1,353
g_5	210	60	0,20	60	2	Octeto	1,541

Tabla 4.17. PLA virgen - Orientación de canto.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	210	60	0,20	60	1	Rejilla	1,422
g_7	210	60	0,20	80	1	Rejilla	1,562
g_2	210	60	0,20	60	1	Octeto	1,172
g_11	210	60	0,20	80	2	Octeto	1,802
g_15	210	60	0,20	100	1	Triángulos	2,208
g_8	210	60	0,20	80	1	Octeto	1,723
g_13	210	60	0,20	100	1	Rejilla	2,035
g_3	210	60	0,20	60	1	Triángulos	1,449
g_10	210	60	0,20	80	2	Rejilla	2,170
g_17	210	60	0,20	100	2	Octeto	2,116
g_4	210	60	0,20	60	2	Rejilla	1,707
g_6	210	60	0,20	60	2	Triángulos	1,903
g_12	210	60	0,20	80	2	Triángulos	1,958
g_9	210	60	0,20	80	1	Triángulos	1,839
g_18	210	60	0,20	100	2	Triángulos	2,228
g_16	210	60	0,20	100	2	Rejilla	2,223
g_14	210	60	0,20	100	1	Octeto	2,022
g_5	210	60	0,20	60	2	Octeto	1,497

Tabla 4.18. PLA virgen - Orientación vertical.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	250	60	0,20	60	1	Rejilla	0,696
g_7	250	60	0,20	80	1	Rejilla	0,834
g_2	250	60	0,20	60	1	Octeto	0,845
g_11	250	60	0,20	80	2	Octeto	1,485
g_15	250	60	0,20	100	1	Triángulos	1,047
g_8	250	60	0,20	80	1	Octeto	1,085
g_13	250	60	0,20	100	1	Rejilla	1,087
g_3	250	60	0,20	60	1	Triángulos	0,653
g_10	250	60	0,20	80	2	Rejilla	1,437
g_17	250	60	0,20	100	2	Octeto	1,621
g_4	250	60	0,20	60	2	Rejilla	1,330
g_6	250	60	0,20	60	2	Triángulos	1,353
g_12	250	60	0,20	80	2	Triángulos	1,392
g_9	250	60	0,20	80	1	Triángulos	0,689
g_18	250	60	0,20	100	2	Triángulos	1,550
g_16	250	60	0,20	100	2	Rejilla	1,403
g_14	250	60	0,20	100	1	Octeto	1,301
g_5	250	60	0,20	60	2	Octeto	1,225

Tabla 4.19. PLA reforzado - Orientación horizontal.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	250	60	0,20	60	1	Rejilla	0,588
g_7	250	60	0,20	80	1	Rejilla	0,744
g_2	250	60	0,20	60	1	Octeto	0,821
g_11	250	60	0,20	80	2	Octeto	1,615
g_15	250	60	0,20	100	1	Triángulos	0,686
g_8	250	60	0,20	80	1	Octeto	0,992
g_13	250	60	0,20	100	1	Rejilla	1,179
g_3	250	60	0,20	60	1	Triángulos	0,490
g_10	250	60	0,20	80	2	Rejilla	1,128
g_17	250	60	0,20	100	2	Octeto	1,716
g_4	250	60	0,20	60	2	Rejilla	1,294
g_6	250	60	0,20	60	2	Triángulos	1,081
g_12	250	60	0,20	80	2	Triángulos	1,397
g_9	250	60	0,20	80	1	Triángulos	0,792
g_18	250	60	0,20	100	2	Triángulos	1,359
g_16	250	60	0,20	100	2	Rejilla	1,310
g_14	250	60	0,20	100	1	Octeto	1,061
g_5	250	60	0,20	60	2	Octeto	1,503

Tabla 4.20. PLA reforzado - Orientación de canto.

Ensayo	T (°C)	v (mm/s)	h (mm)	ρ (%)	c	r	F (kN)
g_1	250	60	0,20	60	1	Rejilla	0,864
g_7	250	60	0,20	80	1	Rejilla	0,980
g_2	250	60	0,20	60	1	Octeto	0,614
g_11	250	60	0,20	80	2	Octeto	1,051
g_15	250	60	0,20	100	1	Triángulos	1,284
g_8	250	60	0,20	80	1	Octeto	0,957
g_13	250	60	0,20	100	1	Rejilla	1,223
g_3	250	60	0,20	60	1	Triángulos	0,771
g_10	250	60	0,20	80	2	Rejilla	1,159
g_17	250	60	0,20	100	2	Octeto	1,013
g_4	250	60	0,20	60	2	Rejilla	0,796
g_6	250	60	0,20	60	2	Triángulos	0,860
g_12	250	60	0,20	80	2	Triángulos	1,106
g_9	250	60	0,20	80	1	Triángulos	1,108
g_18	250	60	0,20	100	2	Triángulos	1,214
g_16	250	60	0,20	100	2	Rejilla	1,160
g_14	250	60	0,20	100	1	Octeto	1,052
g_5	250	60	0,20	60	2	Octeto	0,521

Tabla 4.21. PLA reforzado - Orientación vertical.

Las siguientes imágenes (Figuras 4.19 y 4.20) recogen todas las probetas impresas para este experimento.



Figura 4.19. Probetas de PLA virgen impresas en las tres direcciones para el experimento 2.



Figura 4.20. Probetas de PLA reforzado impresas en las tres direcciones para el experimento 2.

Partiendo de las tablas anteriores se van a hacer una serie de cálculos y a representar gráficas a fin de tener una mejor comparativa entre los distintos parámetros de impresión estudiados. Los cálculos se basarán en calcular promedios de la carga máxima a tracción, en un caso para número de contornos y densidad de relleno iguales y, en el otro, para una misma orientación y mismo material. Esto se refleja en las gráficas siguientes. Para el cálculo de la variación de resistencia se ha empleado la Fórmula 4.1.

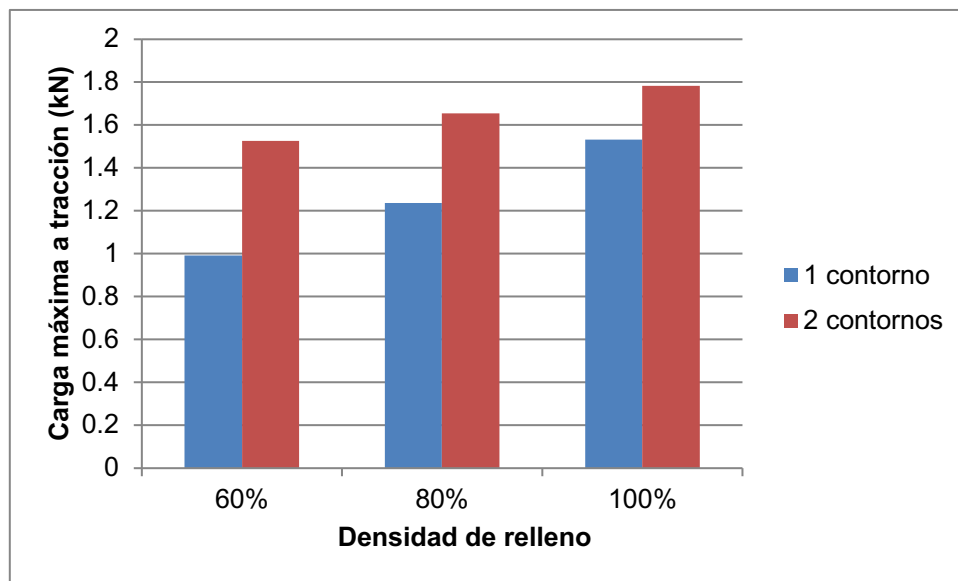


Figura 4.21. Comparativa para los distintos niveles de densidad y contornos (PLA virgen).

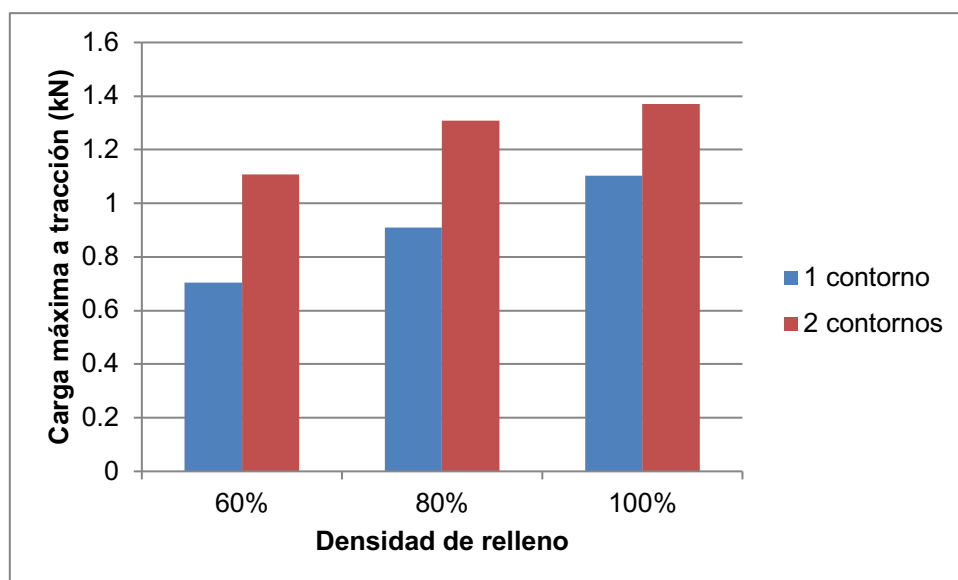


Figura 4.22. Comparativa para los distintos niveles de densidad y contornos (PLA reforzado).

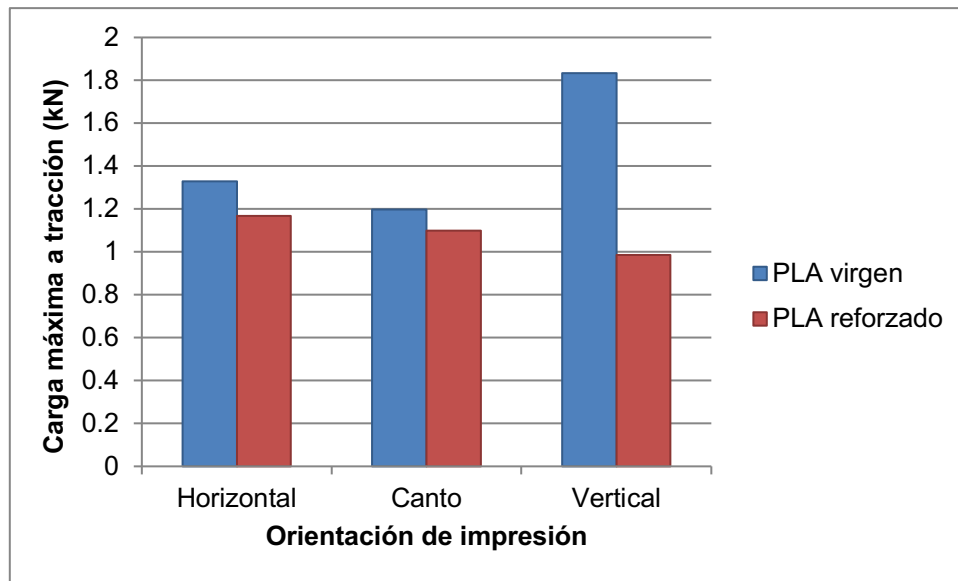


Figura 4.23. Comparativa entre las distintas orientaciones para los dos materiales.

Se agrega la Tabla 4.22 para presentar el incremento de resistencia entre ambos materiales.

Orientación	Variación de resistencia entre materiales
Horizontal	12,114%
Canto	8,424%
Vertical	46,32%

Tabla 4.22. Incremento de resistencia entre ambos materiales.

Antes de pasar a analizar las gráficas anteriores, se realizará el análisis estadístico de este experimento, a fin de sacar conclusiones más sólidas. Se ha realizado un análisis estadístico ANOVA mediante el software R.

Inicialmente, se muestra en la Tabla 4.23 los códigos de significación que define el software R, ordenados de mayor a menor relevancia.

Pr(> t)	0	0,001	0,01	0,05	0,1
Códigos	***	**	*	.	

Tabla 4.23. Código de significación definido por el software R.

Se pretende observar inicialmente el grado de influencia de cada parámetro de impresión sobre la carga máxima a tracción que soporta cada probeta, lo que se muestra en las siguientes tablas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Orientación (o)	2	4,066	2,033	72,712	5,722e-15***
Número de contornos (c)	1	2,163	2,163	77,362	2,044e-11***
Densidad de relleno (ρ)	2	1,440	0,720	25,754	3,129e-08***
Patrón de relleno (r)	2	0,072	0,036	1,293	2,842e-01
Residuales	46	1,286	0,028	-	-

Tabla 4.24. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (PLA virgen).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Orientación (o)	2	0,308	0,154	3,929	2,658e-02*
Número de contornos (c)	1	1,719	1,719	43,9249	3,303e-08***
Densidad de relleno (ρ)	2	1,003	0,502	12,8167	3,765e-05***
Patrón de relleno (r)	2	0,0825	0,0413	1,054	3,580-e01
Residuales	46	1,801	0,039	-	-

Tabla 4.25. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (PLA reforzado).

En este trabajo se toma como criterio, a la hora de clasificar el grado de influencia de un parámetro, que un factor de p-valor $< 0,05$ resulta significativo. De este modo, junto con el código de importancia del software R y las tablas obtenidas de realizar el ANOVA, junto con las gráficas obtenidas anteriormente, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Para el PLA virgen los factores de orientación, número de contornos y densidad de relleno tienen el mismo grado de relevancia según la Tabla 4.25. Estos son significativos sobre la resistencia mecánica final de la pieza, contando la orientación con el p-valor más pequeño. Por otra parte, el patrón de relleno no influye de forma significativa, teniendo un p-valor mayor que 0,1.
 - Con respecto a la influencia de la orientación era algo que se preveía, pues se había explicado anteriormente que existían propiedades de anisotropía. Sin embargo, la variación que se observa en la Figura 4.23 no era esperada, pues las piezas impresas en dirección vertical están dotadas de una mayor resistencia mecánica que las impresas en dirección horizontal y de canto. Esto debería ser al contrario, pues las probetas verticales cuentan con una peor adhesión entre capas y al someterlas a ensayos de tracción el plano de carga es perpendicular a las capas de la pieza, produciendo además una rotura más frágil. Esto daría como resultado una resistencia más baja que en probetas horizontales y de canto, ya que en estas el plano de carga coincide con el plano de las capas, dando lugar a una rotura ligeramente más dúctil y, por tanto, correspondiente a una mayor resistencia. La justificación de esto es, probablemente, la distinta dimensión de cada tipo de probeta. Las verticales contaban con una menor longitud. Esto hace que al colocarlas en las mordazas, la holgura de estas afecten en menor medida al ensayo, pues para las probetas de canto y horizontales las mordazas no se quedaban totalmente alineadas con el eje vertical, lo cual introducía ruido en los ensayos, pues probablemente las probetas no estaban siendo sometidas solamente a esfuerzos de tracción, sino también a torsión y flexión.
 - La influencia del número de contornos y la densidad de relleno concuerda con lo esperado, pues a medida que aumenta el valor de estos dos parámetros, lo hace la resistencia mecánica de la pieza, aumentando considerablemente, como se aprecia de forma clara en las Figura 4.22.
 - La reducida influencia del patrón de relleno es probable que se deba al hecho de haber fabricado piezas con densidades del 60%, 80% y 100%. Si se hubiese seleccionado solamente una densidad del 60% (considerada

baja) se podría haber estudiado con mucho más detalle la verdadera influencia del tipo de patrón sobre la resistencia máxima de la pieza. No obstante, al establecer valores de 80% y 100% (densidades altas) este factor pasa desapercibido.

- Para el PLA reforzado con carbono:
 - La orientación influye de forma significativa sobre la resistencia, aunque no tanto como en las probetas de PLA. La diferencia entre la resistencia que ofrecen las probetas en cada orientación, en este caso, sí que ha cumplido con lo que se esperaba, como se deduce de la Figura 4.23, pues las horizontales tienen una mayor resistencia que las de canto, aunque muy similar, y las verticales son las menos resistentes. Probablemente, se deba a que este material es más rígido, por lo que, al colocar las probetas en las mordazas para realizar los ensayos de tracción, estas, visualmente, no sufrían apenas torsión, ni tampoco se flexionaban de una forma tan fácil como lo hacían las de PLA virgen.
 - Con respecto a los demás parámetros, se observa que el número de contornos y la densidad de relleno vuelven a ejercer la mayor influencia, teniendo el tipo de patrón de relleno el mismo papel que para las probetas fabricadas con PLA.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Orientación (o)	2	1,256	0,628	9,939	1,166e-04***
Número de contornos (c)	1	3,870	3,870	61,256	5,634e-12***
Densidad de relleno (ρ)	2	2,408	1,204	19,056	9,969e-08***
Patrón de relleno (r)	2	0,154	0,077	1,219	0,300
Material (m)	1	3,711	3,711	58,741	1,248e-11***
Residuales	99	6,255	0,063	-	-

Tabla 4.26. Resultados del ANOVA para el experimento 2 (ambos materiales).

Mediante los resultados obtenidos al realizar el ANOVA se puede estudiar la influencia de cada fuente de variación sobre la variabilidad de la resistencia mecánica. Esto se consigue empleando las siguientes ecuaciones (Pérez, 2018):

$$\gamma_1 = \frac{SC_{fuente\ de\ variación}}{SC_{modelo}} \cdot 100$$

(Fórmula 4.4)

$$\gamma_2 = \frac{SC_{fuente\ de\ variación}}{SC_{modelo} + SC_{error}} \cdot 100$$

(Fórmula 4.5)

El término sc_{modelo} corresponde al total de la suma de cuadrados de todas las fuentes de variación, excepto la de residuales, siendo el sc_{error} la suma de cuadrados de estos. De este modo, se obtiene la siguiente tabla, solamente para los resultados recogidos en la Tabla 4.29, para la comparación de ambos materiales.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	γ_1	γ_2
Orientación (α)	2	1,256	11,018%	7,114%
Número de contornos (c)	1	3,870	33,950%	21,921%
Densidad de relleno (ρ)	2	2,408	21,12%	13,640%
Patrón de relleno (r)	2	0,154	1,351%	0,872%
Material (m)	1	3,711	32,555%	21,021%
Residuales	99	6,255	-	-
Total	107	17,654	100%	64,568%

Tabla 4.27. Contribución de cada factor a la variabilidad de la resistencia mecánica final de la pieza.

Analizando la Tabla 4.27 se observa que los factores que tienen una mayor contribución a la variabilidad de la resistencia de la pieza son el número de contornos y el tipo de material. El número de contornos constituye un 33,950% de la variabilidad del modelo y un 21,921% de la variabilidad total, y el tipo de material un 32,555% y un 21,021%, respectivamente. La densidad de relleno también es un parámetro con una importante contribución, aunque en menor medida que los dos anteriores, suponiendo esta un 21,12% de la variabilidad del modelo y un 13,64% de la total. Con la orientación de impresión ocurre algo parecido a la densidad, pues es un factor importante, pero en menor medida que los mencionados previamente, pues cuenta con una variabilidad media. Sin embargo, con respecto al patrón de relleno se corrobora que la influencia de este es insignificante en comparación con los demás parámetros.

A la hora de la realización del ANOVA, se establece la hipótesis de que los datos siguen una distribución normal. Para comprobar esta hipótesis se comprobará la normalidad de los residuos, tanto para el PLA virgen (Tabla 4.28), como para el reforzado (Tabla 4.29) y la comparación de ambos materiales (Tabla 4.30). Esto se hará mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk ejecutado con el software R (Pérez, 2018).

Shapiro-Wilk			
Estadístico		p-valor	
W	0,99175	p<W	0,9712

Tabla 4.28. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA del PLA virgen.

Shapiro-Wilk			
Estadístico		p-valor	
W	0,98554	p<W	0,7569

Tabla 4.29. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA del PLA reforzado.

Shapiro-Wilk			
Estadístico		p-valor	
W	0,99394	p<W	0,9190

Tabla 4.30. Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el ANOVA de ambos materiales.

Para los tres test de normalidad, el p-valor es menor que W, por lo cual se puede concluir que para los residuos se cumple la hipótesis de que siguen una distribución normal.

Una vez realizado el ANOVA, gracias a la Figura 4.23 y las Tablas 4.26 y 4.27, se llega a la conclusión de que el tipo de material, junto con el número de contornos, ejerce la mayor influencia sobre la resistencia mecánica de la pieza, algo que también se preveía. Con respecto al tipo de material, según el trabajo realizado por Ferreira *et al.* (2017), las probetas fabricadas con PLA reforzado con fibra de carbono cortas (que suponen un 15% en peso), ofrecen menor resistencia a tracción que las probetas fabricadas con PLA virgen. Esto puede deberse a que es la matriz la que soporta el mayor porcentaje de las cargas, con lo que las fibras de carbono no realizan función alguna. Además, la adición de estas aumenta de forma significativa la fragilidad del material, lo que puede justificar también que falle a cargas más bajas. Otro estudio que corrobora la menor resistencia a tracción del PLA reforzado con fibras cortas es el realizado por Kovan *et al.* (2018). Este atribuye la baja resistencia a la longitud de las fibras cortas. Ferreira *et al.* (2017) estimó en su estudio una longitud de las fibras de 60 μm , teniendo este valor como referencia de un tamaño de fibra demasiado reducido para aumentar la resistencia. Sin embargo, para ambos artículos, las variaciones entre la resistencia del PLA virgen y el PLA reforzado no eran muy grandes, en cada una de las tres orientaciones, hecho que se cumple en el presente trabajo para las orientaciones horizontal (12,114%) y de canto (8,424%), pero no para

la orientación vertical, donde se aprecia en la Figura 4.23 y, sobre todo, en la Tabla 4.22, un incremento de la resistencia, para las probetas de PLA virgen, del 46,32%, prácticamente el doble que la que proporciona el PLA reforzado.

A fin de justificar la elevada diferencia de resistencia entre las probetas verticales de PLA virgen y las de PLA reforzado, se han tomado imágenes de la sección de rotura de tres piezas las correspondientes a los ensayos g_10, g_11 y g_12 (con patrón “Rejilla”, “Octeto” y “Triangular”, respectivamente), para ambos materiales y así poder estudiar el relleno de cada pieza. Se ofrecen las siguientes imágenes.



Figura 4.24. Sección de rotura de probeta vertical g_10. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.

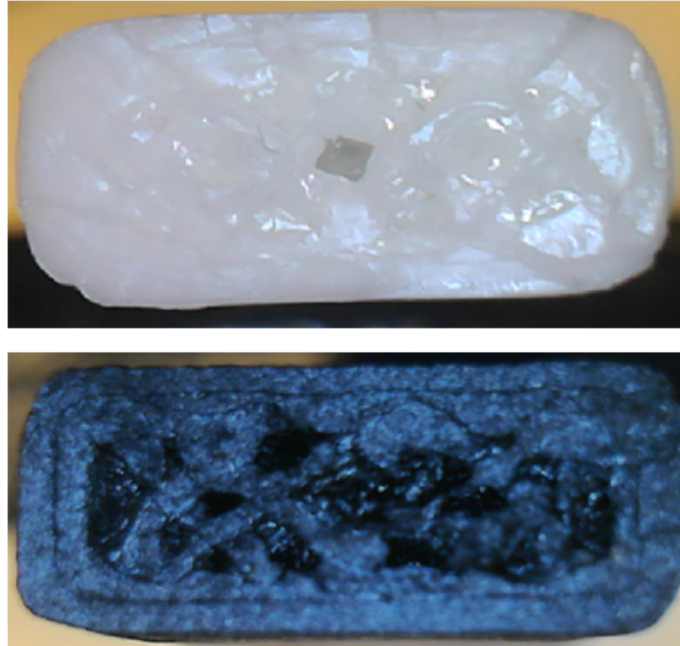


Figura 4.25. Sección de rotura de probeta vertical g_11. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.



Figura 4.26. Sección de rotura de probeta vertical g_12. Arriba PLA virgen y abajo PLA reforzado.

Aunque no se han analizado con detalle las imágenes anteriores, por ejemplo, haciendo un estudio del área de la sección transversal de cada una de las probetas, es apreciable el hecho de que las probetas impresas con PLA reforzado con fibra de carbono cuentan con menos superficie que las de PLA virgen, o lo que es lo mismo, tienen mayor número de huecos. Esto ocurre en los tres casos estudiados, observándose la mayor diferencia en la Figura 4.25, pues para el PLA sin fibra, con el

patrón de “Octeto” y un 80% de densidad, el interior es prácticamente macizo, mientras que para el PLA reforzado existe una gran cantidad de huecos.

La aparición de un mayor número de huecos y de mayor dimensión en las piezas fabricadas con PLA reforzado hace pensar que es el principal causante de la baja resistencia que ofrecen estas, pues estos defectos durante el proceso de fabricación llevan a disponer de secciones resistentes de menor área y, también, podrían propiciar la aparición de concentradores de tensión. Probablemente esto se deba a que se han utilizado boquillas de 0,6 mm de diámetro, muy cercanas al valor del diámetro recomendado (por los fabricantes del material) para imprimir el PLA reforzado con fibra de carbono, que es de 0,5 mm. Esto puede dificultar la consecución de un flujo de material extruido uniforme, pues las fibras cortas de carbono no consiguen alinearse con la dirección del flujo y chocan con las paredes de la boquilla, produciendo atasque y dando lugar a un flujo irregular de material. Además, no consiguen depositarse de forma alineada con las capas, por lo que, realmente, es como si no estuviesen realizando ninguna función para incrementar la resistencia de la pieza. Esto se puede apreciar en las imágenes, pues además de contar con menor área de sección transversal, las probetas impresas con material reforzado siguen con bastante dificultad el tipo de patrón de relleno establecido.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

En este último apartado del trabajo se sacarán algunas conclusiones sobre la parte teórica, el estado del arte (basadas en la revisión de literatura científica realizada), y sobre la parte experimental, así como la posibilidad de futuros trabajos de investigación sobre el tema de la fabricación aditiva.

- Estado del Arte:
 - La fabricación aditiva ha evolucionado de forma considerable y su uso se está extendiendo gradualmente a muchos campos de aplicación distintos, desde el sector de medicina hasta el aeroespacial. Esto se debe al desarrollo de nuevos materiales y a notables ventajas que presenta este proceso de fabricación, como la libertad de diseño y la fabricación de estructuras complejas sin necesidad de utilizar ensamblajes (lo que reduce el peso y el gasto de material).
 - La fabricación aditiva necesita ser estudiada con más profundidad aún, pues presenta algunos inconvenientes como una calidad superficial limitada y una pobre resistencia mecánica.
 - Dentro de los procesos de fabricación aditiva, el más extendido de estos es el de extrusión de material, dentro del cual la técnica más utilizada actualmente es la de modelado por deposición fundida. Esto se debe a que el material que utiliza es filamento de termoplástico, el cual es fácil de procesar y no supone un gran coste. Esto ofrece la posibilidad de poder adquirir una impresora 3D para tener en casa.
 - La implantación de materiales reforzados en la fabricación aditiva es un tema de gran importancia, pues suponen una solución a uno de los inconvenientes mencionados anteriormente, como es la mejoría de la resistencia mecánica de las piezas.

- Parte experimental:
 - Una buena planificación pre-experimental es clave para conseguir un diseño de experimentos que se ajuste lo mejor posible a la variable/s de respuesta que se desea/h estudiar.
 - Se ha realizado un primer experimento donde se estudia la influencia de la altura de capa y de la velocidad de impresión. A pesar del reducido número de ensayos (12), para el aumento de la altura de capa se observó una tendencia importante de la resistencia, incrementándose para el PLA virgen y reduciéndose para el PLA reforzado. Mientras que para la velocidad de impresión no se observó una tendencia tan clara. El máximo incremento de la resistencia con la altura de capa es del 9%, un porcentaje que se puede considerar bajo. En el caso de la velocidad de impresión es incluso más reducido, por lo que se terminó desechando el estudio de estos dos factores en el siguiente experimento.
 - Se realizó un segundo experimento, cuyos parámetros de estudio se escogieron en función de los resultados del experimento 1. En este llevaron a cabo 108 ensayos y se realizó un análisis estadístico ANOVA, gracias al cual se observó la influencia de los parámetros estudiados. La orientación de impresión es un factor influyente, pero en menor medida que la densidad de relleno, cuyo aumento contribuye de manera importante al incremento de la resistencia. No obstante, son el número de contornos y el tipo de material los factores que ejercen una mayor influencia sobre la resistencia. Con respecto al tipo de patrón de relleno, no afecta a la variación de la resistencia a tracción.
 - La resistencia a tracción máxima se consigue con el PLA virgen, no con el reforzado. En cada una de las tres orientaciones de impresión el PLA virgen resiste más: en horizontal, 12,114%, de canto, 8,424% y en vertical, que presenta la mayor diferencia, 46,32%. La configuración óptima de los demás parámetros es: número de contornos que suponga, como mínimo, un grosor de pared del doble del diámetro de la boquilla, una densidad de relleno alta (100%) y una orientación de impresión según la orientación vertical.

- Si se desea optimizar una pieza que trabaje a tracción para conseguir la mayor resistencia mecánica posible, se deberá evitar el empleo de PLA reforzado con fibras de carbono cortas según los experimentos realizados.

5.2. Trabajos futuros

De las conclusiones anteriores de la parte experimental, junto con algunas observaciones realizadas durante la ejecución de los experimentos, se pueden sacar varios temas de estudio para posibles trabajos futuros de investigación sobre la fabricación aditiva:

- Estudio de la influencia del parámetro de “Retracción” en la resistencia mecánica final de la pieza en probetas horizontales. Este puede definir características como la longitud de filamento que se retrae al desplazarse la boquilla de un lugar a otro sin imprimir o la cantidad adicional de material para evitar una falta de este al empezar con el siguiente movimiento. Con una correcta configuración de este parámetro mediante un software de segmentación como el Cura, se pueden evitar errores de fabricación como el que se mostraba en la Figura 4.30, donde se observa falta de material en la zona de curvatura de abajo, pues es desde donde comienza cada movimiento la boquilla del extrusor. Esto ocurre para ambos materiales, aunque curiosamente solo para los que cuentan con dos contornos.
- Análisis de otros factores de impresión como una correcta adherencia entre capas con distinto tipo de patrón de relleno y si esto puede perjudicar a la resistencia de la pieza.
- Impresión del mismo tipo de PLA reforzado con fibra de carbono, utilizando unas boquillas de acero endurecido de 0,8 mm, y volver a comparar la resistencia que ofrecen estas piezas con respecto a otras fabricadas con PLA virgen con esas mismas boquillas. Asimismo, podría ser de interés el estudio de la influencia de la temperatura de impresión sobre la resistencia mecánica de piezas fabricadas con PLA reforzado, pues se optó por una de 250 °C para este trabajo a fin de conseguir un flujo lo más regular posible de material, lo cual se podría conseguir mediante unas boquillas de mayor tamaño, pudiendo reducir la temperatura.
- Análisis del grado de influencia de la longitud del refuerzo para polímeros reforzados con fibras cortas de carbono.

- Fabricación de probetas tipo 1BA (ya que al ser de menor longitud, se agiliza bastante más la realización del experimento), según la norma UNE-EN ISO 527-1 (2012), con PLA virgen (pues es el que ha dado resultados más extraños de resistencia en cuanto a la orientación de impresión) y realización de ensayos de tracción a fin de volver a estudiar cómo es la resistencia que ofrecen las probetas impresas en dirección horizontal y de canto en comparación con las verticales. Esto es para contar con las mismas condiciones en todas las piezas (mismas dimensiones) y estudiar cómo puede llegar a influir la distinta dimensión de las probetas tanto en el proceso de impresión como durante los ensayos a tracción.
- Configuración de los ventiladores de capa a fin de estudiar cómo influye este parámetro sobre las propiedades mecánicas de la pieza, así como sobre la rugosidad superficial.
- Imprimir con PLA reforzado con distintas temperaturas de la cama caliente, empezando desde 0 °C, a fin de analizar si realmente sería necesario este parámetro para poder fabricar piezas con este material sin que sufran contracción alguna y no se despeguen de la cama.

Referencias

- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A. (2017). *Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach*. Procedia Manufacturing 10, 791-803.
- Aleksendrić, D., Carlone, P. (2015). *1: Introduction to composite materials*. Soft Computing in the Design and Manufacturing of Composite Materials, 1-5.
- Anderson, C. (2012). *Makers: The New Industrial Revolution*. Crown Business, New York.
- Arribas, P. (2016). *Procedimiento y caracterización de probetas de plástico fabricadas mediante la impresión 3D*. Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos.
- Ashby, M., Jones, D. (2012). *Engineering Materials: An Introduction to their Properties and Applications*. International Series on Materials Science and Technology 34.
- Balletti C., Ballarin, M., Guerra, F. (2017). *3D printing: State of the art and future perspectives*. Journal of Cultural Heritage 26, 172-182.
- Baumann, F., Scholz, J., Fleischer, J. (2017). *Investigation of a New Approach for Additively Manufactured Continuous Fiber-reinforced Polymers*. Procedia CIRP 66, 323-328.
- Bleyer, J. (2018). *Multiphase continuum models for fiber-reinforced materials*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 121, 198-233.
- Blok, L.G., Longana, M.L., YuB, H., Woods, .K.S. (2018). *An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composite*. Additive Manufacturing 22, 176-186.
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., Clare, A. (2017). *Materials for additive manufacturing*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 66, 659–681.
- Chacón, J.M., Caminero, M.A., García-Plaza, E., Núñez, P.J. (2017). *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modeling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. Materials & Design, 124, 143-157.
- Chawla, K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science+Business Media New York. Chapter 1: Introduction.
- Chawla, K., Chawla, N. (2018). *1.1 Fibrous Reinforcements for Composites*. Comprehensive Composite Materials II 1, 1-12. Ed. Springer
- Durão, L. F., Barkoczy, R., Zancull, E., Ho, L., Bonnard, R. (2017, pero pone que será aceptado en 2019, qué hago??). *Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments*. Progress in Additive Manufacturing. Ed. Springer.

Fan, J., Njuguna, J. (2016). *1: An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures*. *Lightweight Composite Structures in Transport*, 3-34.

Ferreira, L., Amatte, I., Dutra, T., Bürger, D. (2017). *Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers*. *Composites Part B: Engineering* 124, 88-100.

<https://filament2print.com/es/limpieza/740-smart-clean-limpieza.html>. Última fecha de acceso: 13/06/2019.

Forster, A. (2015). *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*. Materials and Structural Systems Division. Engineering Laboratory. NISTIR 8059.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition. Ed. Springer.

Gibson, R. (2012). *Principle of composite mechanics. Fourth Edition*. Mechanical Engineering Series. CRC. Taylor & Francis Group.

Girden, E. (1992). *ANOVA: Repeated measures*. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences.

González-Henríquez, C, Sarabia-Vallejos ,M. A., Rodríguez-Hernandez, J. (2019). *Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: materials, methodologies, and biomedical applications*. *Progress in Polymer Science, In press, accepted manuscript*.

Gordon, A., Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z. (2015). *An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Central Florida, Orlando, Florida, USA.

Guo, N., Leu, M (2013). *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*. *Frontiers of Mechanical Engineering* 8 (3), 215-243.

Haghshenas, M. (2016). *Metal–Matrix Composites*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

Hayagrivan, V. (2018). *Optimization of process parameters for fused filament fabrication*. Additive Manufacturing. Degree Project in Light Weight Structures.

Horvath, J. (2014). *A Brief History of 3D Printing*. Mastering 3D Printing, 3-10. Ed. Springer.

<https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>. Última fecha de acceso: 13/06/2019.

Jakus, A. (2019). *Chapter 1: An Introduction to 3D Printing—Past, Present, and Future Promise*. *3D Printing in Orthopaedic Surgery*, 1-15.

Kapetanious, C., Rieple, A., Pilkington, A., Frandsen, T., Pisano, P. (2018). *Building the layers of a new manufacturing taxonomy: How 3D printing is creating a new landscape of production eco-systems and competitive dynamics*. Technological Forecasting and Social Change 128, 22-35.

Kaw, A. (2016). *Mechanics of Composite Materials. Second Edition*. Mechanical Engineering Series. CRC. Taylor & Francis Group.

Kovan, V., Tezel, T., Camurlu, H., Topal, E. (2018) *Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed pla/carbon fiber composites*. Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty - Akdeniz University, Turkey.

Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., Martorelli, M. (2015). *The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer*. Rapid Prototyping Journal 21, 604-617.

Li, Z., Liu, L., Barenji, A, Wang, W. (2018). *Cloud-based Manufacturing Blockchain: Secure Knowledge Sharing for Injection Mould Redesign*. Procedia CIRP 72, 961-966.

<https://lifelife3d.com/ciencia-y-tecnologia/infill-ultimaker-cura/>. Última fecha de acceso: 20/06/2019.

Magisetty, R., Cheekuramelli, N., (2018, estoy poniendo las fechas de cuando se recibió el artículo, no de cuándo estará disponible). *Additive manufacturing technology empowered complex electromechanical energy conversion devices and transformer*. Applied Materials Today 14, 35-50.

McKeen, L. (2019) *3: Introduction to the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Plastics and Elastomers*. The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers (Fourth Edition), 49-76.

Montgomery, D.C. (2001). *Design and analysis of experiments*. Editorial John Wiley&Sons, Inc.

https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006225.pdf. Última fecha de acceso: 19/06/2019.

Murariu, M., Dubois, P. (2016). *PLA composites: From production to properties*. Advanced Drug Delivery Reviews 107, 17-46.

Murr, L., Johnson, W. (2017). *3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing*. Journal of Materials Research and Technology 6 (1), 77-89.

Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W., Sáiz-González, D. (2019). *Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbonfiber composites produced by additive manufacturing*. Additive Manufacturing 26, 227-241.

Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K., Hui, D. (2018). *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering 143, 172-196.

Niaki, M., Torabi, S., Nonino, F. (2019). *Why Manufacturers Adopt Additive Manufacturing Technologies: The Role of Sustainability*. Journal of Cleaner Production, *In press, accepted manuscript*.

Noorani, R. (2018). 3D Printing. Editorial CRC Press.

<http://www.ourbibo.com/product/showproduct.php?lang=en&id=41>. Última fecha de acceso: 13/06/2019.

Papon, E.A., Haque, A. (2019). *Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites*. Additive Manufacturing 26, 41-52.

Patwardhan, A. (2018). *Chapter 22: How 3D Printing Will Change the Future of Borrowing Lending and Spending?* Handbook of Blockchain, Digital Finance and Inclusion 2, 493-520. (Todavía no he puesto nada)

Pérez, M. (2018). *Análisis comparativo de la calidad superficial de piezas fabricadas mediante mecanizado y fabricación aditiva*. Trabajo Fin de Grado.

Pinkerton, A.J. (2016). *[INVITED] Lasers in additive manufacturing*. Optics & Laser Technology 78, 25-32.

Prakash, K., Nancharaih, T., Rao, V. (2018). *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview*. Materials Today: Proceedings 5, 3873-3882.

<https://www.proto-pasta.com/pages/carbon-fiber-pla>. Última fecha de acceso: 13/06/2019.

Qin, Q. (2015). *1: Introduction to the composite and its toughening mechanisms*. Toughening Mechanisms in Composite Materials, 1-32.

Raney, K., Lani, E, Kalla, D. (2017). *Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process*. Materials Today: Proceedings 4 (8), 7956-7961.

Roschli, A., Gaul, K., Boulger, A.M., Post, B., Chesser, P., Love, L., Blue, F., Borish, M. (2018). *Designing for Big Area Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing 25, 275-285.

Sánchez, S. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>. 3D Natives. Última fecha de acceso: 22/03/2019.

Saptarshi, S., Zhou, C. (2019). *Chapter 2 - Basics of 3D Printing: Engineering Aspects*. 3D Printing in Orthopaedic Surgery, 17-30.

Sapuan, S. (2017). *Chapter 1: Introduction*. Composite Materials. Concurrent Engineering Approach, 1-27.

Schmid, M. (2018). *Laser Sintering with Plastics*. Laser Sintering with Plastics, 1-13.

Singh, S., Ramakrishna, S., Singh, R. (2017). *Material issues in additive manufacturing: A review*. Journal of Manufacturing Processes 25, 185-200.

<https://www.smartmaterials3d.com/es/tienda-smart/71-pla-ivory-white.html> Última fecha de acceso: 13/06/2019.

Staab, G. (2015). *1: Introduction to composite materials*. Laminar Composites (Second Edition), 1-16.

Stupenengo, F. (2011). *Capítulo 10: Materiales compuestos*. Materiales y materias primas. Guía didáctica.

UNE-EN ISO 527-1 (2012). *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*.

UNE 116005 (2012). *Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas*.

Van de Werken, N., Hurley, J., Khanboloukia, P., Sarvestani, A., Tamijani, A., Tehrani, M. (2019). *Design considerations and modeling of fiber reinforced 3D printed parts*. Composites Part B: Engineering 160,684-692.

Wang, K., Ho, C., Zhang, C., Wang, B. (2017). *A Review on the 3D Printing of Functional Structures for Medical Phantoms and Regenerated Tissue and Organ Applications*. Engineering 3 (Issue 5), 653-662. Laser assisted additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites.

Wendel, B., Rietzel, D., Kühnlein, F., Feulner, R., Hülde, G., Schmachtenberg, E. (2008). *Additive Processing of Polymers*. Macromolecular Journals. Materials and Engineering 293, 799-809.

Yamazaki, T. (2016). *Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining*. Procedia CIRP 42, 81-86.

ANEXO

En este apartado se realizarán algunas observaciones con respecto a la realización de los experimentos:

- Se representa mediante la Figura 4.27 la rotura de las probetas, mostrando solamente las más representativas de cada orientación, escogiendo la misma configuración para ambos materiales. Se puede observar de una rotura por la zona media de la probeta, es decir, una rotura considerada como buena según la distancia entre marcas de acuerdo con la norma UNE 116005 (2012), y otra rotura fuera esa zona, en la parte de la curvatura.

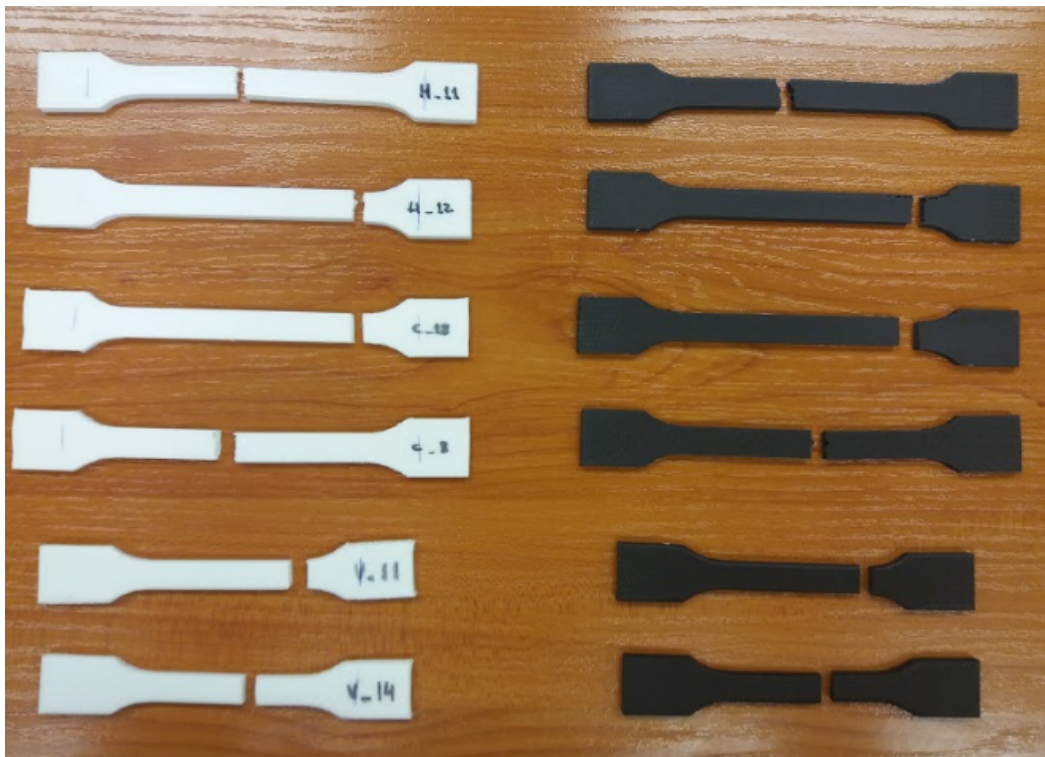


Figura 0.1. Probetas ensayadas a tracción con buena y mala rotura, para ambos materiales.

El que las probetas rompan por la zona cercana al inicio de la curvatura se puede deber a que en esta zona existe mayor número de huecos, especialmente entre el contorno y el relleno interior, lo que da lugar una distribución irregular de la carga a tracción, pues esos defectos provocan un incremento considerable de la tensión. Por otro lado, se puede apreciar, muy ligeramente, que las probetas verticales rompen de forma más frágil que las demás.

- Se han tomado imágenes con el microscopio, Figuras 4.28 y 4.29, de las boquillas utilizadas para imprimir todas las probetas de cada material.



Figura 0.2. Boquilla usada para imprimir PLA reforzado

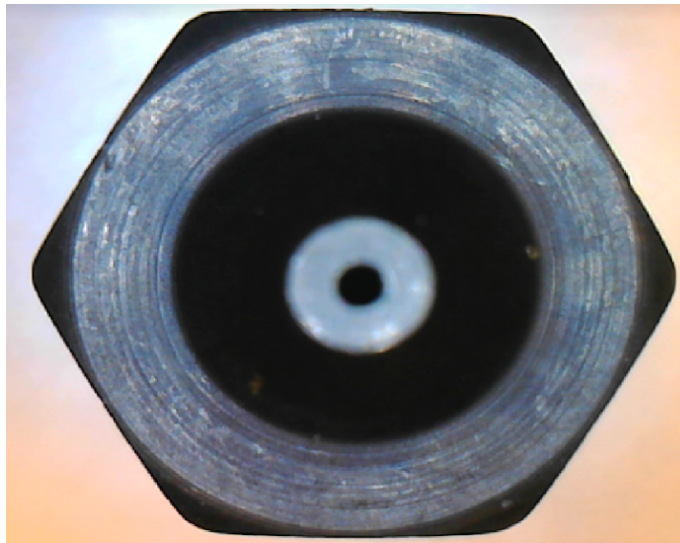


Figura 0.3. Boquilla usada para imprimir PLA virgen

En la Figura 4.28 se puede apreciar el desgaste que provoca la fibra de carbono alrededor de la boquilla, tanto en el exterior como en la sección de salida de esta, mientras que la que se usó para imprimir PLA virgen no parece haber sufrido ningún tipo de desgaste.

- Es de total necesidad realizar una planificación experimental una vez que se hayan definido los valores de los parámetros a estudiar, pues gracias a esto la realización de los experimentos se puede realizar de una manera eficiente y

teniendo control sobre los experimentos en todo momento. En este trabajo ha sido un factor fundamental, sobre todo para el experimento 2, pues se han tenido que imprimir 108 probetas, lo cual ha agilizado enormemente el proceso.

- Anotar datos de tiempo estimado y de cantidad de material utilizado para probeta ha marcado la diferencia. Se ha podido optimizar al máximo el tiempo en el que se han impreso todas las probetas.
- La impresora utilizada, BIBO 2 *Dual Extruders* ha producido un nivel elevado de vibraciones, particularmente durante la impresión de las probetas verticales. De este modo, dificultaba que las probetas se fabricaran de manera totalmente uniforme (contando con defectos apreciables a simple vista). Además, se observaron también problemas con uno de los extrusores. El mecanismo de alimentación (engranajes) del extrusor 1 no era capaz de cargar el filamento de fibra de carbono de manera regular, dando lugar a un flujo de material irregular. Esto se podría arreglar desmontando el extrusor y ajustando el sistema de alimentación de forma que ejerza más fuerza sobre el filamento para evitar que los engranajes patinen.
- En las probetas horizontales, impresas para ambos materiales, aparecen defectos en la zona de curvatura donde la boquilla empieza el movimiento de deposición tras finalizar cada capa. Esto solamente se ha observado en piezas con dos contornos, como se muestra en la Figura 4.30.



Figura 0.4. Falta de material en la zona de curvatura en probetas horizontales (PLA reforzado).

- Con respecto a los materiales utilizados, el PLA virgen es fácil de manipular e imprimir. No obstante, hay que tener especial cuidado con la manipulación del

PLA reforzado con fibra de carbono, pues cuenta con una mayor fragilidad, lo que ocasionaba la rotura del filamento cuando se movía el extrusor al imprimir. Tuvo que añadirse a la impresora un macarrón más largo a fin de reducir esa elevada fragilidad del material.

- Es muy importante conservar el material en las condiciones recomendadas por los fabricantes, para evitar que llegue a estropearse y así perder todas sus propiedades.
- Imprimir PLA reforzado con fibra de carbono con boquillas de 0,6 mm de diámetro parece no haber sido suficiente para poder permitir una correcta alineación de las fibras con el flujo extruido de material y, por tanto, con las capas depositadas. Es probablemente debido a esto que presenta una peor resistencia mecánica.
- El ensayo de tracción, aunque sea simple, si se realiza con mordazas que cuenten con bastante holgura, puede introducir mucho ruido en los resultados finales, pues no se está ejerciendo únicamente una carga de tracción.