



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PIEZAS SOSTENIBLES PRODUCIDAS MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

Alumno: Víctor Manuel López Bayona

Tutor: Prof. D. Diego Carou Porto
Co-tutor: Prof. D. Alberto García Collado
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: Estudio de la resistencia mecánica en piezas sostenibles producidas mediante fabricación aditiva, que presenta Víctor Manuel López Bayona, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, junio de 2019

El alumno:

Los tutores:

Víctor Manuel López Bayona

Tutor: Prof. D. Diego Carou Porto
Co-tutor: Prof. D. Alberto García Collado

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento.....	1
1.2. Motivación y objetivos	2
1.3. Estructura	3
2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. Introducción	5
2.2. Fabricación aditiva.....	7
2.2.1. Historia.....	7
2.2.2. Categorías de procesos.....	10
2.2.3. Materiales	12
2.2.4. PLA reciclado.....	16
2.2.5. Propiedades mecánicas.....	17
2.2.6. Procedimiento a seguir en fabricación aditiva.....	19
2.3. Propiedades mecánicas. Definiciones.....	20
3. METODOLOGÍA	23
3.1. Introducción	23
3.2. Planificación pre-experimental.....	23
3.2.1. Reconocimiento y declaración del problema.....	23
3.2.2. Selección de la variable de respuesta	23
3.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos	24
3.3. Elección del diseño experimental	26
3.4. Realización del experimento.....	26
3.4.1. Impresión 3D.....	26
3.4.2. Ensayo de tracción	27
3.5. Análisis de resultados.....	27
3.6. Conclusiones.....	27
4. EQUIPO EXPERIMENTAL	29
4.1. Equipo experimental para la impresión 3D	29
4.2. Equipo experimental para el ensayo de tracción.....	34
5. PARTE EXPERIMENTAL	39
5.1. Introducción.....	39
5.2. Probeta de ensayo	39

5.3.	Realización de ensayos.....	42
5.3.1.	Actividades previas	42
5.3.1.1.	Impresión 3D	42
5.3.1.2.	Ensayo de tracción	42
5.3.2.	Realización de ensayos	43
5.3.2.1.	Impresión 3D	43
5.3.2.2.	Ensayo de tracción	44
5.4.	Fase I	46
5.4.1.	Factores, niveles y rangos	46
5.4.2.	Diseño experimental	49
5.4.3.	Resultados	54
5.4.4.	Análisis de resultados	55
5.4.4.1.	PLA virgen	60
5.4.4.2.	PLA reciclado.....	62
5.4.4.3.	Influencia del tipo de material	63
5.5.	Fase II	65
5.5.1.	Factores, niveles y rangos	66
5.5.2.	Diseño experimental	67
5.5.3.	Resultados	68
5.5.4.	Análisis de resultados	69
5.5.4.1.	PLA virgen	70
5.5.4.2.	PLA reciclado.....	73
5.5.4.3.	Comparación entre ambos materiales	75
5.6.	Fase III	77
5.6.1.	Factores, niveles y rangos	77
5.6.2.	Diseño experimental	77
5.6.3.	Resultados	80
5.6.4.	Análisis de resultados	82
6.	Conclusiones y trabajos futuros	87
6.1.	Conclusiones.....	87
6.1.1.	Conclusiones del estado del arte	87
6.1.2.	Conclusiones del experimento	88
6.2.	Trabajos futuros.....	89

Bibliografía.....	91
-------------------	----

Índice de tablas

Tabla 1: Varios procesos de fabricación aditiva y años de invención (Rietzel <i>et al.</i> , 2017).	10
Tabla 2: Materiales de origen natural y aplicaciones (Basada en Liu <i>et al.</i> (2018)).	14
Tabla 3: Materiales comerciales y su categoría de proceso (Basada en Bourell <i>et al.</i> (2017) y Pérez (2018)).	15
Tabla 4: Comparación de las propiedades mecánicas del PLA, ABS y HIPS (Basada en Kumat <i>et al.</i> (2018)).	16
Tabla 5: Comparación de las propiedades mecánicas del PLA virgen y PLA en su segundo ciclo de impresión (Basada en Zhao <i>et al.</i> (2018)).	17
Tabla 6: Factores elegidos.	25
Tabla 7: Dimensiones de la impresora Witbox (Pérez, 2018).	29
Tabla 8: Propiedades del PLA.	32
Tabla 9: Propiedades del PLA reciclado.	33
Tabla 10: Dimensiones de las probetas según la norma UNE 116005:2012.	40
Tabla 11: Factores y sus niveles para las probetas (fase I).	49
Tabla 12: Diseño factorial completo para el PLA virgen (fase I).	50
Tabla 13: Diseño factorial completo para el PLA reciclado (fase I).	51
Tabla 14: Diseño factorial fraccionado para el PLA virgen (fase I).	51
Tabla 15: Diseño factorial fraccionado para el PLA reciclado (fase I).	52
Tabla 16: Plan de ensayos para el PLA virgen (fase I).	52
Tabla 17: Plan de ensayos para el PLA reciclado (fase I).	53
Tabla 18: Resultados para el PLA virgen (fase I).	54
Tabla 19: Resultados para el PLA reciclado (fase I).	54
Tabla 20: Código de significación del software R.	59
Tabla 21: ANOVA para el PLA virgen (fase I).	60
Tabla 22: Contribución de cada factor para el PLA virgen (fase I).	61
Tabla 23: ANOVA para el PLA reciclado (fase I).	62
Tabla 24: Contribución de cada factor para el PLA reciclado (fase I).	63
Tabla 25: ANOVA teniendo en cuenta el tipo de material (fase I).	63
Tabla 26: Contribución de cada factor para cada tipo de material (fase I).	64
Tabla 27: Factores y sus niveles para las probetas (fase II).	66
Tabla 28: Niveles y rangos para la densidad de relleno (fase II).	66
Tabla 29: Plan de ensayos para el PLA virgen (fase II).	67
Tabla 30: Plan de ensayos para el PLA reciclado (fase II).	67
Tabla 31: Resultados para el PLA virgen (fase II).	68
Tabla 32: Resultados para el PLA reciclado (fase II).	68
Tabla 33: Factores y sus niveles para las probetas (fase III).	77
Tabla 34: Plan de ensayos para las probetas en posición horizontal.	78
Tabla 35: Plan de ensayos para las probetas en posición de canto.	78
Tabla 36: Plan de ensayos para las probetas en posición vertical.	78
Tabla 37: Resultados para las probetas en posición horizontal (fase III).	80
Tabla 38: Resultados para las probetas en posición vertical (fase III).	80
Tabla 39: Resultados para las probetas en posición de canto (fase III).	81

Tabla 40: Promedio de las cargas obtenidas para cada posición de impresión. 83

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Clasificación según las etapas (ISO/ASTM, 2017).	12
Ilustración 2: Pasos del proceso de impresión 3D, ejemplo de una taza (Gibson <i>et al.</i> , 2010).	20
Ilustración 3: Impresora Witbox utilizada.	30
Ilustración 4: Entorno gráfico Ultimaker Cura 3.2.1.	31
Ilustración 5: Materiales: PLA reciclado (izquierda), PLA virgen (derecha).	32
Ilustración 6: Spray fijador Dimafix.	34
Ilustración 7: Máquina de tracción (a) y mando de control (b).	35
Ilustración 8: Célula de carga.	36
Ilustración 9: Vista de las mordazas (a). Vista cercana mordaza superior (b).	36
Ilustración 10: Diseño por bloques del modelo mediante el software TW Elite.	38
Ilustración 11: Entorno del software TW Elite durante un ensayo de tracción.	38
Ilustración 12: Probeta tipo 1A de ensayo según la norma UNE 116005:2012.	39
Ilustración 13: Dimensiones de la probeta utilizada en este estudio.	40
Ilustración 14: Posiciones de impresión según la norma UNE 116005:2012.	41
Ilustración 15: Posición de la pieza horizontal para el ensayo de tracción. Ejemplo probeta RE-7.	45
Ilustración 16: Posición de la pieza de canto para el ensayo de tracción. Ejemplo probeta RE-5C.	45
Ilustración 17: Temperaturas y velocidades de impresión recomendadas para el PLA (filament2print.com/es/).	47
Ilustración 18: Probeta con patrón de relleno “tri-hexagonal”.	48
Ilustración 19: Probeta con patrón de relleno “grid”.	48
Ilustración 20: Probetas RE-5 y RE-8 imprimidas.	53
Ilustración 21: Probetas sometidas a tracción (fase I).	55
Ilustración 22: Fractura con comportamiento elástico en las probetas RE-7 y RE-6.	56
Ilustración 23: Fractura con comportamiento frágil en la probeta VE-2.	56
Ilustración 24: Posiciones de impresión de las probetas (Yao <i>et al.</i> , 2019).	57
Ilustración 25: Fractura a través de capas y fractura entre capas (Yao <i>et al.</i> , 2019).	57
Ilustración 26: Distintas fracturas en las probetas del estudio de Yao <i>et al.</i> (2019).	58
Ilustración 27: Probeta 70-RE durante su proceso de impresión.	67
Ilustración 28: Probetas imprimidas (fase II).	68
Ilustración 29: Probetas sometidas a tracción (fase II).	69
Ilustración 30: Probeta RE-2C durante su proceso de impresión.	78
Ilustración 31: Probetas PLA virgen imprimidas (fase III).	79
Ilustración 32: Probetas PLA reciclado imprimidas (fase III).	79
Ilustración 33: Probeta RE-2V durante su proceso de impresión.	79
Ilustración 34: Probetas PLA virgen sometidas a tracción (fase III).	81
Ilustración 35: Probetas PLA reciclado sometidas a tracción (fase III).	82

Índice de gráficas

Gráfica 1: Modelo para el PLA virgen.	70
Gráfica 2: Línea de tendencia PLA virgen para la zona A.	71
Gráfica 3: Línea tendencia PLA virgen para la zona B.	72
Gráfica 4: Modelo para el PLA reciclado.	73
Gráfica 5: Línea tendencia PLA reciclado para la zona A.....	74
Gráfica 6: Línea tendencia PLA reciclado para la zona B.....	75
Gráfica 7: Comparación de modelos entre el PLA y el PLA reciclado.	75
Gráfica 8: Comparación de la carga media obtenida en cada posición de impresión para cada material.	84

Lista de acrónimos

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno, del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*.

AM: del inglés *Additive Manufacturing*.

ANOVA: del inglés *Analysis of Variance*.

ASTM: del inglés *American Society for Testing and Materials*.

CAD: del inglés *Computed Aided Design*.

CLIP: del inglés *Continuous Liquid Interface Production*.

CNF: Nanofibras de Celulosa, del inglés *Cellulose NanoFibres*.

DEF: Deposición Energía Focalizada.

DSPC: Proyección de Aglutinante, del inglés *Direct Shell Production Casting*.

EM: Extrusión de Material.

FDM: del inglés *Fused Deposition Modeling*.

HDPE: del inglés *High Density Polyethylene*.

HIPS: del inglés *High Impact Polystyrene*.

ISO: del inglés *International Organization for Standardization*.

LDPE: del inglés *Low Density Polyethylene*.

LOM: del inglés *Laminated Object Manufacturing*.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PBF: del inglés *Powder Bed Fusion*.

PC: Policarbonato.

PDA: Polidopamina.

PEAD: Polietileno de Alta Densidad.

PEEK: del inglés *Poly Ether Ether Ketone*.

PET: del inglés *Polyethylene Terephthalate*.

PLA: Ácido Poliláctico, del inglés *Polylactic Acid*.

PM: Proyección de Material.

PVS: Policloruro de Vinilo, del inglés *Polyvinylchloride*.

SGC: del inglés *Solid Ground Curing*.

SLA: del inglés *stereolithography*.

SLS: del inglés *Selective Laser Sintering*.

SML: del inglés *Sheet Material Lamination*.

STEP: del inglés *Standard for the Exchange of Product*.

STL: del inglés *Standard Triangle Language*.

TFG: Trabajo Fin de Grado.

UNE: Una Norma Española.

VAT: del inglés *Vat Photopolymerization*.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento

Durante toda la historia, el hombre ha necesitado satisfacer sus necesidades conforme han surgido. Para ello, ha llevado a cabo la invención de distintos procesos de fabricación, así como mejorado otros procesos para obtener lo que necesitaba. Por otro lado, con la aparición de nuevas tecnologías y una mayor rapidez en el desarrollo de las mismas han ido creándose nuevos procesos de fabricación, como la fabricación aditiva.

La fabricación aditiva o impresión 3D es una tecnología revolucionaria cuyas aplicaciones pueden ser muy diversas dada la capacidad de generar objetos con geometrías complejas con una gran cantidad de detalle y la combinación de diferentes materiales (Columbus, 2017). La tecnología existe desde hace varias décadas y proporciona ventajas tales como imprimir una pieza sin necesidad de ensamblar, generando tanto interés público como comercial. También ofrece la facilidad de poder modificar su estructura interna, mejorando la fuerza de la estructura con respecto a su peso. Entre las principales ventajas se encuentra el fácil uso de las impresoras 3D, así como la adaptabilidad de las impresoras para otro tipo de procesos. Además, se pueden imprimir diferentes objetos 3D que en el pasado necesitarían de diferentes procesos de producción con maquinaria específica (Campbell e Ivanova, 2013).

Actualmente, como consecuencia del alto consumo, se genera gran cantidad de contaminación que constituye una gran amenaza para el medio ambiente y la salud. El plástico, que es uno de los materiales más usados en la industria, es un material no biodegradable y se encuentra entre los residuos producidos más abundantes. Por lo tanto, es necesario el reciclaje y el uso de materiales biodegradables. Así, la impresión 3D es una tecnología de futuro con la que se puede reducir deshechos y costes de fabricación asociados al consumo de materiales, además permite una fabricación más avanzada y sencilla (Sehdev *et al.*, 2017).

1.2. Motivación y objetivos

Entre los requisitos principales de un producto se encuentra tener unas buenas propiedades mecánicas, algo clave para que sea seguro durante toda su vida útil, de esta manera el producto es eficiente. Otro aspecto recurrente en los últimos tiempos es el de la fabricación sostenible. Se están realizando numerosos estudios para minimizar los impactos ambientales de la fabricación, sin embargo, estos impactos todavía son difíciles de medir, evaluar o mitigar. Por tanto, deben hacerse esfuerzos en investigación para reducir el uso de materia prima, energía, transporte (por ejemplo, llevando a cabo una fabricación descentralizada, produciendo el producto más cerca del punto de consumo) así como fabricar piezas con un diseño optimizado y eficiente. De esta manera, la importancia de la fabricación sostenible es evidente, además, según un estudio de Vojislav Petrovic (2011), más del 40% de los residuos relacionados con el material utilizado se pueden evitar con la impresión 3D y el 95% del material no utilizado se puede reutilizar. Sin embargo, el número de publicaciones es limitado cuando se trata la fabricación sostenible mediante impresión 3D (Peng *et al.*, 2018).

A consecuencia de lo anteriormente expuesto, el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) intenta aportar conocimiento en un tema que la comunidad científica ha tratado de forma limitada mediante la definición de un estado del arte sobre fabricación aditiva y una parte experimental para conocer la influencia de distintos parámetros de impresión en las propiedades mecánicas de las piezas impresas.

Los objetivos del estudio son:

- Conocer los factores que influyen en las propiedades mecánicas de piezas impresas comparando materiales reciclados y convencionales (no reciclados).
- Conocidos estos factores, el siguiente objetivo es entender cómo influyen estos factores en las propiedades mecánicas
- Comprender la idoneidad del uso de los materiales reciclados frente a los convencionales.

1.3. Estructura

El presente Trabajo Fin de Grado se estructura en seis secciones diferenciadas: introducción, estado del arte, metodología, equipo experimental, parte experimental, conclusiones y trabajos futuros. A continuación, se describen las mismas.

Introducción: en esta sección se desarrolla el contexto general del estudio, motivación y los objetivos que se persiguen con la investigación y la estructura dada.

Estado del arte: se incluye información en referencia a la fabricación aditiva, centrada en el estudio de las propiedades mecánicas en cuanto a materiales reciclados. Además, se realizará un estudio experimental de las propiedades mecánicas obtenidas por fabricación aditiva mediante la revisión de la bibliografía disponible.

Metodología: se presenta la estrategia utilizada para llevar a cabo la parte experimental mediante la utilización de diseños experimentales y planificación de experimentos para obtener datos y resultados idóneos. Se elegirán los factores a estudiar y se le darán sus respectivos valores.

Equipo experimental: se expone una descripción de los equipos necesarios para llevar a cabo la parte experimental.

Parte experimental: donde se llevará a cabo la aplicación de la metodología desarrollada para realizar los ensayos y se efectuará un análisis estadístico de los resultados para obtener conclusiones objetivas.

Conclusiones y trabajos futuros: se recopilan las conclusiones obtenidas tras el estudio realizado. Del mismo modo, se recogen líneas de actuación para posibles trabajos futuros.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

La fabricación por adición de capas, es decir, impresión 3D, es reconocida como una tecnología disruptiva. Es una tecnología que supone un avance en el medio-largo plazo, que cambiará la forma en la que se desarrollan y fabrican los componentes y productos. Como consecuencia, los procesos de fabricación convencionales puedan llegar a ser desplazados por la impresión 3D debido a las múltiples ventajas y posibilidades tales como el simple hecho de la no necesidad de ensamblar una pieza fabricada. No solo eso, sino que la impresión 3D tiene potencial para transformar las actuales cadenas de suministro, los canales de distribución y los modelos de negocio de las empresas. Por eso, es necesario conocer el estado del arte sobre el desarrollo de la impresión 3D para entender su efecto en la evolución tecnológica y encontrar nuevas posibilidades de aplicación de esta tecnología (Peng *et al.*, 2018) (Kumar *et al.*, 2018) (Mitchell *et al.*, 2018).

La impresión 3D ha ido desarrollándose de manera importante con el tiempo y este crecimiento se ve reflejado en los datos relativos a su mercado. Así, se espera que el mercado del prototipado rápido supere los 20,2 billones de dólares para 2020, anticipando que este mercado será aún más prometedor. La industria de fabricación aditiva ha crecido de 295 millones de dólares a 5,1 mil millones en los últimos 25 años, con una tasa compuesta de crecimiento de ingresos anuales para todos los productos y servicios de fabricación aditiva en todo el mundo del 25,4%. Un pronóstico más agresivo es de 230-550 mil millones de dólares para 2025, donde los mercados primarios identificados son 100-300 mil millones de dólares en consumo de productos y 100-200 mil millones de dólares en fabricación directa de productos médicos y componentes aeroespaciales (Peng *et al.*, 2018). La importancia presente y futura de la fabricación aditiva queda patente en las estimaciones de Wohlers Associates (Berman, 2012) que prevén que en 2020 el 50% de los productos comerciales giren alrededor de la fabricación aditiva (Thompson *et al.*, 2016).

Aunque la impresión 3D posee una gran eficiencia en el uso de material, su creciente desarrollo y uso origina problemas ambientales como generación y eliminación de residuos o emisiones contaminantes, que deben ser eliminados o

mitigados. Por lo tanto, la sostenibilidad es un problema que no se puede ignorar. El reciclaje es una vía prometedora para paliar este problema (Zhao *et al.*, 2018).

La producción sostenible ha ido ocupando un papel de relevancia tanto a nivel académico como industrial, impulsado por una creciente concienciación social. Así, la investigación en producción sostenible se ha incrementado notablemente en las últimas décadas. Así, pueden destacarse ciertos hitos como la Cumbre de Río (1992), celebrada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en la que, entre otros temas, se desarrollan estrategias relativas a la producción sostenible (O'Brien, 1999) (Carou, 2013). Entre las premisas acordadas se encuentran:

- Procesos de producción más eficientes, en términos de uso de energía y recursos.
- Tecnologías de producción limpias y procedimientos a lo largo del ciclo de vida del producto.
- Minimización o supresión de los desperdicios.

El desarrollo de nuevos materiales en ingeniería juega un papel fundamental en el avance de la fabricación sostenible. Así, desde mediados de los años 1950, los materiales tradicionales empleados en ingeniería (acero, hierro...) van dejando paso a alternativas como los polímeros y elastómeros, y composites (Ashby y Johnson, 2010).

La elección de materiales alternativos debe ser evaluada con el objetivo de garantizar que se alcanzan las propiedades mecánicas del material sustituido. Adicionalmente, su impacto ambiental debe ser evaluado mediante metodologías como el análisis de ciclo de vida, una estrategia de evaluación multiatributo que analiza los impactos ambientales de un producto a lo largo de toda su vida (Bischel, 2016) e incluyendo estrategias verdes como el reciclado para el desarrollo de materiales (Ford y Despeisse, 2016) como, por ejemplo, reciclaje de ácido poliláctico (PLA) o polietileno de alta densidad (PEAD) para impresión 3D (Cruz *et al.*, 2017).

En línea con el enfoque de fabricación sostenible, la exploración de biopolímeros de origen natural y renovable, en lugar de los plásticos basados en aceites fósiles, para la fabricación de diversos productos ha recibido especial

atención. La biomasa de residuos marinos, leñosos y agrícolas, las materias primas renovables más abundantes en la Tierra, ha mostrado un potencial prometedor como alternativas a los recursos fósiles que pueden ser aplicados en muchas áreas como salud y medicina, aeronáutica y espacio, automoción, industria alimentaria, arte, textil y moda, arquitectura y construcción (Bhatia y Ramadurai, 2017) (Liu *et al.*, 2018).

El uso de biopolímeros de origen natural como materia prima de impresión en 3D presenta muchas ventajas ya que reduce la posibilidad de efectos secundarios y negativos asociados con algunos polímeros sintéticos en aplicaciones biomédicas, como degradabilidad, reciclabilidad, aditivos liberados y disminución de la adhesión celular. (Liu *et al.*, 2018).

En la actualidad, la mayoría del gasto de la impresión 3D viene asociado al coste del filamento. Reciclando materia prima como el ácido poliláctico (PLA), uno de los materiales más usados, se pueden reducir las emisiones de dióxido de carbono en su transporte a vertederos o envíos a clientes ofreciendo beneficios ambientales (Xing *et al.*, 2018). El reciclaje mecánico de residuos plásticos es una práctica muy común para mitigar estos problemas, así se ha comprobado que los plásticos reciclados tienen un rendimiento similar a sus homólogos vírgenes, incluso se han aplicado en la fabricación de productos de alto valor en algunos sectores como el automovilístico (Zhao *et al.*, 2018).

2.2. Fabricación aditiva

2.2.1. Historia

La idea de fabricación aditiva tiene más de 100 años. La primera aplicación fue llevada a cabo mediante una patente por Joseph E. Blanton en 1892, ideando un método para producir mapas de contorno topográficos mediante el corte de hojas de cera y apilándolas o depositándolas a continuación. No es hasta la década de los años 1980 cuando la fabricación aditiva es introducida en la industria (Moussaoui *et al.*, 2018) (Rietzel *et al.*, 2017).

El concepto de impresión 3D fue aplicado por Charles Hull, fundador de 3D Systems, en 1983 para una patente de estereolitografía, el cual emplea luz

ultravioleta para curar la resina de un fotopolímero en una cuba. Este método se utiliza para fabricar prototipos. Años después, con la expiración de patentes existentes, se creó un enorme impulso para la innovación de nuevas tecnologías y materiales para la fabricación aditiva (Mitchell *et al.*, 2018) (Davis *et al.*, 2015). De esta manera, poco a poco fueron apareciendo nuevos procesos como la sinterización selectiva con láser (del inglés *Selective Laser Sintering*, SLS) y el modelado por deposición fundida (del inglés *Fused Deposition Modeling*, FDM). Así, surge un importante conjunto de aplicaciones como el prototipado rápido, recubrimientos, soldadura y unión, etc. (Rietzel *et al.*, 2017) (Hallgrèn *et al.*, 2016). (Mitchell *et al.*, 2018) (Davis *et al.*, 2015) (Pérez, 2018).

A principios de los años 1980, el diseño asistido por computador CAD (del inglés *Computed Aided Design*) era un sistema poco desarrollado. Como consecuencia, Hull transfirió el archivo CAD a un formato tal que la impresora 3D pudiera interpretar e imprimir. Así, se consiguió desarrollar un tipo de formato de archivo denominado estereolitografía (del inglés *Standard Triangle Language* o también la abreviatura del inglés *STereoLitography*, STL), que permite que cualquier máquina o impresora 3D lo pudiera utilizar (Noorani, 2018) (Bourell *et al.*, 2017).

En 1986, Carl Deckard, Joe Beaman y Paul Forderhase presentaron una patente de un proceso de sinterización selectiva con láser. Este método consiste en fundir con un láser determinados puntos del material generando así una pieza o estructura. El proceso es capaz de fabricar prototipos utilizando metales, siendo esta tecnología la única de realizarlo en la época (Noorani, 2018) (Rietzel *et al.*, 2017) (Pérez, 2018) (Balletti *et al.*, 2017).

En 1988, Scott Crump patentó un nuevo proceso denominado modelado por deposición fundida, basado en la deposición de material fundido capa sobre capa. Para poder utilizar esta tecnología, necesitaba nuevos materiales para la máquina de FDM, entre los nuevos materiales que utilizó se encontraban el ABS (del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*). En la actualidad estos materiales son los más utilizados para la mayoría de impresoras 3D. En 1993, se patenta la fusión de haz de electrones (Noorani, 2018) (Rietzel *et al.*, 2017) (Pérez, 2018) (Balletti *et al.*, 2017).

En 2006, Objet crea la primera máquina capaz de imprimir en varios materiales. Además, la Universidad Cornell ofrece la primera impresora 3D de código abierto. En 2008, la impresión 3D se inició el proyecto RepRap. Su objetivo era crear una máquina capaz de replicarse a sí misma (Bourell *et al.*, 2017).

En 2014, entre los acontecimientos más importantes se destacan que Organovo Inc. realiza la primera venta de tejidos humanos bioimpresos (exVive3D), Local Motors imprime en Chicago un coche y la NASA envía a la International Space Shuttle (ISS) “ZeroG” la primera impresora 3D capaz de crear objetos en ausencia de gravedad (Price T., 2016).

Actualmente, la fabricación aditiva desempeña un papel de gran importancia y se encuentra en continua evolución. Así, una nueva tecnología desarrollada a partir de la fabricación aditiva ha aparecido en la actualidad. Esta tecnología es la impresión 4D, que es una tecnología avanzada de la impresión 3D donde las propiedades y la forma de un producto impreso son una función del tiempo, es decir, se añade una nueva dimensión más de transformación a lo largo del tiempo. De esta forma pueden obtenerse estructuras dinámicas mediante la combinación adecuada de materiales inteligentes en el espacio tridimensional. Así, el producto impreso reacciona con parámetros como la temperatura o la humedad permitiendo cambiar su forma (Momeni y Hassani, 2017) (Javaid y Haleem, 2018).

En la siguiente tabla se muestran diferentes procesos de fabricación aditiva desarrollados en las últimas décadas junto con sus años de invención.

Nombre de la norma	Nombre alternativo	Año de invención
Fotopolimerización en tanque (VAT)	Estereolitografía (SLA)	1984
	Curado en base sólida (SGC)	1986
	Producción de interfaz líquida continua (CLIP)	2015
Fusión en lecho de polvo (PBF)	Sinterizado selectivo mediante láser (SLS)	1986
	Fusión por multichorro	-
	Sinterizado selectivo mediante calor	2008
Extrusión de material	Modelado de deposición fundida (FDM)	1989
	Fabricación de filamentos fundidos (FFF)	1989
Laminado de hojas de material (SML)	Fabricación de objetos laminados (LOM)	1996
Proyección de aglutinante (DSPC)	Unión selectiva o impresión 3D	1989
Proyección de material	Chorro de cera	1989
	Inyección de polímero o formación libre	2013

Tabla 1: Varios procesos de fabricación aditiva y años de invención (Rietzel et al., 2017).

2.2.2. Categorías de procesos

Según la norma ISO/ASTM 52900:2017 (ISO/ASTM, 2017), la fabricación aditiva queda definida como un proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado. De la misma forma, la norma ISO/ASTM 52900:2017 (ISO/ASTM, 2017) clasifica los distintos tipos de procesos de fabricación aditiva en:

- Proyección de aglutinante: un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo.
- Deposición de energía focalizada: se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión a medida que se depositan.
- Extrusión de material: el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio.

- Proyección de material: en el cual se depositan selectivamente gotas del material de fabricación.
- Fusión de lecho de polvo: la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo.
- Laminado de hojas: el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto.
- Fotopolimerización en tanque o cuba: el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz.

La norma ISO/ASTM 52900:2017 (ISO/ASTM, 2017) también lleva a cabo otro tipo de clasificación, según las etapas necesarias para obtener el producto. Así, los procesos de fabricación aditiva pueden clasificarse en:

- Procesos de fabricación aditiva de una sola etapa: las piezas pueden adquirir la geometría y propiedades básicas del material esperado en un solo paso del proceso.
- Procesos de fabricación aditiva de dos etapas: las piezas pueden adquirir la geometría en una primera operación del proceso y conseguir las propiedades fundamentales previstas del material en un proceso secundario, es decir, un proceso de varias etapas.

En la ilustración 8 se muestra esquematizado el proceso de producción de un producto ya sea obtenido en una o varias etapas.

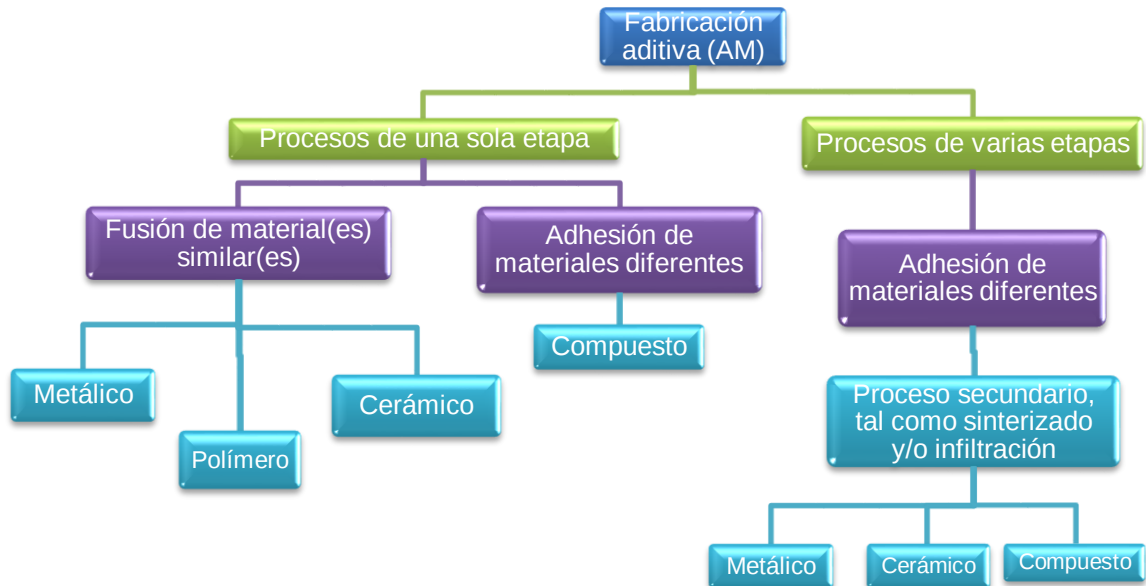


Ilustración 1: Clasificación según las etapas (ISO/ASTM, 2017).

2.2.3. Materiales

En un proceso de fabricación es de especial importancia la elección de materiales adecuados. De la misma forma, en la fabricación aditiva se debe seleccionar la materia prima adecuada, así como el procesamiento idóneo de manera que tenga un adecuado rendimiento en servicio (Bourell *et al.*, 2017).

Con la impresión 3D pueden hacerse objetos tridimensionales con metal, cerámica o plástico o, también por combinación de los anteriores, que pueden estar sujetos a varias aplicaciones (Sunpreet *et al.*, 2017) (Chua *et al.*, 2017). La materia prima debe formarse en un estado compatible con el proceso en cuestión. Por ejemplo, polvo, hoja, alambre o líquido (Bourell *et al.*, 2017).

En general, existen tres categorías principales de materiales; basados en líquidos, sólidos y polvo. Cada una de estas tres categorías tiene a su vez diferentes tipos de materiales, entre los que se encuentra la cerámica, los compuestos, los metales y polímeros (Noorani, 2018).

La poliamida es el termoplástico más usado en sinterización por láser en moldeo por inyección pero, en fabricación aditiva, los grados específicos de poliamida hacen que tengan diferentes propiedades físicas y formas de procesamiento más amplias que en inyección, aunque son químicamente idénticos. Además, también se utilizan en fabricación aditiva termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policloruro de vinilo (del inglés *Polyvinylchloride*, PVS), policarbonato (PC), nylon, polifenilsulfona, polietileno de alta densidad (del inglés *High Density Polyethylene*, HDPE), polietileno de baja densidad (del inglés *Low Density Polyethylene*, LDPE), polietileno tereftalato (del inglés *Polyethylene Terephthalate*, PET), poliestireno de alto impacto (del inglés *High Impact Polystyrene*, HIPS) y ácido poliláctico (PLA) (Chua *et al.*, 2017) (Zhao *et al.*, 2018) (Kumar y Singh, 2018).

El desarrollo de nuevos materiales como los polímeros, elastómeros y composites en ingeniería juega un papel fundamental en el avance de la fabricación sostenible (Ashby y Johnson 2010). Una variedad de plásticos con muy diferentes propiedades mecánicas y químicas, y respetuosos con el medio ambiente se pueden utilizar en la fabricación aditiva, que pueden utilizarse en muchos ámbitos de la industria, como en la automovilística, aeroespacial, medicina, educación, prototipado, etc. (Chua *et al.*, 2017).

En cuanto a la fabricación sostenible, la utilización de biopolímeros de origen natural y renovable, en sustitución de polímeros sintéticos, se encuentra la celulosa, hemicelulosa, lignina, almidón, alginato, quitosano y derivados de ellos. Por otra parte, estos biopolímeros de origen natural, que incluyen materiales lignocelulósicos, materiales de algas marinas y materiales de crustáceos exoesqueletos, representan las materias primas más abundantes de base biológica y renovables para diferentes tecnologías de impresión 3D (Liu *et al.*, 2018).

En la tabla 2 se muestra un resumen con algunos de estos materiales y sus posibles aplicaciones.

Materiales de impresión con base biológica	Estructura impresa	Aplicaciones potenciales
Disolución de pulpa	Patrones complejos de estructuras 2D, cilindros multicapa	Producción de geles o estructuras en 3D espacialmente adaptadas
Nanofibras de celulosa(CNF)/alginato	Rejillas, discos sólidos y estructuras en forma de menisco de oveja, estructuras en forma de celosía	Ingeniería y diseño de tejidos de cartílago
Alginato de metilcelulosa	Forma de andamios	Terapia regenerativa de grasas, cartílagos y defectos entre tejidos
Superficie modificada de titanato de celulosa	Forma andamios porosos	Biomédica, automoción y construcción
Chitosan	Andamios multicapa, desplazamiento ortogonal y diagonal ortogonal de doble capa de andamio	Reparación de órganos y tejidos, regeneración de tejido cartílago, diseño de tejido óseos
Agarosa	Estructura de cilindro, caja y estructura de oreja	Ingeniería de tejidos, medicina regenerativa y fabricación de tejidos

Tabla 2: Materiales de origen natural y aplicaciones (Basada en Liu *et al.* (2018)).

A pesar de que se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar nuevos materiales para la impresión 3D, solo un número limitado de materiales son comercialmente viables, la producción de PLA ha experimentado un crecimiento sustancial la última década (Zhao *et al.*, 2018). Así, para llevar a cabo una fabricación sostenible, se está llevando a cabo la utilización de PLA reciclado, lo que conlleva grandes beneficios ambientales (Xing *et al.*, 2018). Un método utilizado es la mezcla de PLA virgen con PLA reciclado en diferentes proporciones para conseguir mejorar las propiedades deseadas, aunque todavía la aplicación del mismo no se ha explorado en profundidad para dispositivos de almacenamiento de energía (Zhao *et al.*, 2018) (Singh *et al.*, 2018).

A continuación, se presenta una tabla resumen en la que aparecen distintos materiales y asociados con el tipo de proceso de fabricación en el que se utiliza.

	EM*	VAT*	PM*	PBF*	DSPC*	SML*	DEF*
ABS, policarbonato, mezcla PC/BS, PLA, polieterimida	X						
Acrílicos, acrilatos, epóxidos		X	X				
Poliamida (nylon), poliestireno, polipropileno, poliéster ("flex")				X			
Polieteretercetona (PEEK), poliuretano termoplástico (elastómero)	X			X			
Aleaciones de aluminio				X	X	X	X
Aleaciones Co-Cr, aleaciones de níquel				X	X		X
Oro, plata				X			
Acero inoxidable, Ti-6Al-4V				X	X	X	X
Acero para herramientas				X	X		X

Tabla 3: Materiales comerciales y su categoría de proceso (Basada en Bourell *et al.* (2017) y Pérez (2018)).

*EM (Extrusión de material); VAT (Fotopolimerización en tanque); PM (Proyección de material); PBF (Fusión de lecho de polvo); DSPC (Proyección de aglutinante); SML (Laminado de hojas); DEF (Deposición de energía focalizada).

2.2.4. PLA reciclado

El ácido poliláctico, es un tipo de biopolímero natural obtenido a partir de cultivos como el almidón o la caña de azúcar. Es un biopolímero biodegradable constituido por moléculas de ácido láctico. El PLA junto con el ABS son los materiales más usados en impresión 3D, sin embargo, el ABS tiene como origen aceites considerados como tóxicos, con lo que su producción no es ecológica y, por tanto, el PLA se considera una alternativa sostenible. Por otro lado, el PLA muestra un rango de cristalinidad y propiedades mecánicas entre el poliestireno y el tereftalato de polietileno (Kumar *et al.*, 2018) (Xing *et al.*, 2018) (Zhao *et al.*, 2018).

Como consecuencia de los problemas ambientales generados por el consumo del mundo actual, el reciclado (mezcla de material virgen con material utilizado) de materia prima es un método de especial interés para contribuir a fabricar de modo sostenible (Zhao *et al.*, 2018).

Kumar *et al.* (2018) compararon el PLA, ABS y el poliestireno de alto impacto (HIPS), todos ellos reciclados, calculando los valores de alargamiento de rotura, carga a rotura, índice de fluidez, módulo de Young, tensión de rotura y temperatura de transición vítrea (mostrados en la tabla 4).

Polímero	Alargamiento de rotura (mm/%)	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)	Índice de fluidez (g/10 min)	Temperatura de transición vítrea (°C)	Mínimo Módulo de Young
ABS	4,94/7	186,30	9,70	8,76	109,76	175
PLA	5,13/7	254,16	13,24	13,52	62,57	47,90
HIPS	1,90/3	72,72	3,79	7,50	100,41	112,50

Tabla 4: Comparación de las propiedades mecánicas del PLA, ABS y HIPS (Basada en Kumar *et al.* (2018)).

Como puede observarse en la anterior tabla, el PLA es el material con mayor alargamiento a la rotura junto con el ABS. Además, el PLA tiene mayor carga de rotura y tensión de rotura, aunque menor módulo de Young.

Xing *et al.* (2018) llevan a cabo un estudio donde comprueban que la resistencia a la tracción máxima del PLA reciclado es de $46,35 \pm 1,08$ MPa, mientras que realizando un recubrimiento del PLA con polidopamina se mejora la resistencia

hasta $53,24 \pm 1,85$ MPa, es decir, se produce un incremento del 14,9%, además la tensión de rotura aumenta del 9,05% hasta un 12,79%.

Zhao *et al.* (2018) estudiaron los ciclos de impresión que es capaz de aguantar el PLA hasta perder gran parte de sus propiedades. Así, mostraron que el PLA solo podía imprimirse durante dos ciclos, ya que en un tercer ciclo las propiedades mecánicas y la viscosidad disminuían considerablemente mientras que se producía un aumento de la cristalinidad, consideraron además necesario la adición de material virgen al material reciclado para mitigar estos efectos. En la tabla 5 se muestra la comparativa de las propiedades entre el material virgen y el mismo material nuevamente sometido a otro ciclo de impresión:

	Módulo de tracción (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación de rotura (%)	Cristalinidad (%)
PLA virgen	$1572,43 \pm 27,16$	$30,21 \pm 0,89$	$2,74 \pm 0,53$	1,17
PLA reutilizado	$1566,54 \pm 45,61$	$29,47 \pm 1,21$	$2,45 \pm 0,47$	19,87

Tabla 5: Comparación de las propiedades mecánicas del PLA virgen y PLA en su segundo ciclo de impresión (Basada en Zhao *et al.* (2018)).

Como se puede comprobar, se produce una disminución de las propiedades del material, como consecuencia de la presencia de grupos de carbonilo y picaduras superficiales por la degradación termomecánica durante el proceso de derretir el material para su posterior impresión, es decir, que se produce por el proceso de impresión (Zhao *et al.*, 2018).

2.2.5. Propiedades mecánicas

Como en cualquier proceso, se deben de alcanzar una serie de propiedades para que la pieza lleve a cabo su vida útil con seguridad, además de esto, la optimización del espacio de diseño puede tener un impacto significativo en la fabricación de una pieza, incluida la reducción de materiales, el tiempo de producción, la energía eléctrica y los costos ambientales, que a su vez conducen a menores costos de producción. El proceso de optimización del espacio de diseño no es un problema trivial. El objetivo es encontrar la mejor manera de aprovechar el espacio de diseño con el material, para conseguir optimizar ciertos parámetros de diseño, incluida la fuerza, la masa y el volumen (Oropallo, 2016).

Popescu *et al.* (2018) determinaron que los parámetros clave que influyen en las propiedades mecánicas en la fabricación aditiva son: porosidad, altura capa, densidad de relleno, dirección de impresión y la orientación de la pieza. Además, para valores cada vez menores de altura de capa, así como el grosor del filamento depositado o imprimido, se mejora el valor de la resistencia a tracción y, por tanto, del comportamiento mecánico del material. Por otro lado, para obtener el más alto valor de la resistencia a tracción la dirección de impresión debe estar orientada a la mayor dimensión de la pieza.

El reciente desarrollo de las tecnologías de fabricación aditiva está llevando a tener en cuenta muchos parámetros de procesamiento que pueden influir en una buena calidad de las piezas. Según Alafaghani y Qattawi (2018), para aumentar la resistencia de las piezas fabricadas por impresión 3D se necesita una mayor temperatura de extrusión y un espesor de capa optimizado, un patrón de relleno triangular y un mayor nivel de relleno.

Por otro lado, en cuanto a la ductilidad, se puede mejorar cambiando al patrón de relleno rectilíneo y aumentando el grosor o altura de la capa según indica Alafaghani y Qattawi (2018). También se ha demostrado que las piezas fabricadas cuyas capas se encuentran en la dirección de la carga tienen mayor resistencia. Se puede aumentar esta resistencia reduciendo el número de capas. Por otra parte, velocidades de impresión más altas producen una menor resistencia de la pieza con espesores de capa más altos (Alafaghani y Qattawi, 2018).

Otros estudios muestran que la ductilidad y la resistencia aumentan a medida que la porosidad disminuye. Para muestras de alta porosidad, el estrés por fractura estaba por debajo del límite elástico y el alargamiento medido como tensión también fue bajo. A medida que se reducía la porosidad, la resistencia aumentaba significativamente, acercándose al límite elástico, esto viene reflejado en que para la porosidad residual en el rango de 10 a 15%, la tensión de fractura cayó por encima del límite de elasticidad y por debajo de la resistencia a la tracción, dando como resultado una cantidad de plasticidad medible entre 10 y 30%. Cuando la porosidad cayó por debajo de aproximadamente el 5%, se restauró la ductilidad total de 50 a 60% (Bourell *et al.*, 2017).

Un estudio destacó que el ácido poliláctico (PLA) tiene mejor respuesta mecánica que otros polímeros termoplásticos, y que la resistencia a la tracción del plano de estos materiales es anisotrópica, con una resistencia a lo largo de la dirección de extrusión (0 °) que supera la de la dirección transversal (90 °) (Song *et al.*, 2017).

Por otro lado, estudios previos han mostrado que el uso de PLA reciclado tiene ciertas limitaciones como consecuencia de reducir el peso molecular con su reutilización, produciendo una degradación y disminución de las propiedades mecánicas como consecuencia del ciclo o proceso de impresión, que solo puede ser repetido en dos ciclos de impresión, es decir, el plástico solo soporta dos ciclos de impresión antes de sufrir grandes pérdidas de peso molecular influyendo así en las propiedades mecánicas. Estas propiedades pueden ser mejoradas con la adición de polidopamina (PDA) en la superficie. Entre estas propiedades se encuentra la viscosidad, la cual se reduce con cada ciclo de impresión. Esto se corrige añadiendo plástico virgen (Xing *et al.*, 2018) (Zhao *et al.*, 2018).

2.2.6. Procedimiento a seguir en fabricación aditiva

El procedimiento a seguir para llevar a cabo la impresión 3D es siempre común en la mayoría de procesos de fabricación. El proceso comienza con la realización del diseño CAD de la superficie de la pieza que se quiere imprimir y se transforma a un formato de archivo tal que la impresora o máquina a utilizar pueda leer. Este formato comúnmente suele ser STL, aunque la ISO 10303 permite el formato Estándar para el Intercambio de Productos (del inglés *Standard for the Exchange of Product*, STEP). Seguidamente, el formato STL transforma la superficie generada en el CAD en una superficie aproximada formada por triángulos, de esta forma es más fácil dividir la superficie en dos cortes bidimensionales que seguidamente se reproduce físicamente en el proceso de impresión (Rietzel *et al.*, 2017). A continuación, la pieza se divide electrónicamente en capas de espesor determinado y automáticamente se genera la trayectoria de la herramienta, la información obtenida de cada sección en capas se envía a la máquina de forma electrónica, procesando e imprimiendo capa por capa hasta que la pieza se imprime y completa (Rietzel *et al.*, 2017). Posteriormente, tras obtener la pieza, se lleva a cabo operaciones de post-

procesado en caso de ser necesario. En resumen, la ilustración 2 muestra los pasos a seguir en impresión 3D con el ejemplo de una taza.

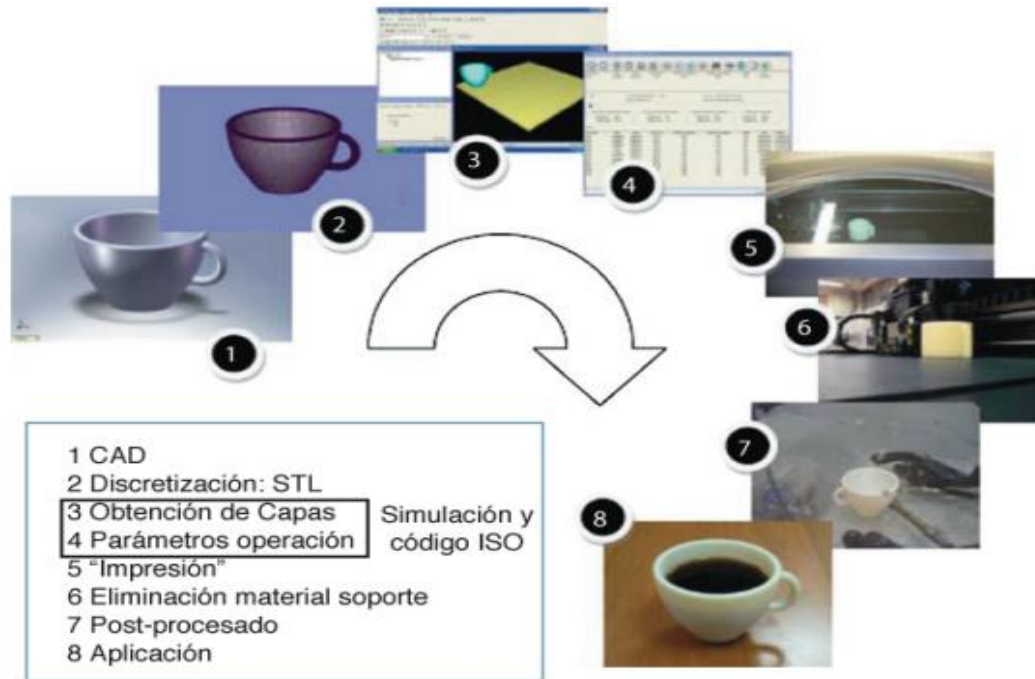


Ilustración 2: Pasos del proceso de impresión 3D, ejemplo de una taza (Gibson *et al.*, 2010).

2.3. Propiedades mecánicas. Definiciones

En la industria, así como en otras áreas se tiene la necesidad de obtener propiedades mecánicas adecuadas para cada producto. De esta manera, se ha estudiado la influencia de los parámetros de impresión con relación a las propiedades mecánicas y la precisión dimensional de las piezas obtenidas por fabricación FDM (Alafaghani y Qattawi, 2018).

A continuación, se presentará la definición de las propiedades mecánicas más importantes, según la norma ISO 527 (ISO 527-1:2012).

- Esfuerzo, σ : Fuerza perpendicular por unidad de superficie de la sección transversal inicial en la longitud de referencia (L_0 : Distancia inicial entre las marcas en la parte central de la probeta), unidades en megapascuales (MPa).

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

F es la fuerza medida implicada, expresada en newtons (N) y A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm²).

- Esfuerzo de fluencia, σ_y : esfuerzo en el punto de fluencia, unidades en megapascuales (MPa).
- Esfuerzo en el punto de rotura, σ_b : esfuerzo en el que la probeta rompe, Valor más alto del esfuerzo de la curva esfuerzo-deformación justo antes de la separación de la probeta, es decir, justo antes de la caída de la carga provocada por la iniciación de fisuras, unidades en megapascuales (MPa).
- Deformación, ε : incremento de la longitud por unidad de longitud inicial de la longitud de referencia, relación expresada como adimensional o en porcentaje (%).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2)$$

ΔL_0 : es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia, expresado en milímetros (mm).

- Deformación en el punto de fluencia, ε_y : primera ocasión en un ensayo de tracción en la que se produce un incremento de la deformación sin un incremento del esfuerzo, relación expresada como adimensional o en porcentaje (%).
- Deformación en el punto de rotura, ε_b : deformación en el último punto registrado antes de que el esfuerzo se reduzca a un valor inferior o igual al 10% de la resistencia si se produce la rotura antes que la fluencia, relación expresada como adimensional o en porcentaje (%).
- Módulo de elasticidad, E_t : pendiente de la curva esfuerzo/deformación $\sigma(\varepsilon)$ en el intervalo de deformación comprendido entre $\varepsilon_1 = 0,05\%$ y $\varepsilon_2 = 0,25\%$, unidades en megapascuales (MPa).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3)$$

σ_1 es el esfuerzo, expresado en megapascuales (MPa), medido en el valor de deformación $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,05%) y σ_2 es el esfuerzo, expresado en megapascuales (MPa), medido en el valor de deformación $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25%)

- Coeficiente de Poisson, μ : relación negativa del incremento de deformación $\Delta\varepsilon_n$, en uno de los dos ejes perpendiculares a la dirección de alargamiento, y del incremento de deformación correspondiente $\Delta\varepsilon_l$ en la dirección de alargamiento, en la parte lineal de la curva de deformación longitudinal en función de la deformación normal. Se expresa como una relación adimensional.

$$\mu = -\frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta\varepsilon_l} \quad (4)$$

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

Se llevará a cabo la definición de la metodología para la realización de este estudio, empleando diseños experimentales que permitan obtener resultados y conclusiones válidas tras su posterior análisis.

Para ello, se sigue el método descrito según Montgomery (2001), donde el proceso implica la argumentación y planificación pre-experimental, mediante el reconocimiento y la declaración del problema del estudio, así como la elección de las variables de respuesta, los factores, niveles y rangos. Asimismo, se realiza un diseño experimental y se describe la consecución de los experimentos. Por último, se presentará el análisis y conclusiones de los resultados obtenidos.

3.2. Planificación pre-experimental

3.2.1. Reconocimiento y declaración del problema

El reciclaje o el uso de materiales reciclados, así como la fabricación sostenible es necesario en la actualidad, pero aún no se aplica en la industria de forma amplia. Mediante la realización de un plan experimental se pretende estudiar los distintos factores que afectan a las propiedades mecánicas en impresión 3D, determinando la diferencia de propiedades mecánicas entre el PLA virgen y el PLA reciclado permitiendo comprender la idoneidad del uso de los materiales reciclados frente a los convencionales.

3.2.2. Selección de la variable de respuesta

La variable o variables de respuesta elegidas deben aportar información sobre el objetivo del estudio que es conocer la diferencia de propiedades mecánicas entre el PLA virgen y el PLA reciclado. Para ello se tiene como referencia estudios anteriores, estudios como el de Kumar *et al.* (2018) en el que utilizan variables como el alargamiento de rotura, la carga de rotura, tensión de rotura o el mínimo módulo de Young. Otro estudio como el de Chacon *et al.* (2017), utilizaron la resistencia a tracción y resistencia a flexión. Asimismo, Letcher *et al.* (2015) junto con su equipo eligieron la resistencia a la tracción, módulo elástico y el alargamiento a rotura.

Singh *et al.* (2018) entre otros factores, escogieron carga máxima y de rotura, deformación máxima y de rotura, módulo de Young, resistencia a la tracción. De esta manera, la variable de respuesta escogida es la carga máxima soportada por la probeta.

3.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos

Se seleccionarán los distintos factores, que podrían influir en las propiedades mecánicas. Para ello, se toman como referencia distintos estudios previos sobre estos factores, entre los que se encuentran los trabajos de Altan *et al.* (2018); Popescu *et al.* (2018); y Alafaghani y Qattawi (2018):

- Altura de capa, orientación de la pieza (vertical, horizontal o lateral), espacio entre filamentos adyacentes, ancho o espesor del filamento impreso, ángulo ráster, dirección de impresión, velocidad de impresión, densidad de relleno, patrón de relleno, temperatura del extrusor y de la plataforma de impresión, temperatura de boquilla (*nozzle*), espesor de pared, temperatura ambiente, diámetro de la boquilla, temperatura de fundición, viscosidad y densidad.

Teniendo en cuenta el objetivo de lograr una fabricación sostenible, algunos de los factores anteriores afectan en cuanto a coste, energía y tiempo. Entre ellos se encuentra la velocidad de impresión, la orientación de la pieza, la altura de capa, densidad de relleno y patrón de relleno.

Como el número de factores es elevado, se lleva a cabo una selección de los mismos para hacer un estudio más práctico y económico. Se elige por tanto altura de capa estudiada por Altan *et al.* (2018). En su estudio, los autores compararon la influencia de la altura de capa con el uso refrigeración con ventilador, la temperatura del *nozzle* y la velocidad de impresión. A la altura de capa le dieron valores de 0,1, 0,2, 0,3 y 0,4 mm y determinaron que la influencia de la altura de capa con respecto a los demás factores estudiados en cuanto a la resistencia a la tracción era del 81,62%, siendo así el factor más importante. Los autores identificaron que a menor valor de altura de capa más mejoraban las propiedades mecánicas.

Como se debe tener en cuenta la fabricación sostenible, se elige la densidad de relleno y la velocidad de impresión, ya que estos factores determinarán la cantidad de material a utilizar en las probetas. Singh *et al.* (2018) compararon la influencia en la carga máxima y la carga de rotura al imprimir piezas compuestas con varios materiales con respecto a la densidad de relleno y la velocidad de impresión. Con valores de 0,6, 0,8 y 1 en la densidad de relleno y de 50, 60 y 70 mm/s en la velocidad de impresión, determinaron que la densidad de relleno influía en un 29,20% y la velocidad de impresión en un 54,93% mientras que las distintas combinaciones de material tenían una influencia de 13,39%.

Se elige el patrón de relleno de acuerdo con Alafaghani y Qattawi (2018). Estos autores compararon en el PLA que la temperatura de impresión con valores de 190, 200 y 210 °C, altura de capa con valores de 0,2, 0,3 y 0,4 mm, densidad de relleno con valores de 20, 60, 100% y el patrón de relleno de tipo rectangular, triangular y hexagonal. Determinaron que un patrón hexagonal producía la mayor rigidez y resistencia, pero menor ductilidad, mientras que un patrón triangular y rectilíneo aportaban valores similares de rigidez y resistencia. Asimismo, comprobaron que esta rigidez y resistencia aumentaba aproximadamente de forma lineal con la densidad de relleno. En conclusión, recomiendan según sus resultados una temperatura de impresión de 210 °C, una altura de capa de 0,3 mm, un patrón de relleno triangular y una densidad de relleno del 100% para maximizar el módulo de Young y la resistencia.

En la tabla 6 se muestran los factores seleccionados.

Factor
Altura de capa
Patrón de relleno
Densidad de relleno
Velocidad de impresión

Tabla 6: Factores elegidos.

La elección de los niveles y rangos de los factores queda condicionada al desarrollo de las distintas fases experimentales. Por tanto, serán seleccionados y justificados en apartados posteriores.

3.3. Elección del diseño experimental

La elección del diseño experimental debe cumplir el objetivo del estudio. Primeramente, se realizarán probetas con ambos materiales mediante la combinación de los distintos niveles de los factores elegidos. Segundamente, se someterán a ensayos de tracción para obtener las propiedades mecánicas y posteriormente comparar la diferencia entre el PLA y el PLA reciclado obteniendo las respectivas conclusiones. Para ello, la parte experimental estará dividida en tres fases distintas donde el proceso a realizar en cada una es el mostrado a continuación:

- Fase I. En esta primera fase, el objetivo es determinar de entre los factores elegidos tras llevar a cabo su selección, cuales son los más importantes e influyentes en la variable de respuesta, es decir, se llevará a cabo un experimento de *screening*.
- Fase II. En esta segunda fase, se realizará un estudio más detallado de la influencia de los factores más determinantes en relación a la variable de respuesta. Mediante un modelo que muestre cómo evoluciona la variable de respuesta al modificar los factores.
- Fase III. Por último, se estudiará la influencia de la anisotropía, es decir, se estudiará la contribución de la posición en la que se imprimen las probetas respecto de la variable de respuesta, tal y como indica la norma UNE 116005:2012.

3.4. Realización del experimento

Para la consecución del objetivo de cada fase, se emplearán dos procedimientos básicos y diferenciados dentro de los cuales se llevará a cabo los respectivos pasos a seguir.

3.4.1. Impresión 3D

Donde se obtendrán las probetas para ensayarlas posteriormente y así obtener las propiedades mecánicas. En este procedimiento se combinarán los distintos factores seleccionados con sus respectivos niveles de manera que cada probeta tenga una combinación distinta de valores de los factores.

3.4.2. Ensayo de tracción

En este procedimiento se lleva a cabo el ensayo de tracción de las probetas obtenidas anteriormente por impresión 3D, el objetivo de este ensayo es someter las piezas a carga hasta la rotura de forma que se pueda conocer las propiedades mecánicas de la probeta y así comparar las propiedades obtenidas en el PLA virgen y en el PLA reciclado.

3.5. Análisis de resultados

En este apartado se realizará un análisis de los resultados obtenidos tras el ensayo de tracción, de manera que se pueda cuantificar la influencia de cada uno de los parámetros estudiados con el fin de obtener conclusiones objetivas en cada una de las fases. Este análisis se llevará a cabo para cada una de las fases.

Se hará uso del software R de análisis estadístico de datos, que permitirá llevar a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) y Microsoft Excel para representar y exponer las evaluaciones realizadas.

3.6. Conclusiones

Evaluada la influencia de los diferentes parámetros, en este último apartado se exponen las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados en cada una de las fases. Estas conclusiones permiten mejorar y aportar conocimiento sobre el estudio, dando lugar a planteamientos y propuestas para trabajos futuros.

4. EQUIPO EXPERIMENTAL

Se llevará a cabo la descripción con detalle el equipo experimental necesario para la impresión 3D y el ensayo de tracción, así como las características de los materiales que se van a utilizar.

4.1. Equipo experimental para la impresión 3D

Para la realización de la impresión 3D de las probetas, los equipos utilizados son los siguientes:

- Material de impresión: PLA virgen y PLA reciclado.
- Material para limpieza de boquilla y sistema de extrusión: Smart Clean.
- Software Ultimaker CURA 3.2.1.
- Espray fijador.
- Impresora 3D Witbox de BQ.

La impresora 3D utilizada en el estudio es una Witbox de BQ, utiliza el método de modelado por deposición fundida añadiendo capa a capa de filamento de material fundido, concretamente PLA y PLA reciclado, hasta obtener la pieza al completo. La boquilla de la impresora tiene un diámetro de 0,4 mm, insertada en un extrusor diseñado por BQ que incluye una tobera para llevar a cabo una refrigeración. El manual de la impresora recomienda unas velocidades de impresión comprendidas entre 50 y 80 mm/s. Por otra parte, la cama o zona de impresión es de base fría de cristal con un tamaño A4, otras medidas de interés se muestran en la tabla 7 mientras que la impresora es la mostrada en la ilustración 3.

Dimensiones de la impresora	
Impresora	(x)505 x (y)388 x (z)450mm
Área de impresión	(x)297 x (y)210 x (z)200mm
Caja	(x)622 x (y)545 x (z)450mm

Tabla 7: Dimensiones de la impresora Witbox (Pérez, 2018).

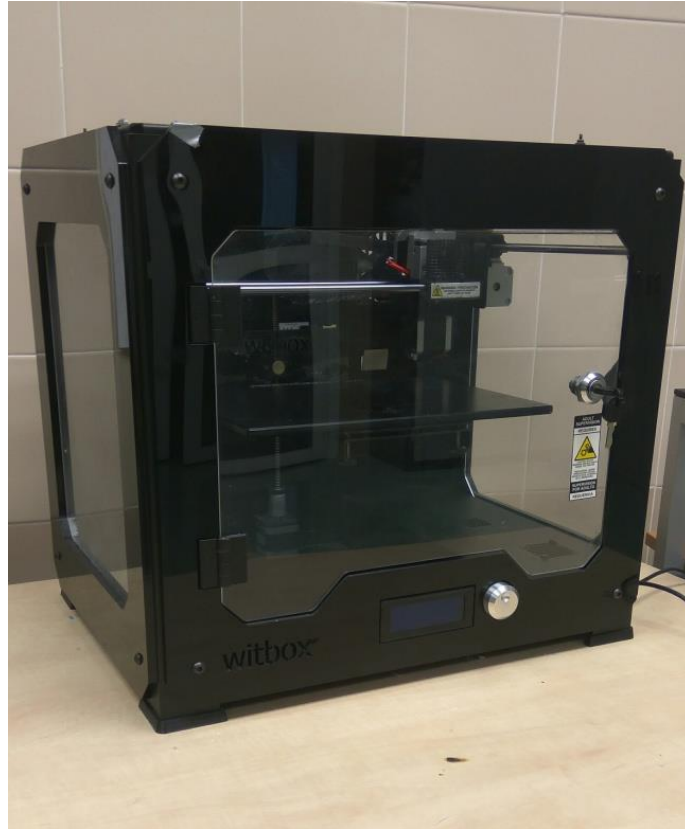


Ilustración 3: Impresora Witbox utilizada.

El software predeterminado que permite configurar los parámetros de impresión es el Ultimaker CURA 3.2.1 es el que se usará en este estudio. Aunque hay distintos tipos de software disponibles, para realizar este proceso, este permite ajustar medidas, escalar, posicionar la pieza de forma óptima e introducir distintos parámetros para su posterior impresión. Por tanto, este software permitirá cambiar los distintos parámetros de impresión para cada uno de los ensayos a realizar, asimismo, se dispone de una opción que permite configurar el programa de forma automática con las características de la impresora.

En resumen, el software Ultimaker CURA 3.2.1 es el encargado de preparar y convertir los modelos 3D generados en otros formatos en un formato compatible con la impresora. De esta forma, el software genera un archivo con formato .gcode interpretable por la impresora. El entorno gráfico de trabajo del software y diferentes opciones de configuración son las mostradas en la ilustración 4.

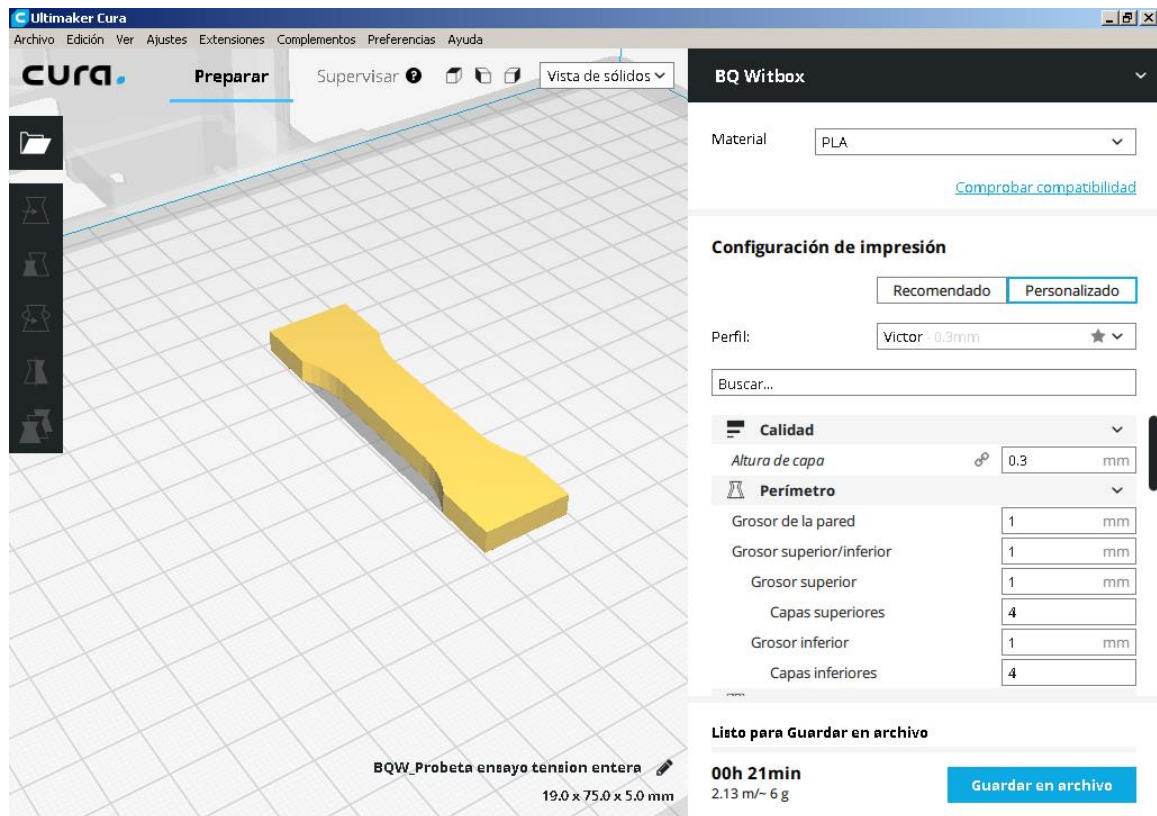


Ilustración 4: Entorno gráfico Ultimaker Cura 3.2.1.

Como se puede ver en la ilustración 4, el entorno de trabajo tridimensional que muestra el software y que se encuentra en la parte izquierda, es el entorno de trabajo correspondiente al área de impresión de la impresora Witbox. Mientras, en la parte derecha se muestra un cuadro de opciones que permite configurar los distintos parámetros de impresión, ya sea altura de capa, densidad de relleno, patrón de relleno, grosor de pared, distintas velocidades de impresión en diferentes partes de la pieza, así como otras muchas opciones de configuración de impresión que permite el software como valores recomendados según el material, opciones de refrigeración, etc.

Se carga el archivo de la pieza 3D que se quiera imprimir en el software apareciendo la pieza en el entorno de trabajo. Su posición en el entorno será la misma posición en la que se imprima la pieza en la impresora de forma que se coloca la pieza en la posición deseada con el cuadro de opciones en la parte superior izquierda. Asimismo, se ajustan los distintos parámetros de impresión y se anota el peso y el tiempo estimado de impresión, ya que el software da un valor aproximado del mismo. Se guarda el archivo con formato .gcode y se transfiere a la impresora llevando a cabo el proceso de impresión hasta obtener la pieza.

El material de impresión de este estudio será ácido poliláctico (PLA) y ácido poliláctico reciclado (PLA reciclado). El ácido poliláctico reciclado contiene un porcentaje del 90% de PLA reciclado, mientras que el 10% restante es material de PLA virgen.

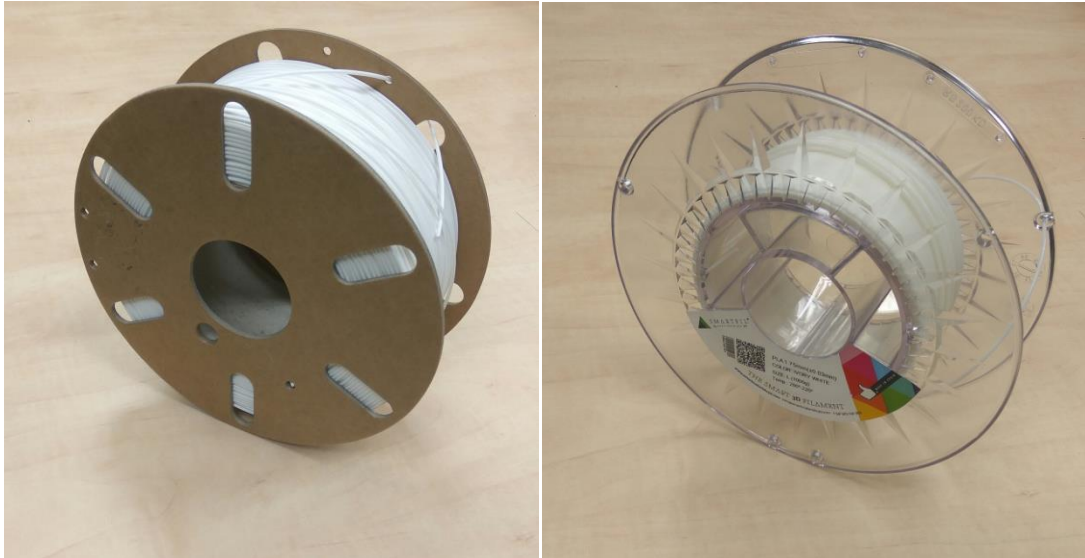


Ilustración 5: Materiales: PLA reciclado (izquierda), PLA virgen (derecha).

Las principales características del PLA son las mostradas en la tabla 8:

PLA	
Nombre químico	Ácido poliláctico
Composición	PLA (Resina poliláctica)- 99% CAS: 9051-89-2
Densidad	1,24 g/cm ³
Temperatura de impresión	220 ± 20 °C
Diámetro	1,75 ± 0,03 mm

Tabla 8: Propiedades del PLA.

Las principales características del PLA reciclado son las mostradas en la tabla

9:

PLA reciclado	
Composición	PLA - 10% CAS: 9051-89-2 y PLA reciclado 90%
Densidad relativa	1,1-1,3 g/cm ³
Temperatura de impresión	205 ± 15 °C
Diámetro	1,75 mm
Temperatura de fusión	160 ± 10 °C

Tabla 9: Propiedades del PLA reciclado.

El material de limpieza para llevar a cabo cambios de material de impresión en la impresora se denomina Smart Clean. Es un material cuyo fin es la limpieza de la boquilla y el sistema de extrusión, eliminando los residuos que hayan podido quedar en el interior del extrusor. En particular, se ha sido utilizado durante el cambio de PLA virgen y PLA reciclado. El filamento de este material tiene un diámetro de 1,75 mm cuya composición es PLA – 69% CAS: 9051-89-2 y CaCO₃ – 30% CAS: 1317-65-3.

Para llevar a cabo el cambio de material, primero se debe retirar el filamento de material utilizado con anterioridad mediante los comandos predeterminados de la impresora. Una vez hecho esto, se calienta el extrusor a una temperatura 10 °C superior a la temperatura de extrusión del anterior material, concretamente se usa PLA a una temperatura recomendada de 210 °C, el extrusor por tanto se calienta hasta 230 °C. Seguidamente, se carga el material Smart Clean y se extruye hasta que salga material por la boquilla. Una vez ocurrido esto, se retira el material y se descarga el filamento de la impresora para posteriormente introducir el nuevo filamento de trabajo.

Por otra parte, se utiliza el espray Dimafix, es utilizado para favorecer la adhesión del material imprimido a la plataforma para una correcta impresión de la pieza, evitando el efecto *warping* (tendencia del material a despegarse de la plataforma de impresión por tensiones internas). Este material está expresamente diseñado para su uso en impresión 3D.



Ilustración 6: Spray fijador Dimafix.

4.2. Equipo experimental para el ensayo de tracción.

Para la realización del ensayo de tracción y así obtener las propiedades mecánicas y por tanto los resultados del estudio, los equipos a utilizar son los siguientes:

- Probetas previamente imprimidas en la impresora 3D.
- Software TW Elite.
- Máquina MTS Criterion 43.
- Mando de control.
- Llave de apriete de las mordazas.

La máquina utilizada para el ensayo de tracción es una MTS Criterion, modelo 43. Es una máquina de funcionamiento electromecánico de alta resolución y con una velocidad de adquisición de datos de 1000 Hz. Tiene disponibles dos columnas de carga que permiten soportar cargas de entre 100 N hasta 50 kN, asimismo, la mordaza superior se desplaza verticalmente aplicando la carga a la probeta mientras que la mordaza inferior se mantiene fija. En la ilustración 7 a) puede observarse la máquina utilizada (mts.com).

Por otro lado, la columna de carga derecha permite fijar el máximo desplazamiento de la mordaza, es decir, fijar el desplazamiento de la mordaza, aunque también se puede aplicar mediante el software. En la columna de carga derecha se encuentra disponible el mando de control, que permite mover las mordazas con mayor y menor precisión, iniciar el ensayo, pausar y detener el ensayo, así como una parada de emergencia.

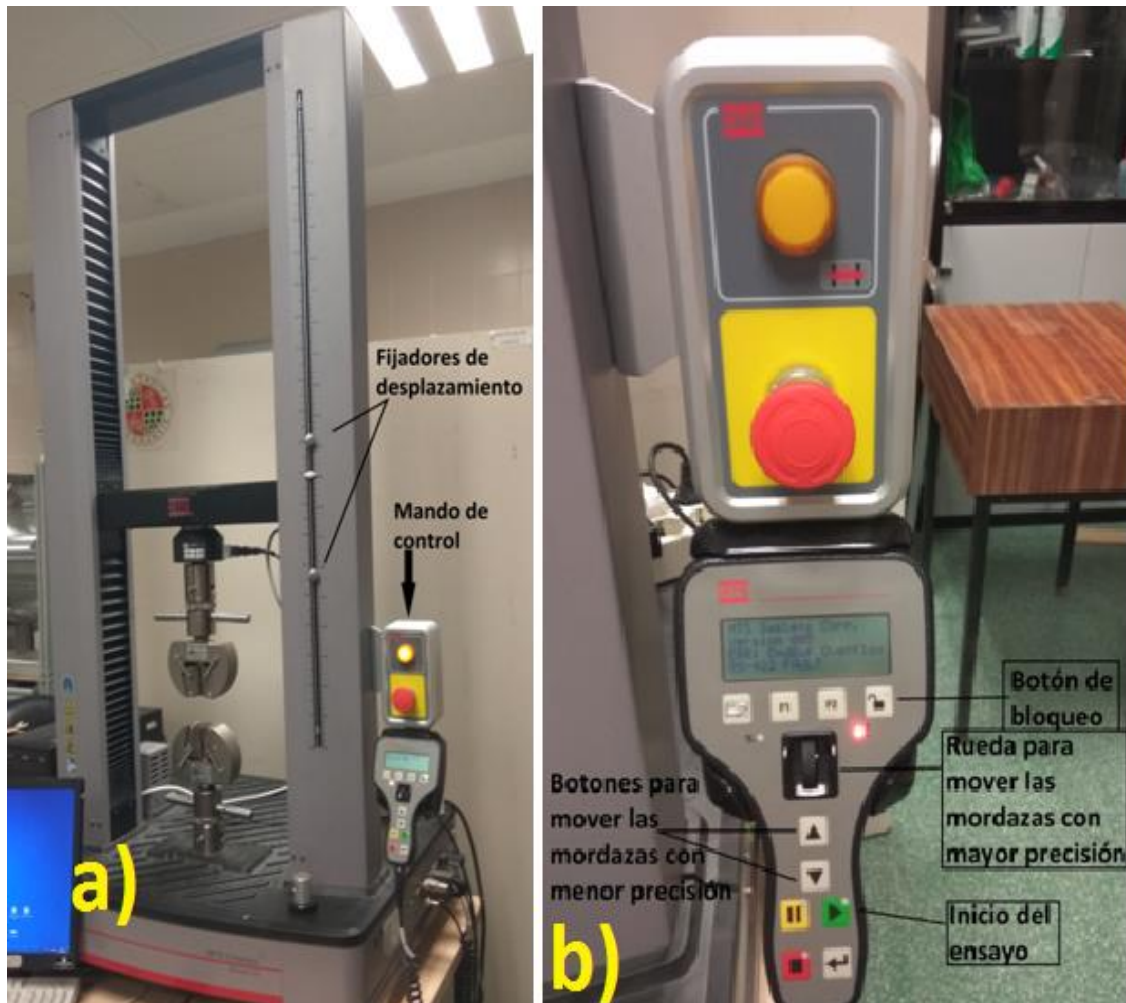


Ilustración 7: Máquina de tracción (a) y mando de control (b).

El mando de control contiene una pequeña pantalla la cual informa de diferentes aspectos de la máquina de tracción, de la versión de software, del ensayo de tracción, así como de fallos de funcionamiento. El mando de control puede verse con más detalle en la ilustración 7 b).

La célula de carga utilizada en el estudio es la mostrada en la ilustración 8, corresponde al modelo LPS.104 y perteneciente a la marca MTS, misma marca que la máquina de tracción. La célula de carga tiene una capacidad de carga hasta un máximo de 10 kN con una sensibilidad de 2,344 mV/V.



Ilustración 8: Célula de carga.

Por otro lado, las mordazas utilizadas pertenecen a la marca Instron cuyo modelo es el 2716-015. Soportan una carga máxima de 30 kN y deben utilizarse en un rango de temperatura correspondiente de entre -70 y 250 °C. Las mordazas se encuentran alineadas de forma automática cuando se colocan en la máquina. Además, para apretar las mordazas se giran unos pasadores y así se consigue fijar las piezas para realizar el ensayo de tracción.

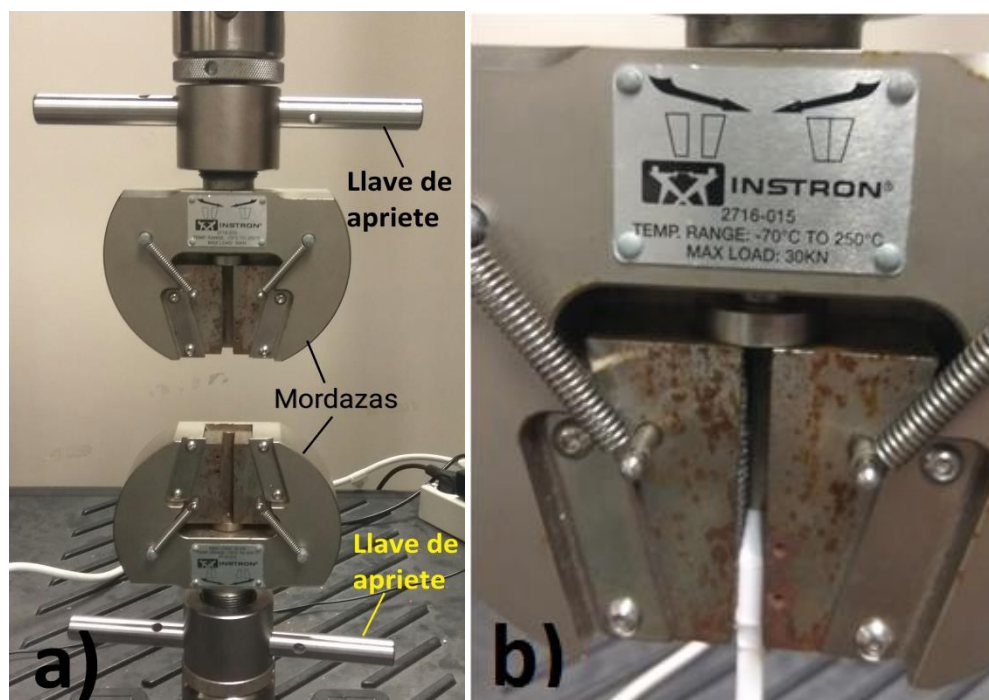


Ilustración 9: Vista de las mordazas (a). Vista cercana mordaza superior (b).

El software que se utiliza para el control de la máquina y configurar el ensayo es el software TW Elite. Es un software de control mediante diagramas de bloques que permite configurar los distintos parámetros del ensayo como velocidad de ensayo, introducir el ancho y espesor de la pieza para obtener tensiones y módulo de Young, así como los datos que se quieren obtener y su forma de visualización. De esta forma, el software permite múltiples opciones de configuración del ensayo, así como la precisión de obtención de datos, como permitir límites de carga o de desplazamiento para evitar roturas en la máquina. También permite mover la mordaza superior a la posición deseada, así como iniciar, parar o terminar los ensayos.

El software permite crear un modelo de ensayo, para ello, se selecciona la pestaña “*Custom Templates*” y se configura a las necesidades. En este estudio se genera el modelo llamado “Ensayos tracción PLA”. Generado el modelo, éste se diseña mediante diagramas de bloques como se observa en la ilustración 10 dependiendo de las necesidades de cada estudio. En la parte derecha de la ilustración se muestra los bloques y las características del diseño del modelo de estudio mientras que las pestañas superiores permiten configurar los diferentes parámetros del modelo generado. En la pestaña “variables”, se configuran los distintos parámetros del ensayo, que se harán según la norma ISO 527-1 e ISO 527-2 (2012).

En la pestaña “Monitor” se muestran los resultados que se van obteniendo durante el ensayo de tracción, como se puede observar en la ilustración 11. En la parte inferior se muestra la carga instantánea y el desplazamiento que soporta la probeta, mientras que en la parte central el software dibuja de forma automática la curva carga-desplazamiento, aunque en este estudio esta curva no es de interés. En la parte superior, el software muestra diferentes iconos que permiten la función de inicio de ensayo, pausa y parada de ensayo.

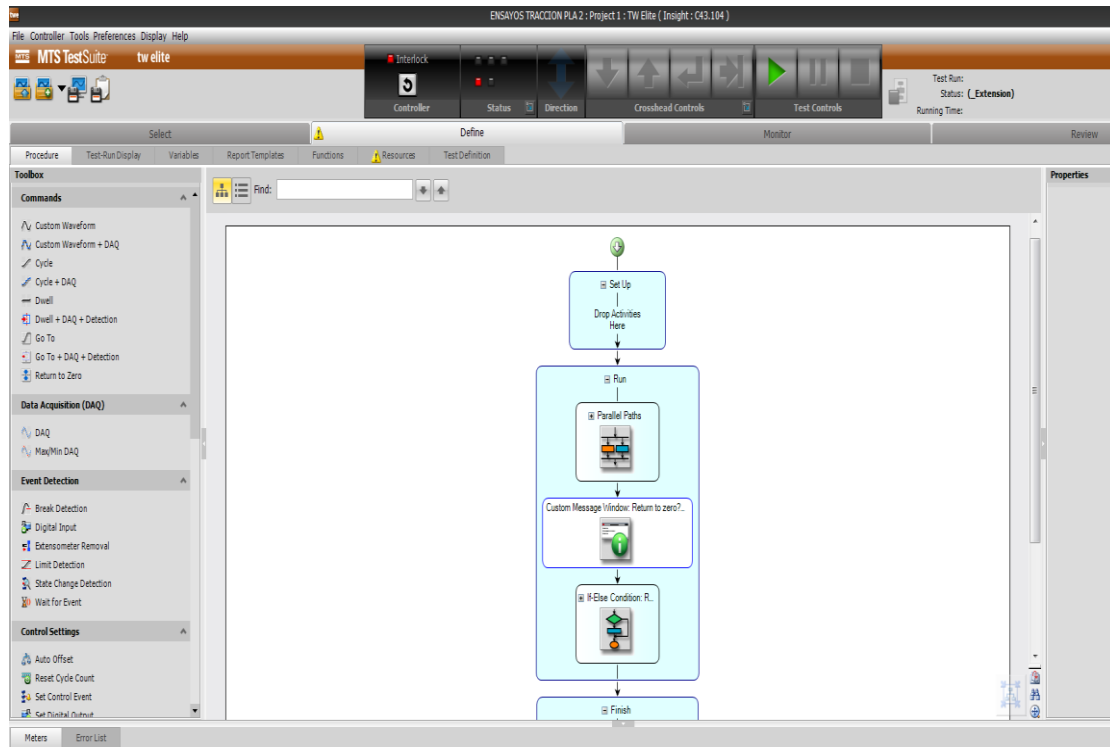


Ilustración 10: Diseño por bloques del modelo mediante el software TW Elite.



Ilustración 11: Entorno del software TW Elite durante un ensayo de tracción.

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. Introducción

En este apartado se lleva a cabo la aplicación de la metodología desarrollada en el apartado 3 para obtener los resultados del estudio. Se presenta la probeta de ensayo utilizada en este TFG y los pasos a realizar para llevar a cabo su obtención mediante impresión 3D, así como su posterior ensayo de tracción. A continuación, se lleva a cabo cada una de las fases, describiendo con detalle el diseño experimental utilizado en cada una de ellas. Por otro lado, se incluye la definición de cada uno de las fases, mostrando los valores de cada uno de los niveles de los factores elegidos en cada caso. Por último, se presentan los resultados del estudio para su posterior análisis haciendo uso del software R y Microsoft Excel.

5.2. Probeta de ensayo

Según la norma UNE 116005:2012, las dimensiones de la probeta de ensayo deben ser las mostradas en la siguiente ilustración y tabla:

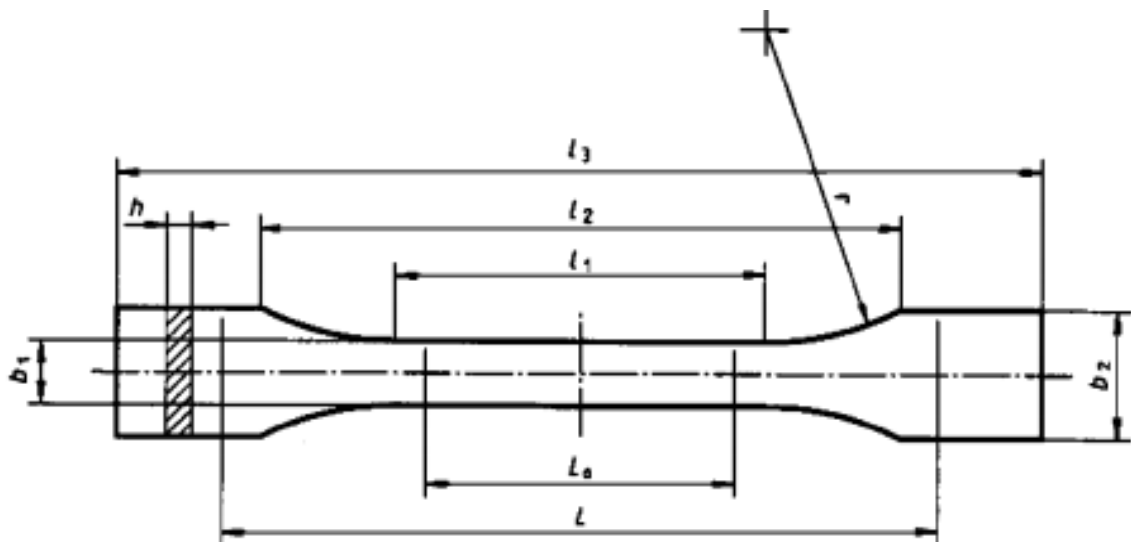


Ilustración 12: Probeta tipo 1A de ensayo según la norma UNE 116005:2012.

		Medidas en milímetros	
Tipo de probeta		1A	1AV
L ₁	Longitud de la zona paralela estrecha	80 ± 2	
L ₂	Distancia 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 ± 0,2	
b ₂	Anchura en los extremos	20 ± 0,2	
h	Espesor recomendado	4 ± 0,2	5 ± 0,2
L ₀	Distancia entre marcas	50 ± 0,5	20 ± 0,5
L	Distancia inicial entre mordazas	115 ± 1	85 ± 1

Tabla 10: Dimensiones de las probetas según la norma UNE 116005:2012.

Sin embargo, las dimensiones de la probeta están basadas en un estudio realizado por Lin *et al.* (2018). Estas dimensiones son correspondientes a una pieza de pequeñas dimensiones. El objetivo de esta elección es el de ahorrar en material, tiempo de impresión y coste en energía en caso de realizar una pieza de un tamaño superior como la de la norma. Las dimensiones de la probeta de este estudio se muestran en la ilustración 13 y en milímetros:

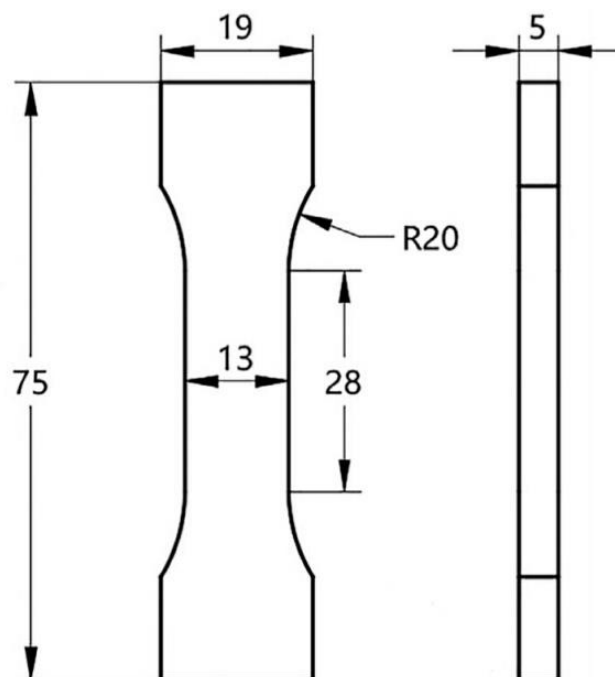


Ilustración 13: Dimensiones de la probeta utilizada en este estudio.

Se combinarán los distintos valores de los niveles de los factores que están siendo investigados con un diseño de experimentos. Este diseño será el mismo tanto para el PLA virgen como para el PLA reciclado.

Según la norma UNE 116005:2012, para evitar errores en los resultados obtenidos, se deben imprimir cinco probetas para cada combinación de los factores y sus niveles. Asimismo, cada una de estas probetas debe ser impresas en tres direcciones distintas. Estas direcciones, mostradas en la ilustración¹ 14, afectan a la posición de la pieza y, por tanto, estas deben ser impresas según la norma en posición horizontal, vertical y de canto. Por lo tanto, según la norma UNE 116005:2012 se deben imprimir cinco probetas para cada posición.

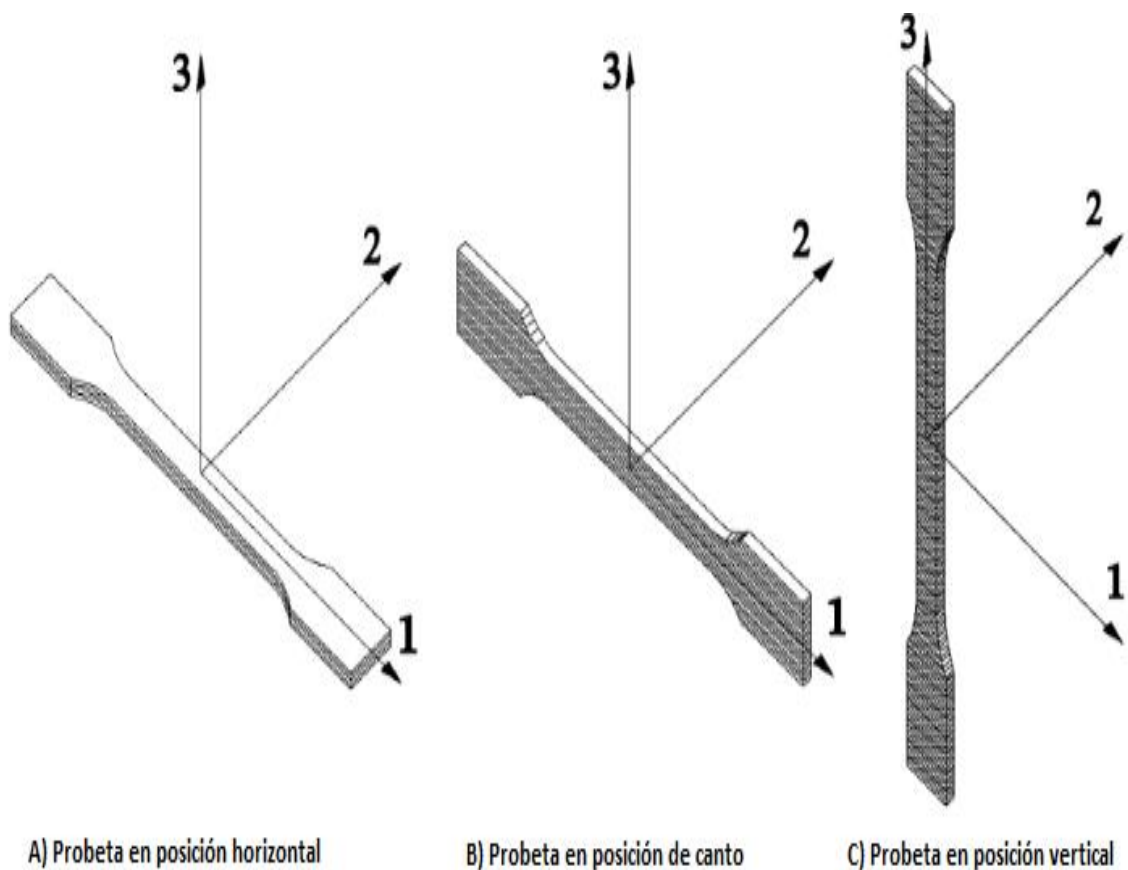


Ilustración 14: Posiciones de impresión según la norma UNE 116005:2012.

¹ Las direcciones “1”, “2” y “3” de los ejes mostrados en la ilustración 14, corresponden normalmente a la mayor longitud de la probeta en el plano perpendicular a “3” para el caso de la dirección “1”, el eje “Z” para el caso de la dirección “3” que es perpendicular a las capas de impresión. Las direcciones “1” y “2” son paralelas a las capas de impresión.

5.3. Realización de ensayos

5.3.1. Actividades previas

Antes de llevar a cabo la impresión 3D y los ensayos de tracción, hay que realizar una serie de actividades previas para el correcto funcionamiento de los equipos, así como para una correcta realización de los mismos.

5.3.1.1. Impresión 3D

Para poder imprimir las probetas se genera en primer lugar un modelo CAD de la pieza en un software comercial, utilizando en este caso el software SolidWorks. Se realiza así el modelado de la probeta con las dimensiones requeridas. Este modelo se convierte a formato STL para que éste pueda abrirse con el software Ultimaker CURA 3.2.1. Es necesario comprobar que los parámetros escogidos e introducidos en el software para cada ensayo no excedan de los rangos del programa para evitar errores, pérdida de tiempo, coste y material.

En cuanto a la impresora, se nivelará la plataforma del área de impresión, así se evita defectos como una mala impresión, pieza deformada, entre otros defectos. Se limpia la boquilla y el sistema de impresión con el material Smart Clean. Asimismo, se aplicará espray a la plataforma de impresión para así facilitar la adhesión del material a la plataforma. Se carga el material de impresión, PLA virgen y el PLA reciclado, y se imprime. Para ambos materiales el procedimiento es el mismo.

5.3.1.2. Ensayo de tracción

Para realizar en ensayo de tracción, se utilizará el software TW Elite, se crea y configura el modelo para este estudio y según la norma ISO 527-1 e ISO 527-2 (2012), donde la velocidad del ensayo viene dada por las siguientes condiciones:

$$1 \text{ \%}/\text{min} (\text{índice de deformación}) = \frac{v (\text{velocidad ensayo})}{\text{distancia entre mordazas}} \quad (5)$$

$$v = \frac{(1 \text{ \%}/\text{min}) * 50 \text{ mm}}{100} = 0,5 \text{ mm}/\text{min}$$

Configurado el modelo, se enciende la máquina de ensayo de tracción después de arrancar el programa, se deberá comprobar que no hay ningún objeto extraño

alrededor que impida su correcto funcionamiento, choque o cause fallo. Antes de colocar la probeta en la máquina, se comprueba mediante el programa o mediante el mando de control que la máquina responde de forma correcta al programa y que las mordazas se mueven. Se arranca un ensayo de prueba sin probeta y se realiza la parada de emergencia, se comprueba que los sensores funcionan y recogen datos.

5.3.2. Realización de ensayos

Una vez realizadas las actividades descritas en los apartados anteriores, se puede comenzar la obtención de las probetas y someterlas a tracción para conseguir el objetivo del estudio tras analizar los resultados de los mismos.

5.3.2.1. Impresión 3D

El procedimiento a seguir para la impresión 3D de las probetas es el siguiente:

- Se abre el archivo STL del modelo CAD de la probeta a ensayar en el software Ultimaker CURA.
- Se fijan los parámetros correspondientes del ensayo en el software.
- Se guarda el archivo con formato .gcode en una tarjeta y se inserta en la impresora.
- Se realiza el auto home a la impresora, esto permite posicionar los ejes de la impresora en el cero.
- Se nivela la plataforma de impresión en caso de no hacerlo con anterioridad.
- Añadir spray fijador a la plataforma de impresión para conseguir una mayor adhesión de la pieza y una correcta impresión de la misma.
- Se selecciona el archivo a imprimir, comenzando el proceso de impresión.
- Se retira la probeta imprimida.

5.3.2.2. Ensayo de tracción

Se realizará el ensayo de tracción, donde el procedimiento es el siguiente:

- Se arranca la máquina y el software.
- Se pulsa el botón de bloqueo en el mando de control, impidiendo el comienzo del ensayo.
- Se selecciona el modelo de ensayo, en este estudio “Ensayos tracción PLA”. Las condiciones de ensayo serán las mismas para todas las probetas ya que el procedimiento es el mismo para todas ellas.
- Para las piezas imprimidas en horizontal, se coloca la pieza en posición vertical, con la cara lisa de la pieza² hacia la derecha y se introduce en la mordaza inferior hasta el comienzo del estrechamiento de la probeta.
- Para las piezas imprimidas en vertical, se coloca la pieza en posición vertical, en este caso al ser la pieza simétrica e igual por su posición de impresión, no importa la orientación en la que se coloque la pieza. Se introduce en la mordaza inferior hasta el comienzo del estrechamiento de la probeta.
- Para las piezas imprimidas de canto, la cara donde se encuentra el soporte de impresión, se coloca en el lado opuesto al operario que sitúa la pieza. Por tanto, el lado visible que se encuentra enfrente de los ojos se corresponde con la cara que no necesita soporte. Se introduce en la mordaza inferior hasta el comienzo del estrechamiento de la probeta. Ver ilustración 16.
- Se aprietan las mordazas hasta que las piezas queden fijadas.
- Se pulsa de nuevo el botón de bloqueo para desbloquear y permitir la realización el ensayo.
- Se comienza el ensayo y se continúa hasta la fractura de la probeta³.
- Tras concluir el ensayo, se guardan los datos obtenidos en un documento de texto.

² La cara lisa de la pieza corresponde con la cara que ha sido imprimida al comienzo de la impresión, es decir, es la cara que está en contacto con la cama de impresión de la impresora (ilustración 15).

³ Como se verá más adelante en los resultados, las probetas de PLA reciclado no llegan a romper en algunos casos, con lo que para disminuir el tiempo de ensayo y de uso de equipos, el ensayo se detiene después de haber obtenido el valor de carga máxima que es la variable de respuesta de este estudio y el dato que se quiere conocer.



Ilustración 15: Posición de la pieza horizontal para el ensayo de tracción. Ejemplo probeta RE-7.



Ilustración 16: Posición de la pieza de canto para el ensayo de tracción. Ejemplo probeta RE-5C.

5.4. Fase I

5.4.1. Factores, niveles y rangos

Seleccionados los factores del estudio en el apartado 3.2.3, se procederá a la definición exacta de los niveles de cada uno de los factores a estudiar, así como la de otros parámetros de impresión. En este estudio, se utilizarán dos niveles para cada factor.

- Altura de capa: se escogen valores para este factor de 0,15 y 0,3 mm teniendo en cuenta estudios previos como el de Altan *et al.* (2018) que escogieron valores entre 0,1 y 0,4 mm. Así, se escoge valores comprendidos entre ellos, además teniendo en cuenta los límites de rango que permite el software Ultimaker Cura 3.2.1 y los valores recomendados de 0,3 mm de Alafaghani y Qattawi (2018) para una mayor resistencia.
- Densidad de relleno: se eligen valores de 60 y 100% de densidad de relleno teniendo en cuenta estudios como Singh *et al.* (2018) que usaron densidades entre 60 y 100%. Alafaghani y Qattawi (2018) escogieron también densidades de 60 y 100%.
- Velocidad y temperatura de impresión: se escogen valores de 40 y 80 mm/s en la velocidad de impresión. Se seleccionan estos valores ya que son los recomendados por el fabricante para el PLA como se puede comprobar en la ilustración 17. Ya que se ha elegido una temperatura de impresión de 210 °C, situada en la zona central de la gráfica para ajustarse a las mejores propiedades, se escogen estos valores de 40 y 80 mm/s comprendidos de forma equidistante con respecto a la temperatura de impresión de 210 °C a un lado y otro evitando así los extremos recomendados. Al mismo tiempo, Alafaghani y Qattawi (2018) recomendaban esta temperatura de impresión para obtener las mejores propiedades mecánicas.

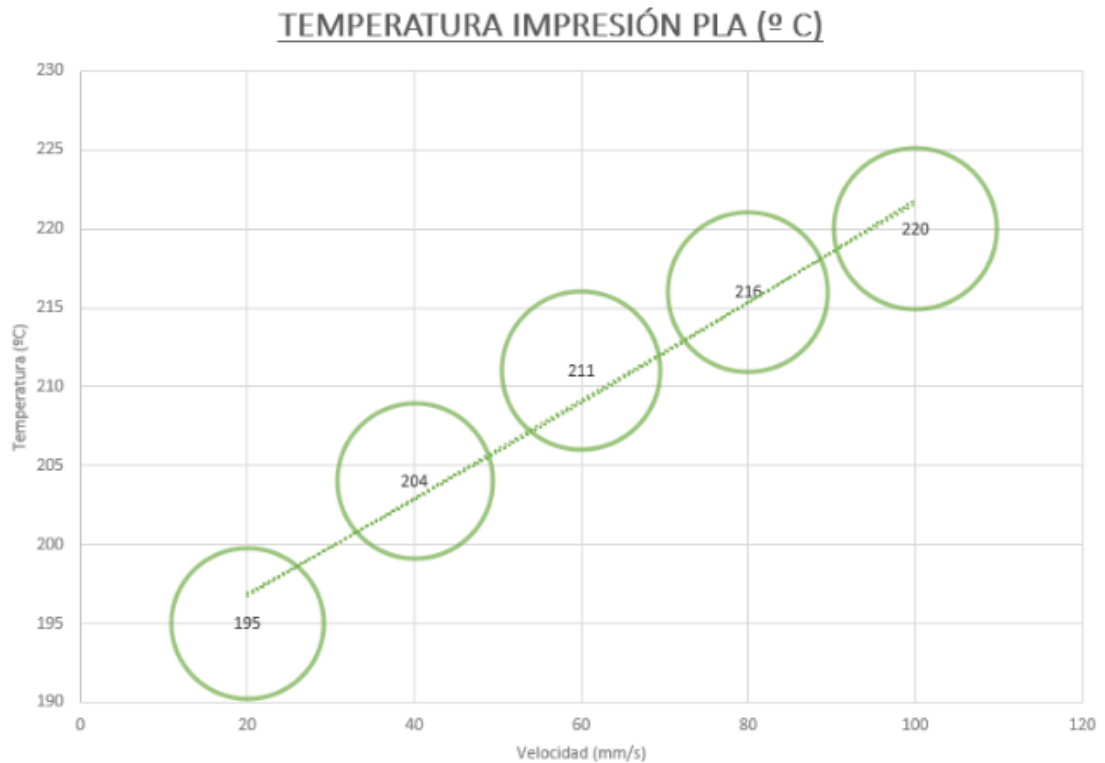


Ilustración 17: Temperaturas y velocidades de impresión recomendadas para el PLA (filament2print.com/es/).

- Patrón de relleno: como referencia del estudio llevado a cabo por Alafaghani y Qattawi (2018) en el que utilizaron patrones triangulares, hexagonales y cuadrangulares y teniendo en cuenta las opciones de patrones que permite el software Ultimaker Cura 3.2.1, se elige el patrón “tri-hexagonal”, una combinación de triángulos y hexágonos que genera una geometría tal a la ilustración 18 correspondiente a nuestra pieza. Esta elección es consecuencia a que no se permite en el software la opción de patrón hexagonal recomendada por los autores. Por otra parte, se elige el patrón “grid” correspondiente con un patrón cuadrangular, utilizado también por los autores en su estudio, la geometría que se obtiene es la mostrada en la ilustración 19.
- El resto de parámetros, como grosor de pared superior e inferior, son asignados por el propio software de forma automática.



Ilustración 18: Probeta con patrón de relleno “tri-hexagonal”.

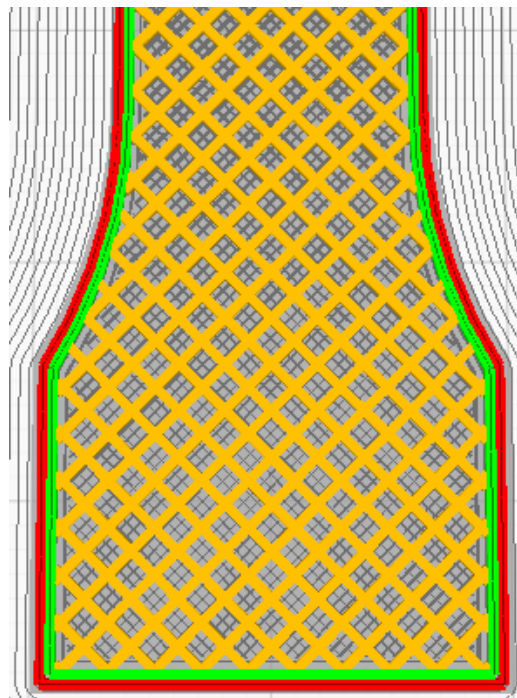


Ilustración 19: Probeta con patrón de relleno “grid”.

En la tabla 11 se muestran cada uno de los factores del estudio con sus respectivos niveles seleccionados.

Factor	Nivel	
Altura de capa	0,15 mm	0,3 mm
Patrón de relleno	Tri-hexagonal	Grid
Densidad de relleno	60%	100%
Velocidad de impresión	40 mm/s	80 mm/s

Tabla 11: Factores y sus niveles para las probetas (fase I).

5.4.2. Diseño experimental

Definidos los factores y justificada la elección de cada uno de los valores de sus niveles, la elección del diseño experimental debe cumplir el objetivo del estudio que es conocer la diferencia de propiedades mecánicas entre el PLA virgen y el PLA reciclado. Para la realización de esta fase se llevará a cabo un diseño factorial fraccionado donde cada factor tiene dos niveles “+” ó “-”.

Como se disponen de cuatro factores y dos niveles para cada uno de ellos, el número total de combinaciones es $N^o = 2^4 = 16$ combinaciones. Como el diseño elegido es fraccionado, se eligen los positivos o negativos de entre las combinaciones (en el presente estudio serán los positivos), quedando ocho combinaciones (Montgomery, 2001). Se realizará una sola probeta, imprimida a su vez solo en posición tipo horizontal, para cada combinación evitando así la realización de 15 como recomienda la norma UNE 116005:2012, ya que se necesita demasiado tiempo de impresión, uso de equipos, dinero y material para realizar las 15 probetas para cada combinación. Impresas las probetas, se someten al ensayo de tracción y se evalúan los resultados para la elección de los factores más determinantes.

A continuación, se muestra en la tabla 12 todas las combinaciones del diseño experimental para el PLA virgen y en la tabla 13 todas las combinaciones para el PLA reciclado.

Ensayo	Altura de capa (h)	Patrón de relleno (p)	Densidad de relleno (r)	Velocidad de impresión (d)	$h*p*r*d$
VE-1	+	+	+	+	+
VE-2	+	+	+	-	-
VE-3	+	+	-	+	-
VE-4	+	+	-	-	+
VE-5	+	-	+	+	-
VE-6	+	-	+	-	+
VE-7	+	-	-	+	+
VE-8	+	-	-	-	-
VE-9	-	+	+	+	-
VE-10	-	+	+	-	+
VE-11	-	+	-	+	+
VE-12	-	+	-	-	-
VE-13	-	-	+	+	+
VE-14	-	-	+	-	-
VE-15	-	-	-	+	-
VE-16	-	-	-	-	+

Tabla 12: Diseño factorial completo para el PLA virgen (fase I).

Ensayo	Altura de capa (<i>h</i>)	Patrón de relleno (<i>p</i>)	Densidad de relleno (<i>r</i>)	Velocidad de impresión (<i>d</i>)	$h \cdot p \cdot r \cdot d$
RE-1	+	+	+	+	+
RE-2	+	+	+	-	-
RE-3	+	+	-	+	-
RE-4	+	+	-	-	+
RE-5	+	-	+	+	-
RE-6	+	-	+	-	+
RE-7	+	-	-	+	+
RE-8	+	-	-	-	-
RE-9	-	+	+	+	-
RE-10	-	+	+	-	+
RE-11	-	+	-	+	+
RE-12	-	+	-	-	-
RE-13	-	-	+	+	+
RE-14	-	-	+	-	-
RE-15	-	-	-	+	-
RE-16	-	-	-	-	+

Tabla 13: Diseño factorial completo para el PLA reciclado (fase I).

La tabla 14 y 15 muestra el diseño factorial fraccionado para el PLA y el PLA reciclado.

Ensayo	Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad de impresión (mm/s)
VE-1	-	-	-	-
VE-2	+	-	-	+
VE-3	-	+	-	+
VE-4	+	+	+	+
VE-5	+	-	+	-
VE-6	-	-	+	+
VE-7	-	+	+	-
VE-8	+	+	-	-

Tabla 14: Diseño factorial fraccionado para el PLA virgen (fase I).

Ensayo	Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad de impresión (mm/s)
RE-1	-	-	-	-
RE-2	+	-	-	+
RE-3	+	+	-	-
RE-4	-	-	+	+
RE-5	+	-	+	-
RE-6	-	+	-	+
RE-7	-	+	+	-
RE-8	+	+	+	+

Tabla 15: Diseño factorial fraccionado para el PLA reciclado (fase I).

Definido el diseño experimental para cada material en esta fase, en las tablas 16 y 17 se muestra el plan de ensayos a realizar para ambos materiales. Además, se añade una columna tiempo estimado de impresión, ya que el software determina un tiempo estimado de impresión. El software también estima un consumo de material aproximado para cada pieza, que siempre tenía un valor estimado de 6 gramos. Además, los ensayos han sido realizados con orden aleatorio para evitar sesgos en los resultados, garantizando la hipótesis de que los errores sean variables aleatorias distribuidas independientemente. Este proceso se realizará en todas las fases experimentales de este estudio (Montgomery, 2001).

Ensayo	Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad de impresión (mm/s)	Tiempo estimado (min)
VE-1	0,15	Tri-hexagonal	60	40	35
VE-2	0,3	Tri-hexagonal	60	80	18
VE-3	0,15	grid	60	80	32
VE-4	0,3	grid	100	80	28
VE-5	0,3	Tri-hexagonal	100	40	32
VE-6	0,15	Tri-hexagonal	100	80	54
VE-7	0,15	grid	100	40	58
VE-8	0,3	grid	60	40	22

Tabla 16: Plan de ensayos para el PLA virgen (fase I).

Ensayo	Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad de impresión (mm/s)	Tiempo estimado (min)
RE-1	0,15	Tri-hexagonal	60	40	35
RE-2	0,3	Tri-hexagonal	60	80	18
RE-3	0,3	grid	60	40	22
RE-4	0,15	Tri-hexagonal	100	80	54
RE-5	0,3	Tri-hexagonal	100	40	32
RE-6	0,15	grid	60	80	32
RE-7	0,15	grid	100	40	58
RE-8	0,3	grid	100	80	28

Tabla 17: Plan de ensayos para el PLA reciclado (fase I).



Ilustración 20: Probetas RE-5 y RE-8 imprimidas.

5.4.3. Resultados

Una vez realizados los ensayos de tracción, se obtienen los siguientes resultados mostrados en las tablas 18 y 19 donde se han añadido el tiempo estimado y real de impresión:

Ensayo	Carga máxima (kN)	Tiempo estimado (min)	Tiempo real (min)
VE-1	2,21	35	39
VE-2	2,16	18	18
VE-3	2,24	32	35
VE-4	3,59	28	31
VE-5	3,60	32	35
VE-6	3,80	54	57
VE-7	3,79	58	61
VE-8	2,16	22	23

Tabla 18: Resultados para el PLA virgen (fase I).

Ensayo	Carga máxima (kN)	Tiempo estimado (min)	Tiempo real (min)
RE-1	2,20	35	39
RE-2	2,16	18	20
RE-3	2,15	22	20
RE-4	3,38	54	57
RE-5	3,37	32	34
RE-6	2,05	32	36
RE-7	3,53	58	61
RE-8	3,49	28	31

Tabla 19: Resultados para el PLA reciclado (fase I).



Ilustración 21: Probetas sometidas a tracción (fase I).

5.4.4. Análisis de resultados

En primera instancia, se puede observar en la ilustración 21 la diferencia y heterogeneidad de fractura en las distintas probetas. Como consecuencia del distinto comportamiento de las probetas a la fractura, las curvas de tensión y deformación no son representativas.

Mientras que gran parte de las probetas sufren una fractura de tipo frágil (ver ilustración 23), aproximadamente paralela a la horizontal, en otras probetas como la VE-2, RE-3 y RE-4 la fractura también es frágil y forma un pequeño ángulo con tendencia a 45 grados. Sin embargo, otras probetas como la RE-7, RE-6, RE-2 y RE-1 sufren una fractura distinta, con un comportamiento más elástico y con una pequeña estricción en la zona de fractura, como se muestra en la ilustración 22. En estas fracturas también se forma un ángulo similar que en los anteriores casos o muy cercano a 45 grados como en RE-7. Destacar que estas fracturas sólo ocurren con el material reciclado y además en las probetas no termina de completarse la fractura.



Ilustración 22: Fractura con comportamiento elástico en las probetas RE-7 y RE-6.

Otro tipo de fractura de interés es la producida en la probeta RE-2, con un comportamiento diferente al resto de probetas, donde la fractura no termina de completarse y en la que se produce en dos zonas diferentes de la pieza. Esta fractura se produce en lados opuestos de la probeta, de forma horizontal.



Ilustración 23: Fractura con comportamiento frágil en la probeta VE-2.

En el estudio realizado por Yao *et al.* (2019), donde imprimieron piezas con diferente inclinación para cambiar la dirección de impresión como se ve en la ilustración 24, comprobaron que sus probetas sufrían dos tipos de fractura, una fractura entre capas y otra fractura a través de las capas.

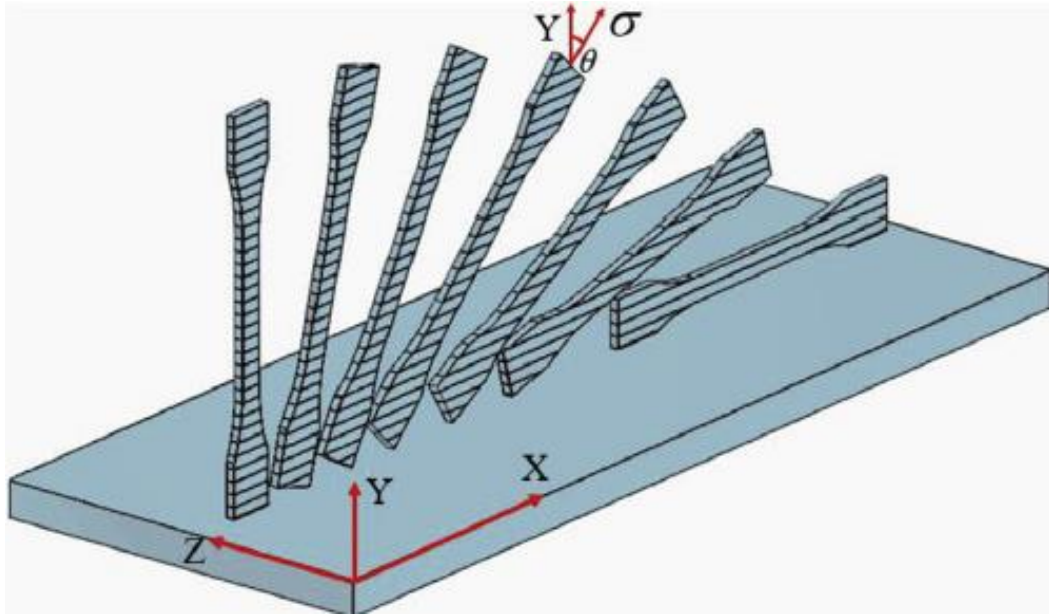


Ilustración 24: Posiciones de impresión de las probetas (Yao *et al.*, 2019).

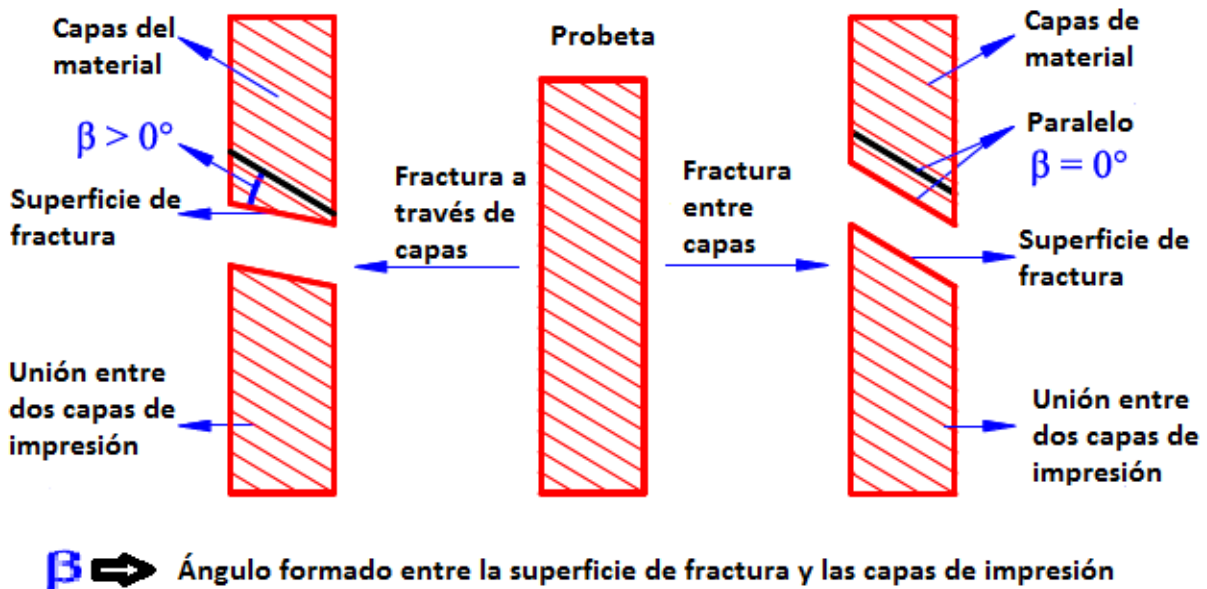


Ilustración 25: Fractura a través de capas y fractura entre capas (Yao *et al.*, 2019).

En la fractura entre capas, la grieta de fractura se propaga entre capas de impresión, mientras que en la fractura a través de capas, la grieta de fractura atraviesa y corta distintas capas de impresión. Los autores dedujeron que la fractura entre capas tiende a convertirse en una fractura a través de las capas conforme se reduce

el ángulo de impresión de la pieza de 90 grados (posición horizontal de la pieza) a 0 grados (posición vertical de la pieza). Por otro lado, la fractura entre capas tiende a dominar cuando la altura de capa aumenta, es decir, la fractura a través de las capas tiene más posibilidad de producirse cuando la altura de capa es menor y el material es más homogéneo. Por el contrario, la fractura entre capas es más probable de producirse cuando la altura de capa es mayor y el material tiene una estratificación distinta (Yao *et al.*, 2019).



Ilustración 26: Distintas fracturas en las probetas del estudio de Yao *et al.* (2019).

Aunque en este estudio de Yao *et al.* (2019) describen los tipos de fractura que se producen en sus probetas, estos resultados no se corresponden con el comportamiento de la fractura en las probetas de este estudio, ya que no hay correspondencia de las conclusiones obtenidas en el estudio de Yao *et al.* (2019) con los resultados obtenidos. En particular, no se observa una clara correspondencia del tipo fractura con la altura de capa.

Comentados los resultados de la fractura de las probetas, se lleva a cabo el análisis estadístico de varianza ANOVA mediante el software R. Los códigos de significación de la influencia de cada factor sobre la carga máxima que muestra el software R y que será común para todos los análisis que se mostrarán posteriormente, son los mostrados en la tabla 20:

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

Tabla 20: Código de significación del software R.

El factor con un código “***” será aquel que más significación tiene en los resultados, mientras que un código “.” se corresponde con un factor de menor nivel de significación contrario. Además, el software proporciona el valor de R^2 , que indica la idoneidad del modelo establecido para estudiar el proceso. Un valor de 1 indica que el modelo explica perfectamente las variaciones medidas en los resultados. Por otra parte, el criterio de significación escogido para este TFG es de $p\text{-valor} < 0,05$.

Se llevará a cabo el análisis del ANOVA primero para el PLA, después para el PLA reciclado y, por último, un análisis teniendo en cuenta el tipo de material. Los resultados por tanto son los siguientes.

5.4.4.1. PLA virgen

Los resultados del ANOVA para el PLA virgen son los siguientes:

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Pr(>F)
Altura de capa	1	32026	32026	9,87540	0,05156 .
Patrón de relleno	1	5	5	0,00160	0,97059
Densidad de relleno	1	4575597	4575597	1410,90320	4,151e-05***
Velocidad de impresión	1	102	102	0,03160	0,87030
Residuos	3	9729	3243	-	-

Tabla 21: ANOVA para el PLA virgen (fase I).

Por otro lado, el valor de R^2 dado por el software es 0,9951, indica que es un análisis correcto. Adicionalmente, se ha verificado la hipótesis de que los errores siguen una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

Los resultados del análisis mostrado en la tabla 21 llevan a las siguientes conclusiones:

- La densidad de relleno es el factor más influyente sobre la carga máxima, teniendo el código de significación más alto y con un p-valor < 0.001.
- Se observa que el patrón de relleno y la velocidad de impresión no son significativos sobre la variable de respuesta, es decir, no tienen influencia.
- La altura de capa tiene poca influencia sobre la carga máxima respecto a la densidad de relleno, aunque tenga un código de significación de “.”, el cual indica que tiene influencia sobre la variable de respuesta. Como su p-valor es mayor a 0.05, la altura de capa deja de ser un factor de estudio para posteriores investigaciones en este TFG.

A continuación, se llevará a cabo el análisis de la contribución de cada factor a la variabilidad de la carga máxima, expresándose en porcentaje para el modelo (p_1) y para el total (p_2). Este análisis se hará para todos los estudios de la fase I usando los datos obtenidos del ANOVA. El porcentaje de contribución de cada factor vendrá dado por las ecuaciones 6 y 7:

$$\rho_1 = \frac{\text{Suma de cuadrados del factor}}{\text{Suma de cuadrados total}} * 100 \quad (6)$$

$$\rho_2 = \frac{\text{Suma de cuadrados del factor}}{\text{Suma de cuadrados total} + \text{residuo}} * 100 \quad (7)$$

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)
Altura de capa	1	32026	0,69	0,69
Patrón de relleno	1	5	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$
Densidad de relleno	1	4575597	99,30	99,09
Velocidad de impresión	1	102	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$
Residuos	3	9729	-	-
Total	7	4617459	100	99,78

Tabla 22: Contribución de cada factor para el PLA virgen (fase I).

Puede observarse que la contribución a la variabilidad más alta viene definida casi en la totalidad por la densidad de relleno con un porcentaje del 99,30% para la variabilidad del modelo y con un 99,09% para la variabilidad total. El patrón de relleno tiene una influencia despreciable con valores de $1,09 \cdot 10^{-4}\%$ para la viabilidad del modelo y $1,08 \cdot 10^{-4}\%$ para la variabilidad total. Al igual que el patrón de relleno, la velocidad de impresión tiene poca influencia con valores de $2,21 \cdot 10^{-3}\%$ para la viabilidad del modelo y $2,21 \cdot 10^{-3}\%$ para la variabilidad total. La altura de capa, sin embargo, tiene una influencia al cambio de la carga máxima de 0,69% sobre la variabilidad del modelo y un 0,69% para la variabilidad total. Se observa por tanto que la altura de capa tiene poca influencia sobre la carga máxima. Además, es mucho menor en comparación con la densidad de relleno, pero mucho mayor en comparación con el patrón de relleno y la velocidad de impresión.

5.4.4.2. PLA reciclado

Los resultados del análisis ANOVA para el PLA reciclado son los mostrados en la siguiente tabla:

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Pr(>F)
Altura de capa	1	49	49	0,0058	0,943986
Patrón de relleno	1	1349	1349	0,1598	0,716091
Densidad de relleno	1	3378909	3378909	400,1721	0,000273***
Velocidad de impresión	1	3388	3388	0,4012	0,571455
Residuos	3	25331	8444	-	-

Tabla 23: ANOVA para el PLA reciclado (fase I).

El valor de R^2 dado por el software es de 0,9827, lo que indica que el análisis es correcto. Adicionalmente, se ha verificado la hipótesis de que los errores siguen una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

Los resultados del ANOVA para el PLA reciclado llevan a las siguientes conclusiones:

- La densidad de relleno, como en el análisis para el PLA virgen, es el factor más influyente sobre la carga máxima, con un código de significación “***”, el más alto y con un $p\text{-valor} < 0,001$.
- El resto de factores no tienen influencia sobre la variable de respuesta, ya que tienen un $p\text{-valor} > 0,05$.
- La altura de capa para el PLA reciclado tiene una significación menor que para el PLA virgen.

El análisis de la contribución a la variabilidad de la carga máxima de cada factor es el siguiente:

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)
Altura de capa	1	49	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$
Patrón de relleno	1	1349	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$3,96 \cdot 10^{-2}$
Densidad de relleno	1	3378909	99,85	99,11
Velocidad de impresión	1	3388	0,10	$9,93 \cdot 10^{-2}$
Residuos	3	25331	-	-
Total	7	3409026	100	99,25

Tabla 24: Contribución de cada factor para el PLA reciclado (fase I).

Como puede comprobarse en la tabla 24, la contribución a la variabilidad más alta de la variable de respuesta es la densidad de relleno con un porcentaje del 99,85% de la variabilidad del modelo y un 99,11% de la variabilidad total. Es por tanto la misma conclusión que para el PLA virgen, pero en este caso la influencia al cambio es aún mayor en el PLA reciclado que para el PLA virgen.

Por otro lado, a diferencia con el PLA virgen, la influencia de la altura de capa en el PLA reciclado es menor que para el caso del PLA virgen, reduciéndose en este caso a un porcentaje de $1,44 \cdot 10^{-3}\%$ para la variabilidad del modelo y $1,43 \cdot 10^{-3}\%$ para la variabilidad total. En definitiva, la altura de capa, el patrón de relleno y la velocidad de impresión no tienen influencia sobre la variable de respuesta.

5.4.4.3. Influencia del tipo de material

En este caso se llevará a cabo un análisis ANOVA teniendo en cuenta el tipo de material, los resultados son los siguientes:

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F-Valor	Pr(>F)
Altura de capa	1	14783	14783	1,4678	0,25354
Patrón de relleno	1	594	594	0,0589	0,81309
Densidad de relleno	1	7909241	7909241	785,3262	$7,773e-11^{***}$
Velocidad de impresión	1	1156	1156	0,1148	0,74176
Material	1	100747	100747	10,0034	$0,01011^*$
Residuos	15	100743	10071	-	-

Tabla 25: ANOVA teniendo en cuenta el tipo de material (fase I).

El valor de R^2 dado por el software es de 0,9814, lo que indica que el análisis, como en los anteriores casos, es correcto. Adicionalmente, se ha verificado la hipótesis de que los errores siguen una distribución normal mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

Los resultados del ANOVA mostrados en la tabla 25 llevan a las siguientes conclusiones:

- Como en los análisis anteriores, la densidad de relleno es el factor más influyente con el código de significación más alto “***”.
- Se comprueba que el tipo de material es un factor que afecta en cierta medida a la carga máxima, aunque su influencia es mucho menor que la de la densidad de relleno. El tipo de material tiene un código de significación de “*” y un $p\text{-valor} < 0,05$.
- La altura de capa tiene una influencia superior al patrón de relleno y la velocidad de impresión, pero su influencia no es significativa respecto al tipo de material y la densidad de relleno.
- Todos los factores, a excepción de la densidad de relleno y el tipo de material, no son significativos y no tienen una influencia apreciable sobre la variable de respuesta, además tienen un $p\text{-valor} > 0,05$.

Se procede al análisis de la contribución de cada factor a la variabilidad de la carga máxima como en los casos anteriores:

Factor estudiado	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1 (%)	ρ_2 (%)
Altura de capa	1	14783	0,18	0,18
Patrón de relleno	1	594	$7,40 \cdot 10^{-3}$	$7,31 \cdot 10^{-3}$
Densidad de relleno	1	7909241	98,53	97,31
Velocidad de impresión	1	1156	$1,440 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$
Material	1	100747	1,25	1,23
Residuos	10	100743	-	-
Total	15	8127264	100	98,74

Tabla 26: Contribución de cada factor para cada tipo de material (fase I).

La variabilidad más alta viene contribuida a la densidad de relleno. Como en los análisis anteriores, este factor es determinante para la variable de respuesta con un

98,53% de la variabilidad del modelo y un 97,31% de la variabilidad total. El tipo de material tiene poca influencia, con un 1,25% de la variabilidad del modelo y 1,23% de la variabilidad total. Esto indica que el cambio de material tiene una influencia poco significativa en la resistencia de la pieza, con lo que el uso del material reciclado es una opción viable y sostenible, reduciendo así el consumo de materias prima y teniendo unas propiedades en servicio similares a las de la materia prima sin reciclar. Aunque se tendrá en cuenta para el estudio de la fase II y III ya que en el análisis ANOVA ha cumplido el criterio de significación de $p\text{-valor} < 0,05$, teniendo un código de significación de “**”.

El resto de factores no tienen relevancia sobre la influencia en la carga máxima ya que su contribución es menor al 1%, en caso del patrón de relleno se tiene una contribución a la variabilidad del $7,40 \cdot 10^{-3}\%$ para la variabilidad del modelo y un $7,31 \cdot 10^{-3}\%$ para la variabilidad total. De igual modo sucede con la velocidad de impresión con un $1,44 \cdot 10^{-2}\%$ para la variabilidad del modelo y un $1,42 \cdot 10^{-2}\%$ de la variabilidad total y la altura de capa con 0,18% de la variabilidad del modelo y un 0,18% de la variabilidad total. Aunque en el caso de la altura de capa, tiene una contribución algo mayor con respecto a la velocidad de impresión y el patrón de relleno, pero muy inferior con respecto a la densidad de relleno y ligeramente inferior con respecto al tipo de material.

5.5. Fase II

A consecuencia de los resultados expuestos, en esta fase II se determinará un modelo que indique la influencia y relación de la densidad de relleno con respecto a la carga máxima, de forma que se pueda conocer o predecir la carga máxima que soporta la pieza en relación a los valores de densidad de relleno escogidos, o elegir los valores de la densidad de relleno en función de la carga máxima que sea necesaria. El conocimiento de este modelo permite ahorrar no solo material, sino tiempo de uso de equipos, así como recursos energéticos, ya que se puede escoger una densidad tal que sea muy superior a la necesaria para la vida útil de esa pieza, pero con el modelo se puede conocer la densidad suficiente para cumplir las necesidades, lo que deriva en el ahorro y en una fabricación sostenible.

5.5.1. Factores, niveles y rangos

Como se ha comprobado, la densidad de relleno es el factor más influyente para la carga máxima. No se tendrá en cuenta la altura de capa, la velocidad de impresión y el patrón de relleno, ya que no son significativos para la carga máxima. Aunque sí se tendrá en cuenta el tipo de material, ya que ha cumplido el criterio de significación de $p\text{-valor} < 0,05$. De esta forma, se trabajará con distintos niveles para la densidad de relleno, mientras que los niveles de los restantes factores, es decir, altura de capa, patrón de relleno y velocidad de impresión, se mantendrán iguales en todas las probetas de esta fase. Los valores de los niveles serán los mismos que en la fase I, siendo por tanto valores seleccionados teniendo en cuenta estudios anteriores.

Por otro lado, los niveles de la altura de capa, patrón de relleno y velocidad de impresión se escogen de forma que se obtengan el menor tiempo posible de impresión consiguiendo así la reducción de consumo energía eléctrica y tiempo de funcionamiento de los equipos. Se escoge por tanto la combinación RE-2 de la fase I la cual da un tiempo de impresión de 20 minutos. Estos valores, mostrados en la tabla 27, son los mismos tanto para el PLA virgen como para el PLA reciclado.

Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Velocidad de impresión (mm/s)	Tiempo de impresión (min)
0,3	Tri-hexagonal	80	20

Tabla 27: Factores y sus niveles para las probetas (fase II).

En cuanto a la densidad de relleno, se eligen cinco niveles distintos, sus valores se encuentran en un rango comprendido entre 40 y 100% para así obtener información relevante para el modelo. Además, estos valores serán los mismos para el PLA virgen y PLA reciclado. Los valores de los niveles son:

Nivel	Densidad de relleno (%)
1	40
2	55
3	70
4	85
5	100

Tabla 28: Niveles y rangos para la densidad de relleno (fase II).

5.5.2. Diseño experimental

Definido cada factor y sus niveles, se realiza el diseño experimental para obtener el modelo. Como todos los factores a excepción de la densidad de relleno tienen un solo nivel, se realizarán cinco ensayos para cada material cambiando solo la densidad de relleno. De la misma forma que en la fase I, el orden de los ensayos es aleatorio para evitar sesgos en los resultados. El diseño experimental es el mostrado en las tablas 29 y 30.

Ensayo	Densidad de relleno (%)
70-VE	70
100-VE	100
40-VE	40
85-VE	85
55-VE	55

Tabla 29: Plan de ensayos para el PLA virgen (fase II).

Ensayo	Densidad de relleno (%)
85-RE	85
70-RE	70
55-RE	55
100-RE	100
40-RE	40

Tabla 30: Plan de ensayos para el PLA reciclado (fase II).

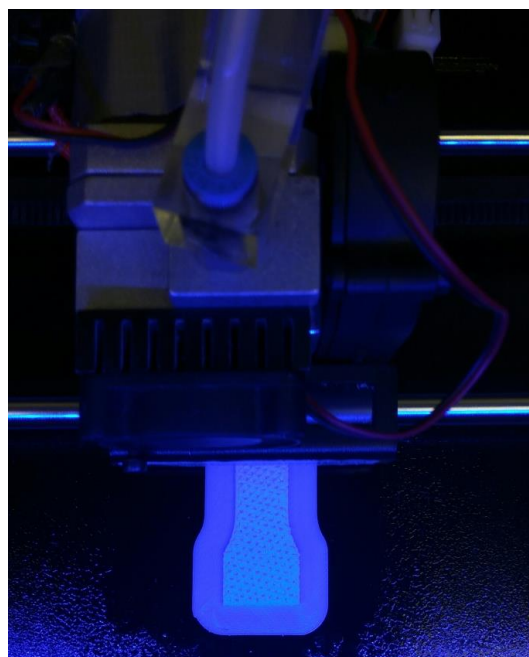


Ilustración 27: Probeta 70-RE durante su proceso de impresión.



Ilustración 28: Probetas imprimidas (fase II).

5.5.3. Resultados

Ensayo	Densidad de relleno (%)	Carga máxima (kN)
70-VE	70	2,15
100-VE	100	3,29
40-VE	40	1,87
85-VE	85	2,30
55-VE	55	1,98

Tabla 31: Resultados para el PLA virgen (fase II).

Ensayo	Densidad de relleno (%)	Carga máxima (kN)
85-RE	85	2,24
70-RE	70	2,08
55-RE	55	1,93
100-RE	100	3,03
40-RE	40	1,80

Tabla 32: Resultados para el PLA reciclado (fase II).

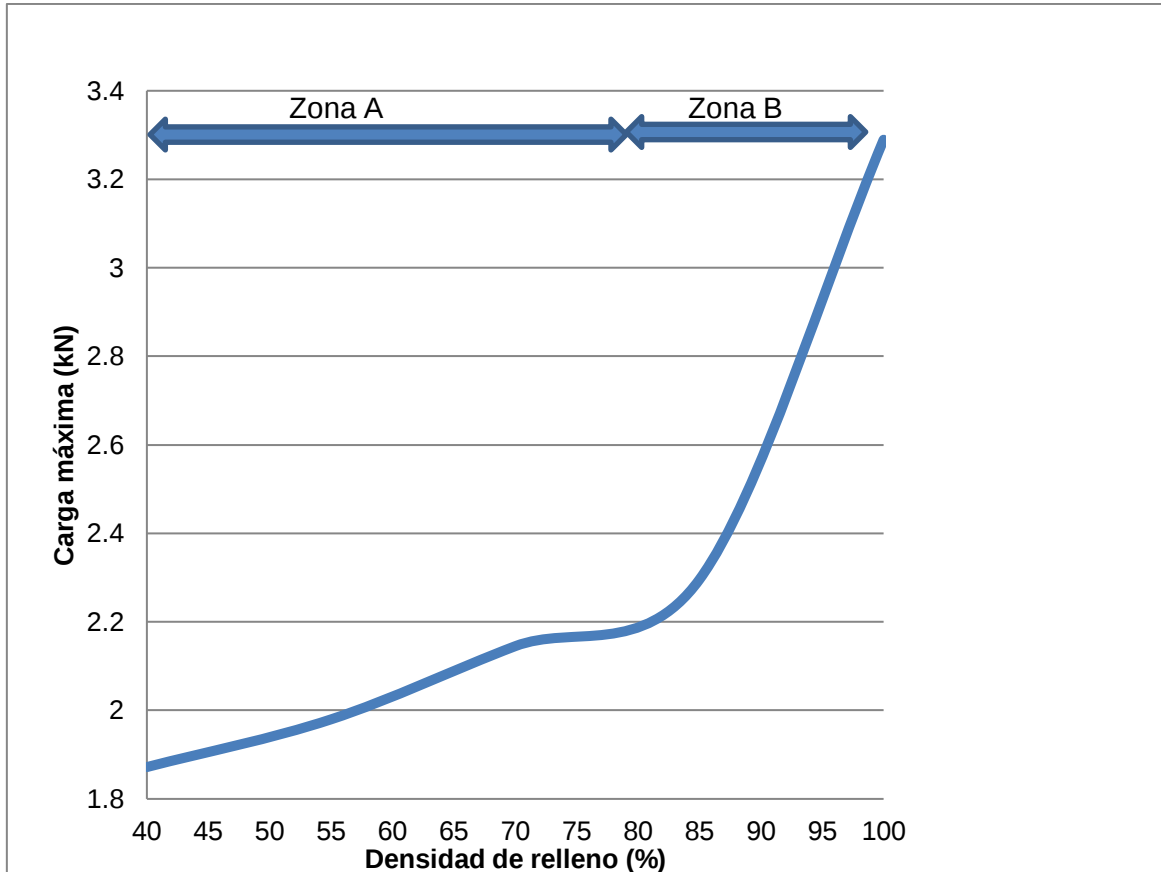


Ilustración 29: Probetas sometidas a tracción (fase II).

5.5.4. Análisis de resultados

Al igual que en la fase I, se comprueba la heterogeneidad de fractura en las diferentes probetas, la diferencia más significativa es que mientras que se produce una fractura frágil en las probetas de PLA virgen, en el PLA reciclado la fractura tiene un comportamiento más elástico, ocurriendo el mismo fenómeno de estricción y fractura incompleta que en la fase anterior. La fractura completa de forma frágil solo se produce en el PLA reciclado en la probeta 85-RE, en el resto de probetas, el ensayo se detuvo un tiempo después de obtener el valor de carga máxima y una vez comprobado que la fractura se producía de forma elástica. Esto se realizó para agilizar los ensayos reduciendo el uso de equipos y consumo de energía, ya que los datos de carga posteriores a la carga máxima no son significativos para este estudio.

En este momento se lleva a cabo la realización del modelo, para ello se grafica las cargas máximas obtenidas en los ensayos respecto de la densidad obteniéndose los siguientes modelos.

5.5.4.1. PLA virgen

Gráfica 1: Modelo para el PLA virgen.

La curva representada en color azul es la curva que indica la tendencia de la carga máxima conforme se aumenta la densidad de relleno. Se observan dos zonas de comportamiento claramente diferenciadas, zonas que se llamarán zona A y zona B:

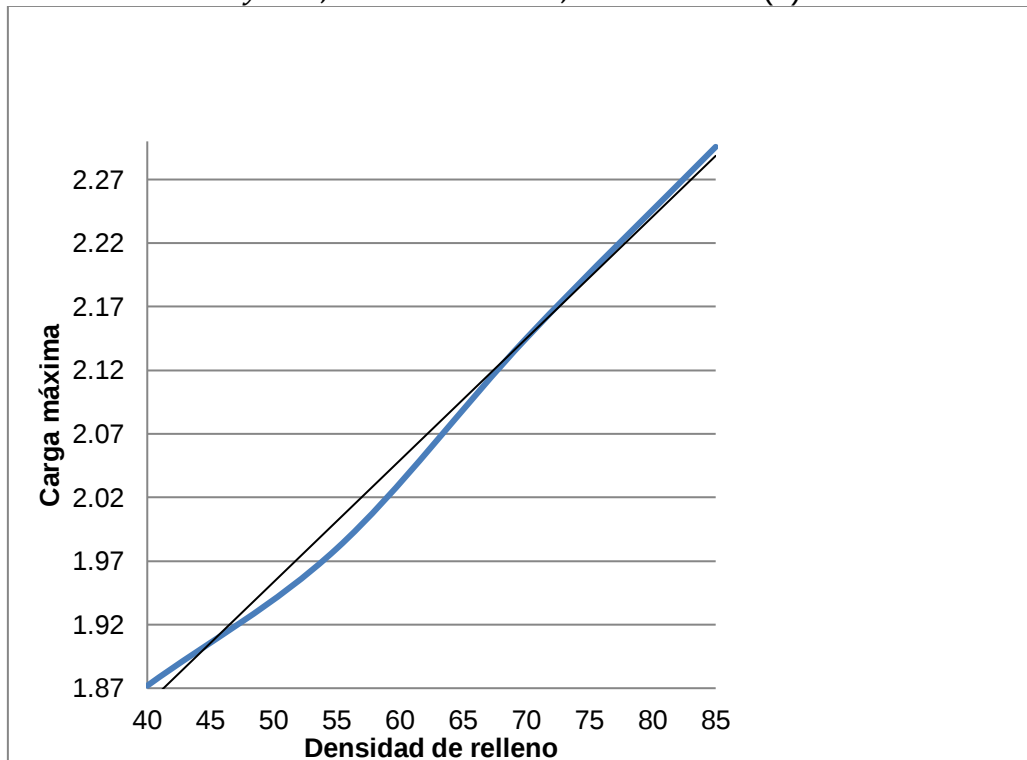
- A. Una zona correspondiente al intervalo entre 40% y 85% de densidad de relleno aproximadamente, donde la carga soportada aumenta poco a poco de forma lineal hasta una densidad del 70 en el que se produce un cambio de pendiente de la curva. Posteriormente se presenta un pequeño intervalo donde no aumenta la carga máxima entre el 70% y el 80% de densidad de relleno. Son densidades a evitar, ya que la elección de una densidad dentro de este rango no supone beneficio en las propiedades mecánicas y en la carga máxima. En el intervalo de 40% y 85% la carga aumenta aproximadamente en un 18%.

- B. Una zona comprendida aproximadamente entre el 85% y 100% de densidad de relleno, donde la curva aumenta en gran medida su pendiente adquiriendo una tendencia lineal. Esto indica que al aumentar la densidad de relleno en pequeños porcentajes supone un gran aumento de la carga máxima que soporta la pieza. En este intervalo la carga aumenta aproximadamente en un 30%.

Como se tienen dos zonas diferentes, se realiza para cada zona una línea de tendencia independiente para tener la ecuación más ajustada posible a la curva general. Donde el valor de “y” es el valor de la carga máxima, mientras que el valor de “x” es el valor de la densidad de relleno en %.

- A. Para esta zona, se realiza una línea de tendencia lineal utilizando los datos comprendidos entre 40% y 85% de densidad de relleno. La siguiente gráfica muestra la línea de tendencia realizada, donde la ecuación que permite conocer la carga máxima que soportará la pieza en función de la densidad de relleno es la siguiente:

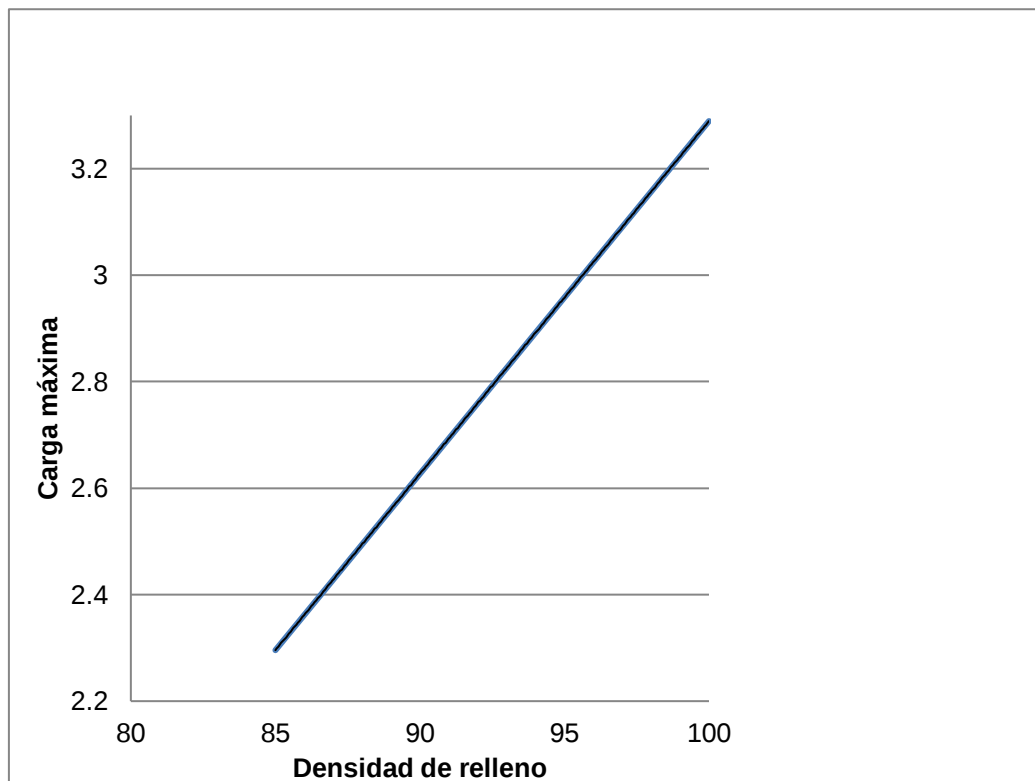
$$y = 0,009577243x + 1,474545487 \quad (8)$$



Gráfica 2: Línea de tendencia PLA virgen para la zona A.

- B. Para esta zona, se realiza una línea de tendencia lineal, se opera de la misma forma que para la zona A con los datos comprendidos entre 85% y 100% de densidad de relleno. La línea de tendencia se muestra en la siguiente gráfica, donde la ecuación obtenida es:

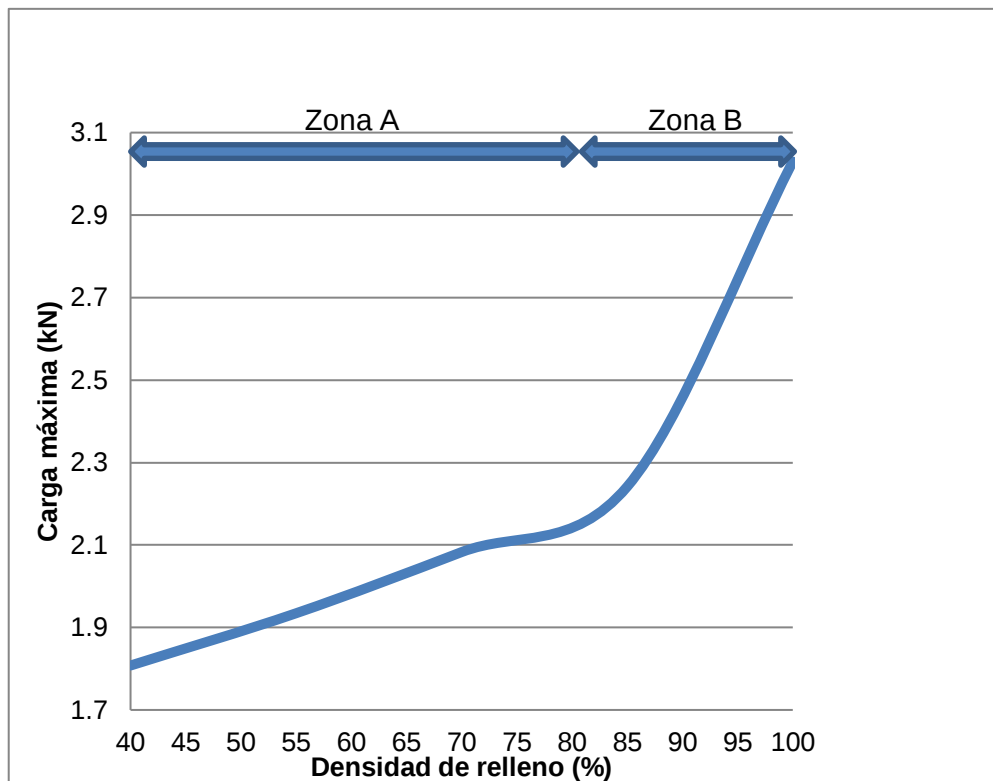
$$y = 0,066247363x - 3,335335637 \quad (9)$$



Gráfica 3: Línea tendencia PLA virgen para la zona B.

5.5.4.2. PLA reciclado

Para el PLA reciclado se obtiene el siguiente modelo:

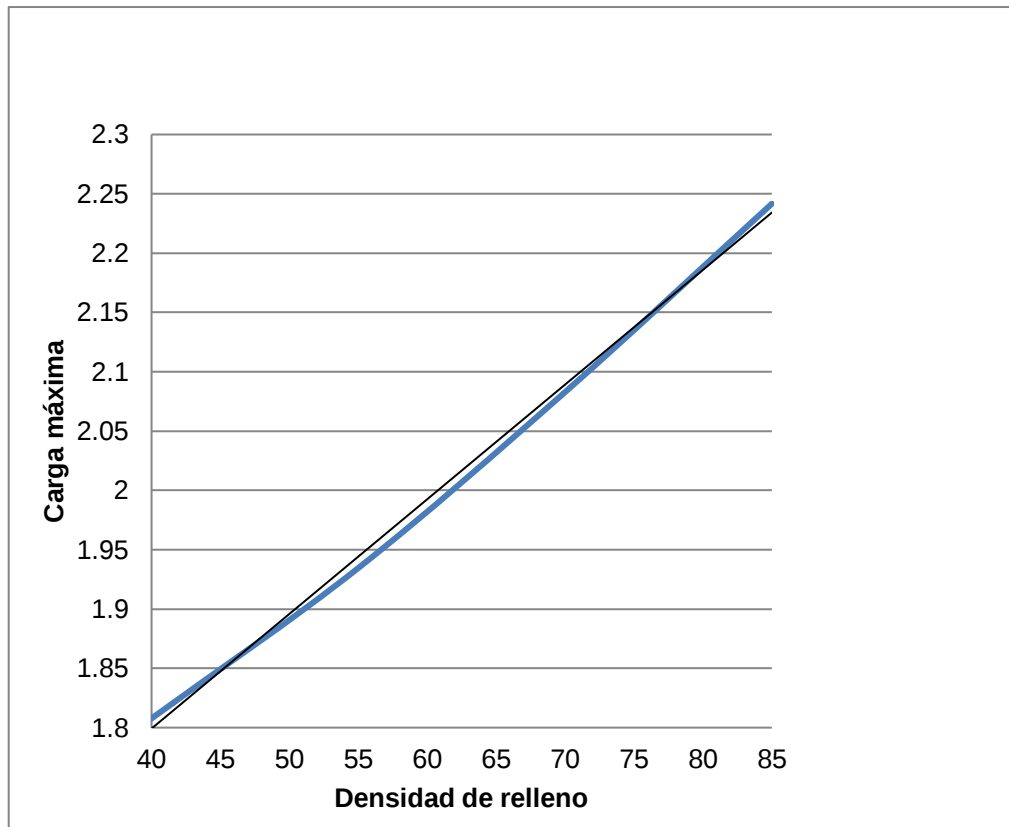


Gráfica 4: Modelo para el PLA reciclado.

Se observa que al igual que en el PLA virgen, se tienen dos zonas diferenciadas y con un comportamiento muy similar y para los mismos porcentajes de densidad de relleno. Con una primera zona que se llamará A, para porcentajes entre el 40%-85% aproximadamente, en la que la carga soportada aumenta poco a poco de forma lineal mientras que para porcentajes superiores la curva adquiere una tendencia lineal con aumentos altos de la carga soportada conforme se aumenta la densidad. A esta zona se llamará zona B. De la misma forma se presenta un pequeño intervalo donde no aumenta la carga máxima entre el 70% y el 80% de densidad de relleno.

- A. Para esta zona, se producen aumentos de carga aproximadamente del 19%, sucediendo lo mismo que para el PLA virgen. Se realiza una línea de tendencia lineal mostrada en la figura operando de la misma forma que para el PLA virgen, entre datos del 40% y 85% de densidad de relleno, donde la ecuación obtenida es la siguiente:

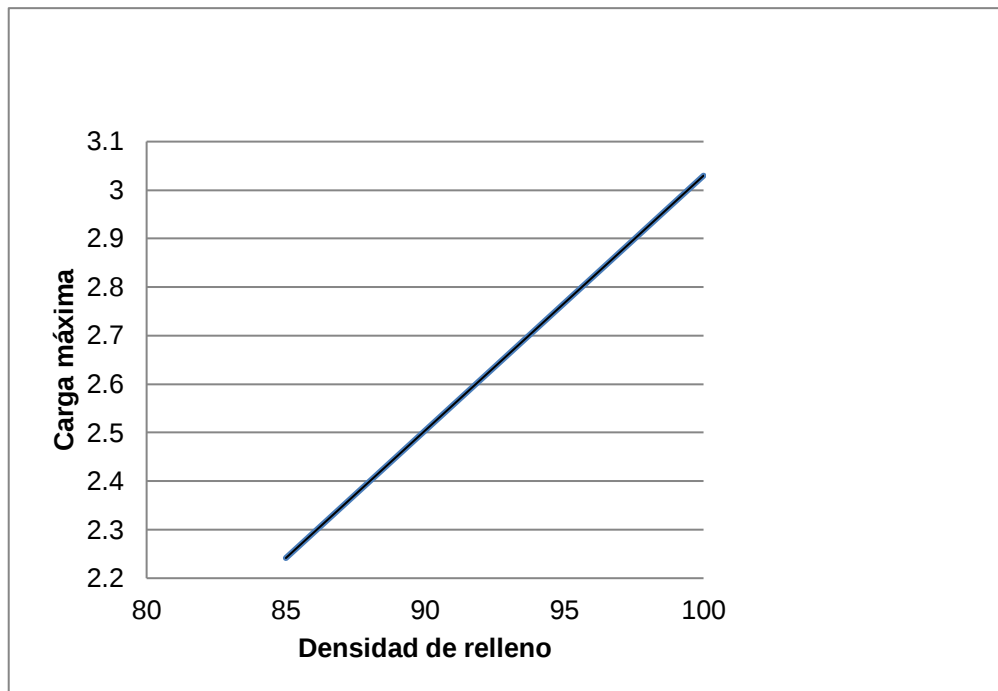
$$y = 0,009666116x + 1,412545407 \quad (10)$$



Gráfica 5: Línea tendencia PLA reciclado para la zona A.

B. Para esta zona, el aumento de carga que se produce es aproximadamente el 26%, valor similar al del PLA virgen. Operando del mismo modo que en el PLA virgen se realiza una línea de tendencia lineal entre densidades del 85% y 100% de densidad de relleno obteniendo la ecuación:

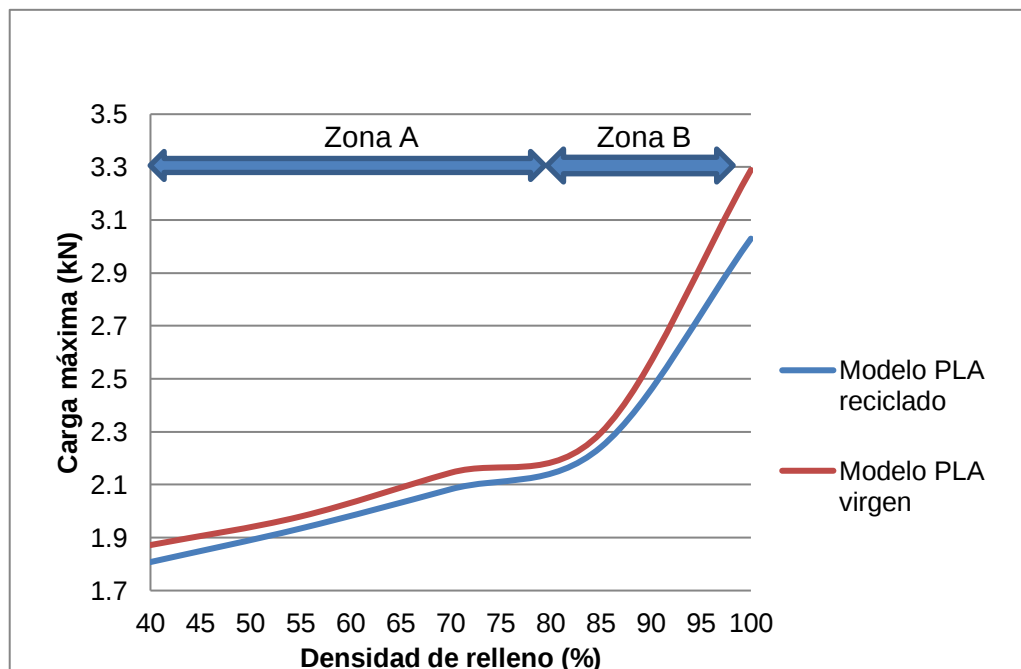
$$y = 0,052543783x - 2,224621187 \quad (11)$$



Gráfica 6: Línea tendencia PLA reciclado para la zona B.

5.5.4.3. Comparación entre ambos materiales

Ahora se llevará a cabo una comparación entre los modelos de ambos materiales.



Gráfica 7: Comparación de modelos entre el PLA y el PLA reciclado.

Como se puede comprobar, ambos materiales tienen un comportamiento prácticamente idéntico, ya que las curvas tienen la misma forma y casi las mismas

pendientes en ambas zonas. Se observa que la curva del PLA reciclado se encuentra por debajo de la curva del PLA virgen, a consecuencia de haberse obtenido valores un poco menores de la carga máxima soportada en las probetas. Sin embargo, la distancia entre ambas es muy pequeña, ya que las cargas obtenidas son muy cercanas entre ambos materiales con una diferencia entre el 2% y el 3% para densidades menores al 90% mientras que para una densidad del 100% la diferencia se eleva al 7%. Asimismo, un aumento de la densidad del 40% al 70% supone para ambos materiales un aumento de la carga máxima alrededor del 14%. Como resultado, las propiedades del PLA reciclado hacen que los materiales reciclados sean aptos para la sustitución de materiales convencionales, lo que deriva en llevar a cabo una fabricación sostenible reduciendo el uso de materias primas.

Para densidades pequeñas el valor de la carga aumenta de forma menor que para valores altos de densidad. Por lo tanto, para usos en los que necesite grandes solicitudes de carga en servicio las densidades óptimas se encuentran entre el 85% y el 100%. Mientras que, si las piezas en servicio sus solicitudes no son excesivas, las densidades óptimas se encuentran entre el 40% y el 70% de forma que se puede reducir el uso de material y equipos, tiempo de impresión, etc.

A consecuencia de los resultados obtenidos y de lo anteriormente expuesto, se llega a las siguientes conclusiones:

- Ambos materiales sufren el mismo comportamiento y sus modelos tienen la misma tendencia, apareciendo en sus respectivos modelos las dos zonas distintas. Una zona A de poca pendiente y tendencia lineal y otra zona B de gran pendiente con tendencia lineal.
- La curva del PLA reciclado se encuentra situada un poco por debajo del PLA virgen, aunque se encuentran muy cercanas entre sí. Esto hace del material reciclado un material apto para su uso comercial y sustitución de materiales convencionales.

5.6. Fase III

Tras la realización de las fases I y II y cumplir los respectivos objetivos, en esta fase III se llevará a cabo un estudio de la anisotropía de las probetas, es decir, en esta fase se pretende analizar la influencia de la posición en las probetas y se realizará para ambos materiales estudiados, PLA y PLA reciclado.

5.6.1. Factores, niveles y rangos

Se utilizarán los mismos parámetros de impresión empleados en fases anteriores. Los niveles de los factores serán los mismos para todas las probetas y los valores de estos niveles serán los mismos que los definidos en la fase I y fase II. Por lo tanto, todas las probetas tendrán la misma densidad de relleno, altura de capa, velocidad de impresión y patrón de relleno. Además, se escogen de forma que se tenga el menor tiempo de impresión, uso de equipos y materiales para llevar a cabo un estudio sostenible al igual que se ha realizado en la fase II. Así, se utilizará una densidad de relleno del 50%, una altura de capa de 0,3 mm, una velocidad de impresión de 80 mm/s y un patrón de relleno tri-hexagonal.

Altura de capa (mm)	Patrón de relleno	Velocidad de impresión (mm/s)	Densidad de relleno (%)
0,3	Tri-hexagonal	80	50

Tabla 33: Factores y sus niveles para las probetas (fase III).

5.6.2. Diseño experimental

Para realizar esta fase, se llevará a cabo la impresión de las probetas en tres posiciones u orientaciones distintas haciendo uso de la norma UNE 116005:2012. Las posiciones son las mismas que las indicadas en el apartado 5.2 y están mostradas en la ilustración 14. Estas posiciones son por tanto posición horizontal, posición de canto y posición vertical.

Igualmente, se sigue lo indicado por la norma y se procederá a la impresión de cinco probetas para cada una de las tres posiciones. Se tendrán en total quince probetas para el PLA y otras quince probetas para el PLA reciclado. De la misma forma que en la fase I y II, el orden de los ensayos es aleatorio para evitar sesgos en los resultados.

El diseño experimental para realizar esta fase III es la mostrada en las siguientes tablas:

Probetas en posición horizontal					
Material	Ensayo				
PLA	VE-1H	VE-2H	VE-3H	VE-4H	VE-5H
PLA reciclado	RE-1H	RE-2H	RE-3H	RE-4H	RE-5H

Tabla 34: Plan de ensayos para las probetas en posición horizontal.

Probetas en posición de canto					
Material	Ensayo				
PLA	VE-1C	VE-2C	VE-3C	VE-4C	VE-5C
PLA reciclado	RE-1C	RE-2C	RE-3C	RE-4C	RE-5C

Tabla 35: Plan de ensayos para las probetas en posición de canto.

Probetas en posición vertical					
Material	Ensayo				
PLA	VE-1V	VE-2V	VE-3V	VE-4V	VE-5V
PLA reciclado	RE-1V	RE-2V	RE-3V	RE-4V	RE-5V

Tabla 36: Plan de ensayos para las probetas en posición vertical.



Ilustración 30: Probeta RE-2C durante su proceso de impresión⁴.

⁴ Se observa en la parte inferior de la pieza el soporte necesario para realizar la impresión.



Ilustración 31: Probetas PLA virgen imprimidas (fase III).

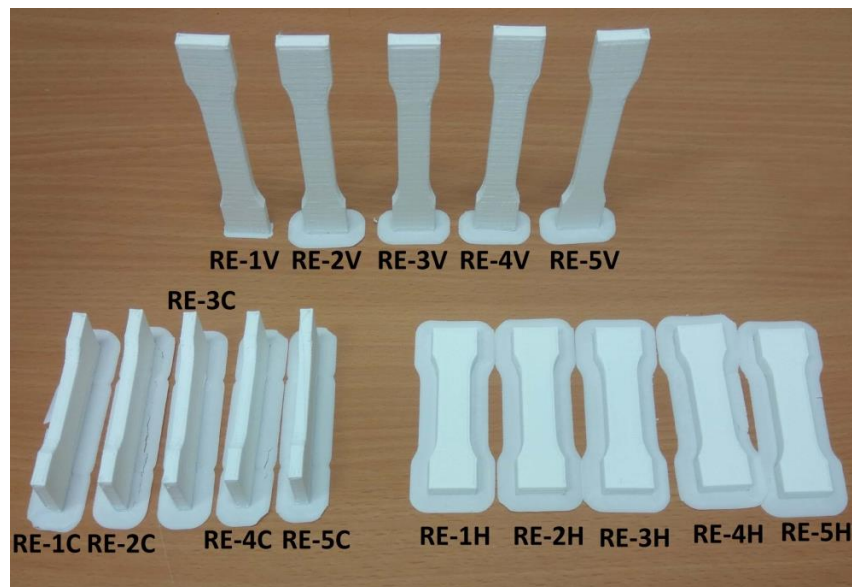


Ilustración 32: Probetas PLA reciclado imprimidas (fase III).



Ilustración 33: Probeta RE-2V durante su proceso de impresión.

5.6.3. Resultados

Una vez realizados los ensayos de tracción de las probetas se obtienen los siguientes resultados, mostrados en las siguientes tablas.

Probetas en posición horizontal	
Ensayos PLA virgen	Carga máxima (kN)
VE-1H	1,96
VE-2H	1,98
VE-3H	2,01
VE-4H	2,01
VE-5H	2,06
Ensayos PLA reciclado	
RE-1H	1,80
RE-2H	1,86
RE-3H	1,84
RE-4H	1,88
RE-5H	1,84

Tabla 37: Resultados para las probetas en posición horizontal (fase III).

Probetas en posición vertical	
Ensayos PLA virgen	Carga máxima (kN)
VE-1V	1,55
VE-2V	1,45
VE-3V	1,53
VE-4V	1,49
VE-5V	1,51
Ensayos PLA reciclado	
RE-1V	1,37
RE-2V	1,31
RE-3V	1,23
RE-4V	1,31
RE-5V	1,33

Tabla 38: Resultados para las probetas en posición vertical (fase III).

Probetas en posición de canto	
Ensayos PLA virgen	Carga máxima (kN)
VE-1C	1,45
VE-2C	1,77
VE-3C	1,73
VE-4C	1,70
VE-5C	1,75
Ensayos PLA reciclado	
RE-1C	1,66
RE-2C	1,63
RE-3C	1,58
RE-4C	1,66
RE-5C	1,60

Tabla 39: Resultados para las probetas en posición de canto (fase III).



Ilustración 34: Probetas PLA virgen sometidas a tracción (fase III).



Ilustración 35: Probetas PLA reciclado sometidas a tracción (fase III).

5.6.4. Análisis de resultados

De la misma forma que en la fase I y fase II, se observa la diferencia de fractura entre el PLA virgen y el PLA reciclado. Para el PLA reciclado, a excepción de las probetas imprimidas en vertical, el resto de ellas sufren una fractura con comportamiento elástico, donde los ensayos se detuvieron un tiempo después de conocer la carga máxima que soportaban. Se comprueba la estricción en la zona de fractura, en el caso de las piezas imprimidas en horizontal formando un pequeño ángulo. En las piezas imprimidas en posición de canto no se observa ángulo formado en la zona de estricción. Las piezas imprimidas en vertical sufren fractura frágil, sin formar ángulo, y en distinta posición dependiendo del caso, desde la zona central en la probeta RE-1V hasta en la zona de agarre como en el caso de RE-2V.

Por otro lado, todas las probetas de PLA virgen sufren fractura frágil en disimilitud del PLA reciclado. Las probetas imprimidas en posición de canto sufren una fractura sin ángulo, además sufren una fractura más agresiva y menos limpia que en el resto de casos. Las piezas imprimidas en posición vertical tienen un comportamiento similar a las probetas de PLA reciclado en la misma posición de impresión, con el mismo tipo de fractura. En el caso de las probetas imprimidas en

horizontal sufren una fractura frágil formando un pequeño ángulo a excepción de la probeta VE-3H y VE-1H.

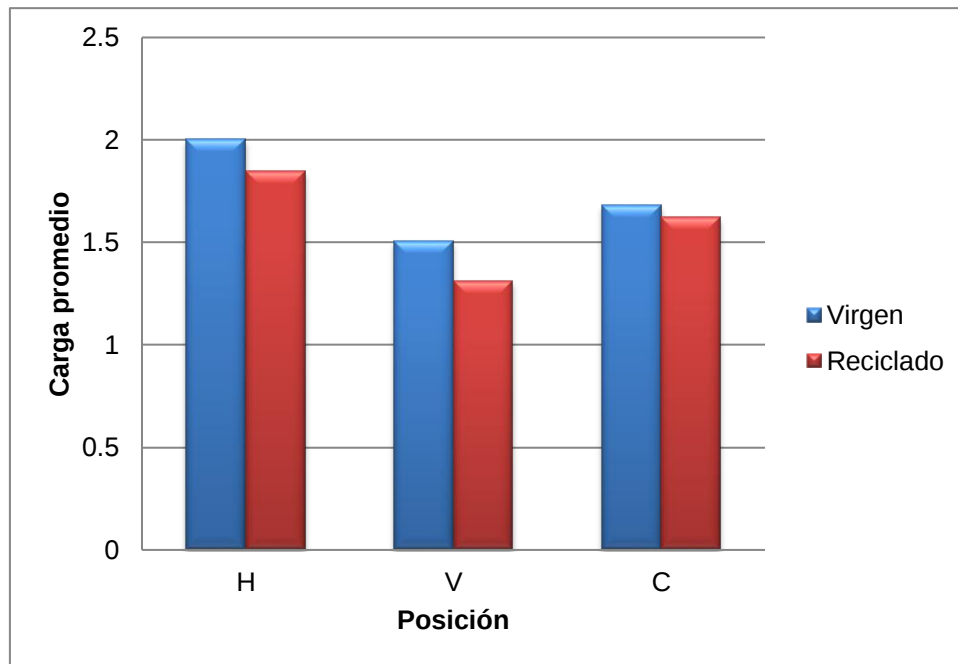
Se realiza el promedio de las cargas máximas obtenidas en cada posición de impresión y para cada material y, a continuación, se calcula la disminución de carga entre materiales para igualdad de posición de impresión mostrándose en la siguiente tabla:

Posición	Promedio PLA virgen (kN)	Promedio PLA reciclado (kN)	Disminución entre material (%)
Horizontal (H)	2,00	1,85	7,91
Vertical (V)	1,51	1,31	12,97
Canto (C)	1,68	1,62	3,37

Tabla 40: Promedio de las cargas obtenidas para cada posición de impresión.

Se comprueba que para el material reciclado se produce una disminución de la carga máxima soportada por las probetas respecto del PLA virgen. Esta disminución es poco apreciable para la posición de canto, con una disminución del 3,37%, lo que indica que el comportamiento de ambos materiales es muy similar y soportan casi la misma carga. Sin embargo, para la posición vertical se acentúa esta disminución en una proporción del 12,97%, lo que supone aproximadamente una disminución cuatro veces mayor con respecto a la posición de canto. Para la posición horizontal se produce una disminución del 7,91%, comprendida entre la posición vertical y de canto, siendo una disminución poco significativa.

Por otro lado, comparando para un mismo material diferentes posiciones de impresión, se comprueba que para el PLA virgen, se produce una disminución de la carga con respecto de la posición horizontal de 24,89% en el caso de la posición vertical y un 16,17% en el caso de la posición de canto. Para el caso del PLA reciclado, la disminución es del 29,09% para la posición vertical, valor superior que se obtiene respecto al PLA virgen. Sin embargo, en el caso de la posición de canto, la disminución es del 12,04%, valor inferior con respecto al que se obtiene en el PLA virgen.



Gráfica 8: Comparación de la carga media obtenida en cada posición de impresión para cada material.

En la gráfica 8 se observa la comparación de la carga promedio para cada posición y para cada material, viendo por tanto que no se produce una disminución importante de la carga promedio entre ambos materiales excepto en el caso de la posición vertical y en cierta medida para la posición horizontal.

De la misma manera, observando la gráfica 8 se reconoce la diferencia de carga máxima soportada dependiendo de la posición de impresión, comprobándose que la posición horizontal es la posición en la que más carga soportan las probetas, seguida de la posición de canto y, por último, de la posición vertical, que es la posición que menos carga soportan las probetas. Como consecuencia, la posición horizontal es idónea para obtener solicitudes de carga altas en servicio durante la vida útil. Se encuentra como ventaja para la posición horizontal y de canto, que en ambas posiciones se puede reducir la densidad de las piezas en cierta medida, lo que supone un ahorro de material y, aun así, se tendría una pieza más resistente que con una pieza imprimida en posición vertical y con una densidad mayor, lo que supone un ahorro de material y de costos. Por otro lado, la posición de canto es la posición más adecuada para la sustitución de materiales convencionales por reciclados, ya que es la posición en la que menor pérdida de carga se produce entre ambos materiales.

De esta manera se llega a las siguientes conclusiones:

- La posición de impresión influye en las propiedades mecánicas de las probetas, obteniéndose la mayor carga para la posición horizontal, seguido de la posición de canto y vertical respectivamente.
- El PLA reciclado soporta menor carga que el PLA virgen, aunque esta disminución no es muy significativa a excepción de la posición vertical. Por tanto, el PLA reciclado tiene unas propiedades mecánicas cercanas a las del PLA virgen, haciendo de los materiales reciclados, materiales adecuados para llevar a cabo una fabricación sostenible.

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

En la actualidad, el alto consumo de la sociedad y la industria conlleva la generación de gran cantidad de contaminación y de residuos, siendo una amenaza para el medio ambiente y la salud. Por lo tanto, la sostenibilidad es un problema que no se puede obviar. La implementación de la impresión 3D en la industria y su creciente desarrollo se erige como un método de fabricación para reducir costes y consumos, pero también genera residuos y emisiones contaminantes. Para disminuir estos residuos, se debe optimizar el proceso de fabricación para obtener las mejores propiedades mecánicas al menor consumo mediante el estudio de los parámetros de impresión y, también, seleccionar materiales respetuosos con el medio ambiente o, cuando menos, con un impacto ambiental reducido.

En el presente TFG se expone un estado del arte sobre la fabricación aditiva y un experimento dividido en tres fases para el estudio de los parámetros más influyentes en la carga máxima en probetas obtenidas por impresión 3D tanto con materiales convencionales (PLA virgen) como con materiales reciclados (PLA reciclado). De esta forma, se ha llegado a las siguientes conclusiones en referencia al estado del arte y al experimento, que se desarrollan a continuación.

6.1.1. Conclusiones del estado del arte

- La producción sostenible ha ido ocupando un papel de relevancia tanto a nivel académico como industrial, impulsado por una creciente concienciación social. La fabricación sostenible es un modo de fabricación necesario para reducir el consumo de recursos, materia prima y contaminación.
- La impresión 3D es un método de fabricación que permite reducir la generación de residuos, donde la mayoría del coste proviene del uso de materia prima.
- El reciclaje es una vía prometedora para evitar el consumo de materias primas.

- La biomasa comprende la materia prima renovable más abundante de la Tierra, mostrando un potencial prometedor como alternativa a los recursos fósiles. Además, pueden ser aplicados en muchas áreas como salud, aeronáutica y espacio, automoción, moda, etc.
- En impresión 3D, las propiedades mecánicas de las piezas dependen de un gran número de parámetros, que deben ser estudiados para optimizar el proceso.
- Los materiales reciclados como el PLA tienen unas propiedades mecánicas ligeramente inferiores a las materias primas, aunque existen métodos de post-procesado para mejorar estas propiedades.

6.1.2. Conclusiones del experimento

- La realización previa de un diseño de experimentos y un análisis estadístico posterior permite estudiar la influencia de algunos parámetros en la impresión 3D en relación a la carga máxima y obtener resultados y conclusiones objetivas.
- La densidad de relleno es el factor más influyente en la carga máxima tanto para el PLA virgen como para el PLA reciclado.
- La altura de capa, patrón de relleno y velocidad de impresión no son influyentes para la carga máxima.
- El comportamiento de la fractura es diferente en el PLA virgen y el PLA reciclado.
- La combinación de ambos materiales revela que la densidad de relleno es el factor más influyente en la carga máxima para la variabilidad total con un 97,31% y que el tipo de material influye en un 1,23%. Esto indica que los materiales reciclados son aptos para la sustitución de los materiales convencionales.
- El modelo obtenido de la influencia de la densidad sobre la carga máxima genera dos zonas distintas. Una zona A para densidades entre 40% y 85%, y otra zona B para densidades de 85% y 100%. Además, la pérdida de carga máxima entre el PLA y el PLA reciclado es escasa, con un valor entre el 3% y el 7%.

- La posición de impresión condiciona la carga máxima soportada, siendo la posición horizontal la posición más favorable. La posición vertical es la más desfavorable. La pérdida de carga entre ambos materiales es alrededor del 3,37% para la posición horizontal, 12,97% para la posición vertical y 7,91% para la posición de canto.
- El PLA reciclado es un material idóneo para llevar a cabo una fabricación sostenible y reducir el consumo de materias primas. Aunque soporta menor carga máxima que el PLA, estas pérdidas son poco influyentes a excepción de la posición vertical de impresión.

6.2. Trabajos futuros

Se presentan algunas líneas de actuación para trabajos futuros, ya que el área de conocimiento expuesto en este TFG es extensa y con un ágil desarrollo.

- Estudio de otros parámetros que puedan influir en la carga máxima en impresión 3D.
- Estudio en más profundidad de la fractura producida en el PLA reciclado.
- Experimentar en impresión 3D con otros materiales reciclados u obtenidos con biomasa y conocer la carga máxima soportada.
- Someter piezas obtenidas por fabricación aditiva a tratamientos de degradación para conocer cómo afecta en las propiedades mecánicas.
- Realización de ensayos de choque y compresión para conocer cómo afectan los parámetros estudiados a otras propiedades mecánicas.

Bibliografía

Alafaghani A., Qattawi A. (2018). *Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method*. Journal of Manufacturing Processes 36, 165-174.

Altan M., Eryildiz M., Gumus B., Kahraman Y. (2018). *Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength*. Materials Testing 60, 471-477.

Ashby M., Johnson K. (2010). *Material profiles*. En *Materials and design* Oxford: Butterworth-Heinemann. Second ed., págs. 194-249.

ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2A: Advanced Manufacturing, Houston, Texas, USA.

Balletti C., Ballarin M., Guerra F. (2017). *3D printing: State of the art and future perspectives*. Journal of Cultural Heritage 26, 172-182.

Berman B. (2012). *3-D printing: the new industrial revolution*. Bus Horiz 2012:55(2):155-162.

Bhatia S., Ramadurai K. (2017). *3D Printing and Bio-Based Materials in Global Health* Springer International Publishing AG, Switzerland.

Bischel MS. (2016). *Moving beyond single attributes to holistically assess the sustainability of materials (Chapter 2)*, in *Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material*, edited by Mrityunjay Singh, Tatsuki Ohji and Rajiv Asthana, Elsevier, Oxford, 11–29.

Boschetto A., Bottini L., Veniali F. (2016). *Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 41, 92-101.

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.

Campbell T. A., Ivanova O. S. (2013). *3D printing of multifunctional nanocomposites*. Nanotoday, 8(2), 119-120.

Chacon J., Caminero M., Garcia-Plaza E., Nunez P. (2017). *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. Materials & Design 124, 143–157.

Chua C., Wong C., Yeong W. (2017). *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. Chapter One-Introduction to 3D Printing or Additive Manufacturing. Pages 1-29.

Columbus L. (2017). *The-state-of-3d-printing*. Forbes.com, página web, última visita 18/06/2019.

Cruz F., Boudaoud H., Hoppe S., Camargo M. (2017). *Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues*. Additive Manufacturing 17, 87-105.

Davis A. (2015). *Layer by layer. The evolution of 3D printing*.

Filament2print.com. (2019), Página web, última visita 18/6/2019.

Ford S., Despeisse M. (2016). *Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges*. Journal of Cleaner Production 137, 1573-1587.

Gibson I., Rosen I. D. W., Stucker I. B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*.

ISO 10303-238 (ISO 10303-238: 2002). Industrial automation systems and integration: Standard for the Exchange of Product data models.

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

ISO 527-2 (ISO 527-2: 2012). *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión*.

Javaid M., Haleem A. (2018). *4D printing applications in medical field: a brief review*. Clinical Epidemiology and Global Health.

Kumar R., Singh R. (2018). *Prospect of Recycling of Plastic Product to Minimize Environmental Pollution*. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11302-5.

Kumar R., Singh R., Farina I. (2018). *On the 3Dprinting of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications*. PSU Research Review Vol. 2, 115-137.

Lechter T., Rankouhi B., Javadpour S. (2015). *Experimental study of mechanical properties of additively Manufactured ABS plastic as a function of layer parameters*.

Lin W., Shen H., Xu G., Zhang L., Fu J., Deng X. (2018). *Single-layers temperature-adjusting transition method to improve the bond strength of 3D-printed PLC/PLA parts*. Composites Part A, 115, 22-30.

Liu J., Sun L., Xu W., Wang., Yu S., Sun J. (2018). *Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers*. Carbohydrate Polymers 207, 297-316.

Mitchell A., Lafont U., Hołyńska M., Semprimoschnig C. (2018). *A review of 4D printing and future applications*. Additive manufacturing 24, 606-626.

Momeni F., Hassani S., Ni J., Liu X. (2017). *A review of 4D printing*. Materials & Design 122, 42-79.

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

Moussaoui K., Rubio W., Mousseigne M., Sultan T., Rezai F. (2018). *Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties*. Materials Science & Engineering A, 735, 182-190.

Mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006225.pdf. (2019). Página web, última visita 18/6/2019.

Noorani (2018). *3D Printing*. Editorial CRC Press.

O'Brien C. (1999). *Sustainable production - a new paradigm for a new millennium*. International Journal of Production Economics, 60-61, 1-7.

Oropallo W., Piegler L. A. (2016). *Ten challenges in 3D printing*. Engineering with Computers 32, 135–148.

Peng T., Kellens K., Tang R., Chen C., Chen G. (2018). *Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact*. Additive Manufacturing 21, 694–704.

Pérez M. (2018). *Análisis comparativo de la calidad superficial de piezas fabricadas mediante mecanizado y fabricación aditiva*. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Jaén.

Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciuc F., Marinescu R. (2018). *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*. Polymer Testing 69, 157-166.

Price T. (2016). *A Brief History of 3D Printing*.

Rietzel D., Friedrich M., Osswald T.A. (2017). Additive Manufacturing. En Tim A. Osswald (Ed. 2). *Understanding Polymer Processing* Editorial: Hanser, 147-169.

Romero S. (2017). *Estudio Comparativo de los Métodos de Fabricación Aditiva para el Titanio y sus Aleaciones*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.

Sehdev M., Thapliyal H., Sharma A. (2017). *3D Printing for manufacturing of biodegradable products*. Department of Mechanical Engineering.

Singh R., Singh H., Farina I., Colangelo F., Fraternali F. (2019). *On the additive manufacturing of an energy storage device from recycled material*. Composites Part B 156, 259–265.

Song Y., Li Y., Song W., Yee K., Lee K.-Y., Tagarielli V.L. (2017). *Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA*. Materials & Design 123, 154-164.

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

Thompson MK., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell RI., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F. (2016). *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 65, 737–760.

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

UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 (2017). *Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología*. ISO.

Wohlers T. (2017). *3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Annual Worldwide Progress.

Yao T., Deng Z., Zhang K., Li S. (2019). *A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations*. Composites Part B, 163, 393-402.

Zhao P., Rao C., Gu F., Sharmin N., Fu J. (2018). *Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment*. Journal of Cleaner Production 197, 1046-1055.

Zhao X., Hwang K., Lee D., Kim T., Kim N. (2018). *Enhanced mechanical properties of self-polymerized polydopamine-coated recycled PLA filament used in 3D printing*. Applied Surface Science 441, 381-387.