



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE FABRICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DESARROLLO DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN ADITIVA
EMPLEANDO FABRICACIÓN MEDIANTE EXTRUSIÓN DE
PLÁSTICOS EN FORMATO GRANZA**

D. Marqués Bada, Raúl

TUTOR UNIVERSITARIO: D. Blanco Fernández, David

TUTOR EN LA EMPRESA: D. García García, Manuel Antonio

FECHA: julio de 2022

Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estructura de la memoria.....	2
2	Estado del arte.....	5
2.1	Industria 4.0.....	8
2.1.1	Interconectividad.....	9
2.1.2	Sistemas ciber-físicos.....	9
2.1.3	Big Data.....	10
2.1.4	Cloud Computing.....	10
2.1.5	Realidad aumentada.....	11
2.1.6	Visión artificial.....	11
2.1.7	Robótica colaborativa.....	12
2.1.8	Fabricación aditiva.....	12
2.2	Un nuevo modelo de fabricación.....	12
2.2.1	Cadena de proceso.....	14
2.2.2	Libertad de diseño.....	18
2.2.3	Materiales de aplicación.....	19
2.2.4	Tamaño de lote.....	20
2.2.5	Residuos generados.....	21
2.2.6	Carácter legislativo.....	21
2.3	Técnicas de fabricación aditiva.....	22
2.3.1	Material Extrusion o Extrusión de Material.....	23

2.3.2	Binder Jetting o Inyección de Aglutinante	24
2.3.3	Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo.....	25
2.3.4	Sheet Lamination o Laminado de Hojas.....	26
2.3.5	VAT Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba.....	27
2.3.6	Directed Energy Deposition o Deposición de Energía Directa (DED)	28
2.3.7	Material Jetting o Proyección de Material.....	29
2.4	Aplicaciones de la fabricación aditiva	29
2.4.1	Sector aeroespacial	30
2.4.2	Sector médico	31
2.4.3	Sector de la automoción	33
3	Extrusión de material.....	34
3.1	Extrusión de material	34
3.1.1	Fabricación por Filamento Fundido (FFF).....	36
3.1.2	Fused Particle Fabrication (FPF).....	38
3.2	Polímeros	41
3.2.1	Termoplásticos	41
3.2.2	Termoestables.....	44
3.2.3	Elastómeros	45
3.3	Componentes de máquina.....	46
3.3.1	Configuraciones de impresora 3D	46
3.3.2	Elementos estructurales	49
3.4	Parámetros de proceso	51
3.4.1	Altura de capa.....	53
3.4.2	Características de una capa.....	54
3.4.3	Orientación de la impresión.....	56

3.4.4	Velocidad de impresión	58
3.4.5	Temperaturas de impresión	58
3.4.6	Características adicionales.....	59
4	Estudio experimental	61
4.1	Materiales de estudio	61
4.1.1	PLA.....	61
4.1.2	PET	62
4.1.3	Lexan	63
4.1.4	Luvocom.....	64
4.1.5	Alúmina	65
4.1.6	Nylon	67
4.2	Diseño de experimentos.....	67
4.2.1	Impresora 3D	68
4.2.2	Parámetros de proceso	69
4.2.3	Experimentos iniciales.....	74
4.2.4	Probetas según normativa internacional	77
4.2.5	Ángulo máximo de inclinación	92
4.2.6	Otros diseños de probetas	93
5	Experimentos	95
5.1	Desarrollo de experimentos	95
5.1.1	Planificación de experimentos.....	95
5.1.2	Cronología de experimentos.....	98
5.2	Proceso de optimización de parámetros.....	99
5.2.1	PLA.....	100
5.2.2	PETG	103

5.2.3	Lexan	105
5.2.4	Alúmina	115
5.2.5	Luvocom.....	122
5.2.6	Nylon	128
5.2.7	PET Reciclado	132
6	Resultados y perspectiva de futuro.....	137
6.1	Parámetros de proceso	137
6.1.1	PLA.....	137
6.1.2	PETG	139
6.1.3	Lexan	140
6.1.4	Alúmina	141
6.1.5	Luvocom.....	141
6.1.6	Nylon	142
6.1.7	PET reciclado	144
6.2	Guías de diseño.....	145
6.3	Perspectiva de futuro	149
7	Planificación y presupuesto.....	151
7.1	Planificación	151
7.2	Presupuesto	155
7.2.1	Costes directos.....	155
7.2.2	Tabla de presupuesto	157
8	Referencias	¡Error! Marcador no definido.
Anexos	II
A1	Resultados experimentales del PLA.....	II
A2	Resultados experimentales del PETG virgen	V

A3 Resultados experimentales del Lexan..... IX

A4 Resultados experimentales de la alúmina.....XIV

A5 Resultados experimentales del Luvocom XV

A6 Resultados experimentales del Nylstrong.....XIX

A7 Resultados experimentales del PET reciclado.....XXIV

Tabla de abreviaturas

Sigla	Término
AM	Additive Manufacturing (Fabricación Aditiva)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
CAD	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Ordenador)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Sinterizado por Láser)
FDM	Fused Deposition Modelling (Modelado por Deposición Fundida)
FFF	Fused Filament Fabrication (Fabricación por Filamento Fundido)

FPF	Fused Particle Fabrication (Fabricación por Partículas Fundida)
I2OT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización)
PETG	Poliéster de glicol
PLA	Ácido Poliláctico
PR	Prototipado Rápido
SL	Stereolithography (Estereolitografía)
STL	Estándar Tessellation Language (Lenguaje Estándar de Teselación)
UNE	Una Norma Española

1 Introducción

Las tecnologías de fabricación aditiva se han erigido como un nuevo campo de desarrollo con aplicaciones excepcionales en la industria actual. La fabricación aditiva persigue paliar las desventajas de las tecnologías de fabricación convencionales y complementarlas. En este estudio, se establece el foco de atención en las tecnologías de fabricación aditiva y se realiza simultáneamente un análisis experimental de la aplicabilidad de distintos materiales poliméricos técnicos a través de una tecnología emergente, la fabricación aditiva de pellets.

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de la fabricación aditiva a finales del siglo XX, esta tecnología se ha convertido en un pilar fundamental en el desarrollo y la implementación de la Industria 4.0, una revolución industrial basada en la compartición de la información para aumentar la productividad, flexibilidad y eficiencia de los centros de producción. La fabricación aditiva se fundamenta en la creación o manufactura de piezas mediante el apilamiento de capas de material sobre un estrato, conformando la pieza final.

Según los estándares internacionales sobre fabricación aditiva, existen un total de 7 clases de tecnología, cada una explotando unas características particulares de los materiales a procesar. La variedad en la aplicación de estas tecnologías es muy diversa, desde el sector médico hasta tecnología punta en automovilismo y el sector aeronáutico. Sin embargo, el nicho de mercado es aún reducido debido a la novedad de la tecnología y el poco “know-how” existente. Además, aún no existe un campo normativo lo suficientemente amplio, lo cual dificulta la entrada de nuevos agentes en la fabricación aditiva.

El desarrollo y la investigación están a la orden del día en un sector novel que persigue ser un actor complementario a la fabricación convencional. Pese al potencial de utilización de cualquier tipo de material (desde materiales poliméricos hasta cerámicos y metálicos), solo se emplean actualmente un bajo número de compuestos. La innovación y el desarrollo persiguen aumentar el espectro de materiales de empleo y, por tanto, los sectores industriales de aplicación.

1.2 OBJETIVOS

Las tecnologías de fabricación aditiva se caracterizan por tener un potencial teórico de procesamiento de cualquier tipo de material, desde polímeros hasta metales, pasando por materiales compuestos y cerámicos. Sin embargo, aún no se ha alcanzado un estado de madurez tal, en el que el rango de materiales disponibles es alto. Actualmente, solo están al alcance de la mano la fabricación de piezas en aleaciones metálicas de acero, aluminio o titanio, materiales poliméricos como la poliamida o policarbonatos, y ciertos materiales cerámicos, como la alúmina. El objetivo de este estudio reside en explotar la potencialidad de esta tecnología y desarrollar un procedimiento y una guía para la incorporación de materiales técnicos a la industria mediante la naciente tecnología conocida como fabricación aditiva de pellets.

Las características inherentes de la fabricación aditiva reducen considerablemente los residuos de la fabricación. Esto permite una disminución en el impacto medioambiental del sector de la manufactura. Asimismo, la fabricación aditiva permite la reciclabilidad de los materiales utilizados, lo que conlleva nuevamente una disminución del impacto medioambiental del sector industrial.

En resumen, el objetivo de este estudio reside en estudiar la empleabilidad de diferentes materiales poliméricos, convencionales o técnicos, e indagar y experimentar con la reciclabilidad de desechos, favoreciendo así la economía circular. La fabricación aditiva de pellets permite explotar las características anteriormente detalladas, creando asimismo un camino para desarrollos futuros en una tecnología en auge.

1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria está dividida en un total de 6 apartados, focalizado cada uno de ellos en diferentes temas de estudio: revisión histórica de la fabricación y la industria, FDM como tecnología de fabricación aditiva, planteamiento del estudio experimental, experimentación en laboratorio, y resultados, conclusiones y perspectiva de futuro.

En el apartado 2 de esta memoria, se realiza un estudio sobre la evolución de la industria y la fabricación a lo largo de la historia, destacando las ventajas e inconvenientes de las tecnologías

existentes y que, progresivamente, fueron impulsando cambios, desde la primera revolución industrial hasta la industria 4.0. Se describirá el contexto actual de la industria y los motivos por los cuáles la fabricación aditiva ha cobrado tanta relevancia en los últimos años. A continuación, se establece una comparativa entre la fabricación convencional y la fabricación aditiva, destacando las ventajas e inconvenientes de cada una y las virtudes a explotar en las nuevas tecnologías desarrolladas. Asimismo, se describirán los estándares internacionales existentes relativos a la fabricación aditiva y la necesidad explícita de la investigación y desarrollo para un uso extensivo en la industria.

En el apartado 3, se hará hincapié en una de las clases de fabricación aditiva diferenciadas por la normativa internacional, el moldeo por deposición fundida (FDM). Se describirán los fundamentos técnicos de la tecnología, las consideraciones previas para el procesamiento de materiales y los parámetros de proceso a considerar para la correcta calibración, preparación y puesta a punto de la máquina y la fabricación. Asimismo, se establece una diferencia entre las tres categorías englobadas como tecnologías FDM. El estudio se centrará en la tecnología Fused Granular Fabrication (FGF) o Fused Particle Fabrication (FPF), cuya denominación en español es fabricación de partículas fundidas o fabricación aditiva de pellets. Se describen también las consideraciones previas necesarias para que un material tenga el potencial de ser procesado a través de esta técnica y se detallan los aspectos estructurales de mayor relevancia en la construcción de la maquinaria.

En el apartado 4 se especifica detalladamente el diseño de experimentos realizado para conseguir los objetivos planteados durante la ejecución de este estudio. De esta forma, se describe inicialmente los materiales a procesar, así como sus características y el nivel de relevancia en la industria; a continuación, se indican las probetas diseñadas para la optimización de los parámetros de proceso; y, en último lugar, se incluye la normativa internacional ISO 52902, cuya finalidad persigue la caracterización de las capacidades de proceso de las tecnologías de fabricación aditiva.

El apartado 5 recoge una guía de los pasos realizados hasta la optimización de los parámetros para el procesamiento de los distintos materiales detallados. Asimismo, se incluyen los inconvenientes y dificultades encontrados durante el proceso. Además, se establece una

comparativa entre la planificación inicial de experimentos y el resultado final, destacando las variaciones implementadas en función de la experiencia obtenida a lo largo del programa de fabricación.

El apartado número 6 resume los hallazgos y recomendaciones registradas durante la etapa experimental. Igualmente, se establecen las guías de diseño y parametrías óptimas para cada material de estudio. En último lugar, se describe un conjunto de ensayos y experimentos a realizar en etapas futuras.

2 Estado del arte

La fabricación o manufactura se define como el conjunto de procesos para convertir materias primas en productos finales, confiriéndoles un valor añadido a la materia y otorgándoles unas características singulares para una actividad determinada [1].

La fabricación es más antigua que la historia registrada. Las actividades de caza, agricultura y ganadería de las primeras civilizaciones humanas se pueden considerar como los primeros vestigios de fabricación. Mediante la utilización de materias primas de la naturaleza y realizando procesos manuales de transformación, se otorgaba una forma específica a las piezas con el objetivo de realzar sus propiedades y servir como apoyo en las actividades diarias. De hecho, las épocas prehistóricas son nombradas gracias al descubrimiento de nuevos materiales y la fabricación de nuevos utensilios. No obstante, no es hasta la edad moderna que los conceptos de fabricación, manufactura y producción comienzan a extenderse, gracias a la designada como Primera Revolución Industrial [1].

A mediados del siglo 18 se dieron en Inglaterra las condiciones socioeconómicas, políticas y geográficas que darían lugar a un proceso de transformación en todos los niveles. A esta transformación se la conoce como la Primera Revolución Industrial (1760-1840) [2] y fue impulsada gracias al desarrollo de máquinas que permitían la conversión de energía térmica en energía mecánica. En 1769, James Watt patentó la máquina de vapor en la Oficina de Patentes de Reino Unido [3]. James Watt introdujo numerosos avances a los diseños previos de Thomas Newcomen, y se le concedió la autoría como inventor de la máquina de vapor. Este descubrimiento marcó el comienzo de una época de desarrollo socioeconómico liderado por el uso intensivo de combustibles fósiles, capaces de sustituir parcialmente la labor humana y provocando un aumento en la eficiencia de las fábricas. La explotación de recursos fósiles como el carbón dio lugar a una disminución de talleres artesanales, que se convirtieron en grandes centros fabriles. Es el caso de las industrias textil y alimentaria. El aumento en las necesidades de combustibles fósiles dio lugar a un impulso en la minería y los medios de transporte, como el ferrocarril o el barco [2, 4, 5].

Los avances alcanzados en la Primera Revolución Industrial fueron ganando relevancia progresivamente en otros puntos del mundo. De esta manera, a mediados del siglo XIX tuvo lugar la Segunda Revolución Industrial (1870-1914), cuyo epicentro fue el continente europeo, junto con Estados Unidos y Japón [6]. Los avances tecnológicos y científicos comenzaron a tener un cariz más complejo. Materiales hasta entonces poco manejables comienzan a cobrar importancia. Es el caso de metales como el acero, el zinc, el aluminio o el cobre; productos químicos como la sosa, colorantes artificiales o material explosivo. Pero el avance de mayor peso en toda esta época fue el descubrimiento de la electricidad y su potencial de uso como vector energético. A principios del siglo XIX, físicos experimentales como Gauss y Faraday consiguieron establecer las bases teóricas de la electricidad. En 1865, el matemático y científico escocés James Clerk Maxwell [7] acopló en una sola teoría las ecuaciones del campo eléctrico y magnético, describiendo los procesos de producción e interrelación entre ellos y habilitando así su explotación. La electrificación de ciudades comenzó a finales del siglo XIX, cuando la tecnología de producción masiva de electricidad había alcanzado cierta madurez. La primera central eléctrica española se construyó en el año 1875, en Barcelona [8]. Los científicos más brillantes de la época desarrollaron tecnologías como la bombilla o los motores eléctricos, que favorecieron el aumento en la eficiencia de los centros industriales y la producción en masa [9–11]. El ferrocarril experimentó un gran boom constructivo y fue el símbolo principal de la época. En el año 1840, en Europa había una longitud total de vía construida de 4000 kilómetros; 30 años más tarde, se superaron los 100.000 kilómetros, un incremento del 2500% [12]. En esta época también se difundió la explotación de nuevos recursos fósiles como el petróleo, apodado popularmente como el oro negro.

El comienzo de la Tercera Revolución Industrial (mediados del siglo XX hasta principios del siglo XXI) está marcado por el desarrollo de los primeros ordenadores y la expansión y accesibilidad en las tecnologías de la información y la comunicación [13]. Los avances en electrónica perseguían una automatización completa de las plantas fabriles mediante la inclusión de autómatas programables, robots, redes cableadas de comunicaciones y ordenadores. Adicionalmente, los nuevos avances pretenden establecer un modelo económico y social más ecológico reduciendo el consumo de recursos fósiles e impulsando las energías renovables. En 1985 se inaugura en las cercanías de Madrid la primera central solar fotovoltaica, con una

potencia total instalada de 100kW [14]. Por su parte, el primer parque eólico se construyó en 1984, en Garriguella, municipio de Gerona [15]. Las primeras acciones legales sobre la lucha contra el cambio climático datan del año 1972, con el primer debate en el seno de las Naciones Unidas acerca del medioambiente y el desarrollo [16]. El sociólogo y economista Jeremy Rifkin basó sus investigaciones en el impacto de los cambios científicos y tecnológicos sobre la economía, la sociedad y el medio ambiente. Su publicación *El fin del trabajo* [17] estableció los pilares básicos a alcanzar tras la tercera revolución industrial:

- Impulso de las energías renovables
- Utilización de los edificios como puntos de microgeneración de energía limpia
- Almacenamiento de energía a gran escala
- Uso de Internet como modelo de distribución energética
- Transición a vehículos ecológicos

Actualmente, está teniendo lugar una transición hacia la cuarta revolución industrial o Industria 4.0, cuyo objetivo persigue difuminar las fronteras entre los mundos real y virtual, favoreciendo la productividad, eficiencia y rendimiento del sector industrial. Esta revolución es posible gracias al avance y explotación de las tecnologías de la información.

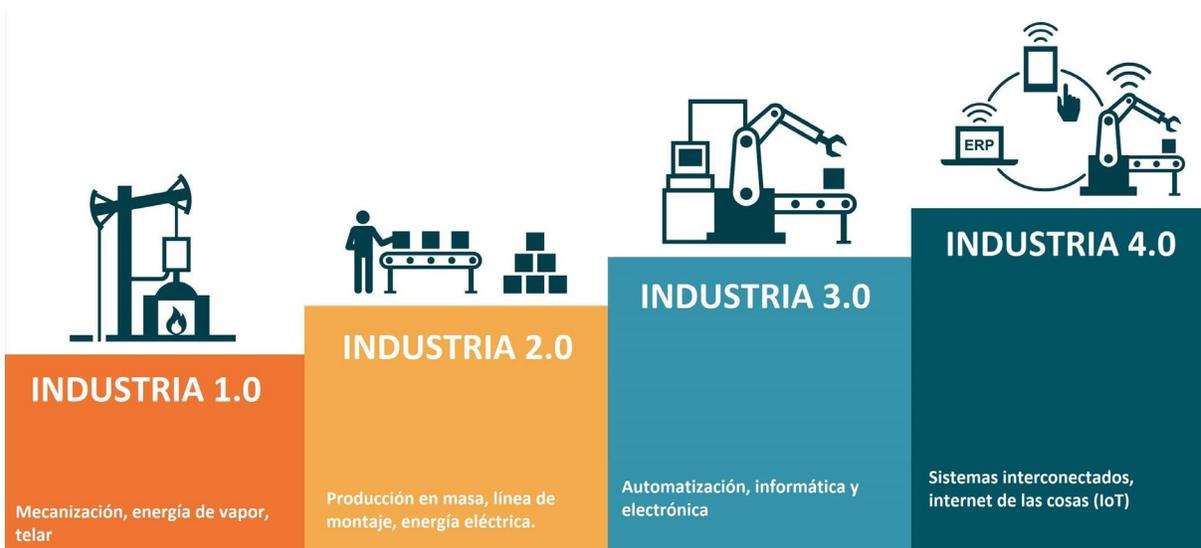


Ilustración 2.1. Tecnologías habilitadoras de las revoluciones industriales [2, 6, 13]

2.1 INDUSTRIA 4.0

La industria 4.0 se define como la transformación digital de los procesos de fabricación y producción, industrias relacionadas y procesos de creación de valor [18]. El término Industria 4.0 fue acuñado por el gobierno alemán en el año 2012 para describir la fábrica inteligente, cuyo objetivo persigue informatizar e interconectar todos los elementos de la cadena de proceso a través del Internet de las cosas [19].

La nueva revolución se cimenta sobre 5 fundamentos clave:

1. Colaboración máquina-humano
2. Fabricación flexible
3. Instalaciones autónomas
4. Información en tiempo real
5. Vínculo entre lo virtual y lo real

Alcanzar todas estas metas es de alta complejidad y el desarrollo de las tecnologías y la evolución de las fábricas aún es prematura, pese a que se están dando grandes pasos. El núcleo de la revolución se encuentra en el aprovechamiento del Internet de las Cosas (IoT). El I2oT (concepto aplicado a la industria) consiste en la interconexión, comunicación e intercambio de información entre productos, máquinas, procesos, sistemas y personas a lo largo de toda la cadena de valor [4]. La conectividad entre todos los estamentos involucrados en la cadena de producción de bienes y servicios requiere de la aparición de nuevas tecnologías habilitadoras, que se erigen como los pilares fundamentales de la Industria 4.0 [18].

A continuación, se describen las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, así como aplicaciones actuales de las mismas y sus potenciales de desarrollo [4, 5, 18].

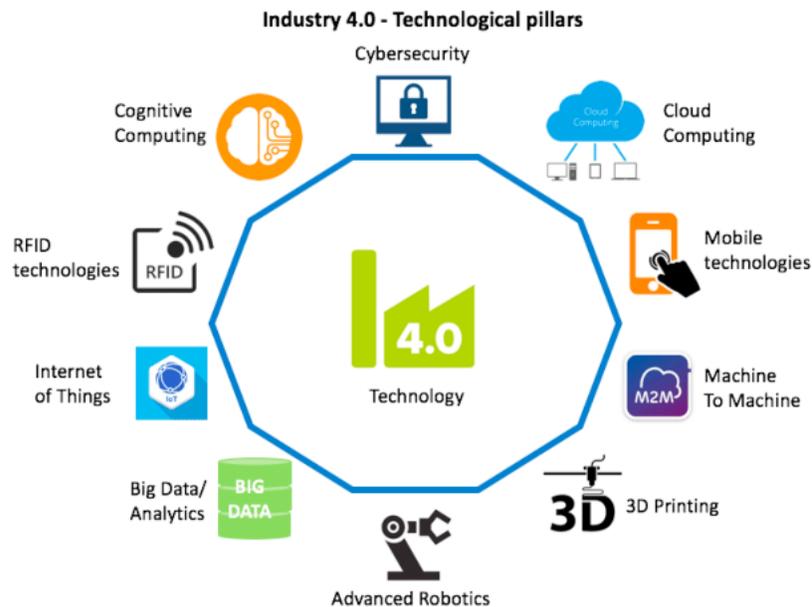


Ilustración 2.2. Pilares tecnológicos de la industria 4.0 [4, 5, 18]

2.1.1 Interconectividad

Se conoce por interconectividad a toda la estructura técnica requerida para el intercambio constante de datos e información relevante entre todos los estamentos de la cadena de valor de la industria. La interconectividad es clave para la integración de la Industria 4.0 y requiere de un uso intensivo de chips con radiofrecuencia capaces de conectarse a Internet y enviar los datos registrados. Los elementos con capacidad para enviar y recibir información son: máquinas, productos, operarios, operaciones de transporte, empresas de suministro, servicios de post venta y mantenimiento, etc. Las fábricas inteligentes se fundamentan en tener el mayor conocimiento posible de las variables que puedan afectar a la calidad de las tareas realizadas [4]. Un ejemplo del uso de la interconectividad consiste en el seguimiento de los envíos por parte de las empresas de paquetería. La inclusión de códigos permite al usuario realizar un seguimiento del estado del paquete, facilitando asimismo estimaciones de la llegada.

2.1.2 Sistemas ciber-físicos

Se conoce por sistema ciber-físico al mecanismo controlado por algoritmos basados en computación y estrechamente integrados con Internet, que fusionan los procesos físicos, tecnologías informáticas y tecnologías de la comunicación. El objetivo del sistema ciber-físico

consiste en generar una descripción virtual a cada producto, facilitando la comunicación y la toma de decisiones por parte de los algoritmos informáticos. Por tanto, los sistemas ciber-físicos apuntan a la integración óptima de los mundos real y virtual [18].

2.1.3 Big Data

El término Big Data se utiliza para denominar a la inmensa cantidad de datos recopilados por los sensores durante la producción en una fábrica. El Big Data está caracterizado por las propiedades 3V: volumen, velocidad y variedad [20]. Por un lado, en una empresa se generan grandes cantidades de datos, que habitualmente no se encuentran estructurados. Por otro lado, el flujo de datos o la velocidad a la que se obtienen es muy alta (los sensores pueden llegar a registrar datos a frecuencias superiores a 1200 Hz). Y, en tercer lugar, los datos son muy variados. Las herramientas convencionales de datos no están preparadas para gestionar, registrar y filtrar tantas variables simultáneamente.

Extraer información relevante del Big Data es básico para avanzar en la producción y adaptarse a los cambios del entorno. Una de las aplicaciones consiste en el mantenimiento predictivo; a partir de datos actuales del proceso y registros históricos, se puede prever cuándo se requerirá una parada de mantenimiento en el sistema, disminuyendo así los tiempos no productivos y sus costes asociados. Otro ejemplo consiste en el machine learning [20]. El Machine Learning se basa en algoritmos informáticos que dotan a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones [18].

2.1.4 Cloud Computing

En estrecha relación con el Big Data, el Cloud Computing es una herramienta capaz de administrar los datos de la empresa, utilizando los grandes volúmenes de datos registrados y poniendo a disposición de los usuarios aquella información relevante. De esta forma, la información está capada para el usuario en base a su posición dentro de la cadena de valor. La computación en la nube es una tecnología que permite acceso remoto a softwares, almacenamiento de archivos y procesamiento de datos a través de Internet, actuando como una alternativa a la ejecución en un ordenador personal o servidor local [18].

2.1.5 Realidad aumentada

Conjunto de tecnologías que permiten al usuario visualizar parte del mundo a través de un dispositivo tecnológico con información gráfica añadida. El dispositivo examina inicialmente el espacio de trabajo y, mediante inteligencia artificial, identifica los elementos que el usuario está visualizando. A partir de esta información y mediante la gestión de referencias, el dispositivo muestra datos relevantes para mejorar el proceso de producción. Por tanto, la realidad aumentada permite superponer elementos virtuales sobre la visión de la realidad del usuario [21]. Esta nueva tecnología es un punto clave a la hora de formar nuevos trabajadores en labores de mantenimiento o ensamblaje. Airbus actualmente utiliza realidad aumentada en la etapa de montaje de los aviones A330neo como herramienta de ayuda para los operarios. De esta manera, han reducido el uso de complejos dibujos técnicos y, un trabajo que anteriormente requería tres operarios y 3 días, actualmente precisa de un operario y 6 horas de trabajo [22].

2.1.6 Visión artificial

La visión artificial se define como la disciplina científica encargada de adquirir, procesar y analizar imágenes del mundo real con el fin de extraer información digital y numérica con capacidad de ser analizada por parte de un ordenador. La visión artificial está estrechamente relacionada con la realidad aumentada. Por ejemplo, durante la instalación y puesta en marcha de una máquina, la visión artificial se encarga de analizar el mundo real y extrae información del mismo; a partir de la realidad aumentada, el ordenador se encarga de transmitir información de relevancia al operario con el objetivo de desempeñar su tarea con la mayor precisión posible [23].

La visión artificial toma gran importancia durante los procesos de inspección y control de calidad. La empresa Intel, fabricante de circuitería electrónica, colabora en la actualidad con empresas de distintos sectores para dar apoyo y solución en tareas de inspección y control de calidad en los procesos productivos mediante la utilización de visión artificial. Gracias a su plataforma OpenVINO, Intel ha alcanzado una detección del 99,9% de defectos en la producción de neumáticos [24]. La capital de Estados Unidos, Washington DC, también utiliza visión artificial para realizar la inspección del estado de las tuberías del sistema de abastecimiento de agua caliente sanitaria en la ciudad [25].

2.1.7 Robótica colaborativa

Son sistemas que permiten ser programados de forma sencilla, capaces de trabajar junto a operarios sin necesidad de utilizar sistemas de seguridad tradicionales e incorporan sistemas avanzados de control de fuerza. El robot se utiliza como una herramienta complementaria a la labor del operario; el sistema no está diseñado para trabajar de forma autónoma. Esta rama del conocimiento se emplea mayoritariamente en el ensamblaje de maquinaria o en tareas de mantenimiento, en especial para componentes de pequeño tamaño donde la precisión del robot juega un papel muy importante. Adicionalmente, la robótica colaborativa se emplea en operaciones quirúrgicas invasivas, donde las incisiones en el cuerpo del paciente deben ser precisas, exactas y del menor tamaño posible [26, 27].

2.1.8 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva consiste en la creación de piezas y productos a partir de la sucesiva superposición de capas sujetas a un sustrato que se desplaza verticalmente. El empleo de las nuevas tecnologías de fabricación permite un aumento en la libertad de diseño y una flexibilidad de producción muy altas, características que se alcanzan con dificultad en las técnicas de fabricación convencional. A lo largo de los siguientes apartados se irán describiendo las distintas técnicas de fabricación aditiva desarrolladas hasta la actualidad, destacando sus propiedades, ventajas y desventajas y ejemplos prácticos de aplicación.

2.2 UN NUEVO MODELO DE FABRICACIÓN

Desde los comienzos de la historia de la raza humana la fabricación se ha utilizado para la transformación de elementos de la naturaleza en componentes útiles con propiedades mejoradas. El desarrollo progresivo de las técnicas de fabricación ha dado lugar a altas productividades y eficiencias, además de facilitar las economías de escala y posibilitar el desarrollo de la sociedad [1]. En este apartado, se expondrán las tecnologías de fabricación convencional, detallando las ventajas e inconvenientes de las mismas y estableciendo las diferencias de proceso con las tecnologías de fabricación aditiva. De aquí en adelante, se nombrará como fabricación convencional al conjunto de procesos de transformación de materiales que no se agrupan como

técnicas de fabricación aditiva y que, por tanto, no dan forma a la pieza a través de la superposición de capas de material.

Existe una amplísima gama de procesos de fabricación designados como fabricación convencional. En líneas generales, las técnicas de fabricación convencional se pueden clasificar en fabricación sustractiva y fabricación por moldeo [28].

- Fabricación sustractiva

Las piezas se producen al eliminar el material de un bloque sólido, barras de plástico, metal u otros materiales mediante corte, perforación y esmerilado, con el objetivo de obtener la geometría deseada. Estas tecnologías también se denominan como mecanizado. Una de las características principales reside en la velocidad de procesamiento de material y la gran cantidad de residuos generados en forma de virutas. Dentro de esta clase se encuentran tecnologías como el taladrado, fresado, corte por láser, lijado, serrado, etc. [1, 28].

- Fabricación por moldeo

Partiendo de una preforma, la maquinaria realiza fuerzas de carácter mecánico, térmico y químico sobre el material para proporcionarle a la pieza la silueta deseada. Esta clase de procesos se caracteriza por la utilización de moldes o dados. Procesos destacados son técnicas de extrusión de plásticos, moldeo por inyección, laminación de metales, forjado de metales, embutido [1]... El amplio conocimiento de estas técnicas ha dado lugar a rendimientos y productividades muy altos.

La intensa experiencia adquirida a lo largo de los años permite procesar todo tipo de materiales a partir de las técnicas de fabricación convencional (metales, cerámicos y polímeros). Además, se realizan combinaciones secuenciales de los procesos con el objetivo de conferir la geometría y propiedades deseadas a la pieza final.

El concepto de fabricación aditiva ha evolucionado a lo largo de los años y ha sido denominado de diversas maneras. Inicialmente, la aplicación de estas tecnologías estaba centrada en la elaboración rápida de prototipos y por ello su denominación era “Rapid Prototyping” o Prototipado Rápido (PR). Conforme la innovación y desarrollo avanzaba, la creación de

elementos completamente funcionales fue posible gracias a la implementación de nuevos materiales, la mejora en las tolerancias de fabricación y los acabados superficiales [29]. Esto dio lugar a la terminología de “Rapid Manufacturing” o “Rapid Tooling”, cuando se utilizaba para producir utillajes y moldes. La rápida evolución precisó de la redacción de una normativa y marco teórico donde se describieran y englobaran las distintas tecnologías de fabricación aditiva. Así, en el año 2009, se forma el comité científico ASTM F42, enfocado en las tecnologías de fabricación aditiva. En el año 2015 se publica el estándar internacional ISO/ASTM 52900 [30], en donde se establecen y definen los términos utilizados en la fabricación aditiva. Asimismo, se especifican las características inherentes de una tecnología de fabricación para ser considerada aditiva: “proceso de producción de objetos mediante la adición de material capa a capa realizado a partir de la información de un modelo tridimensional”.

La constante evolución, desarrollo e investigación en el campo hizo necesaria la redacción de documentos de ayuda para el proceso de diseño y fabricación. El estándar internacional ISO/ASTM 52910 [31] comprende una serie de pautas, recomendaciones y requisitos en el diseño. No obstante, se indica que la norma actúa como un documento de orientación general e introducción a la materia, evaluando inconvenientes que puedan surgir durante el diseño. En ningún caso se muestran soluciones de diseño específicas ni datos de procesamiento de los materiales.

A continuación, se describen las diferencias de mayor relevancia entre las técnicas de fabricación aditiva y convencional. Es de destacar que la fabricación aditiva no está pensada para sustituir a la fabricación convencional, sino para complementarla. El objetivo de la fabricación aditiva se encuentra actualmente en paliar las lagunas existentes en la fabricación convencional y dar apoyo en aquellos requisitos técnicos donde la aplicación de fabricación convencional es de muy alta complejidad o con un alto coste asociado [5].

2.2.1 Cadena de proceso

Se denomina cadena de proceso al conjunto de etapas necesarias para la fabricación de un producto, desde su ideación hasta el envío a los puntos de venta. Las técnicas de fabricación convencional están caracterizadas por una cadena de proceso de alta dificultad y un estudio solo al alcance de expertos con larga experiencia en el sector de la fabricación [1]. Obviando las

distintas etapas necesarias hasta la adquisición del material, la cadena de proceso está formada por varias fases que contemplan la aplicación, sobre la materia prima, de técnicas mecánicas (como puede ser la extrusión de materiales o el forjado), tratamientos térmicos (recocido de metales o sinterizado en materiales cerámicos), ataque químico (aplicación de recubrimientos o pinturas), etc. El diseño final de las piezas debe ajustarse a las características y limitaciones de fabricación de la maquinaria, lo cual implica un proceso iterativo donde se realizan múltiples variaciones en los bocetos de la pieza. Este desarrollo se extiende en el tiempo, ya que conlleva un exhaustivo análisis de coste. La adquisición de maquinaria convencional requiere altas inversiones de capital y, por tanto, el riesgo de pérdidas es elevado. Evaluar todas las posibilidades de fabricación (incluso considerando la posibilidad de subcontratar servicios a terceras empresas), así como realizar un detallado análisis de mercado puede llevar al éxito o fracaso de la compañía [28].

Por otro lado, las técnicas de fabricación aditiva tienen una cadena de proceso pequeña y simple. Además, no precisa de iteraciones en el diseño de la pieza salvo por las limitaciones de fabricación de la maquinaria [32]. En primer lugar, se dibuja la pieza en un programa de diseño asistido por ordenador (CAD), como por ejemplo SolidWorks, Catia o Inventor. Posteriormente, el diseño ha de ser convertido a código máquina, o código G, donde se especifican todas las acciones a realizar por la máquina. Se indican todos los parámetros de proceso tales como movimientos, velocidades y posicionamiento de la herramienta en el espacio tridimensional. El código máquina se obtiene a través de programas informáticos comúnmente nombrados por su denominación inglesa “slicer”.

Estos programas se encargan de dividir la pieza en las capas de construcción y especifican todas las coordenadas donde la herramienta ha de posicionarse y la velocidad de movimiento de la misma, entre otros parámetros. Sin embargo, los archivos de diseño CAD no son compatibles con la extensión de archivo requerida por el “slicer” y se precisa de una etapa intermedia: exportar el diseño CAD a un archivo compatible que actúe como interfaz. Pese a que esto pueda sonar trivial, es una de las mayores fuentes de error en la fabricación aditiva. Para cubrir esta necesidad se requiere de la utilización de un lenguaje de archivo estándar, entre los cuales se encuentran OBJ, IGES o STEP. La opción por excelencia es el formato STL [33].

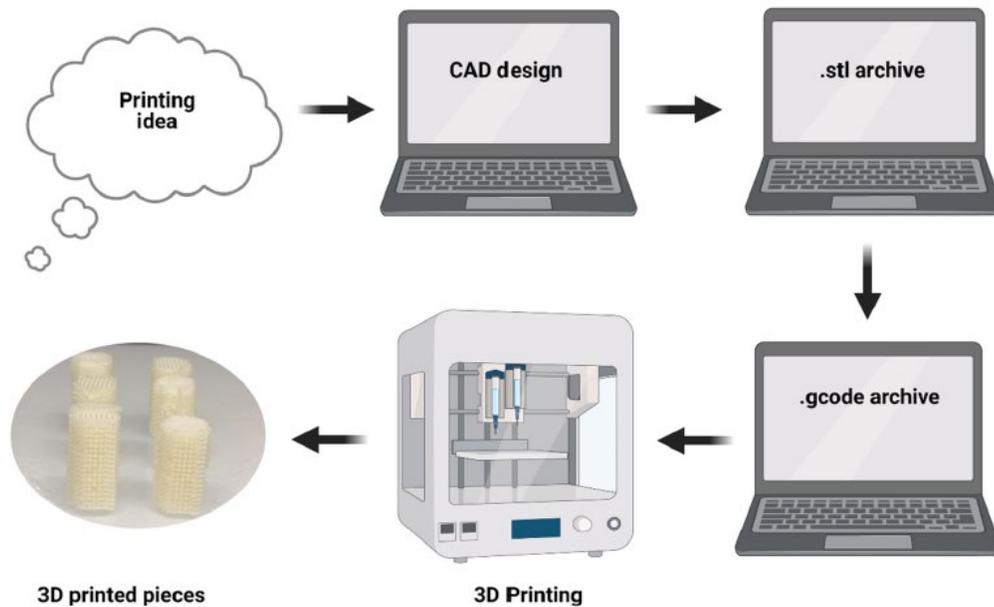


Ilustración 2.3. Cadena de proceso en la Fabricación Aditiva [32]

El Lenguaje Estándar de Teselación (o STL por sus siglas inglesas, Standard Tessellation Language) es un formato de archivo que describe las superficies geométricas de un objeto tridimensional, sin especificar atributos como color, material o textura [34]. La representación gráfica de la pieza se realiza mediante la interpolación de la superficie a partir de geometrías planas como triángulos o paralelogramos (ver Ilustración 4). Para obtener una gran calidad de la geometría, se precisa de una malla fina de la superficie, dando lugar a tamaños de archivo muy grandes. Por otro lado, utilizar un mallado muy grosero da lugar a pérdidas de información sobre la superficie. Debido a la utilización de triángulos o paralelogramos para la descripción de la superficie de la geometría, los contornos circulares o curvilíneos se representan como una aproximación, dando lugar a errores [32]. Existen programas que generan un mallado a gusto del usuario, permitiendo tener mallas de tamaños heterogéneos, con lugares donde la rejilla es más fina (en contornos curvilíneos, aumentando así la precisión geométrica) y zonas donde la malla es más grosera (en contornos rectos, permitiendo así un tamaño de archivo menor).



Ilustración 2.4. Influencia del tamaño de malla en archivos STL [34]

A continuación, la geometría se rebana mediante el programa “slicer” y se especifican todos los parámetros de proceso de la fabricación. El resultado de esta etapa es un archivo G-Code que es interpretado y ejecutado por la máquina [35, 36]. Es importante tener en consideración que, al igual que las máquinas de fabricación convencional, las máquinas de fabricación aditiva también precisan de una calibración y puesta en marcha previa para su correcto funcionamiento.

Debido a la construcción por capas, las piezas fabricadas a partir de tecnologías aditivas no alcanzan la calidad superficial esperable de una tecnología convencional. No obstante, la aplicación de tratamientos de post-procesado térmicos (sinterizado), mecánicos (retirada de soportes) o químicos (revestimientos y pinturas) mejora considerablemente las propiedades de la pieza. Adicionalmente, las piezas son anisotrópicas, con características mecánicas diferentes en función de la dirección de estudio [37].

La cadena de procesos de la fabricación aditiva es rápida y automática, y la inmediatez de manufactura es superior a la obtenida mediante la fabricación convencional, en donde las primeras piezas no se obtienen hasta transcurridos varios meses después del diseño. Sin embargo, los procesos de fabricación aditiva son lentos y la manufactura de una pieza individual puede llevar horas o incluso días. Este factor es totalmente opuesto a las técnicas de fabricación convencional en donde, tras realizar la puesta en marcha del proceso productivo, la eficiencia y rendimiento son muy elevados. Por esta razón, la fabricación aditiva sirve actualmente como

complemento a la fabricación convencional y se aplica principalmente a lotes pequeños de piezas con aplicaciones muy particulares en ciertos sectores. La escalabilidad a nivel mundial no está al orden del día, pese a que el desarrollo en la maquinaria de ciertas empresas está facilitando la rapidez de fabricación.

2.2.2 Libertad de diseño

Gracias a la superposición de capas, las técnicas de fabricación aditiva permiten alcanzar piezas con complejidades geométricas casi inimaginables mediante las técnicas de fabricación convencional. Adicionalmente, la dificultad geométrica no afecta al coste de fabricación. Así como en operaciones donde se requiere la utilización de moldes el precio aumenta en función de la complejidad, las tecnologías aditivas se consideran “design-free” y “complexity-for-free”, es decir, la complejidad de fabricación de las piezas es gratis, puesto que la dificultad no proviene del método de fabricación sino del diseño de fabricación [28]. En cambio, la fabricación convencional tiene grandes limitaciones en cuanto a diseño. Por ejemplo, las técnicas que utilizan dados o moldes y procesan metales en estado líquido deben tener unos espesores de pared ajustados de tal forma que no se produzcan atascos de material y éste rellene completamente los entresijos del molde. Cuanto mayor es la complejidad de la pieza, más costosas son las herramientas del proceso [1].

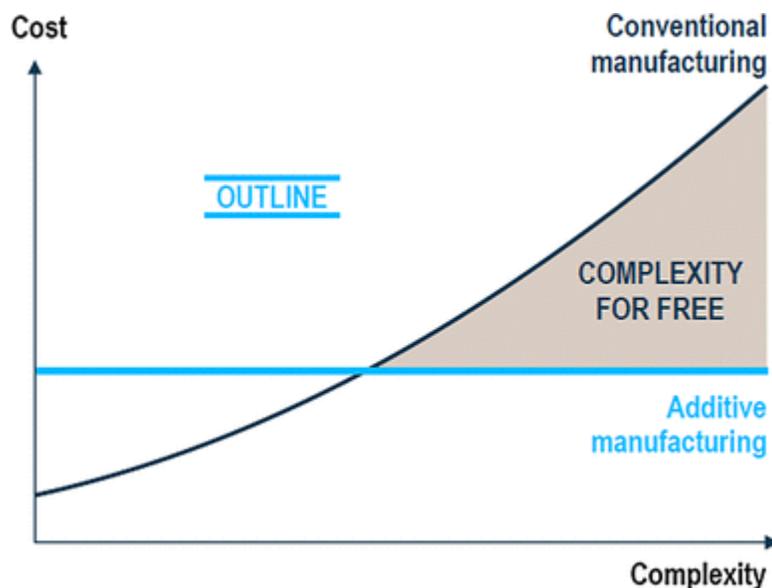


Ilustración 2.5. Costo de la complejidad de la pieza a fabricar [38]

La alta complejidad de las piezas alcanzable a través de AM permite la optimización topológica del diseño de elementos. La optimización topológica consiste en un análisis matemático para perfeccionar la distribución de material en una pieza [39]. De esta forma, el material estará concentrado en aquellas zonas donde la pieza se encuentra sometida a mayores esfuerzos mecánicos y la pieza estará aligerada donde no se requiera tanta concentración de material. La optimización topológica se encuentra ampliamente en la naturaleza. Por ejemplo, la densidad de los huesos del cuerpo humano no es uniforme y la distribución de la capa ósea está optimizada (ver Ilustración 6). La misma situación ocurre en el crecimiento de las plantas o las estructuras de panel de abeja, donde se optimiza la distribución de material en base a un objetivo determinado (favorecer la distribución de esfuerzos mecánicos, térmicos, disminución de ruido, etc.).

Las características inherentes de la fabricación aditiva permiten obtener ensamblajes a través de un único proceso de fabricación. Esto simplifica las tareas de mantenimiento, inspección y verificación del montaje, y reemplazo de piezas.

2.2.3 Materiales de aplicación

Hasta la fecha, las técnicas de fabricación convencional han copado el mercado con productos manufacturados a partir de todo tipo de materiales. Sin embargo, la fabricación aditiva también tiene el potencial de fabricar piezas con una gran variedad de materiales, desde los plásticos hasta los metales, pasando por los cerámicos y materiales compuestos. Actualmente, se conoce el potencial de aplicación, pero se precisa de una investigación más exhaustiva. Dentro de los materiales metálicos, apenas ciertas aleaciones de titanio, aluminio y acero se están utilizando en el diseño de piezas finales [37, 40]. En cuanto a los plásticos, los materiales de uso más extendido en FDM son el PLA y el ABS, de difícil aplicación en centros industriales. No obstante, se está investigando la utilización de nuevos materiales inicialmente ideados para el moldeo por inyección de plásticos (ver apartado 4.1).

2.2.5 Residuos generados

Actualmente, el entorno de la industria está tendiendo a la implementación de tecnologías capaces de disminuir el impacto climático y las consecuencias del mismo, así como la aparición de residuos no reciclables. La fabricación aditiva puede actuar como pilar en esta transición debido a la limitada cantidad de residuos generados [28]. Existen numerosos proyectos de investigación que estudian la reciclabilidad de material metálico pulverulento utilizado [41].

En la nomenclatura inglesa existe un término, aplicable a la fabricación, conocido como “buy-to-fly ratio”. Describe la relación entre la cantidad de material al comienzo del proceso de fabricación y la cantidad de material en la pieza final. En las tecnologías convencionales, este ratio muestra valores en torno a 10:1 o incluso 20:1 (en sectores como el aeronáutico), significando que para una pieza final de 1kg se deben introducir al sistema un total de 20kg, de los cuales 19 kg representan residuos. Sin embargo, la tecnología AM permite disminuir este valor hasta casi 1:1, lo que manifiesta un uso total del material alimentado al proceso productivo [28, 38, 42].

2.2.6 Carácter legislativo

La irrupción de nuevas tecnologías en la industria lleva asociada un nuevo marco legislativo a formalizar y, habitualmente, este proceso se configura más lentamente que el avance de la ciencia. A día de hoy, la jurisprudencia se encuentra en una etapa prematura, sin capacidad de determinar las aplicaciones de las técnicas de fabricación aditiva y sin existir normas, guías o recomendaciones en el diseño. Adicionalmente, la rápida inclusión de nuevos materiales da lugar a constantes programas de investigación y desarrollo. Por otro lado, la simplicidad en la cadena de procesos de la fabricación aditiva (se puede fabricar cualquier objeto del que se disponga un diseño CAD o diseño 3D) puede violar ciertos aspectos de la propiedad intelectual de los fabricantes y quebrantar los privilegios de una patente [43]. Los repuestos de piezas también se podrían obtener a partir de técnicas de fabricación aditiva, pero no se ha determinado aún la calidad o idoneidad de utilizar recambios de este estilo ni las interacciones o transmisión de cargas mecánicas entre piezas.

En último lugar, es preciso especificar que, a través de la fabricación aditiva, cualquier persona puede fabricar cualquier objeto, incluso llegando a imprimir piezas con fines malévolos. En el año 2012, el estudiante de derecho Cody Wilson hizo público el diseño de armas de fuego a través de fabricación aditiva, lo que abría un obstáculo en la carrera por la elaboración del marco legislativo[44]. Las tecnologías convencionales sin embargo tienen un marco regulatorio muy avanzado. Debido a los altos costes de adquisición de maquinaria convencional, es de muy baja probabilidad que un usuario sea capaz de reproducir piezas de recambio.

2.3 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

La evolución de las técnicas de fabricación aditiva ha sido una constante desde su aparición en la década de 1980 [29]. Los laboratorios de investigación especializados en la materia han creado progresivamente nuevas técnicas y metodologías aplicables a su área de especialización. La Organización de Estandarización Internacional (ISO), en colaboración con la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), ha redactado diferentes estándares y normativas relativos a la Fabricación Aditiva. Es importante destacar que estos reglamentos no son de obligado cumplimiento y aún están en continua evolución y evaluación. Entre ellos, destacan el estándar 52910 [31], sobre diseño, requisitos, directrices y recomendaciones durante el diseño para fabricación aditiva; o el estándar 52900 [30] sobre fundamentos y vocabulario de la fabricación aditiva. Este último estándar engloba las tecnologías de mayor relevancia y las cataloga en siete categorías [28, 32, 40]:

- Material Extrusion o Extrusión de material
- Binder Jetting o Inyección de Aglutinante
- Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo
- Sheet Lamination o Laminado de Hojas
- Vat Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba
- Directed Energy Deposition o Deposición directa de Energía
- Material Jetting o Proyección de Material

2.3.1 Material Extrusion o Extrusión de Material

Esta tecnología explota las propiedades reológicas de los termoplásticos y los cambios de fase en función de la temperatura. El material a procesar es extruido a través de un orificio o boquilla a una cierta temperatura y es depositado sobre una cama de impresión en donde se da forma a la pieza. La geometría tridimensional se consigue tras la sucesiva impresión de capas bidimensionales depositadas una encima de otra, concediendo una altura determinada a la pieza [45]. Las tecnologías más relevantes dentro de esta clase son la Fabricación de Filamento Fundido (FFF, por su nomenclatura inglesa Fused Filament Fabrication), Modelado de Deposición Fundida (FDM, Fused Deposition Modelling) y Robocasting. Estas técnicas de fabricación permiten procesar polímeros termoplásticos en forma de filamento o pellets, materiales compuestos y polímeros densificados con metales y cerámicos. Debido al desconocimiento popular, la denominación FDM se suele utilizar de forma análoga para describir todas las tecnologías de extrusión de materiales.

Esta tecnología dispone de equipamiento barato, gran variedad de materiales a transformar, simplicidad en el uso y creación de piezas multimaterial. En contraposición, la precisión dimensional y la calidad superficial son bajas, la pieza final es anisotrópica y se requiere el uso de estructuras de soportes para la fabricación [32, 35, 40].

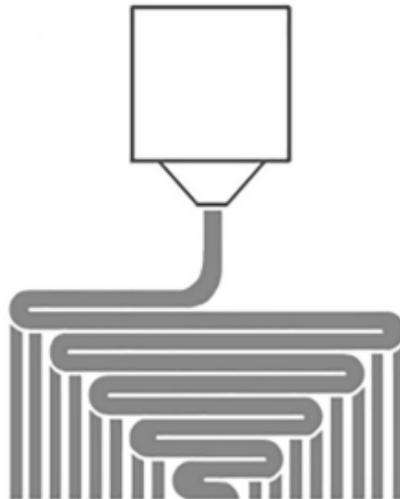


Ilustración 2.7. Representación conceptual de la extrusión de materiales [45]

2.3.2 Binder Jetting o Inyección de Aglutinante

Consiste en la pulverización de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que posteriormente solidifica en una capa transversal. Una vez se fabrica una capa, se desplaza la plataforma de impresión verticalmente y se deposita una nueva capa de material impreso. Se procesan materias primas en polvo como plásticos, metales, cerámicos, vidrio, arena y yeso [33, 37, 45].

Es una tecnología que permite una alta productividad en fabricación y es capaz de procesar una gran variedad de materiales. No obstante, el uso de materiales pulverulentos requiere una manipulación precisa de las materias primas, por ser estas nocivas para la salud. Las propiedades finales de la pieza dependen directamente del aglutinante utilizado y las operaciones de post-procesado son habituales.

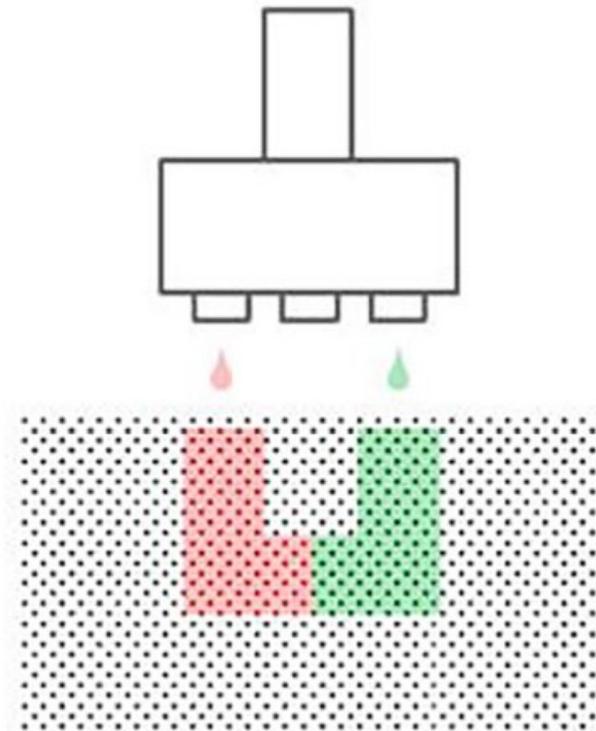


Ilustración 2.8. Representación esquemática de la tecnología Binder Jetting [45]

2.3.3 Powder Bed Fusion o Fusión de Lecho en Polvo

Proceso que utiliza energía térmica, habitualmente procedente de un haz láser, para fundir selectivamente una capa de material pulverulento que, tras su enfriamiento, se fusiona para dar lugar a las capas de la pieza. [45] Fabricada la primera capa, la plataforma se desplaza verticalmente una longitud igual a la altura de capa y se rellena la cuba con material nuevo. Las técnicas más conocidas son sinterizado selectivo por láser (SLS, Selective Laser Sintering), sinterizado láser de metal (SLM, Selective Laser Melting) y fusión por haz de electrones (EBM, Electron Beam Melting).

Estas técnicas de fabricación permiten el procesado de plásticos, metales y cerámicas en estado pulverulento, convirtiéndolo en las tecnologías con un mayor rango de aplicación [28, 46]. Adicionalmente, el material en polvo actúa como material de soporte y la complejidad en la geometría de las piezas es muy alta. Sin embargo, la maquinaria y el material son muy costosos. Se precisa de un exhaustivo control y tratamiento de la materia prima, ya que es peligrosa y se puede deteriorar. La fabricación debe realizarse en atmósferas controladas de helio o argón para evitar explosiones. Las técnicas de post-procesado son habitualmente requeridas.

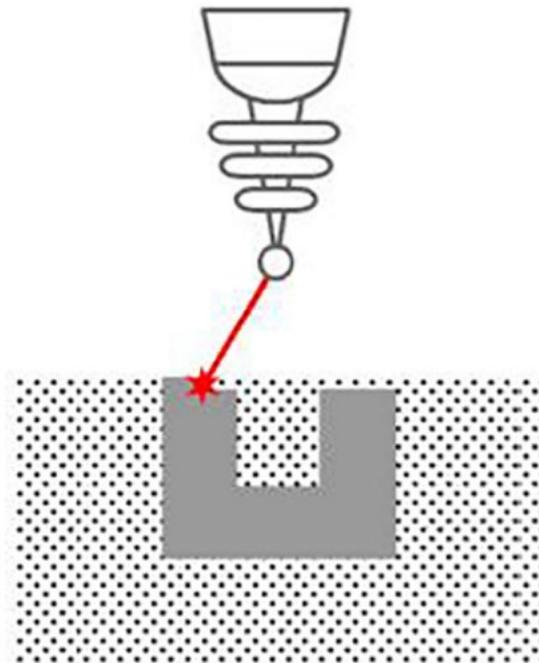


Ilustración 2.9. Representación esquemática de la fusión de lecho en polvo [45]

2.3.4 Sheet Lamination o Laminado de Hojas

Un haz láser o una cuchilla es utilizada para cortar láminas de metal, papel o plástico. La superposición de capas, junto con el vertido de un material adhesivo para unir las, permiten crear una pieza a través de técnicas de fabricación aditiva. Se puede aplicar calor externo a la zona de corte de las capas con el objetivo de aumentar y favorecer la unión [33, 39].

Esta tecnología permite procesar distintos tipos de materiales variando pequeñas partes de la maquinaria, en particular el material aglutinante para facilitar la adhesión. Además, los tiempos de fabricación son cortos, se pueden procesar materiales cerámicos y compuestos, y los volúmenes de fabricación son superiores al resto de tecnologías AM. Sin embargo, se precisan etapas de post-procesado que pueden requerir largos periodos de actividad con un alto coste asociado, la adherencia de capas se ve afectada por el agente aglutinante utilizado y el coste de la maquinaria es elevado [45].

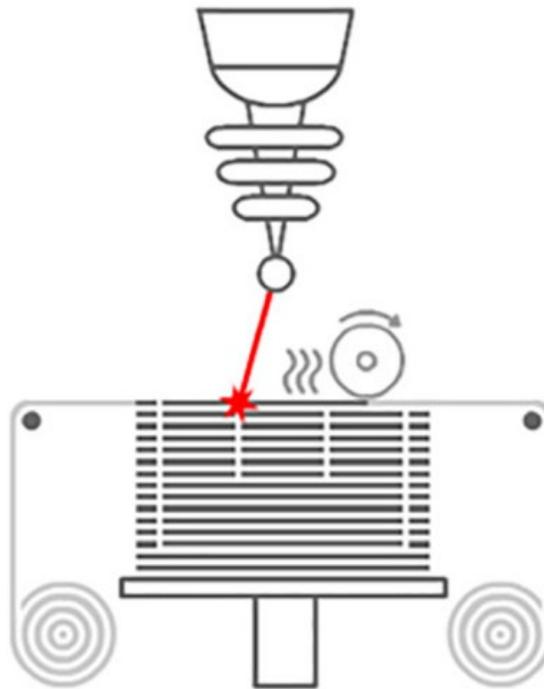


Ilustración 2.10. Representación esquemática del laminado de hojas 3D [45]

2.3.5 VAT Photopolymerization o Fotopolimerización en cuba

La fotopolimerización consiste en la alteración de las propiedades de un material polimérico líquido cuando es expuesto a la luz. La luz, habitualmente ultravioleta, activa el fluido y da lugar a reacciones de polimerización entre los monómeros, que se encuentran enriquecidos en fotoiniciadores [45]. La técnica de fabricación más extendida es la estereolitografía (SL).

La libertad de diseño en las piezas es muy alta y la complejidad de la pieza se puede considerar ilimitada. La precisión dimensional es muy alta y permite un acabado superficial liso. Se pueden fabricar piezas de gran tamaño.

Esta técnica está limitada al procesamiento de resinas fotocurables y el rango de materiales es pequeño. La manipulación del material base debe ser cuidadoso, pues puede ser perjudicial para la salud. Las operaciones de post-procesado son muy habituales, ya que es posible necesitar el diseño de estructuras de soporte. La maquinaria es costosa.

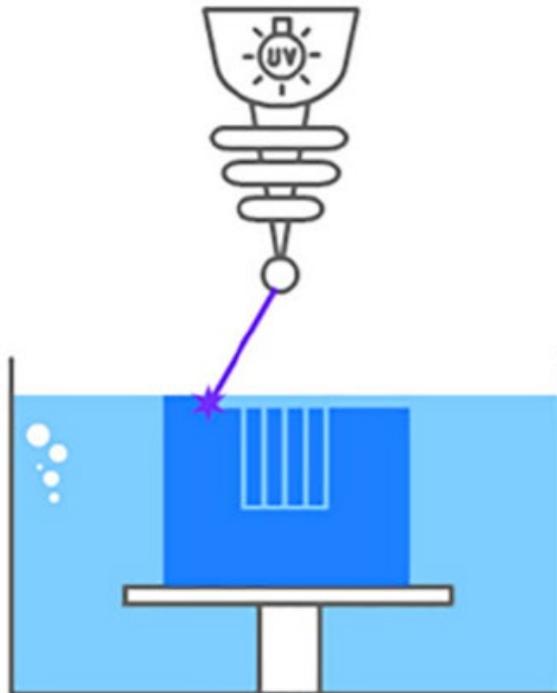


Ilustración 2.11. Representación esquemática de la fotopolimerización en cuba [45]

2.3.6 Directed Energy Deposition o Deposición de Energía Directa (DED)

Esta técnica se utiliza mayoritariamente para la reparación de piezas con defectos o roturas parciales, tales como turbinas o hélices, aunque se pueden construir piezas desde cero. Consiste en la deposición de un material metálico o una aleación metálica sobre la plataforma de impresión o la pieza dañada. A continuación, una fuente de energía (habitualmente un haz láser, un haz de electrones o un arco de plasma) es dirigida hacia el material, dando lugar a una fusión del material de aporte y favoreciendo su unión con la pieza a reparar [32].

Se requiere un control exhaustivo del entorno en el que se irradia la energía. La cámara de impresión debe estar equipada con atmósferas protectoras para evitar explosiones durante la utilización de metales reactivos. Por otro lado, el uso de un haz de electrones requiere una fabricación en una cámara de vacío. Las ventajas residen en la alta precisión dimensional alcanzable, la posibilidad de obtener microestructuras con gradientes de composición o estructuras híbridas formadas por múltiples materiales con distintas composiciones y estructuras, y generación de tensiones residuales que mejoren propiedades mecánicas de la pieza durante su vida útil. Esta tecnología combina características de la extrusión de materiales (FDM) y la fusión de lecho en polvo.

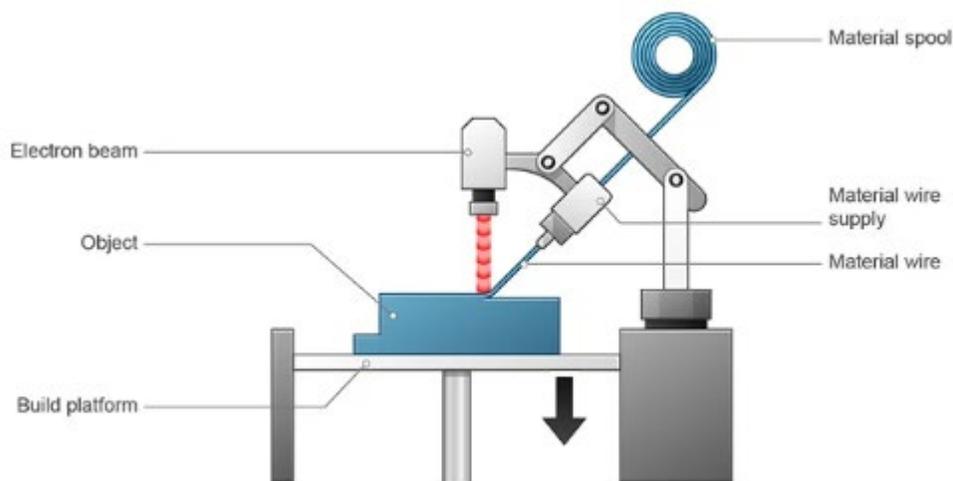


Ilustración 2.12. Representación esquemática de la técnica deposición de energía directa (DED)

2.3.7 Material Jetting o Proyección de Material

Esta tecnología consiste en la pulverización de gotas de material fotocurable sobre una plataforma y que son curadas tras la exposición a luz ultravioleta. Por tanto, los materiales útiles están limitados a resinas poliméricas fotosensibles. La gran ventaja de esta metodología consiste en la utilización de diversos surtidos de material, posibilitando la creación de piezas en diversos colores. Adicionalmente, esta ventaja se puede explotar a la hora del diseño de piezas, generando los soportes estructurales necesarios en material soluble en agua y facilitando las etapas de post-procesado. Se puede alcanzar alta precisión en las piezas. Sin embargo, el volumen máximo de construcción es muy reducido [45].

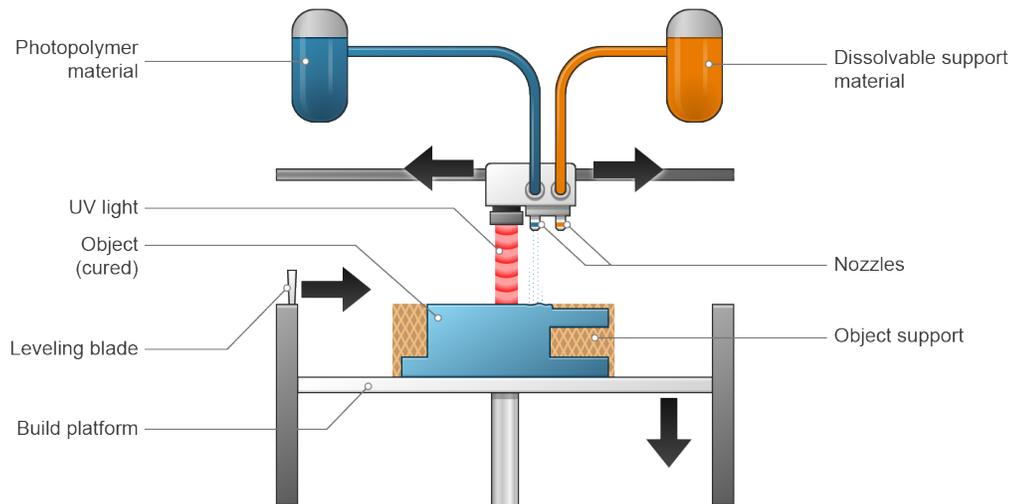


Ilustración 2.13. Representación esquemática de la proyección de material

2.4 APLICACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La característica de mayor relevancia para la explotación de las técnicas de fabricación aditiva es la libertad de diseño, que permite generar piezas con estructuras biónicas, piezas optimizadas topológicamente e incluso la integración de funciones en una sola pieza [39]. Por todas estas razones, el nicho de mercado de la fabricación aditiva es aún reducido y solo aquellos segmentos estratégicos, donde la flexibilidad de diseño, la adaptabilidad y la producción de pequeños lotes

juegan un papel fundamental, emplean extensivamente la fabricación aditiva, en particular aquella basada en la utilización de tecnología láser.

2.4.1 Sector aeroespacial

El sector aeroespacial ha sido siempre un ámbito en donde el avance de la ciencia y la tecnología ha estado a la orden del día. La optimización en el uso de material da lugar a incontables beneficios económicos y una considerable reducción en el coste de la fabricación de cohetes y aviones [28]. Además, la última moda reside en la recuperación de los cohetes espaciales enviados a la atmósfera, permitiendo así una reutilización de los componentes mecánicos y una reducción en los costes de las travesías [47].

Relativity Space [48] es una compañía aeroespacial estadounidense enfocada en el desarrollo de tecnologías de fabricación, vehículos de lanzamiento y motores de cohete para viajes orbitales. Desde su fundación en el año 2015, la empresa se ha enfocado en construir las fábricas del futuro, en donde la automatización, la flexibilidad y el filtrado y extracción de datos es de suma relevancia. El cohete Terran R es la primera nave aeroespacial completamente construida a través de tecnologías de fabricación aditiva mediante la impresora 3D de metal de mayor tamaño en el mundo, de desarrollo propio. La estructura del cohete está impresa en metal y la empresa expone las inmensas ventajas de la implementación de las fábricas 4.0: reducción del número de piezas de más de cien mil a menos de mil (factor de reducción de 100), reducción del tiempo de construcción de 2 años a 2 meses, proceso de iteración en el diseño de 4 años a apenas medio año.

El instituto alemán Fraunhofer IAPT está dedicado a la investigación en técnicas de fabricación aditiva. Una de sus ramas de estudio es el sector aeroespacial, en donde dan soporte a empresas como Airbus. Recientemente, han realizado un análisis estructural de las mangueras utilizadas para el llenado de combustible de los aviones Airbus A380 [46]. Mediante la implementación de las tecnologías de fabricación aditiva han obtenido un diseño final que ha reducido el número de piezas de 14 a 1, disminución de los procesos de fabricación de 18 a 5 y reducción en los costes de fabricación del 50%. Adicionalmente, los gastos asociados al uso de la manguera también se ven afectados, pues los costes de mantenimiento se ven reducidos.



Ilustración 2.14. Impresión 3D de un cohete por la empresa Relativity Space [48]

2.4.2 Sector médico

Otro sector donde explotar las ventajas de la fabricación aditiva es el médico. Como seres humanos, las diferencias en la fisionomía de los cuerpos son palpables y es de gran importancia tener un buen estudio del cuerpo humano a la hora de realizar intervenciones quirúrgicas en donde se repongan o sustituyan partes dañadas.

Una de las ramas que ha estado utilizando la fabricación aditiva durante un largo periodo de tiempo es la odontología. A la hora de sustituir un diente dañado es preciso realizar un diseño específico para cada paciente, adaptándose el implante a la geometría requerida [49]. Los materiales utilizados para implantes dentales precisan de ciertos requisitos médicos para no perjudicar la salud bucal del paciente. En primer lugar, el material utilizado debe ser biocompatible, asegurando así la coexistencia del injerto con los tejidos de la boca del paciente. Además, las características mecánicas del implante deben soportar los esfuerzos a los que estará sometido. En último lugar, el material debe favorecer la creación de una cohesión entre el injerto

y el cuerpo humano. Las técnicas de fabricación aditivas disponen de diferentes materiales que cumplen todas estas propiedades.

Otro campo de estudio es la creación de tejidos. En medicina, se define tejido como una estructura formada por células del mismo tipo y que realizan una función específica. Los principales tejidos existentes en el cuerpo humano son tejidos de revestimiento, de sostén, de unión y relleno, y de defensa [50]. Entre algunos de los avances más importantes destacan la fabricación de órganos como los riñones, páncreas artificial para la lucha contra la diabetes, o la fabricación de prótesis de rodilla o cadera para la sustitución de huesos dañados. Además, la implementación de técnicas de fabricación aditiva permite el uso de materiales biodegradables, cuyas propiedades permiten la progresiva absorción del material externo hasta fundirse con el cuerpo humano y dar lugar a una única estructura, estimulando la recuperación del paciente [51].

En último lugar, la formación de los aspirantes a cirujanos siempre ha tenido una alta complejidad, debido a la dificultad de fabricar maquetas físicas que simulen los rincones más profundos del cuerpo humano. Esto es de mayor importancia cuando los cirujanos se enfrentan a operaciones en donde la vida del paciente está en riesgo; es el caso de las operaciones de tumores cerebrales. En la Universidad Técnica de Hamburgo [52] han desarrollado prototipos para el entrenamiento y formación de médicos que realizan operaciones para el tratamiento de enfermedades vasculares.



Ilustración 2.15. Prótesis maxilofacial

2.4.3 Sector de la automoción

El automovilismo también es una industria puntera e innovadora cuyos avances benefician a largo plazo a los ciudadanos. Una de las competiciones con un gran impacto a nivel social es la Fórmula 1. Las exigencias de seguridad han dado lugar a trajes ignífugos con espléndidas características para detener el avance del fuego. Además, los actuales motores de la Fórmula 1 están impulsando activamente la recuperación de energía mediante el aprovechamiento del calor del tubo de escape por la combustión del carburante. En los últimos años, se está buscando una transición ecológica hacia el uso de combustibles verdes y sostenibles.

En cuanto al sector de la automoción, la fabricación aditiva permite la producción de piezas a medida, optimizadas en base a la función perseguida y creando piezas ligeras, todos los objetivos permitiendo un mayor rendimiento en la pista. Una empresa que ha utilizado la fabricación aditiva es Bugatti. En el último diseño de su modelo por antonomasia, el Bugatti Chiron, se implementaron unos frenos de disco fabricados a partir de titanio con técnicas de fabricación aditiva. La configuración permite una mejor disipación del calor, reduciendo así las posibilidades de sobrecalentamiento y disminuyendo los riesgos en la conducción[53]. Adicionalmente, la reducción en el peso alcanzó un 41%.

Los factores de mayor relevancia para alcanzar altas velocidades en un vehículo son la potencia del motor, la aerodinámica y el peso del automóvil, entre otros. Aligerar los vehículos se ha convertido en una de las prioridades de los fabricantes y la fabricación aditiva favorece esta tarea gracias a la implementación de la optimización topológica. Componentes susceptibles de ser fabricados a partir de tecnologías aditivas son los pedales de un vehículo [54], la suspensión trasera, el chasis y la defensa [55].



Ilustración 2.16. Optimización topológica del sistema de frenos [53]

3 Extrusión de material

En este apartado se establecerá el foco en las técnicas de fabricación aditiva clasificadas como extrusión de material. Se hace hincapié en las características propias de la fabricación, especificando los aspectos de mayor relevancia para obtener una buena calidad de la pieza. Por otro lado, se establece una pequeña distinción entre las tres grandes tecnologías existentes: extrusión por pistón, por tornillo o por engranajes. En último lugar, se indicará el potencial de fabricación de cada tecnología en términos de material.

3.1 EXTRUSIÓN DE MATERIAL

La extrusión de material es una de las diferentes tecnologías existentes de la fabricación aditiva y es la más extendida actualmente entre el usuario principiante, debido a su simplicidad y el bajo coste de la maquinaria y el material. Habitualmente, se suelen utilizar las siglas inglesas FDM (Fused Deposition Modeling) para denominar esta tecnología [37]. No obstante, otras denominaciones son FFF (Fused Filament Fabrication) o impresión 3D. Es importante aclarar que, pese al empleo de las siglas FDM y FFF como sinónimos, la técnica FFF corresponde a una de las tecnologías englobadas dentro del grupo de las técnicas FDM. La tecnología FFF representa un subgrupo de las tecnologías FDM. Este error de nomenclatura proviene principalmente de la extensa popularidad de las tecnologías FFF entre el público amateur y del poco conocimiento existente de otras tecnologías FDM, cuyo desarrollo es actualmente reducido y minoritario.

La extrusión de materiales consiste en calentar un termoplástico hasta una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de fusión [32] y depositarlo progresivamente en una plataforma o cama de impresión, dando forma a la primera capa. A continuación, la plataforma o el cabezal (las configuraciones de impresoras son múltiples) se desplazan verticalmente separándose una medida igual al espesor de capa y posibilitando la impresión de la capa consecutiva. De esta forma, las capas se depositan progresivamente unas sobre las otras dando lugar a una estructura sólida y uniforme tras enfriarse.

La distinción entre las tres grandes técnicas de extrusión FDM reside en el mecanismo que calienta y extruye el material [40]: basado en émbolo, basado en tornillo o basado en filamento. La técnica que utiliza un émbolo está muy poco extendida dentro de la industria debido a la discontinuidad del proceso. El émbolo o pistón debe retraerse cada cierto periodo de tiempo, con el objetivo de alimentar al extrusor con material nuevo. Esto da lugar a ineficiencias en el proceso, fabricando piezas de pequeño tamaño y posibles discontinuidades en la geometría, aumentando la aparición de poros e intersticios y debilitando la pieza mecánicamente. En el mercado actual existen pocas empresas proveedoras de máquinas de impresión 3D utilizando como base para la extrusión un pistón, un émbolo o un ariete. Desktop Metal y Markforged Inc. son dos compañías estadounidenses que explotan esta tecnología. No obstante, su foco de estudio no se centra en la impresión de materiales plásticos mediante émbolo, sino en la impresión de materiales metálicos embebidos en una matriz polimérica. De esta forma, son capaces de fabricar piezas metálicas, cerámicas o compuestos reforzados con fibra que, tras unos tratamientos térmicos posteriores para la eliminación de la matriz, dan lugar a piezas completamente funcionales [40, 56]. Se ha conseguido procesar aleaciones de Inconel, aluminio, titanio, acero inoxidable, etc.

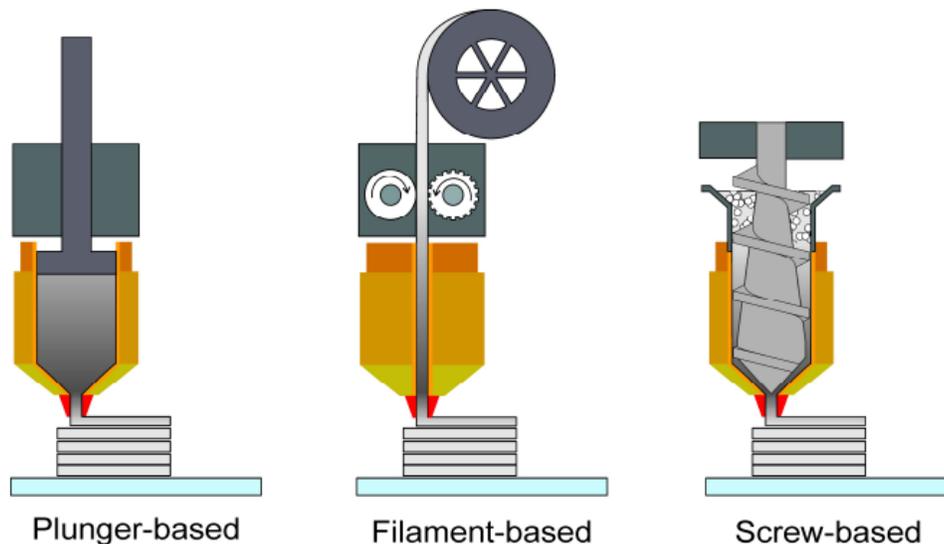


Ilustración 3.1. Tecnologías AM de extrusión de materiales [40]

A continuación, se establece la distinción entre dos clases de tecnología agrupadas dentro de la clase FDM: Fabricación por Filamento Fundido (FFF, por sus siglas en inglés Fused Filament Fabrication) y Fabricación por Partículas Fundidas (FPF, por sus siglas inglesas, Fused Particle Fabrication). Se presentarán asimismo las ventajas y desventajas de cada proceso, y se hará una pequeña revisión de futuro estableciendo los campos de estudio para el avance de estas tecnologías.

3.1.1 Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

La extrusión de material en formato de filamento fue patentada por la empresa Stratasys [57] en el año 1989, pero no fue hasta el año 1992 en donde se comenzó a aplicar esta tecnología para piezas de prototipado rápido. Con la finalización de la patente en el año 2009, la tecnología FFF experimentó un rápido crecimiento gracias al movimiento RepRap [58]. El proyecto RepRap tiene como objetivo el desarrollo de una máquina autorreplicable que pueda ser utilizada para prototipado rápido y manufactura. El término autorreplicable implica que una impresora es capaz de reproducirse y fabricar máquinas semejantes a sí misma, con la única necesidad de adquirir la circuitería y electrónica requerida para el control. Estos desarrollos dieron lugar a impresoras de escritorio asequibles con bajos precios, simplicidad y seguridad en la fabricación, y una popularización de las técnicas de fabricación aditiva dentro del público principiante.

La característica fundamental de esta tecnología se basa en la geometría inicial del material de aporte: filamento [59]. Se entiende por filamento a un material sólido cilíndrico con un diámetro y densidad constante. Las propiedades del filamento son uniformes a lo largo de su longitud. Para obtener el material en forma de bobina o hilo, se precisa de tratamientos térmicos y mecánicos como el trefilado, para disminuir la sección transversal del filamento, y el bobinado, para conformar y almacenar el material en bobinas o carretes [1]. Este proceso comienza con la alimentación de pellets de material a un tornillo sin fin, en donde es calentado a una temperatura lo suficientemente alta como para conseguir la fusión del plástico. A continuación, el material fundido se extruye a través de un dado o molde con la forma deseada, en este caso, sección cilíndrica.

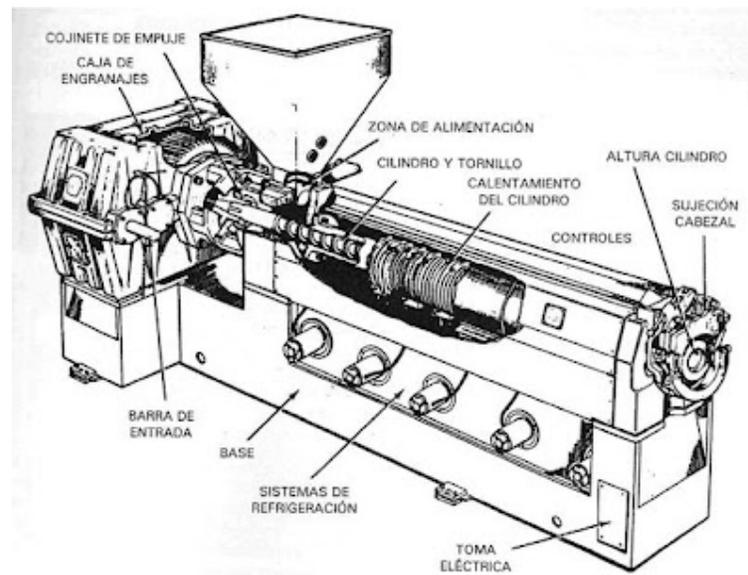


Ilustración 3.2. Proceso de extrusión de plásticos y conformado de bobinas [1]

Sin embargo, no todos los materiales poliméricos son susceptibles de ser trefilados y bobinados. El material de aporte precisa de unas características particulares para, posteriormente, ser utilizado en fabricación aditiva mediante FFF. Durante el proceso de FFF, el filamento está sometido a diversos esfuerzos mecánicos y térmicos que determinan ciertos requisitos previos del material. En primer lugar, el filamento es tirado a través de las ruedas dentadas del motor e introducido en el extrusor, donde, tras la aplicación de calor, se funde. En esta etapa, el filamento requiere la suficiente resistencia mecánica como para mantener su forma cuando es estirado y presionado por las ruedas dentadas [40]. Los motores deben generar suficiente torque para desplazar el filamento, pero sin llegar a romperlo. Adicionalmente, la fricción entre los engranajes y el filamento debe ser alta para no producir deslizamiento. Por otro lado, el filamento debe ser resistente a esfuerzos cortantes como para no producir su rotura cuando los dientes de los engranajes contactan con el material. En último lugar, el filamento no debe pandear cuando se realizan retracciones de material con el objetivo de evitar el fenómeno conocido como el babeo. Actualmente, los materiales de mayor uso en la tecnología FFF son el PLA y el PETG. Estos compuestos tienen un precio asequible y son fácilmente procesables, pero sus características mecánicas y térmicas limitan su aplicación a piezas que no se encuentren sometidas a grandes esfuerzos. No obstante, han aparecido durante los últimos años distintos

materiales en formato de filamento con propiedades y características ideales para su explotación en la industria actual.

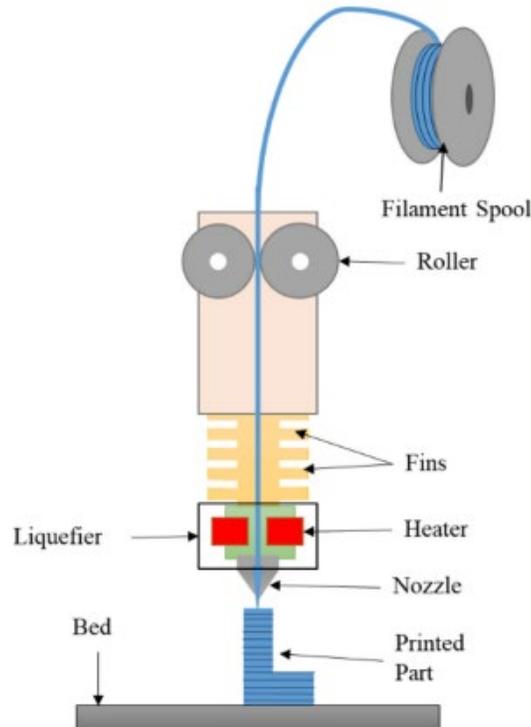


Ilustración 3.3. Esquema de la tecnología FFF [60]

3.1.2 Fused Particle Fabrication (FPF)

La tecnología Fused Particle Fabrication (FPF o también denominada como Granular Particle Fabrication) se refiere a la extrusión de material cuando su geometría inicial corresponde a pellets o granza. Se considera como pellet o granza a todas aquellas partículas sólidas, con forma esférica o cilíndrica, cuya dimensión característica se encuentra en el rango de los 2 a los 5 milímetros [61]. Aquel material con un tamaño inferior está clasificado como material pulverulento y es apto para el procesamiento mediante otras tecnologías.

Esta técnica consiste en la introducción del material en un husillo caliente, en donde se funde y se enlaza con el resto de partículas, formando una pasta líquida y continua con alto índice de fluidez [62]. El husillo está formado por un tornillo sin fin que, mediante su rotación a velocidad constante, introduce progresivamente los pellets en la zona calefactada y empuja la masa a través de la boquilla. El movimiento del cabezal, y por ende de la boquilla extrusora, a lo largo de los

tres ejes dimensionales permite la deposición de material en la localización deseada, formando capa a capa la geometría diseñada [63].

La ventaja principal de esta tecnología frente a FFF reside en el potencial de utilización de los materiales. Como ya se ha detallado anteriormente (ver apartado 3.1.1), las bobinas de filamento polimérico se obtienen tras efectuar diversos procesos de fabricación al material base, cuya geometría es en forma de pellets. La tecnología FPF permite reducir el número de procesos a los cuales está sometido el material. En otras palabras, esta tecnología permite omitir las etapas de trefilado y bobinado del material, reduciendo el número de procesos de fabricación involucrados y los costes asociados. Adicionalmente, el material no debe cumplir las características necesarias para la obtención de filamento. Esto implica que aquellos materiales incapaces de ser bobinados sí pueden procesarse mediante FPF, incrementando por tanto el rango de utilización de materiales.

Por otro lado, el proceso de trefilado y extrusión de plásticos somete al material a importantes esfuerzos térmicos y mecánicos, dando lugar a esfuerzos residuales sobre la bobina [64]. Los gradientes térmicos disminuyen la posibilidad de una reutilización y reciclabilidad del material polimérico, a causa de la degradación térmica. Por tanto, disminuir las etapas intermedias de fabricación en donde se aplican importantes fuentes de calor o tensiones mecánicas (es el caso del trefilado y el bobinado) facilita la reciclabilidad del material e impulsa la economía circular. No obstante, es importante tener en consideración que la reutilización de material nunca alcanza el 100% y se precisa de una mezcla de material reciclado y material virgen. Los parámetros de proceso como la temperatura de extrusión también deberán ser revisados [63].

En último lugar, se ha teorizado que el potencial de uso de plásticos en la técnica de FPF es ilimitado. Las características previas de los filamentos no son ya aplicables a este método y se puede alimentar el extrusor con cualquier material en formato pellet, siempre que posea un contenido en plástico [63]. En cualquier caso, se deberán realizar modificaciones en el extrusor para paliar ciertas desventajas durante la utilización de ciertos materiales (por ejemplo, los materiales abrasivos precisan de modificaciones en la boquilla del extrusor) [65].

La tecnología FPF tiene ciertas similitudes con el moldeo por inyección de plásticos (capítulo 19 de la publicación [1]). En ambas tecnologías, el material polimérico se encuentra inicialmente en formato pellet. Tras la alimentación del husillo, el material es calentado a través de distintas resistencias localizadas a lo largo del tornillo sin fin. El material avanza longitudinalmente gracias a la rotación continua del motor. La mayor diferencia reside en la deposición del material. En el moldeo por inyección, el plástico es forzado a introducirse en un molde y a llenar todas las cavidades; por tanto, el material es introducido al molde contra presión. Sin embargo, en la tecnología FPF es la gravedad y el movimiento continuo del material fluido dentro del extrusor quienes depositan el material sobre la plataforma de fabricación. Por otro lado, la maquinaria utilizada en el moldeo por inyección de plásticos tiene husillos de larga longitud y con un alto número de zonas calefactadas a lo largo del mismo. En el caso de la técnica FPF, el husillo es muy corto y como máximo se incluyen un par de resistencias térmicas. La transmisión de energía hacia el material está más controlada en la fabricación convencional.

Debido a las similitudes, suena razonable pensar que los materiales procesados a través del moldeo por inyección tengan cierta cabida dentro de la fabricación aditiva mediante FPF. De esta forma, se puede aumentar la libertad de diseño de las piezas y reducir los costes asociados a la adquisición de nueva maquinaria convencional, cuya inversión es muy superior en comparación con las máquinas de fabricación aditiva por FPF [66].

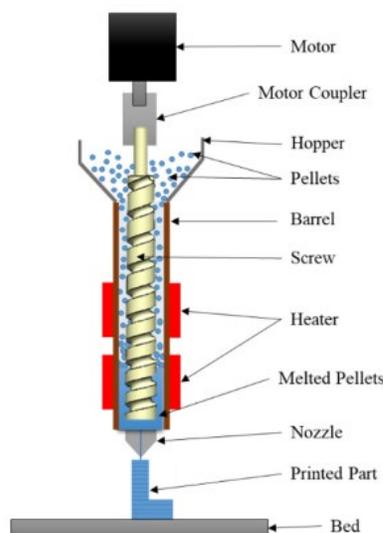


Ilustración 3.4. Esquema de la tecnología FPF [60]

3.2 POLÍMEROS

La tecnología FDM está concebida para la fabricación de piezas a partir de materiales poliméricos. No obstante, la adición de otros componentes como metales, cerámicos o fibras, permite crear materiales compuestos. Etapas de post-procesado dan lugar a piezas finales con extraordinarias propiedades. En este apartado, se desarrollará brevemente la teoría de los materiales poliméricos y las cualidades viscosas explotadas por la tecnología de extrusión de materiales.

Se denomina material polimérico, o popularmente plástico, a las macromoléculas obtenidas por repetición de unidades simples (monómeros) en una reacción de polimerización [67]. La polimerización consiste en un proceso químico por el que los reactivos, en este caso los monómeros, se agrupan entre sí dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, a una cadena lineal o a una macromolécula tridimensional. Un monómero es una molécula de bajo peso molecular formada por la unión de átomos. Los monómeros pueden ser clasificados por los átomos que conforman su estructura principal: grupo hidroxilo (-OH), grupo alcoholes (C-OH), grupo carboxilo (-COOH) y grupo amina (-NH₂). Los polímeros adquieren las propiedades fundamentales de los monómeros que lo componen y pueden diferenciarse en 3 grandes grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

3.2.1 Termoplásticos

Los termoplásticos se ablandan al calentarlos y alcanzan una fase líquida con la temperatura. Al enfriarlos, vuelven a su estado rígido original. En la teoría, estos materiales pueden ser recalentados y enfriados tantas veces como se desee. Este comportamiento se debe a los débiles enlaces existentes entre las distintas cadenas que forman el polímero. Sin embargo, los enlaces entre átomos son fuertes.

Según se aplica suficiente energía térmica al material, los enlaces débiles intermoleculares se rompen progresivamente y se posibilita el deslizamiento entre las cadenas constitutivas del polímero. Esto da lugar a las conocidas como fases de comportamiento de un termoplástico en estado sólido [68]. El comportamiento de los termoplásticos frente a cargas térmicas manifiesta cinco regiones.

- Región vítrea: los movimientos moleculares están impedidos, el material es rígido y posee un módulo elástico elevado. Esta fase finaliza con la temperatura de transición vítrea (T_g).
- Régimen de transición vítrea: el aumento de la temperatura del termoplástico da lugar a una pérdida en la resistencia de los enlaces entre cadenas lineales, provocando un aumento suave en la viscosidad del material.
- Régimen elastómero: los enlaces débiles entre cadenas son minoritarios. El polímero es sólido pero blando, y se deforma con facilidad. El módulo elástico es muy bajo y el material es fácilmente deformable y maleable.
- Régimen viscoso: el polímero se encuentra en estado líquido, siendo la deformación viscosa predominante. Esta fase finaliza con la temperatura de fusión del plástico (T_f).
- Régimen de descomposición: a una temperatura excesiva, la energía térmica causa la degradación del polímero.

Estas cinco regiones son particularmente visibles para termoplásticos amorfos, que carecen de orden estructural y se asemejan a un ovillo de hilo donde las cadenas se encuentran entrelazadas en todas las direcciones del espacio. En otras palabras, el plástico no forma cristales. Termoplásticos amorfos son polimetilmetacrilato (PMMA), cloruro de polivinilo (PVC) y poliestireno (PS). Termoplásticos parcialmente cristalinos son el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) [67].

El termoplástico de mayor aplicación en la industria es el polipropileno (PP), rozando los diez millones de megatoneladas producidas en el año 2019 [69]. Sus propiedades de ligereza, alta rigidez y buena resistencia solar lo convirtieron en el plástico de mayor demanda en Europa en el año 2019, con un peso del 19,4% en la demanda total de plásticos. El polipropileno es el plástico con un mayor rango de aplicación, ya que se utiliza en sectores como el envasado, construcción y edificación, automoción, electrónica y electricidad, agricultura, ocio y deportes [69].

El polietileno (PE) es también un termoplástico con extensas aplicaciones en la industria. Las diferentes variaciones en su composición química permiten la fabricación de polietilenos de alta densidad (HDPE), media densidad (MDPE) y baja densidad (LDPE), concediendo importantes

propiedades en base a la aplicación deseada. El conjunto de las variedades de polietileno representó un 30% de la demanda total de plásticos en Europa en el año 2019 [69]. Su rango de aplicación es tan amplio como el del polipropileno, aunque está mayoritariamente extendido en la industria del envasado.

El policloruro de vinilo, comúnmente nombrado por sus siglas PVC, es el tercer termoplástico de mayor utilización en la industria. Con una demanda anual del 10% sobre el total de plásticos, su aplicación se concentra mayoritariamente en el sector de la construcción, donde se utiliza como revestimiento en paredes y suelos, tuberías y canalizaciones, aislamiento de cables eléctricos y mangueras de riego, marcos de ventana y perfiles, etc.

Datos de la UE28+NO/CH.

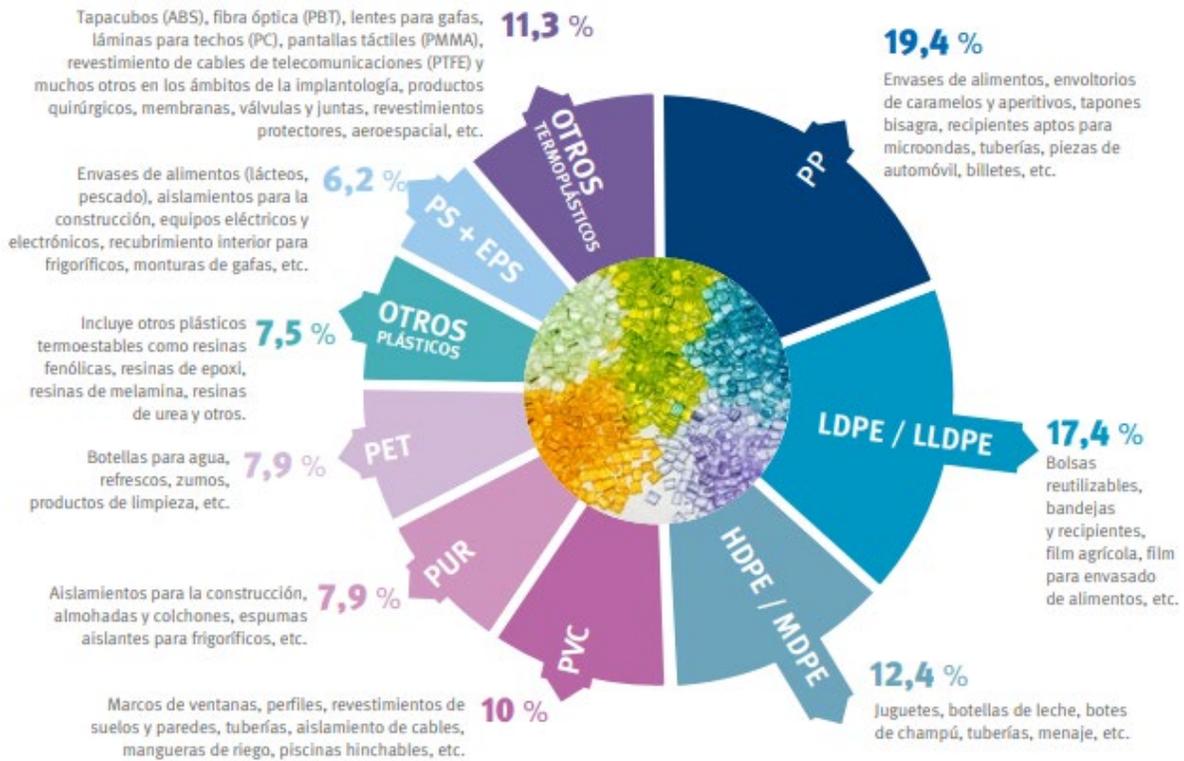


Ilustración 3.5. Distribución de la demanda de plásticos por tipo de resina en 2019 [69]

La impresión mediante FDM de los termoplásticos se debe realizar a una temperatura dentro del régimen viscoso y lo más cercana posible a la temperatura de fusión (T_f) [68]. Por tanto, los

termoplásticos amorfos serán más fácilmente imprimibles, pues las transiciones entre fases son más acusadas y se encuentran en un rango más amplio de temperaturas. En el régimen viscoso, el plástico puede depositarse fácilmente en la plataforma de impresión y darle la forma deseada a la pieza.

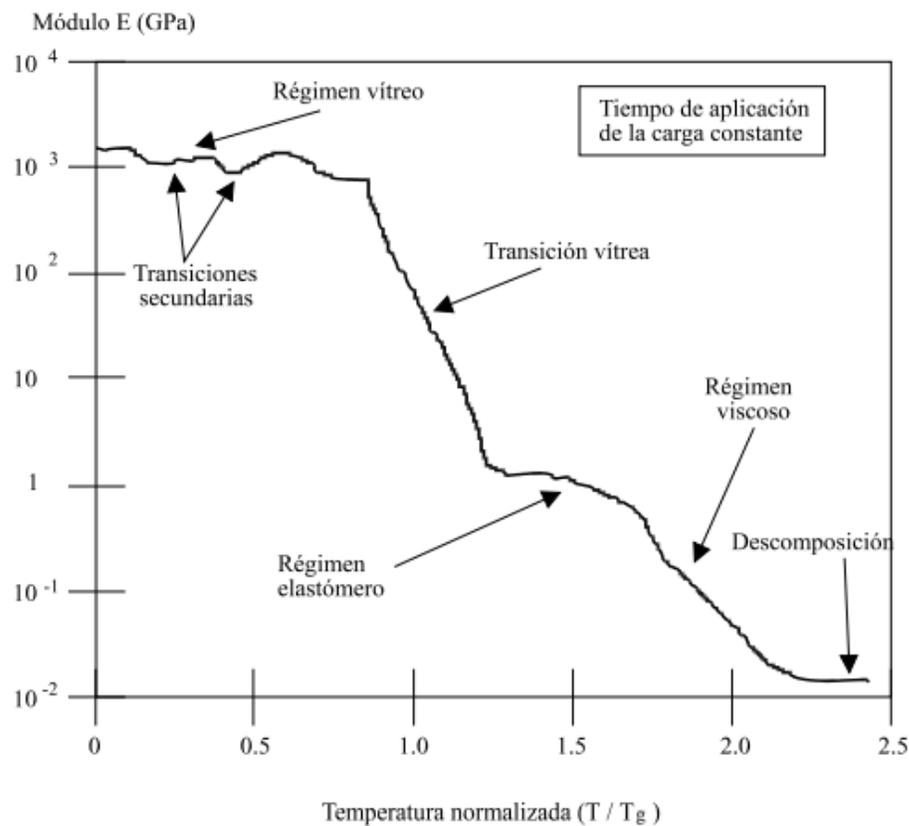


Ilustración 3.6. Variación del módulo elástico de un termoplástico amorfo con la temperatura [67]

3.2.2 Termoestables

Son polímeros con estructuras tridimensionales cuyas cadenas constitutivas están unidas entre sí mediante enlaces fuertes. Los enlaces intramoleculares (entre cadenas de monómeros) e intermoleculares (entre átomos de los monómeros) no son distinguibles bajo el microscopio, lo cual otorga fuerte resistencia a estos plásticos.

El comportamiento de los termoestables frente a la temperatura está afectado por la existencia de enlaces fuertes entre los distintos monómeros. Cuando se calienta el material, la resistencia y rigidez se mantiene intacta, hasta que se alcanza la temperatura de descomposición, en donde todos los enlaces atómicos se rompen [67]. En otras palabras, los regímenes de transición vítrea, elastómero y viscoso son inexistentes.

El poliuretano (PUR) es el termoestable de mayor aplicación en la industria, representando el 8% del consumo anual de plásticos en Europa en el año 2019 [69]. Las propiedades destacables del poliuretano son excelente tenacidad, flexibilidad, resistencia a aceites y grasas y buen aislante térmico y acústico. El poliuretano es un plástico especial, pues su comportamiento frente a la temperatura puede variar en base a su composición química. Así, se distingue entre el poliuretano termoplástico (TPU) y el poliuretano termoestable. El poliuretano termoestable habitualmente se encuentra en forma de espuma y se utiliza mayoritariamente como aislante térmico en la construcción o en máquinas frigoríficas. En su variante termoplástica (TPU), el poliuretano puede ser impreso a partir de FDM.

El poliéster es el termoestable de mayor aplicación en la industria. Sus usos varían desde el envasado y productos de decoración hasta fibras textiles, sector ferroviario o maquinaria industrial. Entre sus características más importantes destacan la resistencia a los ácidos, alta elasticidad y resistencia a la abrasión. Entre los mayores inconvenientes destacan la toxicidad de sus humos y la gran cantidad de agua necesaria para el proceso de enfriamiento. La fabricación con resinas de poliéster exige estrictos protocolos de seguridad.

Estos polímeros no se pueden fundir y tampoco son reciclables. Su comportamiento frente a la temperatura impide su uso en tecnologías de fabricación aditiva, en donde la energía térmica es un valor fundamental para dar forma a los materiales utilizados. Después de calentarlos y moldearlos no es posible volver a fundirlos para conformarlos nuevamente.

3.2.3 Elastómeros

Los elastómeros son polímeros cuya estructura está formada por la unión dispersa de largas moléculas lineales unidas por fuertes enlaces [67]. En condición de reposo, las cadenas de polímeros se encuentran enrolladas de forma irregular y, al aplicar una carga mecánica, se

desenrollan progresivamente experimentando grandes alargamientos. Esta clase de plásticos sí puede ser procesada a través de técnicas de fabricación aditiva.

La silicona es un elastómero con amplias aplicaciones en utensilios diarios gracias a sus propiedades elásticas, biocompatibilidad y resistencia a altas temperaturas. Sus usos de aplicación común son utensilios de cocina para hornear, aislantes, revestimientos, medicina, etc.

El caucho también pertenece a la familia de los elastómeros y tiene un rango de aplicación grande. La invención de los neumáticos supuso una rápida expansión en la utilización de este plástico, que incluso pasó a ser nombrado coloquialmente como el oro blanco de la selva sudamericana, por su procedencia. Adicionalmente, se utiliza en el sector textil gracias a ser un material impermeable, elástico y resistente a los ácidos.

3.3 COMPONENTES DE MÁQUINA

En este apartado, se introducirán los componentes estructurales de mayor importancia en la extrusión de materiales mediante la técnica de FPF. Está fuera del alcance de este trabajo el análisis de la electrónica y los componentes estructurales del bastidor. Se hará hincapié en los elementos que integran el extrusor, cabezal o husillo que depositan el material sobre la plataforma de impresión. Adicionalmente, se describirán las distintas configuraciones de máquina disponibles para la tecnología FDM.

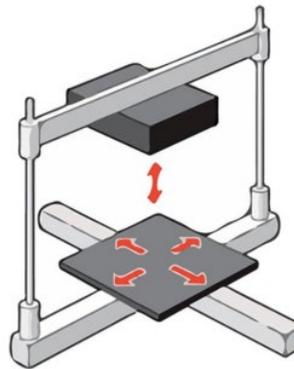
3.3.1 Configuraciones de impresora 3D

Las impresoras 3D se caracterizan por disponer de un total de tres grados de libertad y, por ende, tres movimientos independientes. La disposición de los distintos grados de libertad da lugar a diferentes configuraciones de máquina, cada una con sus ventajas e inconvenientes particulares [70].

- Impresoras 3D cartesianas

Es la configuración más extendida en el mercado debido a la sencillez en el control de los movimientos de los componentes mecánicos. Consiste en tres ejes ortogonales que se utilizan para determinar cómo y dónde se desplaza el cabezal de impresión a lo largo de las tres dimensiones. Por tanto, la impresora dispone de tres movimientos lineales a

lo largo de cada dimensión espacial. El movimiento del eje vertical o dirección de fabricación puede estar asociado al desplazamiento de la plataforma de impresión o al desplazamiento del cabezal de extrusión. Entre las ventajas de esta configuración destaca su gran popularidad. Encontrar recambios de piezas y empresas que se encargan del mantenimiento es sencillo. Por otro lado, los ejes tienen una alta rigidez, lo que da lugar a mejores acabados superficiales que para otras configuraciones [70].



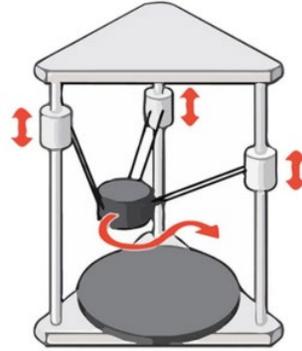
Cartesiana

Ilustración 3.7. Impresora 3D cartesiana

- Impresora 3D delta

Las impresoras Delta están compuestas por el movimiento simultáneo de tres ejes verticales que permiten la localización del extrusor en todo el volumen de construcción. La plataforma de impresión tiene forma circular y los límites de fabricación están definidos por el diámetro de la base y la altura de los brazos. Estas impresoras permiten un aumento en la velocidad de impresión, pero la complejidad en la calibración es superior. Las altas velocidades provocan una pérdida en la precisión dimensional y un aumento en la rugosidad superficial. En último lugar, todas las impresoras delta tienen una extrusión estilo bowden; es decir, el motor paso a paso que introduce el material en la zona calefactada se encuentra localizado en el chasis de la impresora y no sobre el cabezal de extrusión. Esto permite reducir el peso del extrusor, posibilitando velocidades de impresión superiores, pero la canalización del filamento entre el motor extrusor y la boquilla puede dar lugar a atascos de material en el tubo o un flujo de material

discontinuo [70]. No obstante, las impresoras delta no pueden aplicarse a la tecnología FPF por la metodología de introducción del material en el extrusor.



Delta

Ilustración 3.8. Impresora 3D delta

- Impresora 3D polar

Es la impresora menos desarrollada en el mercado, puesto que utiliza coordenadas polares para la localización del extrusor en el espacio tridimensional. Dispone de tres grados de libertad, uno correspondiente a la rotación de la plataforma de impresión y dos movimientos longitudinales (uno vertical y otro horizontal) del extrusor de material. Esta configuración es ideal para la obtención de geometrías en espiral. Sin embargo, la precisión de la fabricación varía considerablemente según el punto de deposición de material se aleja del centro de rotación de la plataforma [70].

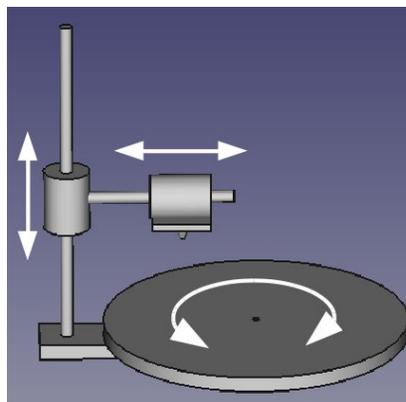


Ilustración 3.9. Impresora 3D polar

3.3.2 Elementos estructurales

1. Motor

El motor paso a paso es un elemento mecánico que realiza movimientos de rotación. En el caso de las impresoras FPF, se requiere un mínimo de cuatro movimientos: 3 motores para la traslación del extrusor en todo el volumen de impresión y un motor adicional para la extrusión de material. En este apartado el foco se establecerá en el motor extrusor de material. Los motores paso a paso se caracterizan por estar alimentados por corriente continua y la rotación del eje de salida no es continua, sino discreta. El eje solo puede ser posicionado en ciertos lugares específicos a lo largo de la circunferencia. Habitualmente, los motores paso a paso están divididos en 200 pasos, lo que indica posiciones cada 1,8 grados de rotación. La naturaleza inherente del motor no da lugar a giros suaves, sino que realiza saltos y cruza estados intermedios, por lo que su funcionamiento está acompañado de un sonido y vibración característicos. Los motores paso a paso no tienen un gran par de salida, por lo que suelen estar acompañados de ruedas reductoras con el objetivo de aumentar el torque, a la vez que se disminuye la velocidad de rotación en el eje. El motor está compuesto por un rodamiento que permite una rotación relativa entre la carcasa del motor y el eje de salida. En último lugar, el eje de salida está directamente acoplado con el tornillo sin fin del husillo, que permite el movimiento del material polimérico en estado fluido. A mayor velocidad de rotación del husillo, mayor será el caudal volumétrico extruido [71]. Estas observaciones cobrarán especial relevancia en el apartado Estudio experimental.



Ilustración 3.10. Motor paso a paso [71]

2. Tolva

La tolva es el elemento estructural en donde se introducen los pellets y se realiza la alimentación del husillo. Puesto que va localizada sobre el propio extrusor, es deseable que su peso sea el más bajo posible, facilitando así unos movimientos del cabezal suaves, con bajas inercias y con precisión de movimiento alta. Sin embargo, una tolva de pequeño tamaño limita el volumen máximo de pieza fabricada. Es atractivo diseñar y fabricar un sistema de alimentación de pellets neumático que permita trasladar el material desde una tolva estacionaria e independiente de la impresora y que llene la tolva del husillo solo cuando el receptáculo esté vacío.

3. Husillo

El husillo está compuesto por un tornillo sin fin o tornillo de Arquímedes que desplaza progresivamente los pellets desde la tolva hasta la boquilla del extrusor. Las características dimensionales del tornillo se relacionan directamente con el flujo volumétrico de material extruido. El husillo debe permitir introducir de una manera suave los pellets en el tornillo, sin provocar acumulaciones de material. La geometría del husillo es de suma relevancia pues puede dar lugar a continuos atascos debido a acumulación de material. Además, el material aglomerado podría llegar a degradarse térmicamente, evitando la entrada de nuevo material, arruinando la fabricación y ocasionando sucesivas etapas de limpieza cada poco tiempo. Estos comentarios cobrarán relevancia en el apartado Estudio experimental.

4. Zonas calefactadas

Las zonas calefactadas son dos resistencias eléctricas que calientan el material hasta alcanzar la temperatura de fusión y convertir el agregado de pellets en una pasta fluida capaz de ser depositada en la plataforma de impresión. Asimismo, las zonas calefactadas están provistas de dos sensores para regular correctamente la temperatura dentro del husillo, evitando el quemado de los materiales en caso de alta temperatura o un desigual calentamiento que provoque solidificación dentro del husillo, dando lugar a atascos.

5. Boquilla

La boquilla es el elemento final del extrusor y se encarga de depositar el material sobre la cama de impresión. Este elemento es de suma importancia, pues es quien determina ciertos parámetros del proceso. Adicionalmente, debe estar fabricada de un material resistente a la abrasión y debe evitarse su obstrucción. El diámetro de la boquilla determina la calidad dimensional y rugosidad superficial de la pieza, pues determina ciertos parámetros del proceso.

3.4 PARÁMETROS DE PROCESO

Se entiende por parámetros de proceso al conjunto de instrucciones enviadas a la máquina y a las que el usuario tiene acceso a su modificación manual. Los parámetros de proceso influyen por tanto en la calidad de impresión de la pieza. La medición de la calidad de la pieza es un aspecto aún no estudiado por la norma y son los técnicos quienes deben adaptarse en función de los objetivos y la finalidad de la pieza. Los diagramas de Ishikawa son gráficos causales que representan las fuentes que influyen sobre un evento específico. En fabricación, los diagramas Ishikawa son muy habituales para analizar todos los aspectos que pueden influir en la calidad final de una pieza o producto. La norma aún no dicta qué factores influyen en mayor medida sobre la calidad final de una pieza obtenida a partir de fabricación aditiva, por lo que ningún aspecto debería ser ignorado. Se estima que, en procesos como la fusión selectiva por láser, el número de factores de gran importancia puede alcanzar la centena. Entre los más relevantes destacan la calidad del archivo CAD, la homogeneidad en el material de aporte o la experiencia del técnico de fabricación.

Pese a la inmensa cantidad de factores que afectan a la calidad final de la pieza, solo unos pocos son de verdadera relevancia. Es importante destacar que la selección de parámetros depende del objetivo del proceso de fabricación. En otras palabras, de la función a optimizar. Las técnicas de fabricación convencional buscan minimizar el coste total de producción (bajas velocidades de fabricación dan lugar a un menor desgaste de las herramientas y su recambio es menos habitual), maximizar la producción [72] (mediante la fabricación a altas velocidades, sin tener en mucha consideración el precio asociado) o maximizar el beneficio [73]. Optimizar los

parámetros de proceso de tecnologías de fabricación convencionales es de alta complejidad y requiere de herramientas matemáticas para la toma de decisión con múltiples objetivos.

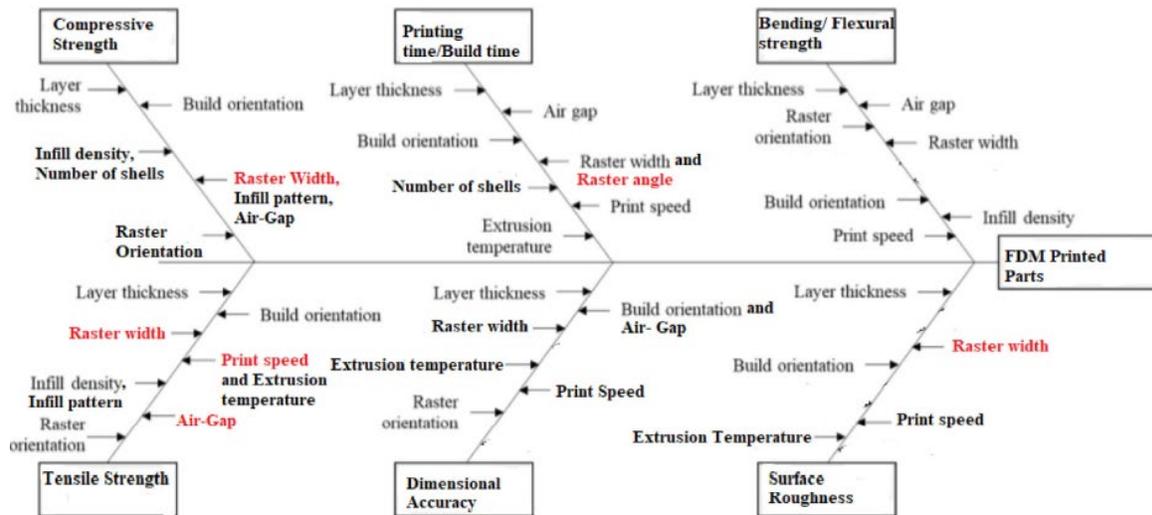


Ilustración 3.11. Diagrama de Ishikawa para piezas de FDM [45]

En el caso de la fabricación aditiva por FDM, los criterios a estudiar suelen ser cinco: resistencia a tracción de la pieza, resistencia a compresión, tiempo de fabricación, resistencia a flexión y precisión dimensional y calidad superficial [45]. Por tanto, durante los procesos de fabricación se deben hacer siempre concesiones entre las funciones objetivo; es imposible obtener una pieza de alta calidad minimizando el tiempo de fabricación (cuyo valor ideal es nulo). Los ensayos realizados durante la etapa de experimentación irán encaminados a la optimización de parámetros para la maximización de la precisión dimensional y la calidad superficial.

Cada tecnología de fabricación tiene sus parámetros de proceso específicos no compartidos con otras tecnologías. Por ejemplo, la fabricación de materiales cerámicos precisa de tratamientos térmicos tras la impresión, con el objetivo de eliminar los agentes aglutinantes poliméricos, y un proceso de sinterizado para densificar la pieza. Por otro lado, las técnicas que utilizan un haz láser para procesar materiales metálicos tienen parámetros como potencia del haz o velocidad del láser, ausentes en tecnologías como el FDM. En este estudio, se hará hincapié en los parámetros de proceso de las tecnologías de FDM.

3.4.1 Altura de capa

Altura de las capas depositadas a través del extrusor, medida en el eje vertical o eje Z. Determina el desplazamiento vertical de la plataforma de impresión cada vez que se imprime una capa. Los valores de esta variable dependen del diámetro de la boquilla del extrusor, del material a imprimir y de la precisión máxima de movimiento de la máquina en el eje Z. Como norma general, se establece que la altura de capa debe tomar un valor entre el 50% y el 80% del diámetro de la boquilla utilizada [74].

La altura de capa da lugar al efecto conocido como “staircase effect” o efecto escalera. Debido al rebanado de la pieza en capas, las capas sucesivas pueden tener longitudes diferentes, provocando unos escalones en capas contiguas. Este efecto (ver Ilustración 28) se ve afectado por la altura de capa; a mayor altura de capa, más notorio es. Adicionalmente, este resultado influye directamente sobre la calidad superficial de la pieza, la precisión dimensional y la velocidad de impresión. Alturas de capa mayores permitirán velocidades de impresión más altas.

El fenómeno “staircase effect” es común a todas las tecnologías de fabricación aditiva. Sin embargo, el efecto es más acusado en las tecnologías FDM pues la altura de capa es superior al resto de tecnologías (la altura de capa habitual para las tecnologías de lecho en polvo es 50 micrómetros; sin embargo, FDM utiliza habitualmente 0,2 milímetros).

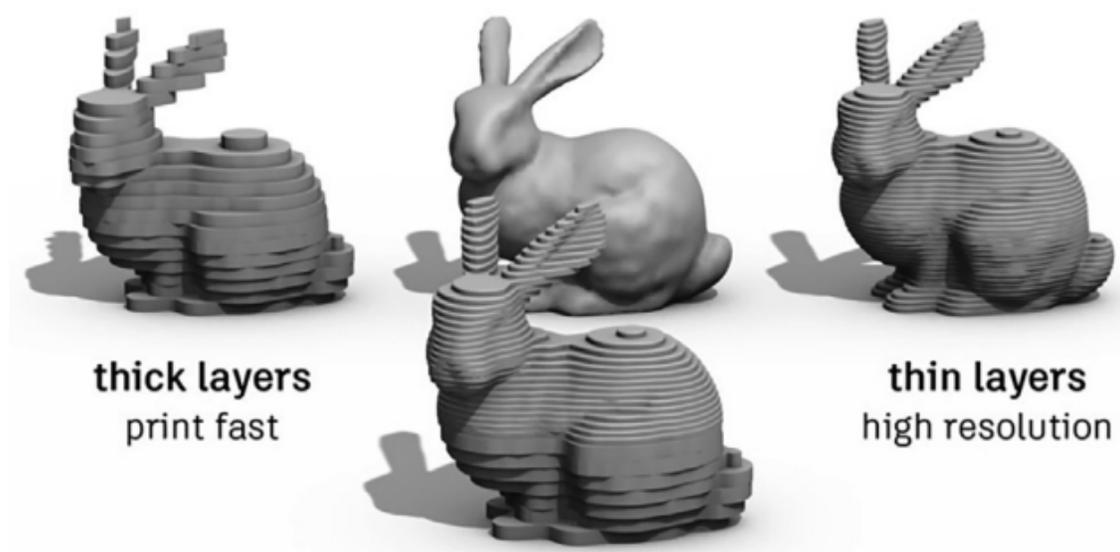


Ilustración 3.12. "Staircase effect" para modelos con distinta altura de capa [33]

Ahora se hace hincapié en las características geométricas de las líneas que formarán las distintas capas. El primer parámetro se denomina ancho de extrusión o, por su terminología en inglés, “extrusion width”. Este valor corresponde al ancho de las líneas que se imprimen en cada capa. Por norma general, se utiliza como valor el diámetro de la boquilla, de tal forma que una deposición correcta no desparramaría el material y se mantendría el ancho de la línea especificado y su altura correspondería al de la altura de capa.

El segundo parámetro relevante es el espaciado entre líneas o “air gap”. Esta variable da cuenta de la distancia teórica existente entre las líneas contiguas que conforman el contorno de la pieza [59]. Para entender este concepto, se indica a continuación un pequeño ejemplo. Se imprime una pieza cilíndrica compuesta por varias líneas de contorno, todas ellas circulares y concéntricas entre sí. El espaciado entre líneas corresponde a la distancia radial que se desplaza el cabezal para imprimir líneas consecutivas, es decir, la distancia existente entre dos círculos contiguos. Si este valor es nulo, las líneas contiguas estarían completamente tangentes, sin haber solapamiento o espacio entre las mismas. En el caso de tener un valor positivo, existe un pequeño espacio de aire. Para valores negativos, las líneas se solapan y se montan unas encima de otras (ver Ilustración 30 e Ilustración 31). No todos los programas “slicer” permiten controlar este parámetro y habitualmente toma un valor nulo.

El último parámetro de capa se denomina ángulo de trama o “raster angle”. Este valor indica la orientación de impresión de las líneas con respecto de los ejes horizontales X e Y de la máquina de impresión [35, 45, 59].

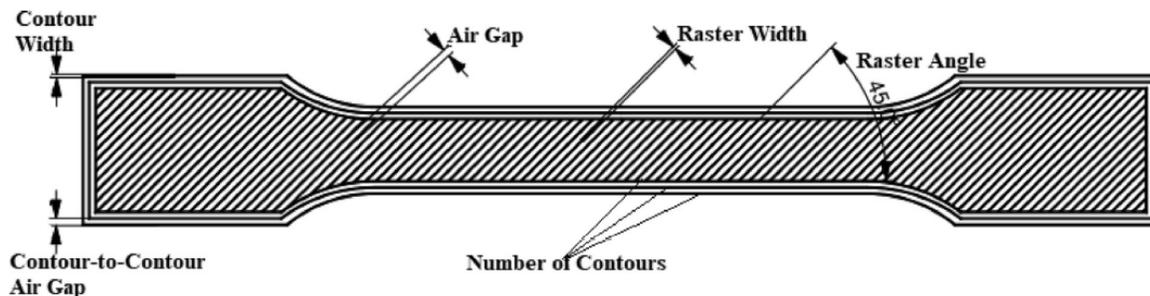


Ilustración 3.14. Identificación de parámetros de capa [45]

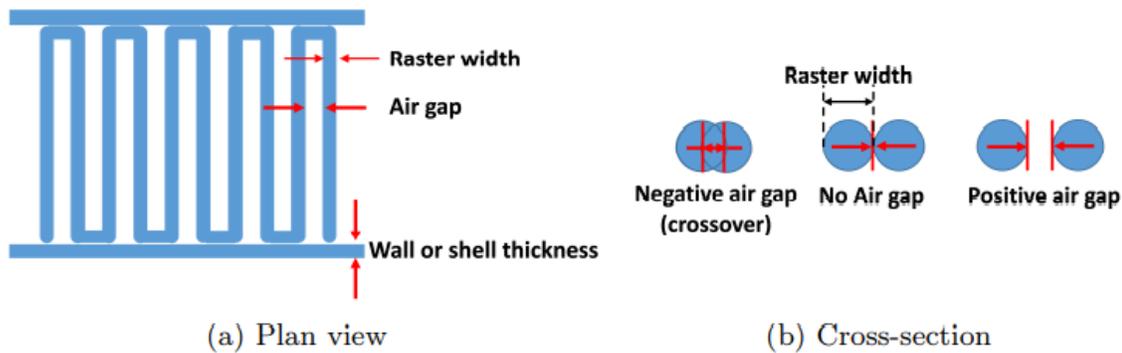


Ilustración 3.15. Vista en planta de una capa impresa [77]

3.4.3 Orientación de la impresión

Indica el posicionamiento de la pieza dentro del volumen de fabricación. Esta es una consideración de gran relevancia cuando se pretende optimizar la calidad superficial de la pieza [35, 45, 63]. La orientación determina directamente la necesidad de utilizar soportes para evitar desplomes de voladizos. Adicionalmente, la retirada de soportes puede no ser sencilla en función del material a procesar y pueden quedar rebabas que deban ser lijadas para disminuir la rugosidad de la pieza. Por ejemplo, durante el procesamiento de metal a través de tecnologías de fusión de lecho en polvo, los soportes deben ser retirados mediante el uso de sierras o mediante erosión de corte por hilo. Adicionalmente, se precisa de etapas de lijado para mejorar la calidad superficial donde se encontraban los soportes. Por tanto, un correcto posicionamiento de las piezas dentro de la cuba de fabricación permite disminuir los tiempos de manufactura y el coste asociado.

Por otro lado, se debe tener en cuenta aquellas caras donde el efecto “stair-case” va a ser predominante, puesto que necesitará algún tratamiento de post-procesado. Por último, una correcta orientación en la fabricación permite apilar y fabricar un mayor número de piezas simultáneamente, reduciendo los costes de fabricación no productivos.

La resistencia mecánica de la pieza también se ve afectada por la orientación de fabricación, especialmente la resistencia a tracción [59, 78]. La adhesión entre capas contiguas es el factor delimitante de la resistencia mecánica de la pieza. La delaminación ocurre con mayor facilidad

que la rotura del material. Por ello, si una pieza está sometida a tracción, se debe evitar que la dirección traccionada coincida con la dirección de impresión (eje vertical Z).

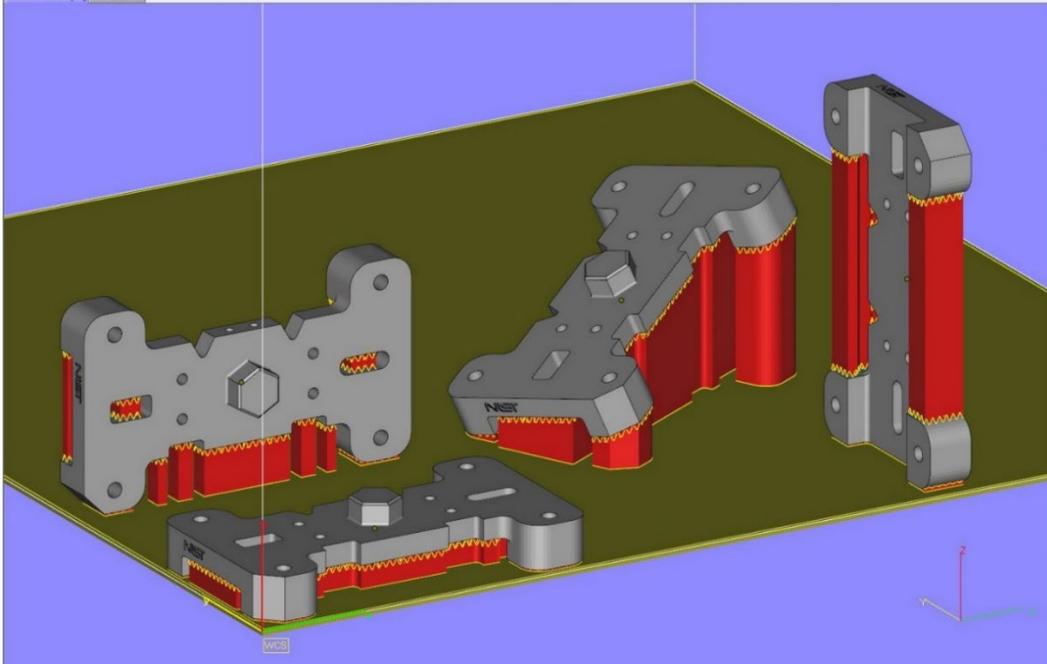


Ilustración 3.16. Estructuras de soporte en base a la orientación de fabricación [36]

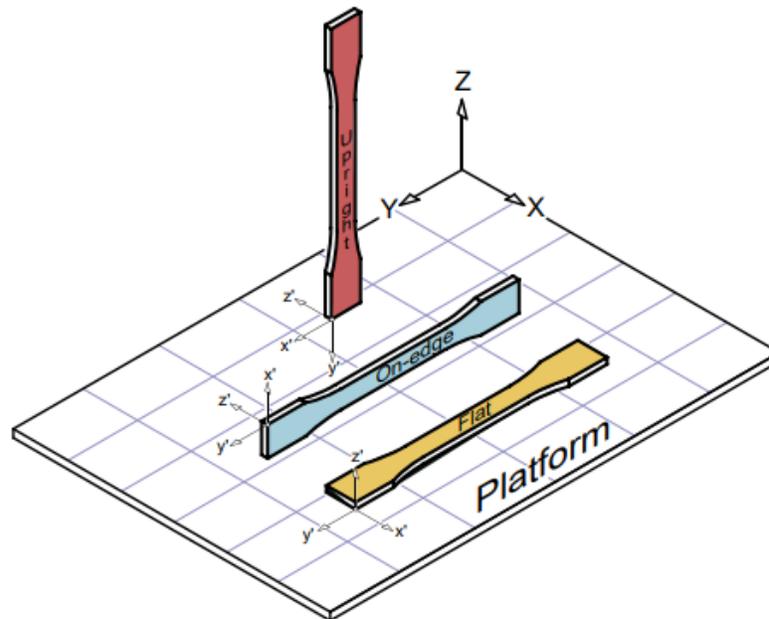


Ilustración 3.17. Orientaciones de impresión de la probeta para análisis de propiedades mecánicas [59]

3.4.4 Velocidad de impresión

Los programas informáticos utilizados para hallar el código máquina de impresión pueden adaptar múltiples velocidades durante la fabricación. En función del programa utilizado, las opciones pueden variar.

En primer lugar, la velocidad de mayor relevancia en el proceso es la velocidad de deposición de material sobre la cama de impresión, es decir, el flujo volumétrico de material extruido. La velocidad de impresión máxima viene dada por las características esenciales del material. En líneas generales, una mayor deposición de material disminuye los tiempos de fabricación, pero la calidad de las piezas se verá mermada. El flujo volumétrico máximo está limitado por las características reológicas del material y su viscosidad [32, 45].

En segundo lugar, se debe seleccionar la velocidad de desplazamiento del cabezal durante la impresión, también conocido como velocidad de impresión. Al igual que en el parámetro anterior, bajas velocidades dan lugar a una mejora en la calidad de la pieza y un aumento del tiempo de fabricación. Ciertos programas “slicer” permiten modificar la velocidad de impresión en función de la zona de fabricación. Así, los soportes se fabricarán a alta velocidad y los contornos a velocidad baja. Sin embargo, el material de relleno se realizará a velocidad intermedia. Esto permite una optimización en los tiempos de producción, prestando mayor atención a las zonas críticas de fabricación.

3.4.5 Temperaturas de impresión

El material a extruir debe ser calentado con el objetivo de disminuir su viscosidad interna y aumentar su fluidez. De este modo, el material puede ser depositado con facilidad sobre la cama de impresión. Adicionalmente, existen impresoras que disponen de una resistencia térmica sobre la plataforma de impresión para mejorar la adhesión entre la pieza y la impresora y evitar problemas de deslizamiento. Una deficiente temperatura de extrusión implica una excesiva viscosidad del material y mayor dificultad para su deposición, incluso dando lugar a flujos discontinuos. Una temperatura excesiva puede forzar al material a entrar en la región de descomposición, dando lugar al quemado del material y generando atascos continuos en el husillo.

Estos parámetros son particulares de cada material estudiado y se aclarará con mayor detalle en próximos apartados (ver apartado 4.1).

3.4.6 Características adicionales

Las características inherentes de cada material hacen que los requerimientos específicos varíen. Existen polímeros que requieren un control preciso de la temperatura en el volumen de impresión. Esto se debe a que velocidades de enfriamiento muy elevadas pueden producir derrumbamientos y agrietamientos de la pieza. La familia de polímeros ULTEM [79] consiste en una resina termoplástica que ofrece alta resistencia a la temperatura, alta resistencia mecánica y rigidez y una amplia gama de resistencia frente a compuestos químicos. Adicionalmente, su ligereza y la relación entre peso y resistencia lo convierten en un material ideal para su aplicación en el sector aeronáutico, automovilístico y en la industria médica para instrumental quirúrgico [75]. En cualquier caso, la problemática del procesamiento de ciertas variedades de ULTEM (la empresa proveedora Sabic comercializa un total de 132 categorías [79]) reside en la necesidad de mantener la zona de impresión a alta temperatura, en torno a 120°C [80]. Este suceso también ocurre para el ABS, el primer plástico que fue utilizado masivamente en la fabricación aditiva por FDM. Cambios bruscos de temperatura provocan agrietamientos del material y, por tanto, fallos durante la impresión.

Otro parámetro de proceso requerido para la impresión de ciertos materiales es el ventilador de capa. Este dispositivo cumple la función de recircular aire hacia las capas impresas, con el fin de disminuir su temperatura con la mayor velocidad posible. Se utiliza principalmente para aquellos termoplásticos que tienen un coeficiente de convección bajo y mantienen su temperatura alta durante un largo periodo de tiempo. Al ser la transferencia de energía con el ambiente lenta, el material sigue en un estado de alta fluidez a pesar de haber sido depositado en la plataforma de impresión. Esto provoca derrumbes de material con facilidad, e incluso la boquilla puede arrastrar material ya depositado. El PLA es el claro ejemplo de la necesidad de encender el ventilador de capa para su correcta impresión. Habitualmente, éste se enciende a partir de la tercera capa impresa, de tal forma que se favorece una correcta adhesión de las dos primeras capas a la plataforma y la cohesión entre capas se facilita gracias al rápido enfriamiento de las sucesivas capas a través del ventilador de capa [81]. Otros polímeros que requieren esta

funcionalidad son el caucho termoplástico (TPE), el polipropileno (PP) y el poliéster de glicol (PETG).

Una última funcionalidad adicional es la plataforma de impresión. Como se ha comentado anteriormente, existen muchos materiales poliméricos que precisan la utilización de un sustrato caliente (plataforma de impresión) para fijar la pieza y evitar derrumbes o desplazamientos de capa. Adicionalmente, el material del que está fabricada la plataforma de impresión también influye. Una correcta adherencia requiere una buena afinidad físico-química entre el material de la plataforma de impresión y el material de impresión [82]. Habitualmente se opta por la utilización de recubrimientos aplicados sobre láminas adhesivas o recubrimientos líquidos. En el primer grupo destaca el uso de cintas adhesivas que contiene un recubrimiento polimérico en una de sus superficies; en el segundo grupo destacan las barras de pegamento o lacas de impresión 3D. Otra opción consiste en el diseño de faldas y balsas para aumentar la superficie de contacto entre la pieza y la plataforma de impresión.

4 Estudio experimental

El propósito principal de este estudio reside en la caracterización de los parámetros de proceso de diferentes materiales termoplásticos durante su fabricación a través de la técnica FPF; en otras palabras, cómo fabricar estos materiales. A continuación, se detalla todo el proceso experimental llevado a cabo, desde el diseño de los experimentos y su planificación, hasta el estudio detallado de los materiales utilizados y un análisis de la normativa relativa a probetas de calibración de la maquinaria de fabricación aditiva.

4.1 MATERIALES DE ESTUDIO

Como ya se indicó previamente, la técnica de fabricación FPF o extrusión de materiales en formato granza está centrada en la manufactura de materiales poliméricos, en particular, los termoplásticos (ver apartado 3.2). No obstante, la incorporación de otros elementos a una matriz polimérica puede dar lugar a materiales compuestos con características idóneas para ciertas aplicaciones en la industria [35, 66]. La inclusión de partículas metálicas o cerámicas abre el espectro de utilización de este tipo de tecnologías y abarata considerablemente la producción de piezas con alta complejidad geométrica [40].

Inicialmente, se estudiarán plásticos habitualmente utilizados en la fabricación por filamento (PLA, PETG o nylon) y, posteriormente, se analizarán plásticos técnicos utilizados en el moldeo por inyección (LEXAN y LUVOCOM). En último lugar, se estudiará el potencial de la fabricación de cerámicas técnicas, como la alúmina, a través de esta tecnología.

4.1.1 PLA

El PLA, acrónimo de ácido poliláctico, es el material polimérico por excelencia utilizado en la fabricación 3D a través de la tecnología FFF. El PLA es un derivado de materias primas naturales y renovables, como el maíz, y pertenece a la familia de los poliésteres. En contraposición a otros materiales plásticos, el PLA puro se obtiene a partir de materias primas renovables y no se basa en combustibles fósiles. Un aspecto positivo del PLA reside en su capacidad para ser reciclado y reutilizado. Se establece que la vida útil del PLA está en 5 ciclos de impresión [62, 63]. Adicionalmente, el PLA es compostable bajo condiciones de temperatura

y presión específicas en una planta de compostaje industrial. Es decir, puede ser degradado por acción de microorganismos produciendo dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa, siendo este último elemento aprovechable para la generación de energía eléctrica en centrales de ciclo combinado. En resumen, el impacto medioambiental del PLA es inferior al de otros plásticos utilizados en la industria.

El movimiento RepRap impulsó la popularización del PLA como uno de los plásticos de mayor utilización en las impresoras 3D de escritorio. Sus propiedades características lo hacen ideal para la fabricación de prototipos y pequeños juguetes por los usuarios: sencillo de imprimir, baja inflamabilidad, alta estabilidad a la luz ultravioleta, disponibilidad en diferentes colores, alta resistencia y rigidez, bajo coste de adquisición, etc. [78].

En cuanto a aplicaciones industriales, el PLA es un polímero muy versátil con utilidad en distintos sectores. La variación de la formulación principal de este material lo convierte en aplicable en la industria del empaquetado con objetos como recipientes para comida congelada, envases de leche o film transparente [83]. Se están llevando a cabo estudios para analizar la reciclabilidad y la reutilización de vasos y cubiertos de PLA usados durante festivales de música [84].

4.1.2 PET

El PET (o por su nombre técnico, tereftalato de polietileno) es un polímero muy extendido en la industria de los envases y en la industria textil. La cadena principal de este plástico contiene el grupo éster, compuesto fabricado a partir del petróleo. El PET (junto con sus derivados como el PETG), posee unas características especiales que lo hacen muy apropiado para las industrias del envasado y la industria textil, entre otras. Los datos de PlasticsEurope [69] revelan que el PET es el cuarto plástico con mayor demanda anual en Europa, con un total de 4 megatoneladas, y representa el 8% de la demanda total de plásticos en Europa. Entre sus características principales destacan la alta resistencia al desgaste y la corrosión, buena resistencia química y térmica, reciclable, y barrera contra el dióxido de carbono, el oxígeno y la humedad. Estas propiedades lo convierten en un material ampliamente utilizado en la fabricación de botellas, bandejas, flejes y láminas [85].

La introducción de glicol en su estructura interna (dando lugar al PETG) le confiere unas cualidades ideales para la fabricación a través de tecnología aditiva. Los datos revelan que el PETG es el segundo plástico más utilizado en las técnicas de FFF, solo por detrás del PLA. El PETG combina por tanto las propiedades del PET y las del glicol. Es un copolímero duro, resistente al impacto y a los productos químicos, es fácil de extruir y posee alta estabilidad térmica. En contraposición, el PETG puede absorber rápidamente la humedad, reblandeciendo su estructura. Por ello, es preferible mantener las piezas en un ambiente fresco y seco.

En el contexto actual de la industria se está promocionando las acciones de lucha contra el cambio climático. Las acciones humanas tienen un grave impacto sobre el ecosistema de la Tierra y es primordial combatir contra la polución de la atmósfera y los océanos [61, 69]. Una de las ramas de desarrollo reside en reciclar los materiales y compuestos ya fabricados, confiriéndoles una vida útil más longeva. En este caso, el plástico PET entra dentro del cupo de materiales con capacidad de ser reutilizados. Mediante la mezcla de PET con un compuesto compatible, se pueden llegar a fabricar piezas de material reciclado. En este caso, se realizará un estudio de los parámetros de proceso del PETG virgen para, en una etapa posterior, evaluar la reciclabilidad del PET procedente de botellas [86].

4.1.3 Lexan

El Lexan es un nombre comercial para la familia de termoplásticos técnicos amorfos basados en resina de policarbonato (PC). Sus excepcionales propiedades térmicas, eléctricas, ópticas y mecánicas lo hacen un candidato óptimo para el recubrimiento de componentes electrónicos que precisan de interfaz para la protección contra agua y polvo; también es utilizado en cubiertas translúcidas, pasillos acristalados, barreras contra el sonido o protección visual.

El Lexan básico puede ser enriquecido con aditivos especiales para potenciar alguno de sus atributos. Los aditivos utilizados en el Lexan FST 3403T lo convierten en una resina retardante de la llama, convirtiéndolo en un material apto para aplicaciones en el interior de trenes y ferrocarriles. Sabic es el fabricante y especifica que el Lexan es apropiado para su procesamiento mediante la técnica convencional de moldeo por inyección.

El sector del transporte por ferrocarril ha estado siempre a la vanguardia de la tecnología. Las primeras revoluciones industriales favorecieron el desarrollo de esta tecnología que facilitaría el transporte de mercancías y pasajeros, comunicando zonas del planeta distanciadas entre sí. La normativa UNE-EN45545 [87] describe los requisitos de utilización de materiales dentro de los vehículos de ferrocarriles. En primer lugar, se distinguen los vehículos en función del nivel de peligro en tres categorías: HL1, HL2 y HL3. Cada nivel de riesgo varía en función de la categoría de explotación del vehículo. Los trenes subterráneos deben tener muy buenas propiedades con el objetivo de retardar al máximo la aparición de fuego y humo dentro del vehículo. Sin embargo, los vagones cuya aplicación sea exclusivamente al aire libre tendrán unas estipulaciones más laxas. Por otro lado, se establecen también requisitos frente al fuego. Cada requisito viene dado por la localización de la estructura en el vagón (interior o exterior) y de su utilización específica (mobiliario, equipos de índole electrotécnica o equipos de índole mecánica). De cualquier manera, el Lexan FST 3403T [88] cumple el nivel de peligro HL3 (utilización en cualquier vehículo de ferrocarril) y con requisito R6 (estructura del asiento del pasajero).

4.1.4 Luvocom

El Luvocom es un polímero basado en el sulfuro de polifenileno (PPS) y está reforzado con fibra de carbono. Fabricado por la empresa Lehvoss Group, es un material que cumple las normativas de lucha contra fuego y llama del sector ferroviario. Sus propiedades de uso continuado, resistencia a la distorsión por gradiente térmico y no inflamabilidad lo convierten en un material ideal en interiores de trenes y ferrocarriles. Por otro lado, se obtienen partes rígidas y resistentes a impactos y con buenas características eléctricas como conductividad y descarga progresiva de electricidad estática generada. Otras propiedades de relevancia son la resistencia al calor, resistencia a los químicos, resistencia al moho, resistencia a la luz solar, abrasión y envejecimiento.

En la hoja de características (referencia) se especifica que el Luvocom, en su variedad 3F PPS CF 9938 BK [89], está especialmente diseñado para el procesamiento mediante moldeo por inyección de plásticos. Sin embargo, el fabricante también suministra bobinas de hilo y facilita ciertos parámetros para comenzar con la iteración en la fabricación. Los parámetros de proceso

indicados en la ficha de características han de tomarse exclusivamente como unas pautas y deberán ajustarse en base a la máquina, geometría de la pieza, etc. Esta variedad de Luvocom (3F PPS CF 9938 BK) cumple los requisitos R22 y R23, con nivel de riesgo HL3. En otras palabras, puede ser utilizado como componente estructural, formar parte de equipos electrotécnicos y de equipos mecánicos.

El material en formato pellet tiene una geometría cilíndrica con longitud de 3 milímetros. Su almacenamiento debe realizarse en un lugar seco y a temperatura ambiente. Se recomienda realizar un pretratamiento térmico de secado antes de procesar el material con el objetivo de deshumidificar los gránulos de Luvocom. El almacenamiento de los pellets debe realizarse a temperatura ambiente.

4.1.5 Alúmina

La alúmina u óxido de aluminio (Al_2O_3) es un material cerámico obtenido a partir de la bauxita mediante el proceso Bayer. El alto contenido de aluminio en la corteza terrestre lo sitúan como el tercer elemento químico de mayor abundancia en la Tierra, solo por detrás del oxígeno y el silicio. Sin embargo, el aluminio aparece combinado fundamentalmente con el oxígeno, formando óxidos e hidróxidos [90].

La alúmina se caracteriza por ser un material refractario capaz de soportar esfuerzos a muy altas temperaturas. Su punto de fusión alcanza los 2072 grados Celsius, convirtiéndolo en un candidato perfecto para el revestimiento y aislante térmico en altos hornos. Además, los materiales cerámicos se caracterizan por su alta rigidez y resistencia a tracción, mientras que la resistencia a compresión y a flexión es muy pobre [91].

La fabricación de piezas a partir de materiales cerámicos requiere la adición de productos poliméricos u otros componentes similares para facilitar su procesamiento. En especial para cerámicas técnicas como la alúmina, estos agentes aglutinantes deben ser retirados posteriormente a la fabricación para conferirle a la pieza final unas propiedades extraordinarias. Es por ello, que se deben aplicar tratamientos térmicos y químicos de post-procesado. Estos procedimientos se conocen como desbanderizado y sinterizado [1]. Con la primera etapa se procede a la retirada del material polimérico aglutinante y/o aglomerante. En función de los

agentes poliméricos utilizados la fase de desbanderizado puede requerir tratamientos térmicos, baños en productos químicos o una combinación de procesos. La retirada de los materiales poliméricos aglutinantes da lugar a intersticios y poros, fragilizando la pieza y teniendo ésta una densidad muy inferior a su valor teórico (ver Ilustración 34). El objetivo de la etapa de sinterizado consiste en disminuir el tamaño y la cantidad de los poros mediante la aplicación de un tratamiento térmico, densificando simultáneamente la pieza final (ver Ilustración 35). El sinterizado es un tratamiento que requiere de un control muy preciso de las condiciones de temperatura, presión, atmósfera protectora y duración de los periodos de calentamiento. Realizar ciclos térmicos erróneos da lugar al agrietamiento del material o el posible derrumbe de paredes de espesor reducido. Adicionalmente, el estudio de la contracción de la pieza debe ser muy estricto, con el fin de prever de antemano las variaciones dimensionales y obtener geometrías que se ajusten a los requerimientos del cliente (capítulo 8 de la publicación [1]).

Los procesos de desbanderizado y sinterizado son los responsables de una buena o mala fabricación de la pieza, así como el potencial de vida útil. Los perfiles térmicos de los tratamientos se guardan como un tesoro por las empresas y son inaccesibles para terceras personas. Los materiales compuestos por una matriz polimérica y refuerzos metálicos también deben ser sometidos a etapas de desbanderizado y sinterizado.

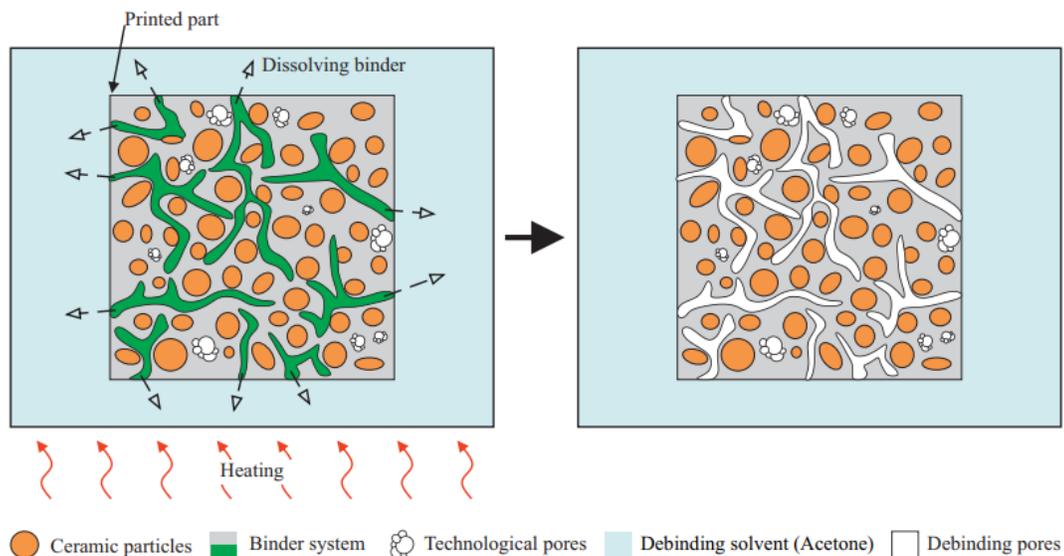


Ilustración 4.1. Esquema representativo del proceso de desbanderizado [91]

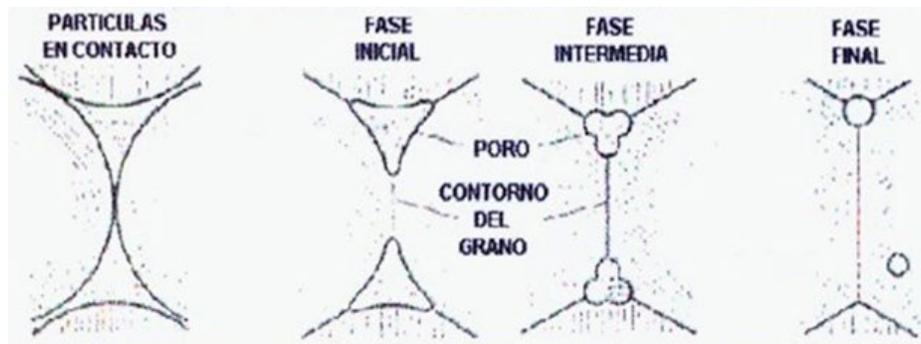


Ilustración 4.2. Esquema del proceso de sinterizado

4.1.6 Nylon

El Nylon es un polímero sintético perteneciente al grupo de las poliamidas. Las amidas se caracterizan por la aparición del grupo carboxilo en su estructura interna. Entre las poliamidas más populares destacan la lana, la seda y el Kevlar.

El Nylon es una fibra resistente al desgaste, ultraligera, con elevada estabilidad dimensional y elevada elasticidad, tiene una alta resistencia al moho, a las bacterias y a los insectos, no es tóxico y no produce alergias. Todas estas características se ven potenciadas en aplicaciones del sector textil.

El material utilizado para este estudio está reforzado con fibra de vidrio con el objetivo de conferir unas propiedades mejoradas de resistencia mecánica, resistencia térmica, resistencia a la abrasión y rigidez aumentada. El proveedor facilita unos parámetros de proceso para la fabricación de piezas en Nylstrong a partir de material en formato de filamento. En cualquier caso, se tomarán como valores de partida y se realizarán las primeras iteraciones alrededor de estas cifras. El potencial de aplicación de este material está aún por explorar.

4.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El objetivo de este estudio experimental reside en obtener los parámetros de proceso de mayor relevancia para la fabricación de piezas con los materiales anteriormente expuestos. Es de especial relevancia indicar que los parámetros aquí especificados aplican exclusivamente para la impresora 3D utilizada en el ambiente de trabajo. El empleo de los mismos materiales en otras máquinas puede requerir ligeras variaciones en las variables de proceso. No está dentro del

alcance de este trabajo elaborar una optimización de los parámetros en base a los diferentes objetivos a maximizar en la fabricación (tiempo de fabricación, calidad superficial, precisión dimensional, resistencia a tracción o compresión). Se tomará como factor de calidad la precisión dimensional de las piezas. Para ello, se seguirán alguno de los criterios establecidos por la norma para realizar un estudio de las condiciones de fabricación de cada material, así como las guías de diseño aplicables para esta máquina.

4.2.1 Impresora 3D

Para la realización de este estudio experimental se utilizará la impresora industrial Big Foot Pro Pellets, cuyo proveedor es la empresa Indart 3D, localizada en Irún, País Vasco. La impresora 3D dispone de dos puntos de impresión en donde se puede instalar o bien extrusores de filamento o bien extrusores de pellets. La impresora es cartesiana y por tanto dispone de tres grados de libertad por cada extrusor. No obstante, el eje vertical y un eje longitudinal son solidarios en ambos puntos de deposición. En resumen, la impresora dispone de cuatro movimientos independientes. El volumen de fabricación es de 460 milímetros en el eje X, 470 milímetros en el eje Y, y 500 milímetros en el eje Z o eje vertical, pudiendo obtener piezas de un volumen máximo de 0,10 metros cúbicos. La cama de impresión está calefactada, con un rango de temperaturas de entre 45°C y 120°C, facilitando así la adhesión de la pieza a la plataforma de impresión.

Los extrusores de pellets disponen de dos zonas de control de temperatura, suministrando mayor energía para la licuación del material en el punto de alimentación. Se recomienda asimismo que el tamaño de los pellets se encuentre en el rango de los 3 a los 5 milímetros para una correcta alimentación de material al husillo. Adicionalmente, el fabricante de la máquina sugiere un gradiente térmico de 20°C entre las dos zonas calefactas del extrusor, encontrándose la boquilla a una temperatura superior. La temperatura máxima del extrusor está limitada a 400°C. En último lugar, el tamaño de boquilla de los extrusores es de 0,8 milímetros.



Ilustración 4.3. Impresora Big Foot Pro Pellets

4.2.2 Parámetros de proceso

Como ya se introdujo en el apartado 3.4 existe una gran cantidad de factores que influyen en la calidad final de la pieza. Adicionalmente, se debe establecer una función objetivo de la fabricación. Habitualmente, los parámetros de proceso se optimizan con alguna de estas finalidades: eficiencia en la fabricación, precisión dimensional y calidad superficial, resistencia a tracción, a flexión y a compresión. No obstante, optimizar todas las funciones objetivo simultáneamente no está al alcance de ninguna técnica de fabricación. Por ejemplo, obtener una pieza final con alta precisión dimensional y calidad superficial requiere largos periodos de tiempo. La realización de este trabajo representa los primeros pasos en una optimización paramétrica larga y de alta complejidad. Debido al reducido periodo de tiempo disponible, los experimentos estarán encaminados a obtener la mejor precisión dimensional de piezas que tolere la máquina.

A continuación, se detallan los parámetros de proceso de mayor significación y se establece adicionalmente el orden de prioridad en base a su influencia sobre la calidad final de la pieza.

4.2.2.1 Temperatura del extrusor

La temperatura de extrusión del material es el parámetro de mayor relevancia en la calidad de fabricación de la pieza, a la vez que determina la viabilidad en la construcción. Como se detalló en el apartado 3.2, la temperatura a alcanzar para la correcta extrusión del material debe ser ligeramente superior a la temperatura de fusión del material (T_f), aumentando así la fluidez y favoreciendo su deposición en la cama de impresión [68]. Las temperaturas utilizadas para la extrusión de materiales deben tomarse como parámetros de partida y utilizar las sugerencias del fabricante. Imprimiendo un mismo polímero (PLA, por ejemplo), la temperatura de extrusión varía en función del proveedor de los pellets del material. Adicionalmente, la eficiencia térmica del extrusor y el flujo de energía suministrado al material dependen de los materiales de construcción del husillo, así como de la calidad de los calefactores y la temperatura ambiente de la sala donde se realiza la impresión. Incluso el color de los pellets tiene influencia sobre la temperatura de extrusión [78].

Las máquinas de impresión 3D a través de FDM habitualmente disponen de una zona calefactada en el extrusor con el objetivo de elevar la temperatura del material hasta poder ser extruido. Sin embargo, la impresora Big Foot posee dos zonas calefactadas, una en la zona de alimentación de pellets y otra en la boquilla del extrusor. Poseer dos puntos calientes favorece, a priori, obtener una distribución idónea de la temperatura a lo largo de la longitud del husillo, facilitando el calentamiento de material hasta la temperatura requerida.

4.2.2.2 Temperatura de la cama de impresión

Las impresoras 3D de tamaño industrial vienen equipadas con una plataforma de impresión calefactada. La finalidad consiste en obtener una buena adhesión entre la plataforma y las primeras capas impresas. Además, debe asegurarse una correcta sujeción, evitando así desplomes o derrumbamientos del material [59, 60, 77].

La temperatura de la cama de impresión debe ser ligeramente superior a la temperatura de transición vítrea del material [68]. Un estudio preciso de la temperatura de la cama de impresión es tan importante como el análisis de la temperatura del extrusor, en particular para las etapas de post-procesado requeridas. Una baja temperatura es sinónimo de una escasa adhesión. Por otro lado, una temperatura excesiva da lugar a muy alta adherencia, dificultando el proceso de

retirada y separación de la pieza de la impresora, que puede resultar en una rotura de las primeras capas fabricadas.

La temperatura de la plataforma es responsable del efecto conocido como combeo o “warping” en inglés. Este fenómeno consiste en la deformación o elevación de las esquinas de la primera capa impresa de la pieza debido a una baja adherencia con la plataforma de impresión. Disponer de una cama de impresión calefactada disminuye la posibilidad de aparición del efecto warping. Existen productos comerciales conocidos como sprays antiwarping (por ejemplo, Dimafix) que se utilizan para promover la adherencia entre la pieza y la plataforma de impresión.

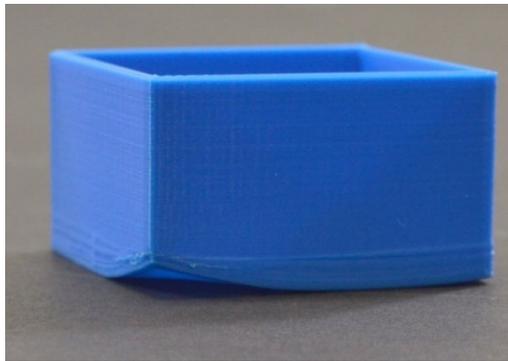


Ilustración 4.4. Efecto warping en la tecnología FDM

4.2.2.3 Velocidad de rotación del husillo

Para accionar el movimiento de pellets y alimentar el husillo de material, se utiliza un motor paso a paso. Estos motores permiten un control preciso de su velocidad mediante el ajuste del número de pasos que gira el motor a lo largo de un periodo de tiempo. Los motores incluidos en la impresora tienen un total de 200 pasos en una rotación completa alrededor de su eje, es decir, cada paso corresponde a un giro de 1,8 grados [71].

La velocidad de rotación del husillo está directamente relacionada con el flujo de material depositado sobre la plataforma de impresión. Cuanto mayor es la velocidad de rotación, mayor es la alimentación de pellets y, por tanto, mayor es el flujo volumétrico de material a través del husillo.

Una optimización correcta del flujo volumétrico de material es muy beneficiosa para la impresión de piezas. El flujo volumétrico influye en la precisión dimensional, rugosidad,

características mecánicas como resistencia a tracción o fatiga, etc. El flujo de material depositado influye directamente en el ancho de línea y el solapamiento entre líneas.

4.2.2.4 Altura de capa

La altura de capa representa la elevación de cada capa impresa. Es, por tanto, la longitud vertical que el extrusor se desplaza cada vez que realiza un salto en el eje Z con el objetivo de imprimir la capa subsiguiente. El espesor de capa determina asimismo la rugosidad de la pieza, ya que da lugar al efecto conocido como stair-case effect. Este efecto está presente en todas las tecnologías de fabricación aditiva, pero es más acusado en la extrusión de materiales. Esto se debe a que la resolución de cada capa (es decir, la altura de capa) está directamente relacionada con el diámetro de la boquilla. Está extendido que la altura de capa debe oscilar entre el 50 y el 80 por ciento del diámetro de la boquilla. Ahora, teniendo en consideración que la máquina permite movimientos en el eje Z con una precisión de 10 micras, se necesita una boquilla de 20 micrómetros de diámetro para obtener la mayor precisión posible. Con esta geometría de la boquilla, la calidad de las piezas sería máxima, pero existen restricciones mecánicas que limitan la calidad. Empleando la mecánica de fluidos, y en particular la ecuación de Darcy-Weisbach, las pérdidas de carga en la boquilla y, por tanto, la resistencia a vencer por el motor del husillo, son inversamente proporcionales al diámetro de la boquilla elevado a 5. Es decir, disminuir en un factor de 10 el diámetro de la boquilla tiene un efecto de 10^5 en la resistencia a contrarrestar por el motor. Por este motivo, los proveedores de boquillas solo ofrecen unos diámetros específicos, cuyos valores están en el rango de 0,4 a 1 milímetro. No obstante, existen otro tipo de aplicaciones, por ejemplo, la fabricación aditiva de estructuras en cemento, en donde se construyen boquillas específicas con diámetros de hasta 5 milímetros.

Ecuación 1. Pérdidas de carga en un conducto cilíndrico según la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_{pl} = \frac{8 * f * L}{g * \pi^2 * D^5} * Q^2$$

También es importante destacar que el material de fabricación de la boquilla tiene un impacto en la calidad final de las piezas impresas. Las boquillas convencionales suelen estar fabricadas en latón o bronce. Sin embargo, la utilización de plásticos abrasivos, como pueden ser aquellos reforzados con fibras de carbono o vidrio, polvo de madera o refuerzos de acero, precisan de

una boquilla resistente al desgaste [92]. Este material suele ser acero endurecido, acero inoxidable, aluminio o titanio [65].

4.2.2.5 Orientación de la pieza

Las técnicas de fabricación aditiva dan lugar a piezas con una fuerte anisotropía, es decir, las propiedades mecánicas de la pieza son diferentes en función de la dirección de estudio. Este efecto es de importante consideración en las técnicas de FDM, puesto que la anisotropía es alta [59].

En las técnicas de FDM, la anisotropía de la pieza es alta, debido a la naturaleza inherente de la fabricación. El eje vertical (comúnmente denominado como eje de fabricación) es la dirección débil de la pieza. Por tanto, una pieza que vaya a estar sometida a tracción deberá ser impresa tal que la dirección de aplicación de la carga sea perpendicular a la dirección de fabricación. Este fenómeno se debe a que la interfaz entre capas es débil. Durante el proceso de solidificación del material, la difusión entre capas es baja y la adhesión entre las mismas no es completa. Sin embargo, dentro de la misma capa, el flujo continuo de material depositado a lo largo de las líneas impresas proporciona buenas propiedades a la pieza. En otras palabras, es más sencillo separar dos capas contiguas que romper una línea de material [45, 59, 75].

La orientación en la impresión también determina la necesidad de generar soportes. Se denomina soporte a las estructuras impresas cuyo objetivo reside en sustentar la pieza durante la fabricación. Los soportes son necesarios en lugares donde la pieza tiene voladizos, grandes agujeros o paredes inclinadas. El soporte tiene una densidad de relleno baja que facilita su retirada tras la fabricación. En la superficie de contacto con la pieza, se producen rebabas que deberán ser limadas en posteriores etapas para mejorar el acabado superficial. Esto es especialmente relevante para aquellos materiales resistentes y muy duros, donde el soporte tiene una alta cohesión con la pieza. Por tanto, una correcta orientación durante la impresión disminuye el uso de soportes, abaratando toda la fabricación y agilizando los tiempos de producción.

4.2.3 Experimentos iniciales

Las primeras probetas irán encaminadas a la obtención de los parámetros de proceso detallados anteriormente.

El primer parámetro de estudio, por orden de trascendencia, es la temperatura del extrusor. Como ya se comentó en el apartado 3.2, los plásticos deben calentarse por encima de la temperatura de fusión, de tal forma que el material se encuentre en una fase líquida viscosa con alta fluidez y se pueda depositar sobre la cama de impresión. Para ello, se ha seguido el procedimiento aquí denominado como impresión en vacío o contra presión atmosférica. En primer lugar, se hace uso de las fichas técnicas de los materiales suministradas por los proveedores con el objetivo de encontrar algunas indicaciones iniciales. Existe una gran bibliografía acerca de las temperaturas de fabricación en materiales habitualmente utilizados en FDM, como es el caso del PETG o el PLA [59, 60, 75, 77]. No obstante, estos datos deben tomarse exclusivamente como un punto de partida para el proceso de optimización. Por un lado, el procesamiento de pellets y filamento tiene diferencias importantes y la transferencia de calor entre resistencia calefactada y material varía. Por otro lado, cada máquina requiere unos parámetros diferentes debido a los propios materiales de construcción de la impresora. Factores externos tales como la temperatura del ambiente, corrientes de aire o la humedad influyen en la impresión del material. Esta prueba es de especial importancia para aquellos materiales comúnmente procesados a través del moldeo por inyección de plásticos [88, 89]. Las temperaturas especificadas en las fichas técnicas solo sirven como estimación inicial, con posibilidad de necesitar amplias variaciones.

En esta primera etapa, se procede a calentar el material a una temperatura determinada. Con la plataforma de impresión alejada de la boquilla del cabezal, se extruye material a diferentes velocidades y diferentes longitudes. El software de la máquina permite extruir a velocidades máximas de 50 milímetros por segundo. La longitud impresa no está limitada por software. Una temperatura correcta del material da lugar a movimientos suaves y continuos del husillo, con un hilo cilíndrico impreso de diámetro constante. El material debe poder extruirse a cualquier velocidad dentro del rango de velocidades permisibles. Cuando la temperatura es muy baja, el material no alcanza la región viscosa y fluye con dificultad a lo largo del husillo. Los pellets no

han fluidificado lo suficiente y el movimiento del tornillo sin fin se encuentra con una resistencia superior a la que puede vencer. Esto da lugar a que el motor salte pasos. El motor salta pasos cuando la etapa de reducción dispuesta en el motor paso a paso desliza, es decir, los engranajes de la etapa de reducción no giran de manera solidaria y existe un movimiento relativo entre los engranajes. Es sencillo advertir cuándo el motor entra en una región de salto de pasos pues se genera un ruido elevado durante la extrusión de material.

La segunda etapa de los experimentos previos consiste en la obtención de la temperatura correcta en la cama de impresión. Como ya se destacó en el apartado 4.2.2.2, la temperatura de la cama de impresión es fundamental para tener una correcta adhesión de la pieza con la máquina, logrando una buena sujeción y un buen posicionamiento de la pieza, que evitará los desplomes de material. Para ello, se decide imprimir diversas líneas con el objetivo de evaluar la correcta fijación del material depositado sobre la plataforma de impresión.

La tercera etapa consiste en obtener una velocidad de extrusión de material correcta y que dé lugar a piezas cuyas dimensiones reales coinciden con las medidas nominales. Para ello se decide fabricar una probeta prismática con base cuadrada y con un espesor de pared unitario, es decir, la pared tiene un ancho igual al ancho de línea (en este caso, el espesor nominal de pared es 0,8 milímetros). Esta probeta permite optimizar simultáneamente los parámetros de temperatura de extrusión, temperatura de la plataforma de impresión, velocidad de impresión y velocidad de extrusión, entre otros. Es un patrón sencillo y que no precisa de largos tiempos de fabricación. Las dimensiones geométricas se pueden ir variando en base a los parámetros que se decidan estudiar.

En último lugar, y con el objetivo de corroborar los parámetros hallados, se imprimirán diferentes probetas prismáticas. En este caso, sí existirá relleno. Con esta probeta no solo se pretende confirmar los hallazgos realizados, sino que se pueden estudiar parámetros como activación del ventilador de capa, número de contornos sólidos, geometría de relleno, densidad de relleno, etc. Las dimensiones de esta probeta también son susceptibles de sufrir cambios.

Las probetas de cubo vacío y probetas prismáticas se utilizarán para obtener información relevante del proceso y comprobar si las modificaciones realizadas en los parámetros de proceso

dan lugar a una mejora notable en la calidad de las piezas. Adicionalmente, las medidas serán utilizadas como patrón de calidad en la fabricación. En las probetas de cubo vacío se tomarán un total de 7 medidas: cuatro espesores de pared y las medidas en los tres ejes espaciales (ejes X, Y y Z). Por otro lado, se registrarán las medidas generales (ejes X, Y y Z) en las probetas prismáticas.

Ecuación 2. Precisión y desviación de las medidas

$$\text{Precisión de medida} = \frac{\text{Medida real}}{\text{Medida teórica}} [-]$$

$$\text{Desviación de la medida} = \text{Medida real} - \text{Medida teórica} [\text{mm}]$$

Estas ecuaciones también serán utilizadas para la obtención de la calidad de las probetas de la norma ISO 52902 (ver apartado 4.2.4).

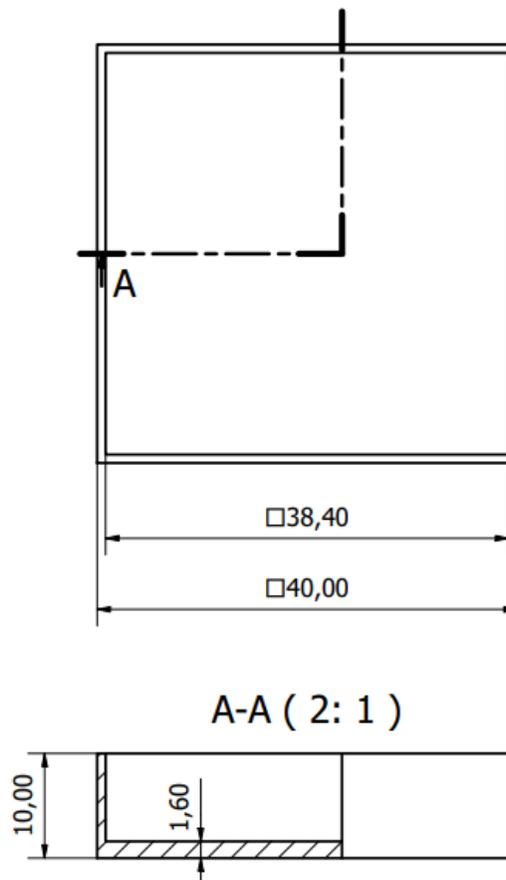


Ilustración 4.5. Probeta de cubo vacío

4.2.4 Probetas según normativa internacional

Los avances en la tecnología y la innovación suelen adelantarse a la actualización de las normativas internacionales. En muchos casos, el desarrollo de los estándares es lento y tedioso pues requiere retomar y resumir todo el conocimiento hallado acerca de una materia. Pese a haber sido patentada la primera técnica de fabricación aditiva en 1982 [29], esta tecnología aún sufre de un vacío legal o laguna jurídica. Actualmente no están muy extendidas las normativas al respecto y se van creando conforme se realizan nuevos descubrimientos. Además, la mayoría de los estándares de importancia internacional están en un continuo proceso de evolución y de perfeccionamiento, haciendo que, en muchos casos, sean los investigadores quienes tengan que seguir una ruta de diseño propia e individual [30, 31, 93].

En el año 2019 se publicó la norma ISO 52902 [93] sobre la evaluación de las capacidades geométricas de sistemas de fabricación aditiva. En conjunto, esta norma establece una serie de piezas patrón comunes a todas las técnicas AM y que persigue estudiar las capacidades geométricas de la tecnología y una buena calibración de la máquina. Una vez realizada la fabricación de los patrones, se realizan diversas mediciones sobre las piezas. El análisis de los resultados obtenidos permite establecer unas guías de diseño y fijar las capacidades geométricas de la tecnología bajo estudio. Para cada bloque patrón se establecen una serie de medidas a realizar con el objetivo de examinar la precisión de fabricación, la calidad superficial y otros parámetros de relevancia. La norma establece asimismo las herramientas y procedimientos de medida, así como la incertidumbre de medida requerida por los instrumentos utilizados. En ningún caso se indica el procedimiento para la configuración y calibración de las máquinas; la norma internacional correspondiente es la ASTM F 2971.

Todas las máquinas de fabricación aditiva disponen de un área de trabajo. Sin embargo, la calidad y precisión no es homogénea en toda la superficie de construcción. Esto es apreciable en las tecnologías que utilizan un láser como fuente de energía para la fusión y solidificación del material de trabajo. En estos casos, el foco láser que emite la energía para la fabricación se encuentra fijo en un punto. Mediante la rotación simultánea de diversos espejos, la máquina permite localizar el foco láser en todo el volumen de fabricación. La distancia existente entre el punto de fabricación y el punto de envío del láser varía por tanto a lo largo del área de

construcción. Teniendo en consideración que el haz láser tiene una pequeña deflexión, el área focal donde se centra la energía varía a lo largo del volumen de impresión. En otras palabras, la densidad de energía del haz láser puede variar ligeramente con respecto del valor nominal, dando lugar a una discontinuidad en la fusión de partículas. Esto da lugar a una inferior calidad de fabricación en los bordes del volumen de impresión.

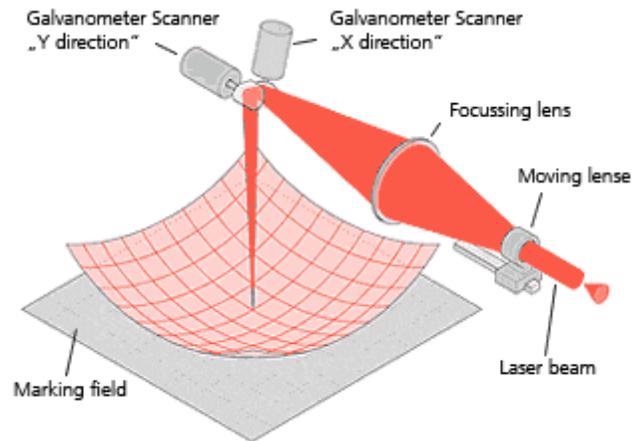


Ilustración 4.6. Distribución de las zonas con una densidad de energía constante en las técnicas de fabricación por láser

En cuanto a técnicas de extrusión de materiales, algunos aspectos que influyen sobre la precisión de las piezas a lo largo del área de impresión son: la plataforma calefactada puede no tener una correcta distribución de temperatura; el flujo de aire para el enfriamiento de la pieza puede ser irregular, formando zonas de aire estancado con temperaturas superiores a lo deseado; o las propias características constructivas de la máquina, tales como vibraciones de los sistemas de transmisión de movimiento por correas. La norma ISO 52902 [93] sugiere hacer un estudio de todas las regiones del área de trabajo. Por otro lado, también se sugiere fabricar un mínimo de 5 veces cada bloque patrón, con el objetivo de estudiar la repetitividad de la fabricación y tener un análisis cuantitativo extenso.

Esta norma está diseñada para la experimentación de las capacidades geométricas de todas las tecnologías de fabricación aditiva. No obstante, la precisión en cada una de las técnicas varía considerablemente. Es por ello que la norma establece tres tamaños diferentes de bloques patrón (fino, medio y grosero) y es el usuario quien debe adaptar los modelos a la precisión de la

máquina. En el caso de la extrusión de materiales, se utilizan los bloques patrón de tamaño grosero.

A continuación, se detallan los modelos sugeridos por la norma, así como las mediciones a realizar y los instrumentos de medida necesarios.

4.2.4.1 Artefacto lineal

El artefacto lineal está diseñado para el estudio de la precisión lineal de posicionamiento a lo largo de diferentes direcciones de fabricación de máquina. Dependiendo de la orientación de la pieza y la configuración de la máquina, la desviación con respecto de la medida nominal en las probetas actúa como una base para el diagnóstico de errores en el sistema de posicionamiento.

La probeta está compuesta por un prisma con distintas protuberancias verticales, todas ellas con las mismas dimensiones volumétricas. Los salientes están dispuestos a diversas distancias. El tamaño total de la pieza es de 55x5x8 milímetros, con 5 protuberancias posicionadas a lo largo de la dimensión mayor. Estos salientes tienen un tamaño de 5x5x5 milímetros, a excepción de los situados en los extremos cuyas dimensiones son 2,5x5x5 milímetros. Las distancias relativas entre los salientes varían desde 5 milímetros hasta 12,5 milímetros, en intervalos de 2,5 milímetros. Se adjunta una representación gráfica de la probeta.

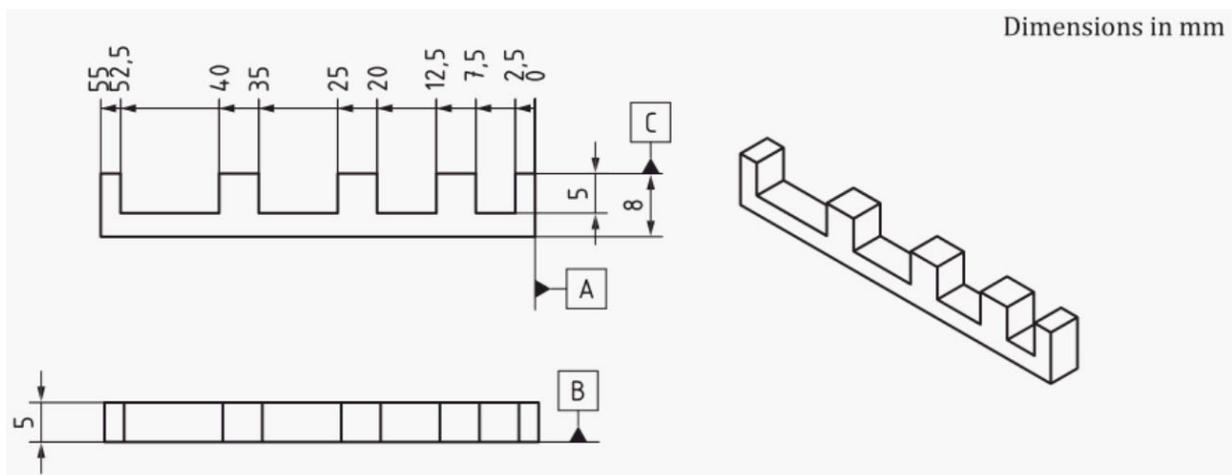


Ilustración 4.7. Artefacto lineal según la norma ISO 52902 [93]

Utilizando las caras “A” y “B” de la probeta, se realizan mediciones para evaluar el posicionamiento real de las distintas superficies con respecto de los datos primario.

Adicionalmente, se miden las dimensiones reales de cada saliente y las distancias entre los salientes. Todas las mediciones se pueden realizar con un calibre digital con un error máximo permisible inferior a 0,02 milímetros. Cada medida debe realizarse un total de 3 veces y a distintas alturas de cada protrusión.

Como medidas secundarias se pueden obtener la rectitud (straightness) de las caras de la probeta y el paralelismo entre caras. Sin embargo, se requieren instrumentos de medición de mayor precisión (clase AA y clase AAA, ver apartado 4.2.4.9)

4.2.4.2 Artefacto circular

El artefacto circular está diseñado para el estudio de la precisión de fabricación de contornos curvilíneos y cilíndricos. La producción de esta geometría requiere del movimiento de dos ejes de manera sincrónica, de tal forma que se dibuje sobre la plataforma de impresión un contorno lo más similar posible a una circunferencia. La probeta está compuesta por dos anillos (uno de alto espesor y otro de bajo) y un cilindro.

La norma indica, como medición principal de la probeta, la circularidad de las superficies curvilíneas manufacturadas. Adicionalmente, se puede registrar los espesores de pared. Como medida secundaria, se sugiere cuantificar la concentricidad y cilindridad de cada uno de los anillos fabricados. Todas las mediciones sugeridas a realizar en esta probeta precisan de herramientas de alta precisión y con una alta experiencia por parte del usuario (clase AAA, ver apartado 4.2.4.9). Por este motivo, los artefactos circulares no formarán parte del estudio experimental de este trabajo.

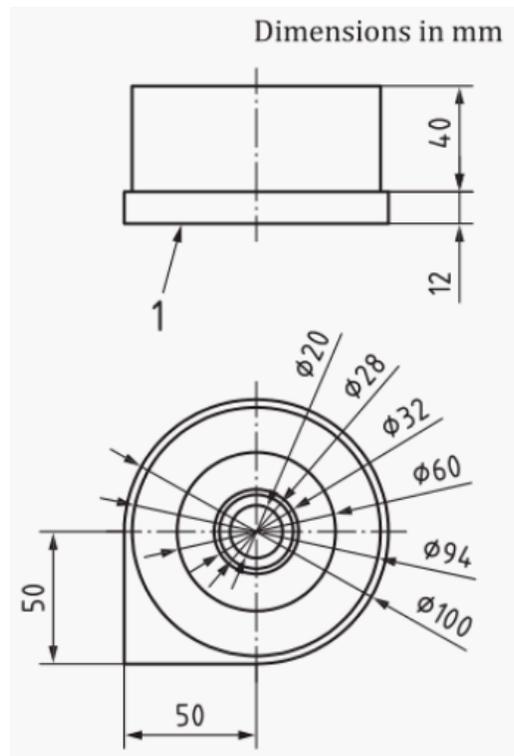


Ilustración 4.8. Artefacto circular según norma ISO 52902 [93]

4.2.4.3 Resolución de pines

En ingeniería, se conoce como pines o pernos a las estructuras cilíndricas y esbeltas cuya finalidad reside en dar firmeza en uniones y ensamblajes. Dentro de la normativa, se contempla un capítulo para el estudio de estas geometrías. El propósito de estas probetas reside en estudiar la capacidad de la máquina de fabricar, con precisión, características pequeñas con relaciones de tamaño diversas. El perno de menor tamaño fabricado informa al usuario del detalle máximo alcanzable.

La probeta consiste en una base prismática con columnas verticales de forma cilíndrica. Se dispone un total de 5 columnas equiespaciadas por 10 milímetros y cuyos diámetros varían entre 4 milímetros y 1 milímetro, con saltos de 1 milímetro, y un perno final con diámetro de 0,5 milímetros. La norma establece diferentes relaciones altura-diámetro de los pernos, con ratios que varían desde 4:1 hasta 10:1. Las mediciones a realizar consisten en las dimensiones de los pernos (diámetro y altura), así como la cilindridad de los mismos. Por otro lado, la medida cualitativa a realizar en esta serie de probetas reside en cuál es el diámetro mínimo realizable.

No todos los pernos serán fabricados de forma correcta a partir de la tecnología seleccionada. El instrumento de medida a utilizar es un calibre digital con error máximo permisible inferior a 0,02 milímetros, aunque se prefiere el uso de un tornillo micrométrico digital con error máximo admisible inferior a 0,02 milímetros. Se aconseja realizar tres mediciones a lo largo de la altura del perno (arriba, central y abajo, ver Ilustración 43). La cilindridad y concentricidad de los pines requiere del uso de instrumentos clase AAA (ver apartado 4.2.4.9), por lo que se obviarán estas dimensiones.

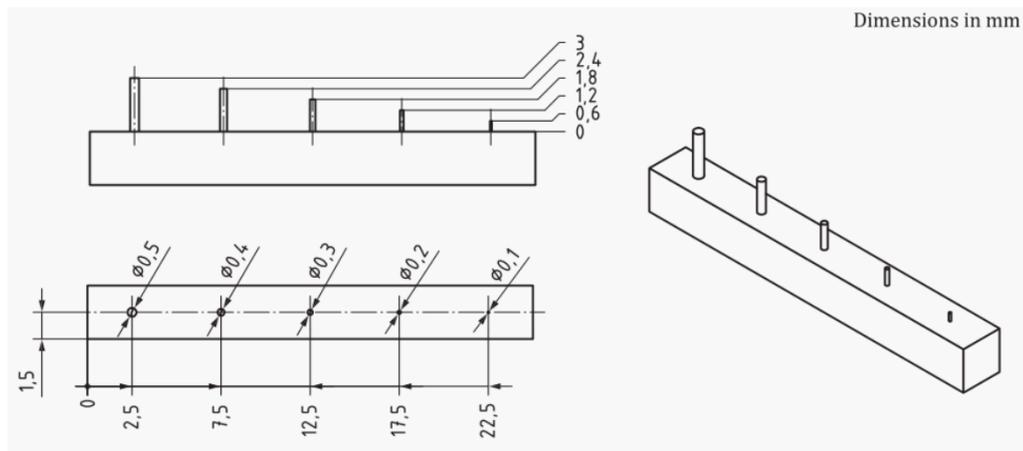


Ilustración 4.9. Probeta para el estudio de resolución de pines de tamaño medio y relación altura-diámetro 6:1 [93]

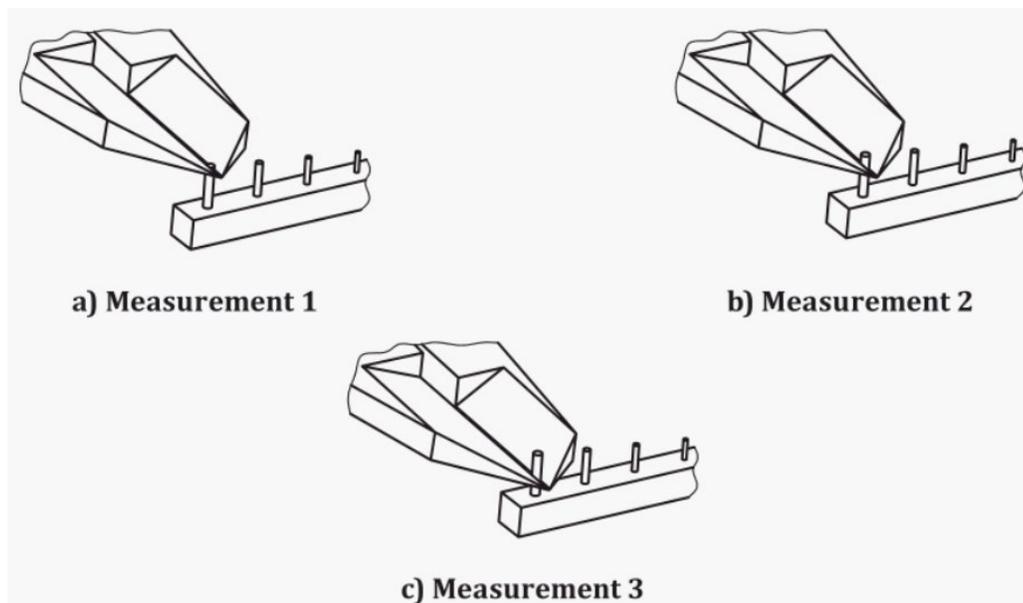


Ilustración 4.10. Mediciones del diámetro de los pernos en tres alturas [93]

4.2.4.4 Resolución de agujeros

La fabricación aditiva de agujeros tiene complejidad. Por un lado, la orientación de los agujeros con respecto a la dirección de fabricación influye en la precisión de los mismos. Así, agujeros cuyo eje de revolución sea horizontal, pueden precisar del diseño de soportes adicionales para evitar el derrumbamiento del material.

La probeta diseñada por la norma tiene como objetivo el estudio del diámetro mínimo reproducible a partir de tecnologías de fabricación aditiva. Consiste en un prisma de dimensiones 25x3x2,5 milímetros con 5 agujeros pasantes con diámetros que varían de 4 milímetros a 1 milímetro en intervalos de 1 milímetro, con un agujero adicional de 0,5 milímetros. Las medidas principales a tomar mediante esta probeta son los diámetros de los agujeros. Como medidas secundarias se pueden obtener la circularidad y cilindridad de los agujeros pasantes (instrumentos de medida clase AAA). Se recomienda utilizar un microscopio calibrado para la medición de los diámetros.

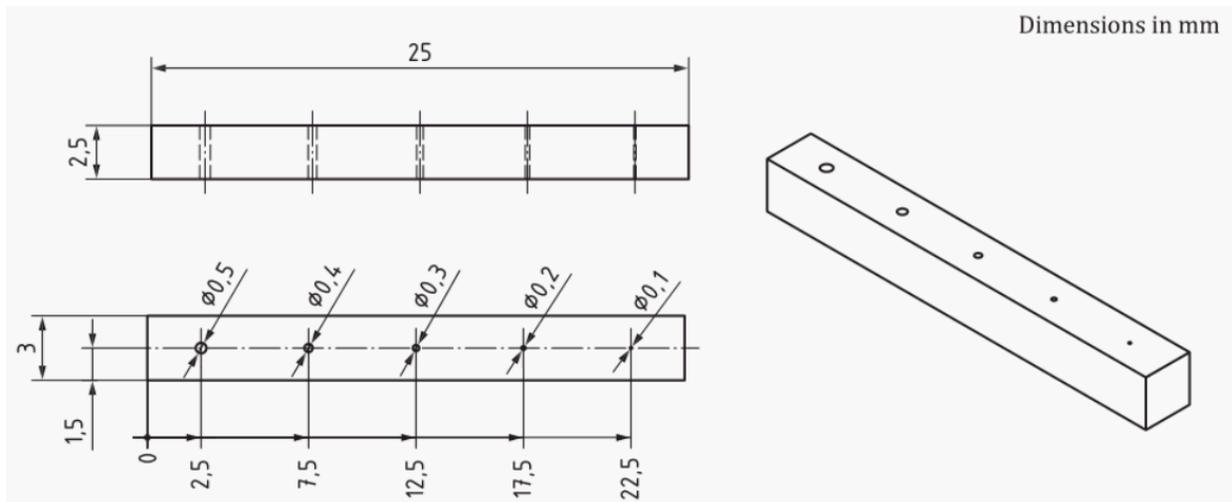


Ilustración 4.11. Probeta para el estudio de resolución de agujeros de tamaño medio [93]

4.2.4.5 Resolución de nervios

Se considera nervio a las estructuras con forma de pared que se utilizan para la unión de distintas zonas características de la pieza o para reforzar la estructura. El objetivo de esta probeta reside en la experimentación con el tamaño mínimo de paredes estrechas capaces de ser reproducibles a partir de la tecnología de estudio. Además, se permite hallar la precisión y resolución del sistema. La probeta sugerida por la norma consiste en una estructura dividida en seis áreas, cada

una de ellas con una pared de bajo espesor. Los espesores de estudio para la técnica de FDM varían de 6 milímetros a 1 milímetro, con saltos de 1 milímetro.

Se deben realizar distintas mediciones con el objetivo de obtener distintos puntos de estudio a lo largo y alto de la pared. El instrumento de medida más simple a utilizar consiste en un calibre digital con error máximo permisible inferior a 0,02 milímetros. Adicionalmente, se puede hallar la rectitud (straightness) de todas las caras de los nervios, en ambos sentidos vertical y lateral. En este caso, se precisa de un escáner 3D (clase AAA).

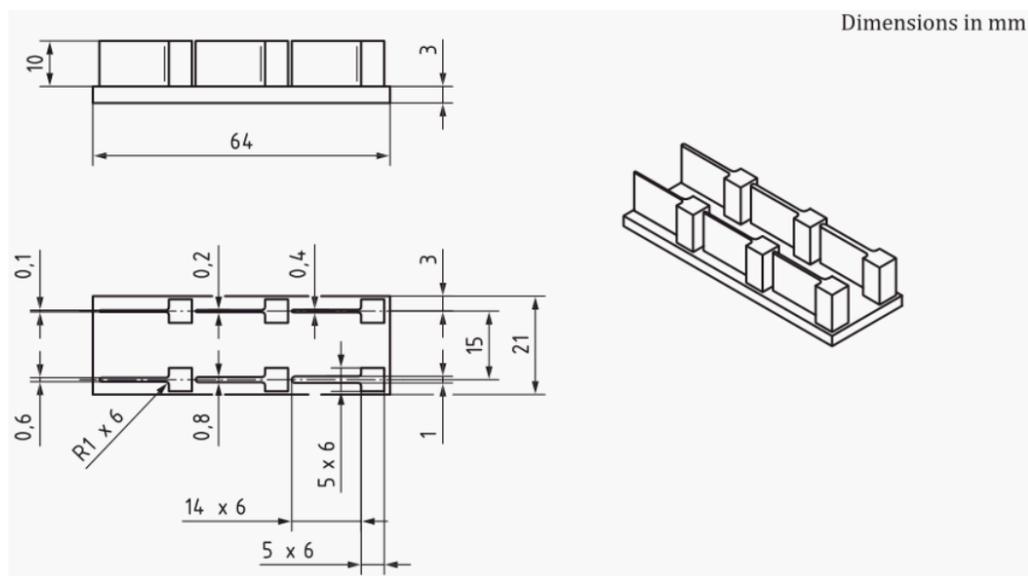


Ilustración 4.12. Probeta de estudio de resolución de nervios en tamaño medio [93]

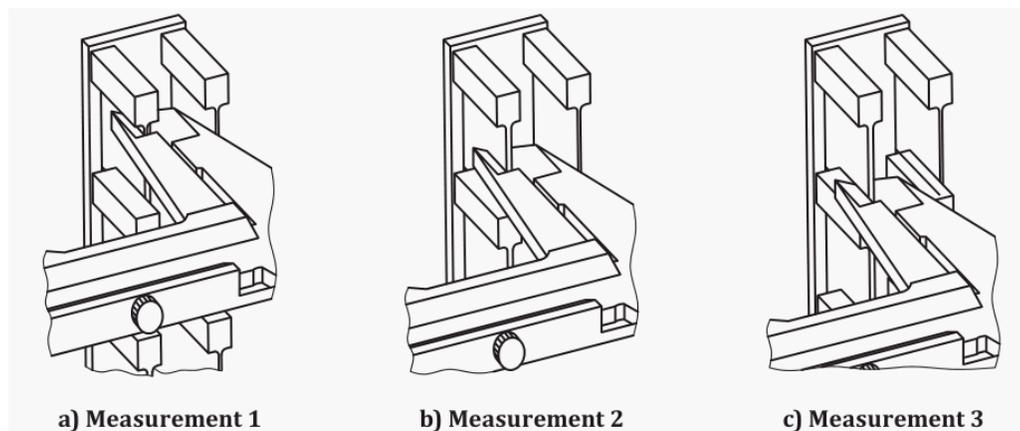


Ilustración 4.13. Mediciones de los espesores de pared

4.2.4.6 Resolución de ranuras o muescas

Las cavidades en fabricación aditiva tienen una alta complejidad. Si se carece de un estudio previo, existe la posibilidad de que el material se funda y la ranura no aparezca en la pieza, es decir, la máquina ha rellenado un espacio que teóricamente debería estar vacío. La probeta de la norma tiene una forma prismática con tamaño 51x30x10 milímetros (aunque la norma también especifica la viabilidad de tener un prisma con altura de 20 milímetros) en donde se realizan 6 incisiones con longitudes de 25 milímetros y espesores que varían de 6 milímetros a 1 milímetro en intervalos de 1 milímetro. De esta manera, la probeta persigue obtener la ranura de menor tamaño capaz de ser reproducible mediante la tecnología seleccionada, así como la precisión de la ranura.

La medida principal es el espesor de las ranuras y se puede tomar con ayuda de un calibre digital con error máximo permisible inferior a 0,02 milímetros. Como medidas secundarias se puede hallar el paralelismo entre caras y la planitud de las caras, en ambos casos mediante una máquina de medición por coordenadas.

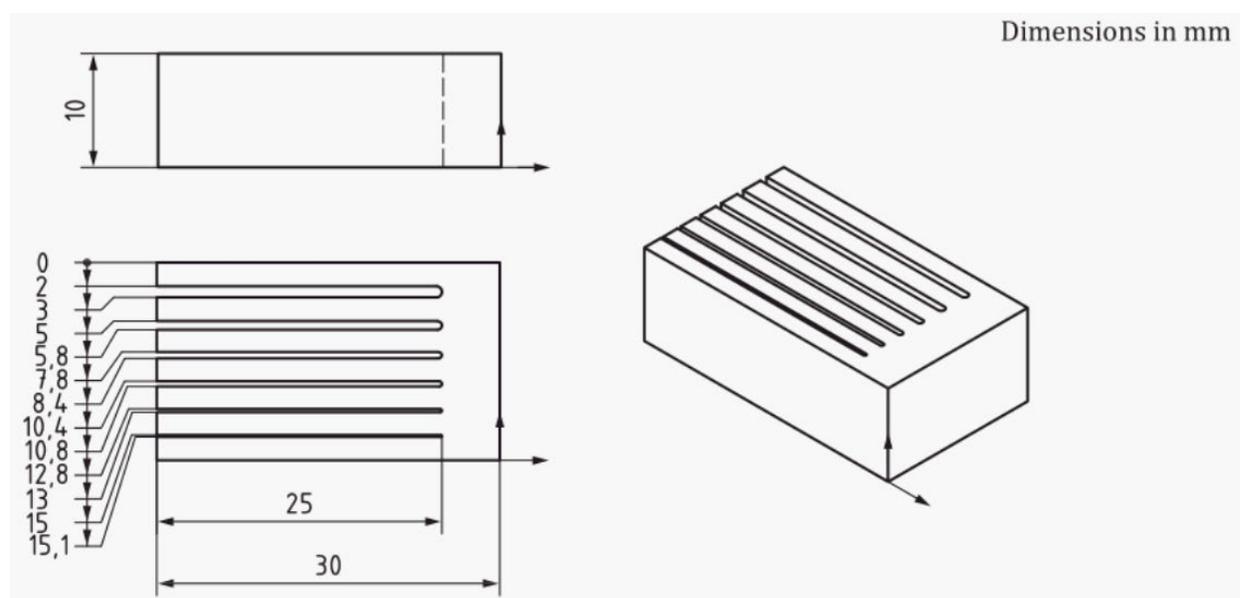


Ilustración 4.14. Probeta para el estudio de la resolución de muescas de tamaño medio [93]

4.2.4.7 Precisión angular

La precisión angular consiste en estudiar la desviación real de un ángulo con respecto de su valor teórico. Esta probeta está compuesta por una base prismática de donde nacen 7 salientes, cada uno dispuesto en un ángulo de inclinación diferente. El primer saliente está a 0° con respecto de la base prismática; el último saliente está a 30° con respecto de la base. Los salientes están separados entre sí por una distancia de 1 milímetro y el ángulo de inclinación aumenta progresivamente de 0° a 30° , en saltos de 5° . Con esta probeta se estudia la precisión de impresión de caras inclinadas y permite evaluar la desviación en angularidad y la rugosidad de las superficies. Las herramientas de medida requeridas son de clase AAA, por lo que no se procederá a la fabricación de estas probetas dentro de este estudio.

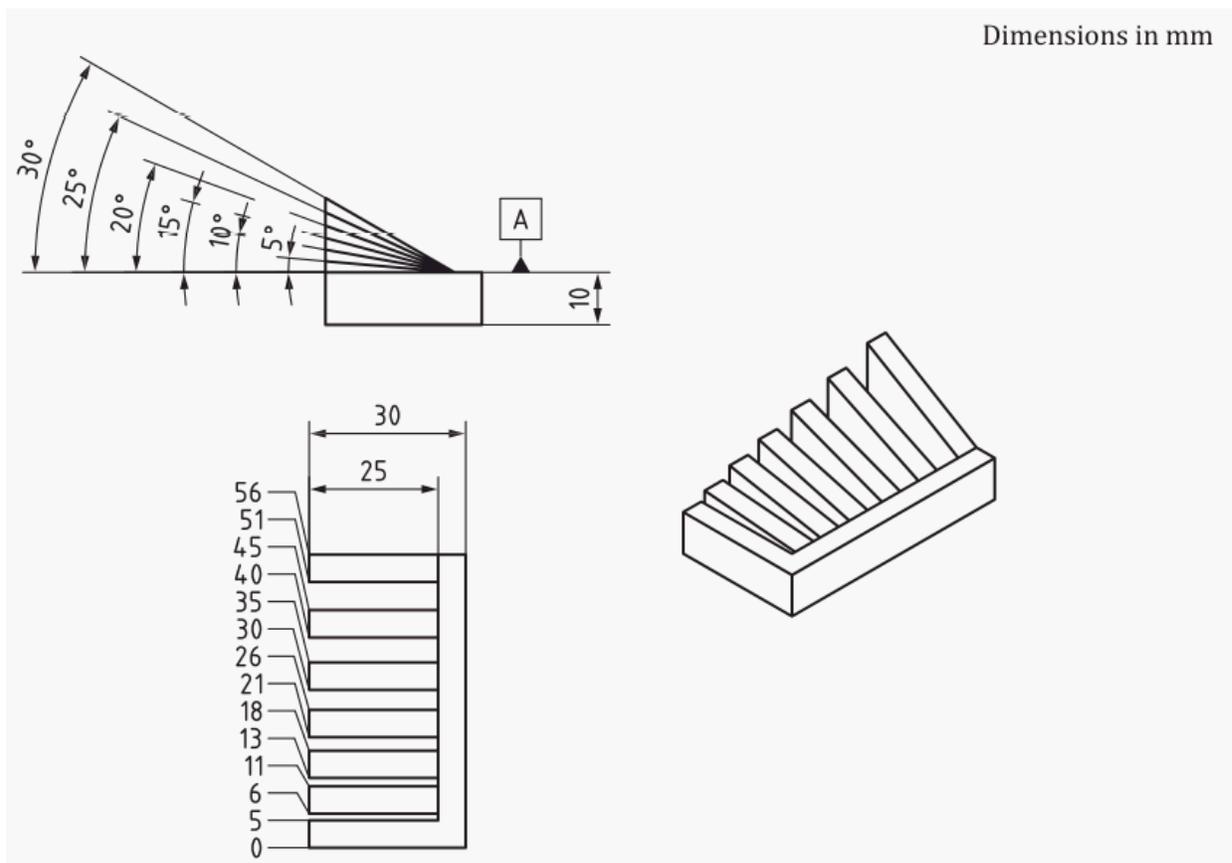


Ilustración 4.15.- Probeta para el estudio de la precisión angular [93].

4.2.4.8 Rugosidad superficial

En último lugar, la norma incluye una pieza con el objetivo de estudiar el efecto stair-case generado por todas las tecnologías de fabricación aditiva. Por ende, se estudia la rugosidad superficial de las probetas. La geometría sugerida está compuesta por 7 láminas con tamaño 24x60x6 milímetros dispuestas a lo largo de la plataforma de impresión e inclinadas a distintos grados. Adicionalmente, se estudia la rugosidad de la pieza en zonas donde se han requerido post tratamientos para retirar los soportes de construcción. Las láminas están inclinadas en ángulos que varían de 0° a 90° con respecto del eje vertical, estando las inclinaciones equiespaciadas; es decir, ángulos de inclinación de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.

Todas las láminas están etiquetadas mediante un número que describe la inclinación de la pieza, facilitando así la identificación y la toma de datos. Las medidas se pueden realizar linealmente (estudio de la rugosidad en una dirección) o en un área (estudio en dos dimensiones). El instrumento de medida recomendado es un profilómetro óptico o por contacto. En total, se deben tomar hasta cuatro medidas de cada probeta: rugosidad superficial media (R_a), distancia valle-pico promedio (R_z), grado de asimetría en la distribución de altura de la superficie (R_{sk}) y curtosis de la distribución de altura (R_{ku}). La medición de estas cualidades de la probeta precisa del uso de instrumentos de medida clase AAA.

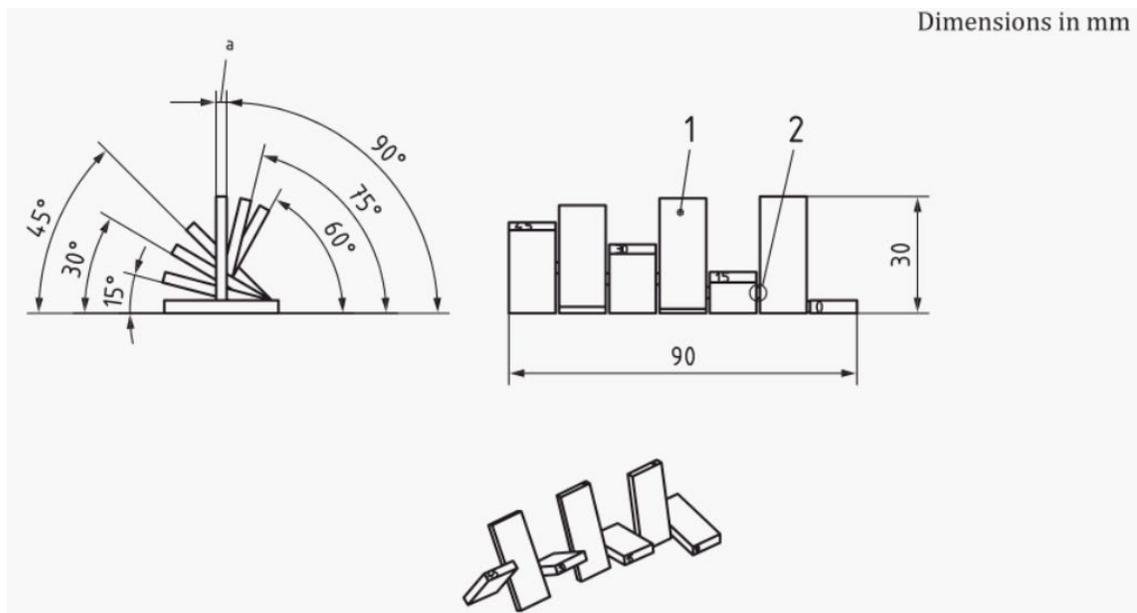


Ilustración 4.16. Probeta para el estudio de la rugosidad superficial [93]

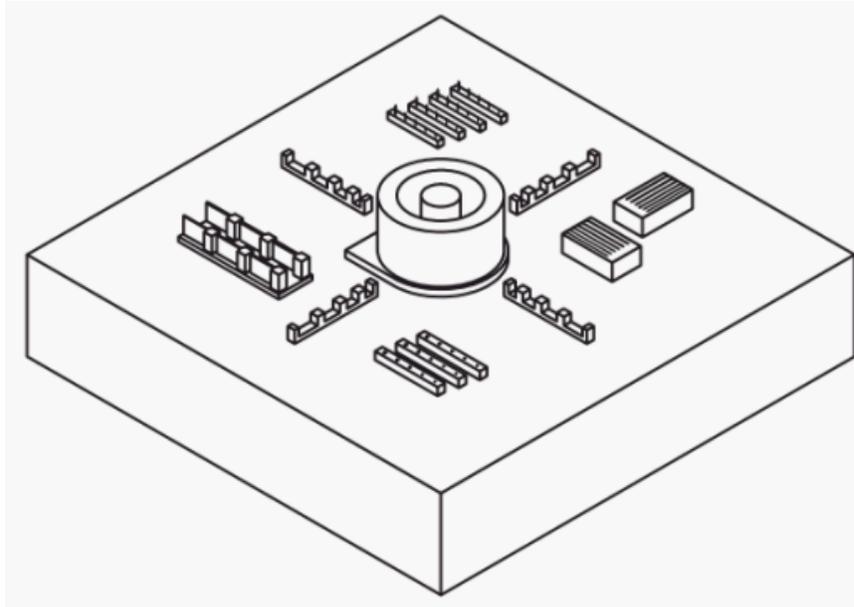


Ilustración 4.18. Vista isométrica de la configuración global de probetas [93]

El objetivo de todas las probetas y artefactos anteriormente detallados reside en estudiar las capacidades geométricas de la tecnología de fabricación bajo estudio. Se requiere la utilización de diversos instrumentos de medida para la obtención de datos de relevancia y la extracción de información, que posteriormente será transformada en guías de diseño y fabricación. La norma incluye un anexo final relativo a metrología, en donde se especifican todos los instrumentos de medida que se pueden utilizar, la precisión requeridos por los mismos y una metodología de medición.

Los instrumentos de medida son clasificados en tres grupos en base a la dificultad de uso y el precio de los instrumentos de medida:

- Clase A; instrumentos simples y de precio reducido. Destacan los micrómetros, pies de rey o calibres de profundidad, bloques patrón longitudinales, etc. Con estos instrumentos se pueden realizar medidas de longitudes, alturas y diámetros en los artefactos lineal, circular y resolución de pines, entre otros.
- Clase AA; instrumentos de mayor complejidad y con un coste superior. Destaca el escáner 3D, microscopios calibrados o relojes comparadores lineal y angular. Las medidas obtenidas son de mayor precisión y menor incertidumbre. Con ellos se pueden

medir longitudes relativas entre caras, rectitud de las caras de la probeta o la concetricidad de un anillo.

- Clase AAA; instrumentos de máxima precisión utilizados habitualmente en laboratorios, con una alta complejidad en su uso y un precio muy elevado. Destacan la máquina de medición por coordenadas (CMM) y los perfilómetros óptico y digital. Con estos instrumentos se pueden hacer mediciones de rectitud, circularidad, diámetro, concetricidad, altura, etc.

Se destaca también la buena práctica de repetir medidas de una misma dimensión con el objetivo de reducir la incertidumbre y tomar el valor promedio como dato real.



Ilustración 4.19. Instrumentos de medida clase A



Ilustración 4.20. Juego de bloques patrón del fabricante Mitutoyo



Ilustración 4.21. Máquina de medición por coordenadas (CMM)

En último lugar, se sugiere un procedimiento para la toma de mediciones en las distintas probetas. Este procedimiento no es en ningún caso preferible a otros métodos; debe ser tomado solamente como una sugerencia. Adicionalmente, se indican los instrumentos de medida recomendados para las mediciones a realizar en cada una de las variables de relevancia de cada probeta.

4.2.5 Ángulo máximo de inclinación

Está previsto que la normativa ISO 52902 sufra cambios y modificaciones para el año 2024, en vistas a mejorar los patrones de diseño para disminuir la incertidumbre en las medidas y obtener un análisis más amplio en las guías de diseño y fabricación mediante tecnologías aditivas. Es por ello que aún existen ciertos campos en los que la norma no hace hincapié y pueden ser de interés en función de la geometría fabricada. En este caso, se indica una probeta de diseño propio para estudiar el ángulo de inclinación máximo imprimible sin necesidad de requerir estructuras de soporte. La pieza consiste en una estructura en voladizo cuyo ángulo de inclinación, con respecto del eje vertical, aumenta progresivamente en saltos de 5 grados.

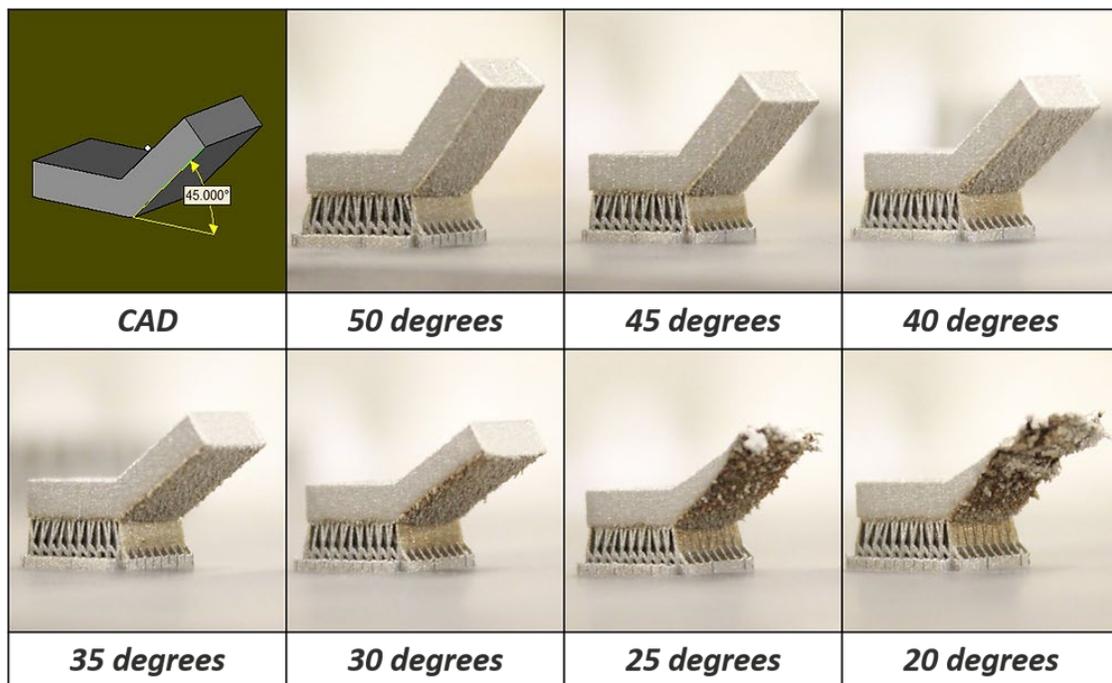


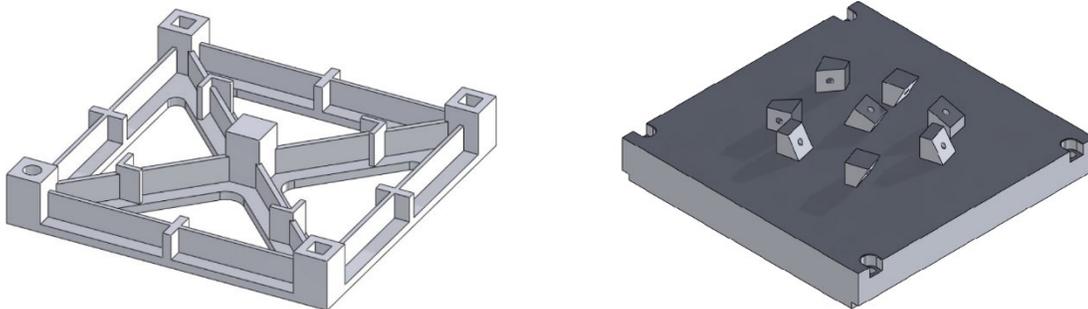
Ilustración 4.22. Descuelgue de material en función del ángulo de inclinación de voladizos con respecto del eje horizontal

Las tecnologías de fabricación aditiva permiten una libertad en el diseño muy alta. Sin embargo, a veces es preciso diseñar estructuras de soporte que sustenten la pieza según se construye capa a capa [32]. Esta probeta evalúa cualitativamente el ángulo máximo de inclinación realizable por la máquina sin necesidad de utilizar soportes. Las piezas con soporte requieren etapas de acabado con el objetivo de retirar los soportes y mejorar la calidad superficial y la rugosidad de la pieza. El ángulo máximo de inclinación sin soporte varía en función del material a procesar.

4.2.6 Otros diseños de probetas

Como se ha destacado en numerosas ocasiones, la tecnología avanza más rápido que la normativa y las leyes. Habitualmente, son los propios investigadores quienes solucionan los inconvenientes encontrados durante la experimentación con la nueva tecnología y quienes se sobreponen a las dificultades. Hay numerosos investigadores que han propuesto probetas para la calibración de máquinas y para el estudio de la incertidumbre y resolución de las tecnologías de fabricación aditiva.

Los patrones impresos no solo se utilizan para la evaluación de las capacidades geométricas y la precisión de fabricación de las tecnologías aditivas. También se llevan a cabo para la comparación de los distintos procesos [94]. A continuación, se adjuntan algunos diseños de las probetas sugeridas por investigadores internacionales.



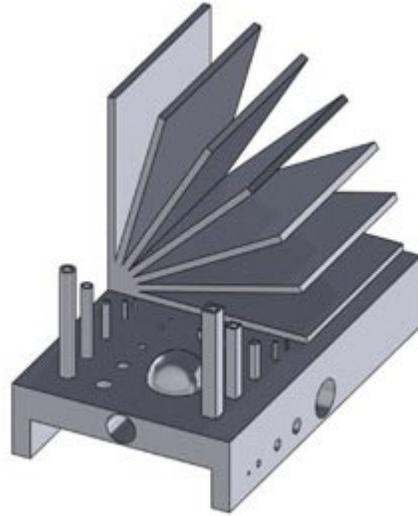


Ilustración 4.23. Probetas para el análisis de la fabricación aditiva [94]

5 Experimentos

En este apartado se detalla toda la cronología de experimentos programada para los materiales de estudio especificados en el apartado 4.1. Se detalla cada una de las probetas fabricadas a partir de cada material y se recogen las dificultades e inconvenientes encontrados durante el procesamiento. Es importante recalcar que la programación de experimentos sufrió variaciones según se obtenía mayor experiencia del proceso. De esta manera, los conocimientos adquiridos durante la fabricación de los primeros materiales fueron aprovechados para etapas posteriores del proceso. Adicionalmente, se establece una comparación entre la planificación inicial y la cronología real de los experimentos

5.1 DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

A continuación, se describen los periodos temporales de realización de los experimentos y se adjunta adicionalmente la cronología real. El diseño de las piezas y probetas a fabricar se realizará a través del programa SolidWorks, un programa de diseño industrial. El software requerido para la deconstrucción de la pieza en capas y cálculo de las trayectorias de máquina se realizará por medio de Simplify 3D, un slicer de nivel industrial con un entorno gráfico que permite la modificación de una gran cantidad de parámetros de proceso, entre los que destacan altura de capa, ancho de línea, velocidad de impresión, etc. En último lugar, el control de la impresora Big Foot se realiza a través de una placa Duet 3D, que lleva instalado internamente un programa en donde se precisa especificar los parámetros de temperaturas del extrusor, temperatura de la cama de impresión y velocidad de extrusión.

5.1.1 Planificación de experimentos

El periodo de realización de los experimentos está acotado a 2 meses y medio. Inicialmente, se ha fijado un periodo de una semana para el establecimiento del marco teórico de la fabricación aditiva, conocimiento de las consideraciones previas de diseño mediante tecnología FDM, legislación y normativa internacional [4, 5, 32, 35, 45]. Simultáneamente, ese periodo de tiempo

se utilizará para conocer la máquina y entender el software interno necesario para la fabricación de piezas.

En primer lugar, se llevará a cabo el estudio del PLA. Este plástico se utiliza habitualmente en la fabricación aditiva mediante tecnología FDM, por lo que existe extensa información en Internet sobre los parámetros de proceso [32, 59, 78]. Adicionalmente, este plástico está ideado para procesarse a través de FDM, por lo que la dificultad de procesamiento debería ser reducida. Al tomar este termoplástico como primer material a procesar, el periodo de pruebas se utilizará simultáneamente para conocer de primera mano el funcionamiento de la máquina y los softwares requeridos.

En segundo lugar, se estudiará del PETG. El polímero PET, extensamente utilizado en la industria del envasado y empaquetado, se procesa mediante técnicas de extrusión de plásticos (técnica convencional), moldeo por inyección o moldeo por soplado [1]. Con el objetivo de adaptar las propiedades del material para la fabricación aditiva mediante FDM, se añade el etilenglicol, dando lugar al PETG. Con esto, se reduce el punto de fusión del material, se obtienen objetos translúcidos y se frena la cristalización cuando se encuentra sometido a esfuerzos; estas propiedades dan lugar a piezas resistentes y fáciles de termoformar o extruir [95]. El potencial de los plásticos basados en polietileno reside en su capacidad para ser reciclados. Su demanda anual asciende hasta los 4 millones de toneladas [69] y promover una economía circular favorece la reducción de la contaminación de los mares y la disminución de la huella de carbono de las industrias de envasado [61]. Este plástico también está ampliamente extendido en la tecnología FDM, por lo que la duración de los experimentos se prevé corta. Existen numerosas publicaciones en Internet donde se realiza una optimización de los parámetros de proceso [63, 85, 96].

En tercer lugar, se procederá con el análisis del primer plástico técnico, el Lexan. Este material está diseñado para su procesamiento mediante la tecnología convencional conocida como moldeo por inyección. La extrapolación de parámetros es de alta complejidad y no se pueden relacionar directamente. El moldeo por inyección lleva utilizándose en la industria desde los años 1940 (sección 19 de la publicación [1]) y el control y conocimiento de las variables que actúan en el proceso es muy alto. Existe una gran experiencia al respecto e incluso existen

manuales para resolver problemas a la hora de su fabricación. No obstante, los parámetros especificados en la ficha técnica del material han de tomarse exclusivamente como un punto de partida alrededor del cual variar los valores. Asimismo, la empresa ya ha realizado pruebas con anterioridad, pero sin obtener resultados de buena calidad. EL atractivo de este material reside en su aplicación para la industria del ferrocarril.

En cuarto lugar, se investigará el Luvocom. El fabricante Lehvoss Group ha diseñado este material para la fabricación mediante moldeo por inyección, misma situación que el Lexan. No obstante, el proveedor facilita ciertos parámetros para la impresión 3D, ya que también proporcionan el material en formato filamento. Este material requerirá de un mayor periodo de estudio. Por un lado, aún no se han realizado pruebas satisfactorias en la máquina. Por otro lado, este material está reforzado con fibra de carbono, lo cual dificulta la extrusión del material y su deposición en la plataforma de impresión.

En quinto y último lugar, se analizará la alúmina. El fabricante es Inmatec y la referencia es Inmafeed K1008. El análisis de la extrusión de alúmina es una nueva rama de estudio dentro de la empresa y no se conoce punto de partida. Adicionalmente, el material tiene un contenido del 96% en alúmina y un 4% en plásticos aglutinantes. La proporción de termoplásticos es muy baja en comparación con el material cerámico, lo cual puede representar dificultades durante los ensayos. Por otro lado, el proveedor de material no especifica el termoplástico utilizado como material aglutinante. Sin embargo, sí se detallan los parámetros de proceso habitualmente utilizados para el moldeo por inyección de la alúmina. Estos datos se tomarán como punto de partida en el estudio.

El estudio de cada material estará dividido en 4 fases diferentes:

- Estudio de las temperaturas mediante la extrusión en vacío
- Estudio de los parámetros de proceso mediante la fabricación de cubos vacíos y prismas
- Estudio de las capacidades geométricas mediante la fabricación de las probetas ISO 52902
- Fabricación de piezas

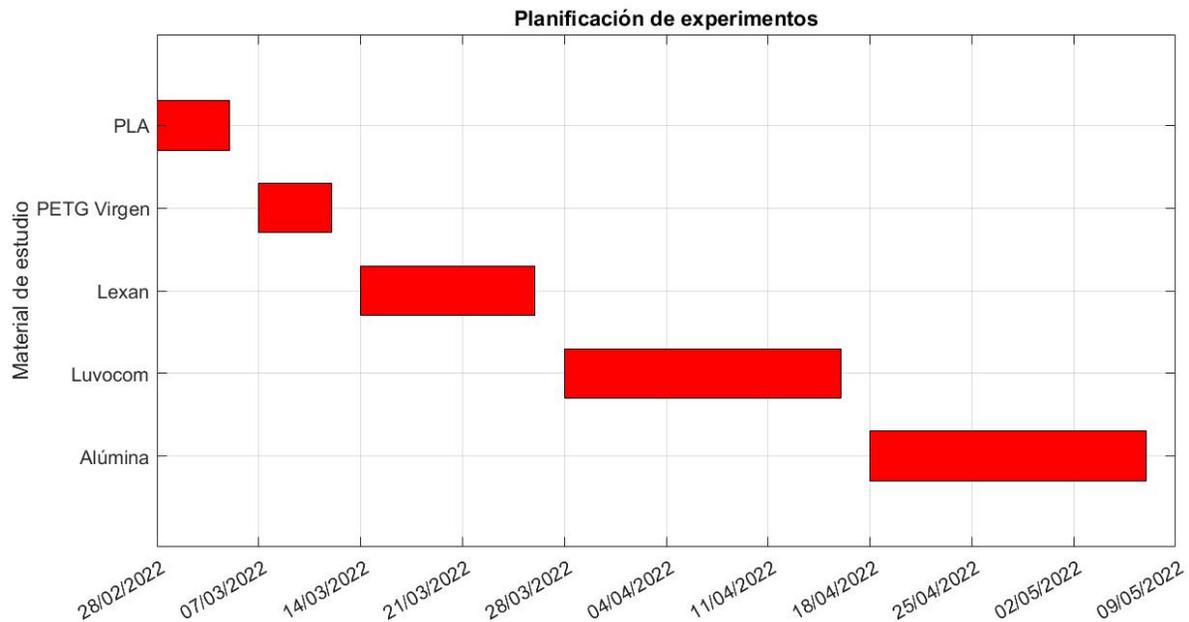


Ilustración 5.1. Planificación inicial de los experimentos

5.1.2 Cronología de experimentos

La sucesión de la programación de los experimentos sufrió importantes variaciones por causas ajenas a la empresa. En primer lugar, la disponibilidad de máquina se vio reducida al comienzo de la investigación. La máquina se encontraba en un proceso de implementación de mejoras y el envío de la impresora por parte de Indart 3D no se realizó hasta mediados del mes de marzo. Los primeros ensayos se realizaron el día 22 de marzo.

Por otro lado, la fabricación de los materiales Luvocom y alúmina representó múltiples inconvenientes (ver apartados 5.2.4 y 5.2.5). Por esta razón, y con el objetivo de crear un amplio marco teórico y experimental, y generar guías de diseño aplicables a materiales técnicos de interés por parte de la empresa, se decidió implementar la optimización de dos polímeros adicionales.

En sexto lugar, se procederá con el estudio del Nylstrong, nylon reforzado con fibra de vidrio. El proveedor también suministra la materia prima en formato de filamento y se especifican unos parámetros de partida para la optimización en los procesos de fabricación. El Nylon es un polímero sintético perteneciente al grupo de las poliamidas. Se caracteriza por su carácter elástico y resistente.

Para finalizar con el estudio, se analizará la reciclabilidad de botellas de plástico, fabricada a partir de distintas clases de polietileno (PET). Como ya se destacó en secciones anteriores, la composición química del polietileno puede variar, dando lugar a compuestos de mayor densidad y con propiedades térmicas y mecánicas diversas. En el caso de las botellas de plástico, éstas están fabricadas a partir de PET, mientras que los tapones son de HDPE. Para este estudio solo se utilizará el cuerpo de las botellas.

A continuación, se adjunta un gráfico con la ejecución real de los experimentos a lo largo del tiempo.

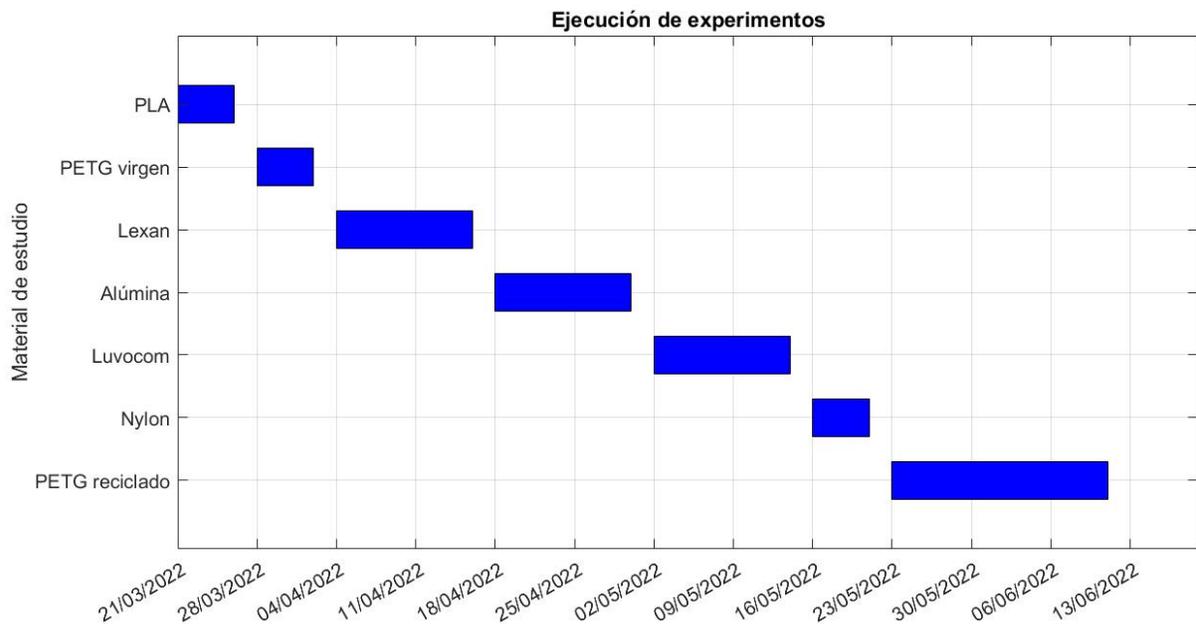


Ilustración 5.2. Cronología real de los experimentos

5.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

En este apartado se detallarán todos los experimentos realizados hasta concluir con los parámetros que dan lugar a una buena calidad superficial de las piezas. Adicionalmente, se incluirán todos los problemas encontrados durante el procesamiento de los materiales, así como el procedimiento realizado para la resolución de esos obstáculos.

5.2.1 PLA

El PLA utilizado es del proveedor SmartMaterials y de color natural o transparente. Como parámetros de partida para la primera iteración se utilizaron los sugeridos en la ficha técnica: temperatura de extrusión entre 200°C y 220°, temperatura de la cama de impresión 45°C y encendido del ventilador de capa a partir de la segunda capa. Puesto que los extrusores de pellets de la impresora Big Foot Pro Pellets están compuestos de dos zonas calefactadas, se utilizó la sugerencia obtenida por parte del fabricante de la máquina de establecer un gradiente térmico de 20°C. Las temperaturas de los puntos calefactados fueron ajustadas a 180°C y 200°C.

La boquilla utilizada tiene un diámetro de 0,8 milímetros; por tanto, otros parámetros de proceso quedan ajustados: ancho de línea 0,8mm y altura de capa 0,4mm. La velocidad de impresión del PLA toma el valor de 30 mm/s en la impresión mediante FDM; se utilizará como parámetro para la fabricación mediante FPF. La velocidad de rotación del husillo se ajusta inicialmente a E400 (según indicado por el fabricante de la máquina; 11,20 rpm).

El material no muestra problemas durante su extrusión contra presión atmosférica, por lo que se procede inmediatamente a realizar las probetas de cubo vacío. Estas probetas consisten en un cubo con medidas 40x40x10 milímetros y un espesor de pared unitario, es decir, el espesor de pared corresponde al ancho de la línea seleccionado. La primera probeta realizada muestra buena calidad superficial y las dimensiones totales de la pieza se ajustan a las teóricas, con desviaciones que apenas alcanzan el 2%. Sin embargo, el ancho de las paredes, cuya medida teórica es de 0,8 milímetros, alcanzan valores que duplican la dimensión nominal. Existe una sobreextrusión de material, es decir, se está depositando excesivo material y las líneas son más anchas de lo diseñado. Para ello, se decide disminuir la velocidad de rotación del husillo y, por ende, la velocidad de deposición del material. Tras varias iteraciones, se obtienen unos parámetros de proceso aceptables para las primeras probetas.

A continuación, se incluyen algunos gráficos relativos a las mediciones realizadas sobre las distintas probetas impresas en PLA.

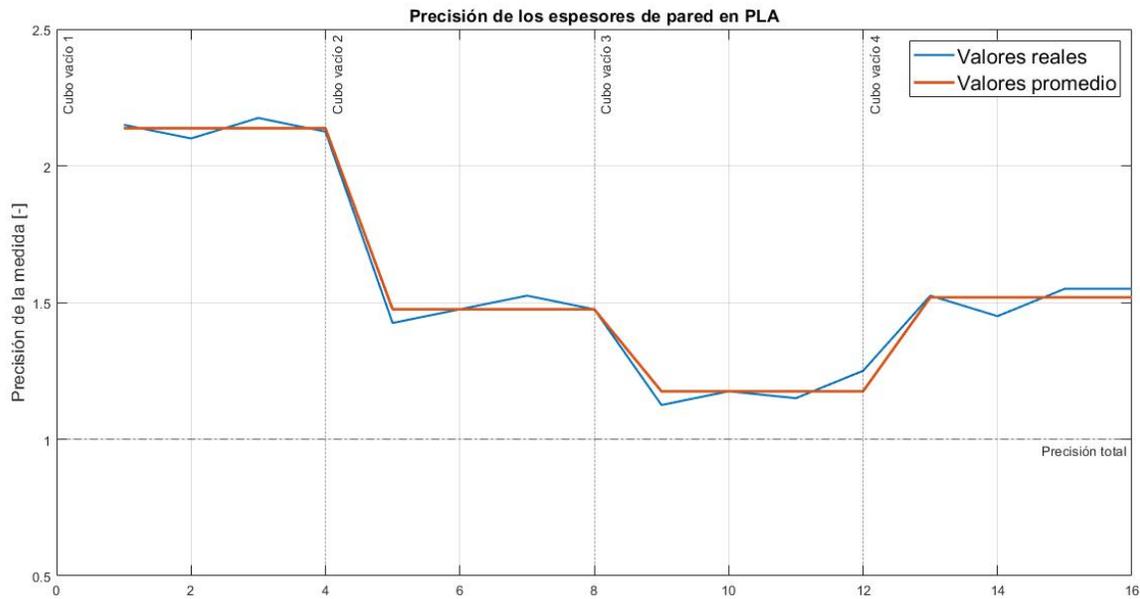


Ilustración 5.3. Precisión de los espesores de pared en el cubo vacío de PLA

En este primer gráfico se recoge la precisión de los espesores de cubo vacío en las distintas iteraciones realizadas, donde se modifican progresivamente los parámetros de proceso (ver anexo A1). Así, se define la precisión de la medida como:

$$Precisión\ de\ medida = \frac{Espesor\ real}{Espesor\ nominal}$$

Según se implementan modificaciones durante los experimentos, los espesores de pared medidos se ajustan al valor nominal de la medición, que debe coincidir con el valor indicado en el programa de CAD y el ancho de línea de impresión. Es decir, los cambios están teniendo un efecto positivo sobre la calidad de impresión. Realizando un análisis visual sobre las piezas, se puede observar también el conocido como efecto “pata de elefante”. Este fenómeno ocurre cuando la altura de la primera capa no se ha ajustado correctamente y la deposición de material se ha realizado excesivamente cerca de la plataforma de impresión. Esto provoca un desparramamiento de material y las dimensiones de los ejes X e Y se han expandido con respecto a su valor teórico. De aquí en adelante, se deberá prestar mayor atención a la calibración de la plataforma de impresión y ajustar correctamente (de manera manual o digital) la altura de la primera capa, con el objetivo de que coincida con el valor especificado mediante código G.

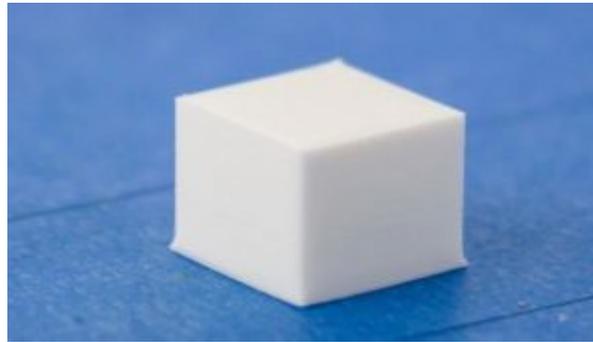


Ilustración 5.4. Efecto pata de elefante

Con este breve análisis se da por concluido la optimización de los parámetros de proceso del PLA. No obstante, se realizan otras pruebas para corroborar los resultados. En segundo lugar, se procede a realizar un análisis de la repetibilidad y la precisión de la máquina fabricando piezas de PLA. Para ello se imprimen prismas con tamaño 10x20x30 milímetros y se monitorizan las medidas de cada eje. Los resultados arrojados por el sistema son los siguientes.

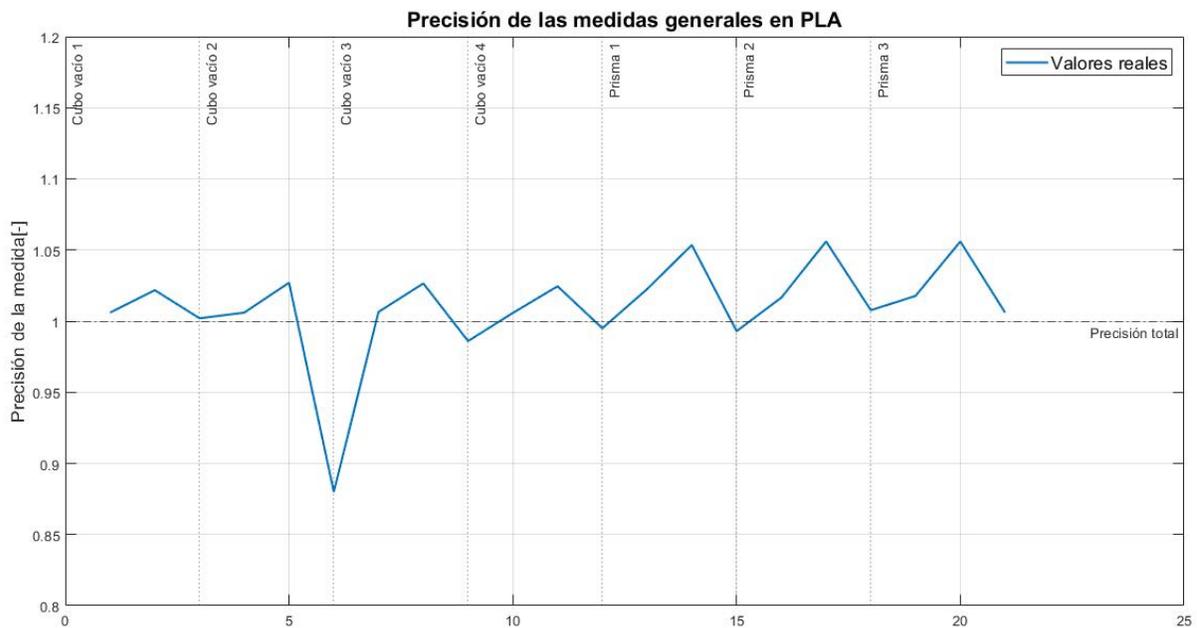


Ilustración 5.5. Dimensiones exteriores en las probetas de PLA

En este gráfico se muestran las dimensiones totales (dimensiones exteriores en los ejes X, Y y Z) para los ensayos previos realizados en PLA (cubos vacío y prismas). Los resultados muestran

una buena optimización de los parámetros, pues la precisión obtenida tiene una desviación inferior del 5%. Se concluyen los análisis del PLA mediante la fabricación de las probetas indicadas por la norma ISO 52902 para registrar y generar la guía de diseño del PLA.

5.2.2 PETG

El PETG es una modificación del PET mediante la adición de etilenglicol en su estructura interna. La introducción de glicol da lugar a piezas resistentes y fáciles de extruir. No es de extrañar que el PETG se haya convertido en el termoplástico por excelencia utilizado en la tecnología de Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Además, existe una amplia literatura relativa a la impresión de este material y el impacto de los parámetros de proceso en las propiedades finales de la pieza [63, 66].

El proveedor de material en formato pellet es SmartMaterials y, al igual que para el PLA, facilita unos parámetros de impresión del PETG en formato filamento. Los valores sugeridos son:

Tabla 1. Parámetros de inicio para la fabricación de PETG

Parámetro	Valor numérico
Temperatura de extrusión	225-245°C
Temperatura de la plataforma de impresión	60-90°C
Ventilador de capa	100%

El procesamiento de pellets requiere una temperatura ligeramente superior a la utilizada para el procesamiento de filamento. Por este motivo, la temperatura se ajusta al valor máximo dentro del rango especificado por el proveedor del material, es decir, 245°C. Las pruebas de extrusión contra presión atmosférica muestran que la temperatura óptima corresponde a 250°C.

Para comenzar con las pruebas de cubo vacío, se ajusta la temperatura de extrusión a 250°C, la temperatura de la cama de impresión a 60°C y la velocidad de rotación del husillo a 15 rpm. Las

primeras probetas muestran un espesor de pared muy pequeño, con dimensiones inferiores al valor nominal. El material extruido es insuficiente para crear la geometría especificada y se precisa aumentar la velocidad de rotación del husillo y, por tanto, el volumen de material depositado sobre la plataforma de impresión.

Tras realizar diversas iteraciones, la velocidad de rotación del husillo ha sido incrementada hasta 22,5 rpm. Adicionalmente, ha sido preciso aumentar la temperatura de extrusión debido al bajo índice de fluidez del material. A una temperatura de 250°C y con velocidad de rotación del husillo de 22,5 rpm, la resistencia al avance del material y el rozamiento entre el material y el husillo son altos. Esto provoca que el motor salte pasos, erosionando los engranajes del motor y disminuyendo su vida útil. Con un aumento de la temperatura hasta 260°C, el índice de fluidez crece y el material se deposita con mayor facilidad. A continuación, se incluye un gráfico con la evolución de la precisión y la desviación de los espesores de pared con respecto de la medida nominal. Como se puede observar, los espesores de pared de las últimas probetas se ajustan a los valores nominales de diseño.

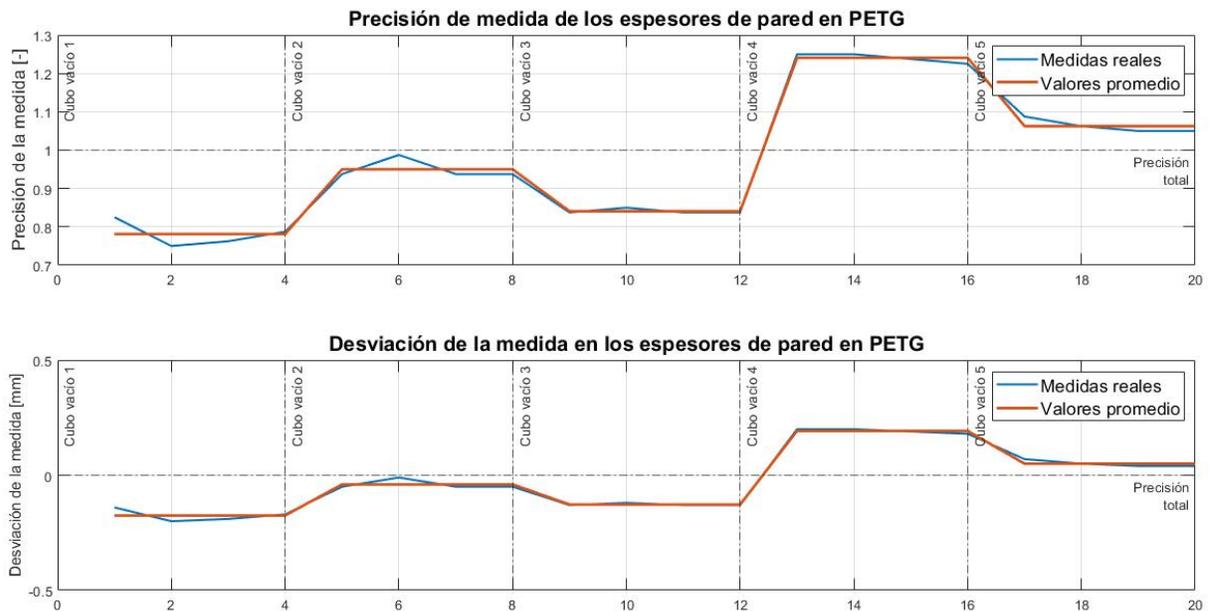


Ilustración 5.6. Precisión y desviación dimensional de los espesores de pared en las probetas de cubo vacío de PETG

El procesamiento de PETG es sencillo y no presenta dificultades durante su fabricación. No aparece el fenómeno de babeo y la calidad superficial y dimensional de las piezas es alta. La virtud del PETG reside en la economía circular a explotar mediante la creación de mezclas de PETG virgen y PET reciclado (más información en el apartado 5.2.7).

5.2.3 Lexan

El Lexan [88] es un material de mayor interés por parte de la empresa ya que es un plástico técnico utilizado en la industria ferroviaria gracias a sus propiedades mejoradas para la lucha contra el fuego y el humo. Por ello, se ha realizado una iteración más amplia de los parámetros de proceso, obteniendo resultados prometedores.

El fabricante SABIC indica las variables a controlar en la fabricación de piezas mediante moldeo por inyección. Como valores iniciales de ciertas variables, se toman los datos del fabricante: temperatura del molde entre 50°C y 80°C, temperatura de fusión entre 250°C y 280°C, velocidad de rotación del tornillo entre 40 rpm y 70 rpm. Adicionalmente, se tiene en consideración otros parámetros que habían sido previamente optimizados por empleados de la empresa. Es de recalcar, que los parámetros de proceso especificados por los empleados de la empresa no generaron piezas con buena calidad superficial y alta precisión dimensional.

Tabla 2. Parámetros iniciales de impresión del Lexan

Variable	Valor numérico
Velocidad de rotación del husillo	E1150
Temperatura del alimentador de material	300°C
Temperatura de la boquilla de extrusión	320°C
Temperatura de la cama de impresión	100°C
Velocidad de impresión	1800 mm/min

Durante la impresión contra presión atmosférica, se observa que el motor salta pasos y el caudal de material no es constante. El hilo extruido tiene pequeñas protuberancias y se forman burbujas. Se especula que el causante de estos problemas pueda ser la geometría de los pellets, pues tienen forma tubular con un cilindro hueco en el centro que permite la entrada de aire. La aparición de las burbujas se debe a la extrusión del aire atrapado dentro de la granza. Para disminuir la aparición de las burbujas y obtener un caudal de material más constante se decide disminuir la velocidad de rotación del husillo. De esta forma, la alimentación de pellets es más paulatina y el aire se evacúa con mayor sencillez.

Implementados los cambios, se observa una mejoría considerable en la continuidad en el flujo. Por ello, se procede a realizar las primeras probetas de cubo vacío en Lexan. Se observa una baja calidad en las piezas impresas. La extrusión de flujo sigue sin ser continuo y aparecen ciertos huecos de material en algunas de las caras. Tras hablar con el jefe de máquina, se indica que la fabricación de Lexan siempre ha estado acompañada de atascos en el cabezal de extrusión. Cada cierto tiempo se precisa hacer una parada de mantenimiento en la máquina para desatascar el cabezal y limpiar el husillo mediante un material purgador. A continuación, se incluyen imágenes del husillo atascado.

En las imágenes se observa un apelotonamiento de material en la parte alta del extrusor. Este atasco no permite la alimentación correcta de nuevos pellets y el flujo de material se ve reducido de manera considerable, llegando al punto de no extruir material. Desde el comienzo del procesamiento de Lexan por parte de la empresa en la máquina Big Foot Pro Pellets, se reportan problemas de atascos. Los parámetros de proceso inicialmente detallados (ver Tabla 2) no habían sido nunca optimizados y eran unos parámetros adecuados para la fabricación de piezas de pequeño tamaño. Se teoriza que las temperaturas de extrusión del cabezal pueden no estar bien ajustadas, a pesar de seguir las indicaciones del fabricante de la máquina de mantener un gradiente térmico de 20°C.

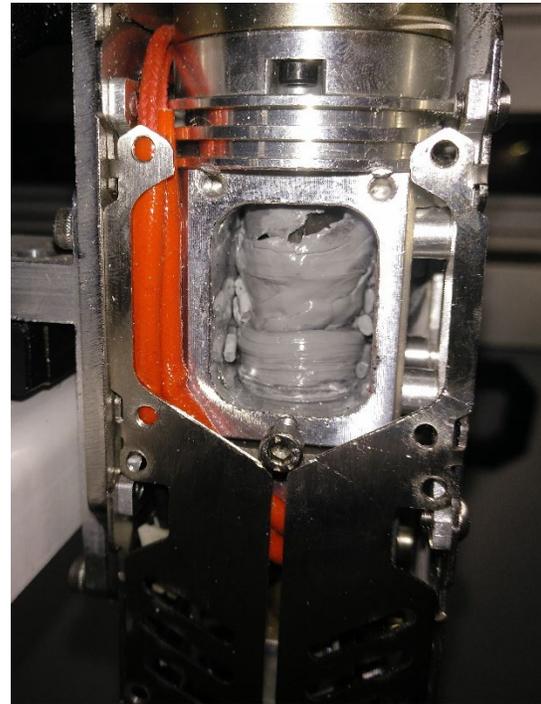


Ilustración 5.7. Atascos producidos en el extrusor durante la fabricación de Lexan

En busca de la solución del problema, se propuso la siguiente teoría de la procedencia de los atascos. En primer lugar, las temperaturas de extrusión utilizadas (300°C y 320°C) son ligeramente superiores a la temperatura de fusión del material. Esto indica que, en la teoría, todo el husillo debería estar lleno con material en estado fluido. El punto de mayor relevancia y donde se producen los atascos es la zona de alimentación de pellets. Por un lado, existe un cierto material que se encuentra a alta temperatura, por encima del punto de fusión, y que está en estado líquido. Por otro lado, existe una alimentación de pellets nuevos a temperatura ambiente. Esto significa que aparece una bifase del material. En la gran mayoría de compuestos químicos existentes en el planeta, hay alguna excepción como el agua, la fase sólida es más densa que la fase líquida. Esto implica que la fase sólida precipita y desciende, mientras que la fase líquida se mantiene en la zona superior. Aplicando estos conocimientos a la teoría aquí expuesta, la distribución de material a lo largo del husillo sería líquido, sólido y líquido. Ahora, la fase líquida que se encuentra en la zona de alimentación de material virgen nunca será capaz de introducirse en el husillo y se quedará permanentemente estancada en la parte alta del cabezal.

Suponiendo una posible degradación de las propiedades del material por estar éste sometido a altas temperaturas durante un largo periodo de tiempo o por choques térmicos debido al encendido y apagado de las resistencia calefactoras tras la fabricación de piezas de pequeño tamaño, se produce una solidificación progresiva de la fase líquida localizada en la zona de alimentación de pellets, dando lugar a anillos de material sólido y de gran tamaño que imposibilitan la introducción de material virgen. La velocidad de este proceso es lenta y explicaría por qué la extrusión del material no es constante pasados unos 30 minutos desde el comienzo de la fabricación. Esta teoría concuerda con las simulaciones realizadas en la publicación [97], en donde se extrae como conclusión que el volumen específico del policarbonato (PC) aumenta con la temperatura. En otras palabras, la densidad del policarbonato (polímero base en el Lexan) disminuye con la temperatura, refrendando así la hipótesis propuesta (ver Ilustración 64).

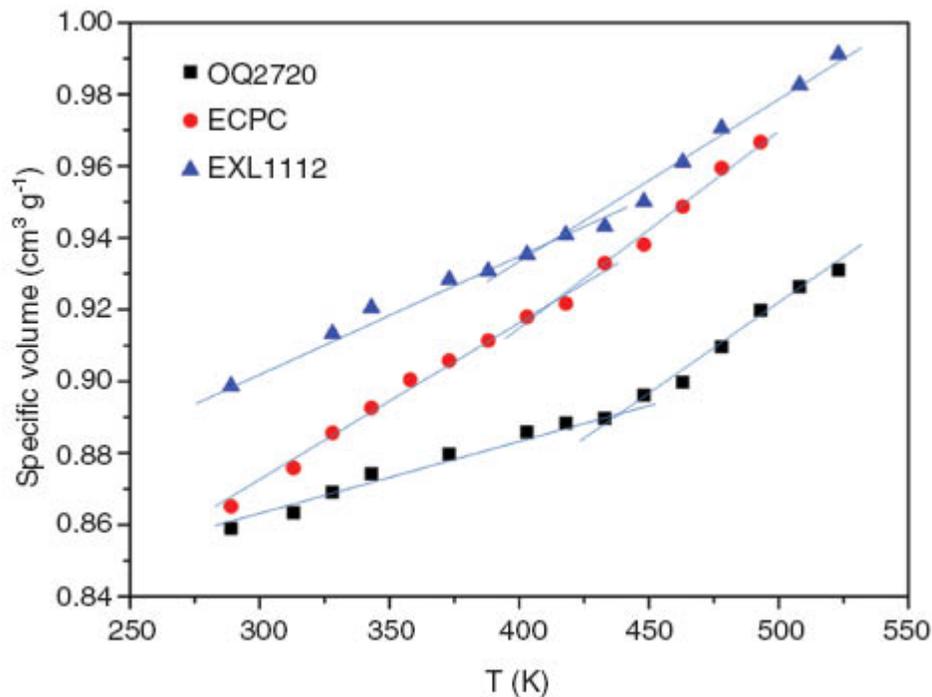


Ilustración 5.8. Relación del volumen específico con la temperatura en distintos policarbonatos [97]

Se propone disminuir la temperatura de la zona calefactada de alimentación de pellets. A partir de ahora, este punto se utilizará como zona de reblandecimiento, sin llegar a la fusión del material, disminuyendo la fricción entre pellets y husillo y favoreciendo un flujo continuo de

alimentación. Las temperaturas del cabezal de extrusión son ahora 200°C para la zona de alimentación de pellets y 320°C para la boquilla del extrusor.

Se realizan las primeras impresiones contra presión atmosférica del material. El motor deja de saltar pasos y desaparecen las burbujas en el hilo extruido. Sin embargo, el material sale de la boquilla del extrusor sin necesidad de rotar el husillo; se produce babeo. La viscosidad del fluido es muy baja. Se decide utilizar los parámetros sugeridos por el fabricante SABIC acerca de la fabricación de Lexan y se disminuye la temperatura de la boquilla hasta 280°C. Ahora, el gradiente térmico existente en el extrusor es de 80°C.

Se procede a realizar las impresiones de las probetas de cubo vacío del material. Las capas iniciales de la primera probeta se fabrican con buena calidad. La adherencia entre la plataforma de impresión y la pieza es buena, no se producen derrumbes de material y la calidad superficial y precisión dimensional es alta. Sin embargo, transcurridos 5 milímetros de altura de una pieza de 10 milímetros (a media altura de la pieza), el material comienza a dar problemas, el flujo deja de ser continuo y se empieza a desbrozar, dando lugar a zonas en donde falta material. Adicionalmente, el espesor de pared es considerablemente más alto que el teórico, lo cual implica la existencia de una sobreextrusión de material. Se disminuye la velocidad de rotación del husillo.

Se realiza una segunda impresión de la probeta y aparece el mismo inconveniente, pero esta vez a una altura diferente. Se teoriza nuevamente la existencia de atascos en el husillo. Tras una inspección del extrusor, no aparece ningún indicio de atascos; no existe un anillo sólido alrededor del husillo que evite la introducción del material de aporte. Se teoriza que la disminución de caudal de material haya sido demasiado excesiva y que el Lexan no fluya correctamente a lo largo de la longitud del husillo. Se aumenta la velocidad de rotación del husillo.

Se realizan nuevas impresiones con el Lexan y se varían los parámetros de proceso con el objetivo de estudiar cuál puede ser el causante de los microatascos. Sin embargo, no se llega a ninguna conclusión. Estos problemas parecen ser aleatorios y no existe un motivo de sencilla

explicación. Se limpia el husillo mediante material purgador con el objetivo de retirar posibles residuos de material quemado que pudieran haberse quedado enclaustrados dentro del extrusor.

Se imprimen nuevamente probetas de cubo vacío, sin mejoría alguna: no se consigue imprimir una pieza completa (a pesar de tener un tamaño pequeño) y la calidad de las piezas es paupérrima. Como última opción, se realiza una limpieza a fondo del extrusor, desensamblando la máquina y estudiando cuál puede ser la causa de los atascos. Para ello, se requiere inicialmente retirar todo el material que pueda existir dentro del husillo mediante el material purgador. Se retira la boquilla del extrusor y se procede a su limpieza. Se aprecia que la boquilla está completamente taponada. Se decide realizar un análisis de la boquilla al microscopio. Como se observa en la imagen, han aparecido virutas de color negro en la punta de la boquilla. Se desconoce la procedencia de estas brozas, pues el Lexan tiene un color grisáceo y el material purgador es de color blanquecino. Se teoriza que la procedencia de este material negruzco provenga de un desgaste excesivo de los componentes internos del extrusor o algún adhesivo utilizado durante la etapa de ensamblaje.

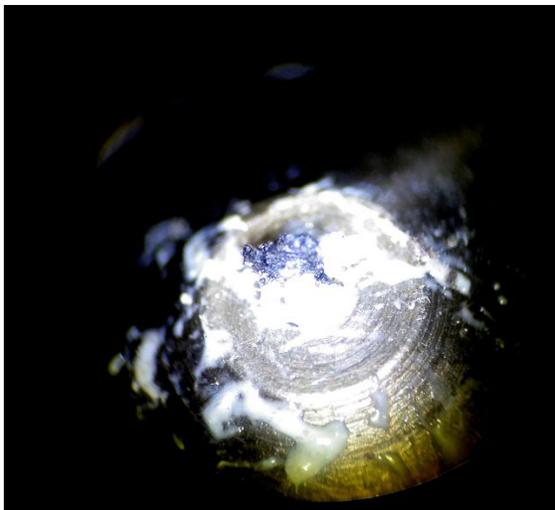


Ilustración 5.9. Detalle de la boquilla vista al microscopio

Tras desmontar por completo el extrusor, no se aprecia ninguna fuente de donde puedan proceder las virutas negras. No hay restos de material procesado que se haya quemado y atascado en el extrusor, el husillo no presenta un desgaste excesivo ni tiene quemaduras. Se

decide desmontar adicionalmente el motor que acciona la rotación del tornillo extrusor. Al tener todas las piezas del motor separadas, se atisba un desgaste en los rodamientos. El rodamiento es un componente mecánico sobre el que se apoya y gira el eje de un mecanismo. Está compuesto por dos anillos (interno y externo) y permite tener una rotación relativa entre los mismos, manteniendo uno de ellos fijo mientras el otro anillo gira solidario al eje. En la siguiente imagen, se detallan las partes que componen un rodamiento.

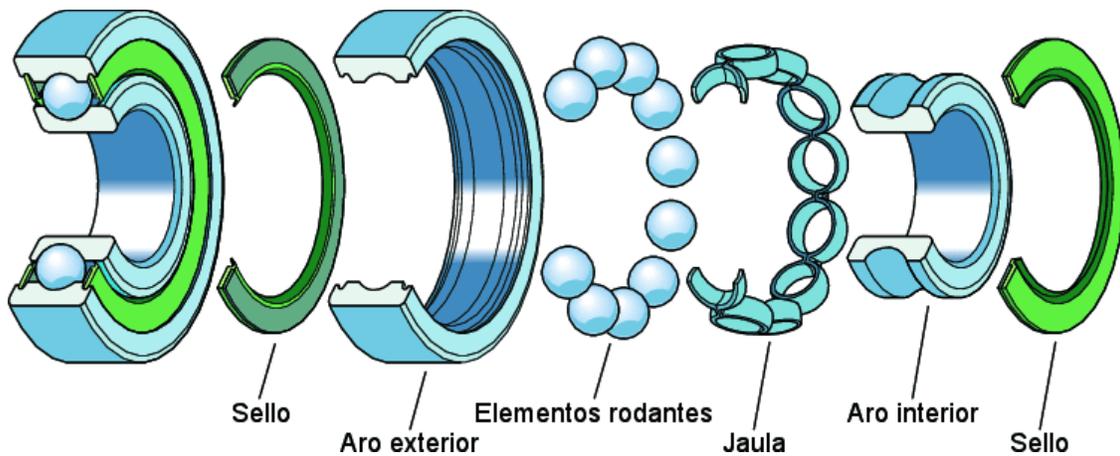


Ilustración 5.10. Componentes de un rodamiento [98]

Debido a la selección de materiales para la construcción del motor, el sello de los rodamientos no es capaz de soportar mucha carga térmica. La temperatura de fabricación del Lexan es relativamente alta y desgasta los sellos del rodamiento. Las brozas negras que aparecen en las piezas de Lexan proceden de los sellos del rodamiento y son la causa de los microatascos que provocan una extrusión discontinua del material.



Ilustración 5.11. Estado de desgaste de los rodamientos

Tras la sustitución de los rodamientos, se retoma la fabricación de las probetas de cubo vacío de Lexan. El objetivo reside en obtener un espesor de pared lo más próximo posible al valor nominal de 0,8 milímetros. Tras haber resuelto los inconvenientes de impresión anteriormente detallados, los parámetros de proceso para la fabricación de Lexan en su primera iteración son:

Tabla 3. Parámetros de proceso de la primera iteración con Lexan

Variable	Valor numérico
Velocidad de rotación del husillo	550
Temperatura del alimentador de material	200°C
Temperatura de la boquilla de extrusión	280°C
Temperatura de la cama de impresión	100°C
Velocidad de impresión	1800 mm/min

Al igual que para las probetas fabricadas a partir de PLA (ver párrafo 5.2.1), este artefacto inicial está diseñado para la optimización de los parámetros más groseros del proceso, como son las temperaturas de extrusión y de la plataforma de impresión, la velocidad de fabricación y la velocidad de rotación del husillo. Tras realizar 3 iteraciones, los parámetros de proceso que han sufrido cambios son:

- La temperatura de la boquilla se ha aumentado hasta 300°C. El valor inicial de este parámetro era un poco bajo y el material ofrecía excesiva resistencia a la rotación del husillo. Con este aumento, el material se encuentra en una fase más fluida y opone menor resistencia al avance, favoreciendo su deposición sobre la plataforma de impresión.
- Se ha disminuido la velocidad de rotación del husillo hasta E400 para reducir el flujo volumétrico de material depositado sobre la plataforma de impresión. Con esta modificación, desaparecen las sobreextrusiones de material que daban lugar a anchos de línea superiores a los deseados. Así, los espesores de pared se ajustan en mayor medida

a las dimensiones especificadas en el programa de diseño gráfico. Adicionalmente, se evita que el motor salte paso y sufra excesiva resistencia por parte de los pellets, previniendo un desgaste prematuro de las ruedas dentadas del motor paso a paso.

- En último lugar, se ha alterado la velocidad de impresión hasta 1300mm/min para aumentar la calidad superficial y la precisión dimensional de las piezas. A velocidades de deposición superiores, la calidad de las esquinas era baja.

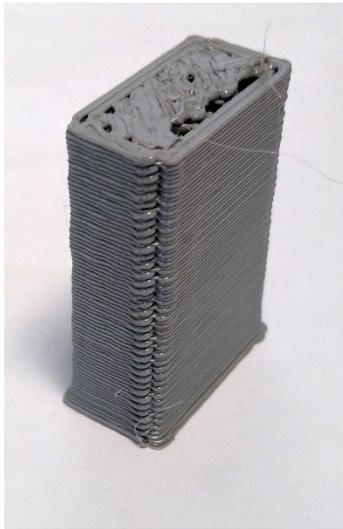


Ilustración 5.12. Comparativa entre una esquina mal rematada (izquierda) y una bien rematada (derecha)

En segundo lugar, se han diseñado unas probetas con el objetivo de corroborar los parámetros de proceso anteriormente expuestos y evaluar la precisión dimensional previsible antes de fabricar las probetas especificadas por la norma ISO 52902. Adicionalmente, se pretende estudiar la calidad de fabricación del relleno de la pieza (en este caso, se seleccionó el relleno rectilíneo). Las piezas a imprimir son prismas con unas dimensiones de 10x20x30 milímetros. Se selecciona un relleno rectilíneo con densidad del 20%, construcción de 2 capas sólidas en la parte superior e inferior de la pieza y 2 contornos sólidos. El resultado es muy prometedor, aunque las capas superiores no muestran el relleno deseado. Las dos capas superiores no han sido impresas de forma correcta y se aprecian huecos en las mismas. Para solventar este problema, se decide aumentar la densidad de relleno. La probeta final se obtiene con una alta calidad y buena precisión dimensional.

Se pueden graficar los resultados obtenidos hasta la fecha y extraer conclusiones de los mismos.

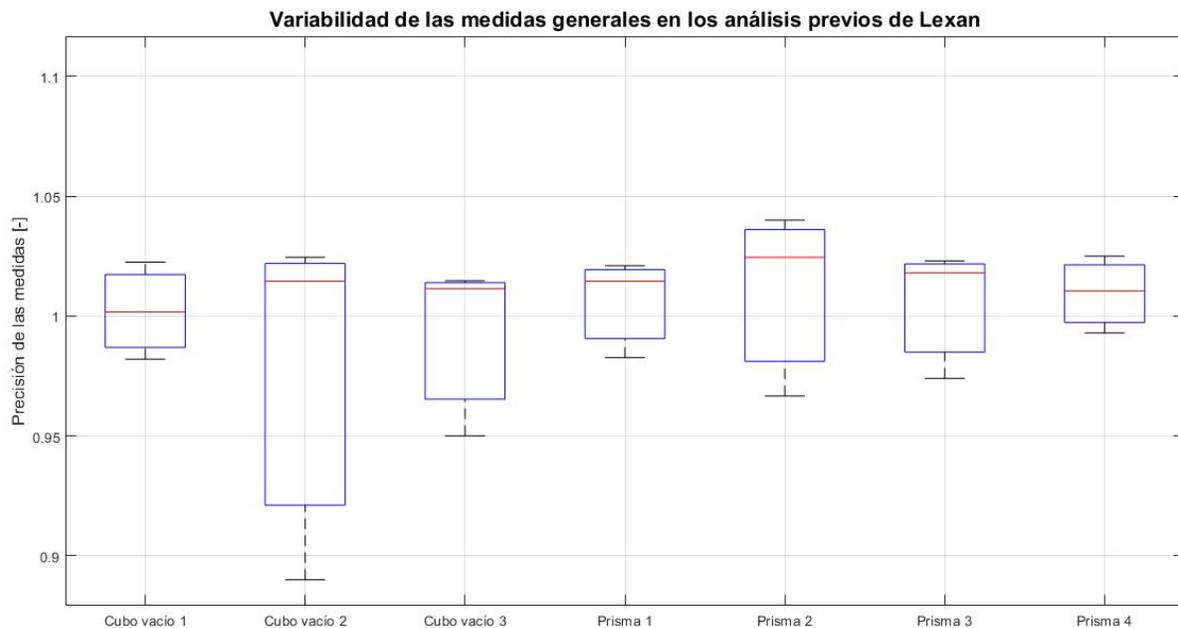


Ilustración 5.13. Precisión de medidas de las probetas iniciales de Lexan

En este gráfico se representa la variabilidad en la precisión de las dimensiones máximas de las probetas fabricadas. Según se van implementando cambios a los parámetros de proceso, se observa una mejoría en la calidad de las piezas, lo cual implica que los cambios efectuados están en la dirección correcta de optimización.

En este punto, los parámetros de proceso dan lugar a una buena calidad superficial y alta precisión dimensional. Se puede por tanto proceder a realizar las probetas especificadas por la norma ISO 52902. Como resumen, los parámetros de proceso utilizados son:

Tabla 4. Parámetros de proceso de Lexan

Variable	Valor numérico
Velocidad de rotación del husillo	E550
Temperatura del alimentador de material	200°C
Temperatura de la boquilla de extrusión	300°C
Temperatura de la cama de impresión	100°C
Velocidad de impresión	1260 mm/min

5.2.4 Alúmina

El procesado de la alúmina es una nueva área de investigación para la empresa. En este aspecto, solo se disponen de los datos ofrecidos por el proveedor referentes a la fabricación mediante moldeo por inyección. Por tanto, se realizará la extrapolación de los distintos parámetros especificados en la ficha técnica. Se procede a realizar la extrusión contra presión atmosférica del material. En previsión de evitar los atascos de material como sucedieron con el Lexan, se decide establecer un gradiente térmico grande entre la zona de alimentación de pellets y la boquilla. Así, la temperatura de la boquilla se fijará en 200°C y la resistencia térmica de la zona de alimentación de pellets se dejará apagada. Puesto que se produce transmisión de calor por convección natural, la zona de alimentación de pellets se mantiene a una temperatura aproximada de 110°C, pese a estar apagado el calefactor, y, por tanto, el gradiente térmico existente es de 90°C. Tras realizar sucesivas pruebas, la temperatura óptima de extrusión es de 170°C. Se observa adicionalmente que la cantidad de material depositado varía en función de la velocidad de rotación del motor. No se extruye la misma masa de material si el motor se acciona a 50mm/s o si rota a 10mm/s, a pesar de que la cantidad de material a extruir represente el mismo valor. Puesto que este aspecto puede representar dificultades durante la fabricación de piezas, se decide abrir el extrusor con el objetivo de limpiar posibles atascos en el husillo. Se observa que existe atasco en la zona de entrada de pellets. Sin embargo, la forma en que el material se

aglomera difiere de aquella observada para el Lexan. En este caso, el material no se encuentra en un estado sólido aglomerado sino en un estado pulverulento. La rotación del husillo provoca que los pellets se desmenucen antes de ser calentados e introducidos en el tornillo sin fin, y se forma una capa de polvo que tapona la entrada y no permite una correcta alimentación de material nuevo.



Ilustración 5.14. Atascos por alúmina pulverulenta

En la imagen anterior se puede observar la presencia de alúmina en estado pulverulento y la formación de un anillo de polvo que evita la correcta alimentación de material al tornillo sin fin. La alúmina, como se ha detallado en el apartado 4.1.5, es un material frágil antes de haberse aplicado los procesos de sinterizado y desbanderizado. Adicionalmente, el material en uso solo contiene un 4% de agentes poliméricos aglutinantes, dando lugar a un material compuesto quebradizo. Se especula que la exposición de la alúmina a la humedad pueda fragilizar aún más los granos de material. Un alto contenido en humedad dentro de los pellets podría ser devastador y favorecer que el tornillo triture los pellets en tamaño de grano fino. Para ello se decide someter, previo a la fabricación, a la alúmina a un proceso de secado en horno.

Tras realizar unas pruebas adicionales de extrusión contra presión atmosférica, se procede a realizar las primeras fabricaciones de prismas. Puesto que la alúmina presenta dificultades para ser fabricada mediante FPF, se conjetura que la fabricación de cubos vacíos pueda ser compleja y se opta por fabricar prismas de pequeño tamaño. Asimismo, se decide comprobar si el proceso de secado en horno evita los atascos del husillo.

Los parámetros de proceso utilizados son:

Tabla 5. Parámetros de proceso de la alúmina

Parámetro	Valor numérico
Temperatura de la boquilla	160°C
Temperatura de la zona de alimentación	0°C
Velocidad de rotación del husillo	E750 (20,98 rpm)
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Relleno	Rectilíneo
Densidad de relleno	100%

El primer prisma fabricado tiene un tamaño de 5x10x5 milímetros. El resultado es muy prometedor. La pieza final tiene un buen acabado superficial y una precisión dimensional alta. Además, no se aprecia ningún atasco aparente en el husillo.



Ilustración 5.15. Prisma impreso en alúmina

A continuación, se procede con la fabricación de prismas de mayor tamaño; en este caso, 10x20x30 milímetros. Se utilizan los mismos parámetros de proceso, solo varía el tamaño del prisma. La adhesión de la pieza a la plataforma de impresión es buena. Sin embargo, solo se han impreso correctamente un par de capas. A partir de la segunda, la adhesión entre capas es nula y el material forma virutas. Adicionalmente, la retirada de la pieza de la cama de impresión fue difícil y se rompió el material, sugiriendo que la temperatura de la cama de impresión es muy elevada. Se identifica que este material tiene una gran dificultad durante su procesamiento: un pequeño punto donde no exista material dará lugar a un derrumbamiento total de las capas sucesivas. El control del flujo volumétrico del material debe ser excepcional.

Tras hacer múltiples variaciones en todos los parámetros de proceso, los avances son mínimos. La fabricación de los prismas nunca alcanza el 100% y se debe parar el proceso transcurridos varios minutos, debido a la acumulación de material sólido en las capas superiores de la pieza.

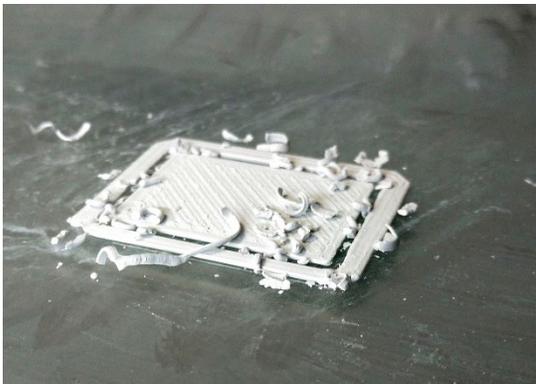




Ilustración 5.16. Fabricaciones fallidas de prismas en alúmina

Los errores de fabricación son aleatorios; tan pronto puede fallar en las dos primeras capas como en las dos últimas. No existe aparentemente una razón lógica que explique por qué la fabricación se interrumpe y da fallos. Sin tener ningún fundamento teórico que lo respalde, se conjetura que el flujo másico de material no es constante a lo largo del periodo de fabricación. Se decide estudiar cómo varía la masa en la deposición de cada capa. El procedimiento es el siguiente:

1. Se apaga la cama de impresión para disminuir al máximo la adherencia con la pieza y poder retirar fácilmente el material.
2. Tras imprimir una capa, se indica mediante código máquina que el extrusor se desplace al origen de coordenadas y se mantenga detenido durante un periodo de 10 segundos, tiempo suficiente para retirar todo el material impreso.
3. Se retoma la impresión desde el último punto de referencia.
4. Se pesa, a través de una balanza de alta precisión, la masa depositada en cada capa.

Se realizó un total de 4 pruebas para evaluar la variación de flujo volumétrico. Cada probeta tiene unos parámetros de fabricación diferentes. A continuación, se grafican los resultados obtenidos.

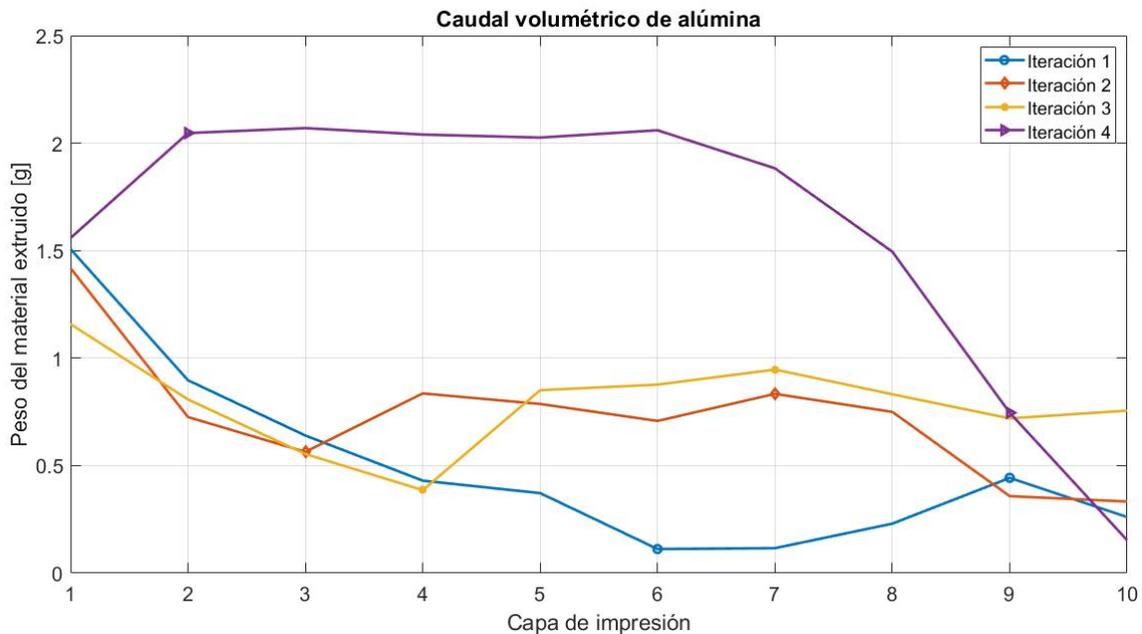


Ilustración 5.17. Análisis del flujo volumétrico de la alúmina

A la vista de los resultados, la variación de la masa de material depositada es alta. Además, la caída es impredecible. En el momento en que existe un pequeño déficit de material, la pieza se destruye completamente debido a la falta de soporte en las capas inferiores.

Conforme se realizaron las pruebas mediante la impresión contra presión atmosférica, se captó un fenómeno adicional con el material. Las pruebas contra presión atmosférica consisten en lo siguiente: con la cama de impresión separada de la boquilla, se extruye material a diferentes velocidades de rotación del husillo y con distintas longitudes de impresión. De esta forma, la cantidad de material debe ser aproximadamente constante independientemente de la velocidad de rotación (esta afirmación sí aplica para la tecnología FFF donde el control de caudal de material es muy alto; para FPF, el control es más reducido y la alimentación de pellets puede variar ligeramente). Sin embargo, esto no ocurre para la alúmina. A velocidades de rotación bajas, el material apenas es expulsado por el husillo. A altas velocidades, el material fluye correctamente. Se especula que el motivo de este comportamiento sean las propiedades reológicas del material en estado líquido.

Según la mecánica de fluidos, existen dos grandes grupos de fluidos: newtonianos y no newtonianos. La diferencia entre las dos clases reside en la viscosidad. En los fluidos

newtonianos la viscosidad es constante a cualquier velocidad de movimiento del fluido. Sin embargo, en los fluidos no newtonianos la viscosidad varía en función de la temperatura y la tensión cortante aplicada sobre el fluido. Dentro del segundo grupo de fluidos, se pueden diferenciar hasta 4 clases en función de la dependencia de la viscosidad con respecto a la velocidad de deformación: dilatante, plástico, pseudoplástico y plástico de Bingham. El plástico de Bingham se caracteriza por la existencia de una fricción estática cuando el fluido no está en movimiento y, por tanto, hasta que el esfuerzo tangencial aplicado no alcanza unos valores suficientemente altos, el fluido no comenzaría a desplazarse (ver Ilustración 74). Estableciendo una semejanza con el comportamiento de los sólidos, un plástico de Bingham presenta un coeficiente de fricción estático fijo.

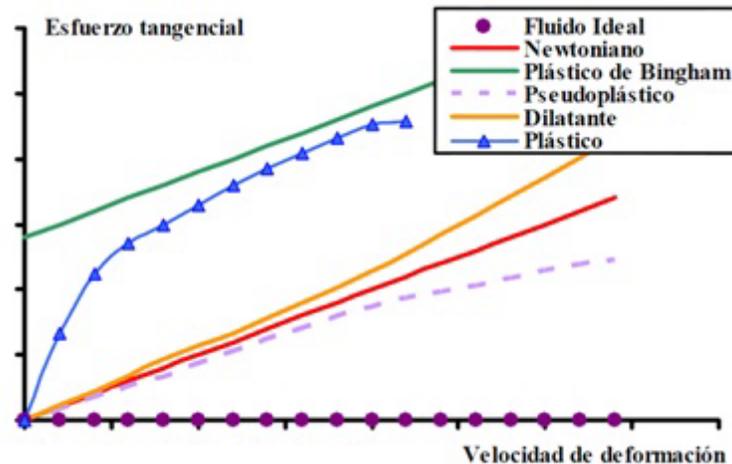


Ilustración 5.18. Fluidos newtonianos y no-newtonianos

Es de recalcar que la suposición anteriormente indicada carece de fundamentación teórica y/o experimental. Es solo una hipótesis propuesta a la vista de los problemas de fluidez observados durante el procesamiento de la alúmina. En un estudio futuro, se debería comprobar la hipótesis indicada mediante experimentación con un viscosímetro.

5.2.5 Luvocom

El proceso de optimización de parámetros de proceso para el Luvocom es completamente nuevo dentro de la empresa y no se dispone de experiencia previa notable para las primeras iteraciones del desarrollo empírico. No obstante, la empresa proveedora del material, Lehvoss Group, también suministra filamento de Luvocom a sus clientes. Se utilizarán estos parámetros como punto de inicio de la fabricación de las probetas. Se indican a continuación

Tabla 6. Parámetros de proceso del Luvocom en filamento

Parámetro	Valor
Temperatura del extrusor	310°C-340°C
Temperatura de la plataforma de impresión	Superior a 50°C
Altura de capa	Superior a 0,2mm
Velocidad de impresión	40-60 mm/s

Como ya ocurrió previamente con el Lexan, la temperatura de extrusión especificada en la ficha técnica [89] suele estar por debajo de la temperatura requerida en la máquina Big Foot Pro Pellets. Para el Lexan, se necesitó aumentar hasta 50°C la temperatura indicada por el fabricante Sabic. Por este motivo, se decide que la temperatura de extrusión en la primera iteración sea 380°C.

Por otro lado, el Luvocom es un polímero técnico que está formado con fibras de carbono. Se anticipa que la fabricación de este material pueda presentar dificultades e incluso llegue a provocar atascos en el extrusor. Por consiguiente, se decide tener un gradiente térmico importante entre los dos puntos calefactados del husillo. Se comenzará con una temperatura de 250°C en la zona de alimentación de pellets. La boquilla a utilizar es de 0,8 milímetros, por lo que la altura de capa y el ancho de línea quedan definidos. Adicionalmente, el proveedor de

material sugiere realizar una etapa de secado para eliminar la posible humedad atrapada en el Luvocom. Los parámetros para la etapa de secado son temperatura del horno entre 120°C y 140°C, y una duración de entre 2 y 4 horas.

Con las temperaturas indicadas, la extrusión contra presión atmosférica es buena. No se producen atascos en el extrusor y el hilo obtenido es constante. Se logra una repetibilidad de las longitudes extruidas a velocidades variables, por lo que el Luvocom sí se comporta como un fluido newtoniano.

Se procede a la extrusión de las probetas de cubo vacío. La velocidad de impresión se tomará como el mismo valor que el utilizado para el Lexan, 1800 mm/min. La primera probeta muestra una baja calidad de impresión. Las esquinas se han impreso con una calidad deficiente y se han derrumbado hacia dentro. Adicionalmente, existe una falta de material considerable en las paredes. Se decide disminuir la velocidad de impresión hasta 1000mm/min con el objetivo de aumentar la deposición de material por unidad de tiempo. De esta forma, el flujo volumétrico de Luvocom asciende y se previene el déficit de material en las paredes.



Ilustración 5.19. Primera probeta de cubo vacío en Luvocom

La disminución de la velocidad de impresión da lugar a probetas con una mejor calidad, pero sigue existiendo una retracción de material en las esquinas. No se pueden obtener medidas útiles de las piezas, puesto que los resultados no serían representativos por la irregularidad de la geometría. Se especula que aún exista una insuficiente deposición de material y que el flujo

volumétrico requerido deba ser superior. Para ello, se aumenta la velocidad de rotación del motor hasta E800 (velocidad de rotación del eje del motor 22rpm).

La calidad superficial y acabado aumentan considerablemente. Se pueden realizar las primeras mediciones en la probeta. Sin embargo, existe aún una pequeña falta de material en las últimas capas de la pieza. Se postula que la fluidez del material no sea lo suficientemente alta como para depositar el Luvocom de forma continua. Por ello, se decide aumentar adicionalmente la temperatura de extrusión hasta 390°C. Con el objetivo de corroborar los cambios realizados en los parámetros de proceso, se decide fabricar un cubo vacío cuya altura es el doble de la especificada en ocasiones normales. A simple vista, el hundimiento de las esquinas se produce en las capas superiores, mientras que la calidad en las capas inferiores es alta. Otra proposición para explicar el fallo en la fabricación de las esquinas es la necesidad de atemperar el volumen de fabricación. El Luvocom posee un alto coeficiente de expansión térmica (5 veces mayor que el acero). Cuando se le aplica un elevado choque térmico, la contracción puede ser tal que las esquinas se vean afectadas y se hundan al centro de la probeta. Puesto que las capas inferiores se ven calentadas por la cama de impresión, este efecto no se aprecia hasta las zonas más altas de la pieza.

Con el objetivo de refrendar la hipótesis propuesta, se decide fabricar un cubo vacío con el doble de altura. Si el alto choque térmico provoca el hundimiento de las esquinas, este efecto debería ser más acusado en las últimas capas de fabricación. En este caso, los parámetros de proceso son los siguientes: temperaturas de impresión 390/250°C, temperatura de la cama de impresión 70°C, velocidad de impresión 1000mm/min y velocidad de rotación del husillo E800 (22 rpm, aproximadamente). El cubo vacío fabricado tiene unas dimensiones nominales de 40x40x20 milímetros. La precisión dimensional es alta, pero la calidad no. Existe un déficit de material en las capas más altas de la pieza y existe una importante delaminación. Considerando que los problemas provengan del alto choque térmico al que se somete el material (la temperatura de la sala ronda los 20°C y el material se extruye a 390°C), se decide instalar el sistema de calentamiento del volumen de impresión desarrollado en Idonial. Este sistema consiste en una cúpula cuadrada formada por cinco cristales de metacrilato y que previene la dispersión del calor generado por los extrusores. Adicionalmente, incluye un sistema de calefacción para mantener

el aire del volumen de impresión a mayor temperatura. Con estos dispositivos, se alcanzan unas temperaturas de 50°C en la zona de impresión y se reducen los choques térmicos a los que se somete el material.

Se realiza nuevamente una impresión del cubo vacío y se observa un importante incremento en la calidad de la pieza. El déficit de material existente en las capas altas de la pieza es menos acusado, pero las esquinas siguen teniendo baja calidad. El espesor de pared tiene una alta variabilidad con respecto al valor nominal y existen pequeñas acumulaciones de material en las paredes. Con el objetivo de disminuir la falta de material existente en ciertas zonas de las paredes (especialmente después de la aparición de un pequeño pegote de material), se decide aumentar ligeramente la velocidad de rotación del husillo hasta E900 (25 rpm aproximadamente) y disminuir la velocidad de impresión hasta 1000mm/min, facilitando así la correcta deposición de material.

La deposición de material es ahora más uniforme y las esquinas ya no se encuentran tan hundidas. La precisión dimensional ha aumentado y los espesores de pared se acercan más aún a los valores nominales. Se teoriza que un espesor de pared unitario (es decir, un espesor con una sola línea) no tenga rigidez suficiente como para mantener su forma por sí mismo. Se realizan impresiones del cubo vacío con dos contornos. La calidad de las piezas es muy similar, pero las esquinas ya no se derrumban.

Tras realizar diversas modificaciones en los parámetros de proceso, se obtienen los siguientes parámetros óptimos:

Tabla 7. Parámetros optimizados para la fabricación de Luvocom

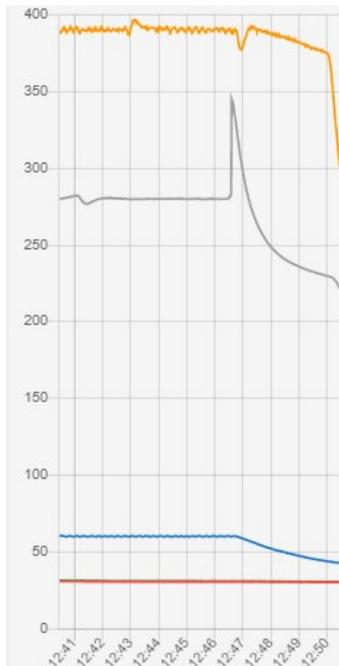
Parámetro	Valor
Temperatura de la boquilla	395°C
Temperatura de la zona de alimentación	300°C
Temperatura de la cama de impresión	70°C
Velocidad de rotación del husillo	E900 (25 rpm)
Velocidad de impresión	1000mm/min

A continuación, se procede a la impresión de probetas prismáticas con el objetivo de corroborar los datos obtenidos y estudiar la densidad del patrón de relleno que da lugar a una buena calidad superficial. Las medidas nominales del prisma son 10x20x30mm. Se considera que la calidad superficial y la precisión dimensional es aceptable para proceder con la fabricación de las probetas de la norma ISO 52902.

Se lleva a cabo el mismo procedimiento para la configuración y puesta en marcha de la impresora. Sin embargo, comienzan a aparecer errores en el sistema. Las zonas que monitorizan las temperaturas de las zonas calefactadas comienzan a dar claros fallos. La lectura no es correcta y por tanto el control es erróneo. Se adjuntan a continuación unas imágenes sobre la evolución de las temperaturas registradas. Se puede observar claramente cómo los sensores fallan, puesto que existen variaciones muy bruscas de temperaturas en unos periodos de tiempo ínfimos. El cambio de temperatura con respecto al tiempo es infinito, en otras palabras, se disipa o se proporciona energía infinita en un corto periodo de tiempo. Es decir, hay un claro error de funcionamiento en los sensores. La electrónica está errando.

En la Ilustración 76, se adjuntan unas gráficas con las temperaturas registradas. En total, se indican cuatro funciones cuyo significado se explica a continuación. En rojo, se dibuja la temperatura del extrusor que no se encuentra en funcionamiento. La impresora Big Foot Pro

Pellets dispone de dos cabezales, uno de filamento y uno de pellets. La línea roja grafica la temperatura del cabezal apagado. Puesto que sus resistencias internas están frías, la temperatura medida equivale a la temperatura ambiente de la sala, aproximadamente 35°C (el sistema de calefacción del volumen de impresión está encendido). En azul se representa la temperatura de la cama de impresión, que asciende a 70°C. En naranja, se registra la temperatura de la boquilla del extrusor. Como se ha indicado durante el proceso iterativo, la temperatura óptima de este punto calefactado es de 390°C. En gris, se grafica la temperatura de la zona de alimentación de pellets. La evolución de esta variable con el tiempo rompe las leyes de la física (existen cambios muy bruscos) e indica el mal funcionamiento del sensor o la electrónica del sistema.



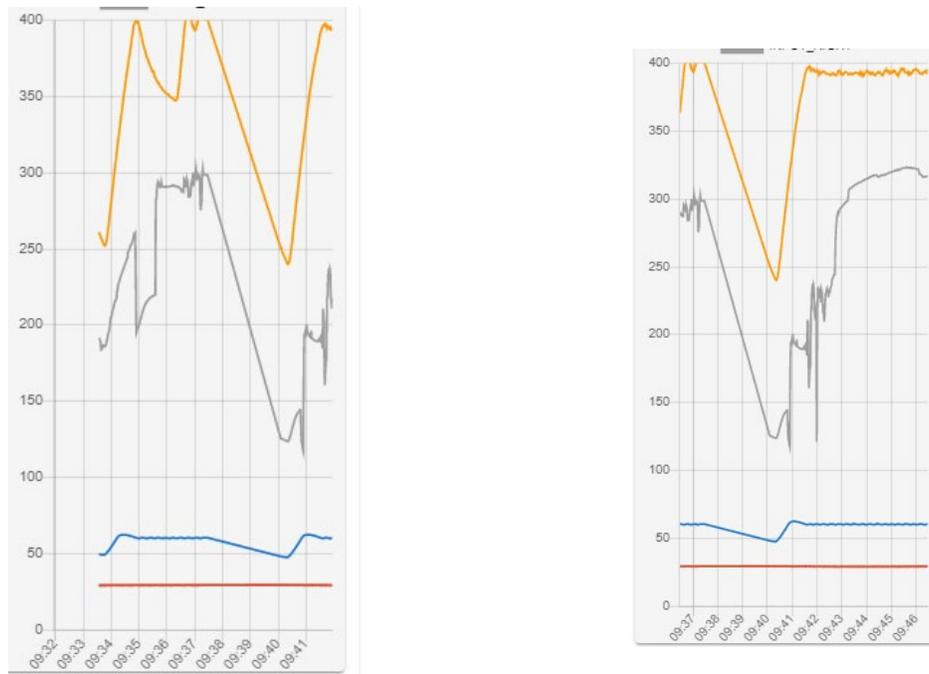


Ilustración 5.20. Errores registrados en la medición de temperaturas durante la fabricación de Luvocom

5.2.6 Nylon

El nylon es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas. La estructura básica del nylon puede ser modificada con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas. Uno de los aditivos más comunes consiste en reforzar la estructura interna mediante la introducción de fibras de vidrio. La fibra de vidrio confiere al material gran rigidez, alta resistencia mecánica y alto grado de dureza. En contraposición, la procesabilidad del material es más difícil y las piezas son abrasivas, lo cual limita su uso en aplicaciones con deslizamiento relativo entre piezas.

El Nylon aquí estudiado tiene como nombre comercial NYLSTRONG, debido a su refuerzo en fibra de vidrio. El proveedor de material (SmartMaterials) no especifica ningún parámetro relativo al procesamiento de los pellets. Sin embargo, sí se establecen ciertas recomendaciones en la fabricación de NYLSTRONG en formato filamento. Los parámetros de proceso utilizados para la primera iteración son:

Tabla 8. Parámetros de proceso de Nylstrong en filamento

Parámetro de proceso	Valor numérico
Temperatura de impresión	245-265°C
Temperatura de la cama de impresión	90-100°C
Ventilador de capa	20-100%

Se comienza la fabricación de Nylstrong con la extrusión contra presión atmosférica. Como indica el proveedor del material, una temperatura de impresión de 265°C es suficiente para obtener una correcta fluidez del termoplástico y una buena deposición sobre la plataforma.

Se imprimen probetas de cubo vacío con dimensiones nominales de 40x40x10mm. Los parámetros de proceso utilizados son los recomendados por el proveedor del material. A primera vista, la pieza tiene una buena calidad y precisión dimensional. Sin embargo, los espesores de pared son altos y la rugosidad de la pieza es muy acusada. Existe, por tanto, una sobreextrusión de material que da lugar a unos espesores de pared superiores a las medidas nominales. Mediante la disminución de la velocidad de rotación del husillo, se alcanzan unas dimensiones reales cercanas a los valores nominales.

Con el objetivo de corroborar los parámetros de proceso, se procede a fabricar prismas con dimensiones nominales de 20x10x30 milímetros. La calidad dimensional de las piezas es buena. Sin embargo, la rugosidad es muy alta y la estructura es frágil. Las capas se separan fácilmente aplicando una pequeña fuerza con las manos; es decir, la delaminación es elevada. La causa principal de este fenómeno es una deficiente temperatura de impresión. Durante la manufactura de técnicas de fabricación aditiva, la dirección que limita las propiedades mecánicas de la pieza es la dirección vertical o dirección de fabricación. Esto se debe a la naturaleza inherente de la deposición sucesiva de capas. Para una buena unión entre capas, la temperatura del material depositado debe ser alta, favoreciendo la unión entre capas gracias a la difusión de material caliente. En otras palabras, la adhesión de capas se ve favorecida cuando la temperatura es alta

y la difusión de material entre capas sucesivas es elevada. Con una temperatura de extrusión baja, el material depositado se enfría muy rápido y la fusión entre capas contiguas es reducida, debido a una pobre fusión entre el material solidificado y el nuevo material depositado. Se precisa por tanto aumentar la temperatura de extrusión.

Con un incremento en la temperatura de extrusión hasta los 275°C, se observa un aumento considerable de la resistencia de la pieza y la delaminación es inexistente. No obstante, la rugosidad de las piezas sigue siendo alta. Además, se percibió durante la manufactura de componentes de NYLSTRONG una necesidad imperiosa de calibrar la plataforma de impresión cada poco tiempo. Tras una revisión profunda de los elementos mecánicos del cabezal, se advirtió un desgaste importante de la boquilla de extrusión. Los fenómenos aquí detallados (alta rugosidad y alto desgaste de la boquilla) son causados por el contenido de fibra de vidrio en la estructura del material. Estas fibras dan lugar a piezas resistentes y con alta rigidez, pero el resultado es un componente muy abrasivo y con alta rugosidad.

Se decide hacer un análisis visual del desgaste inducido en la boquilla de latón. Por un lado, la longitud total se ha visto reducida. Esto se debe al rozamiento existente entre la boquilla y el material ya depositado durante la fabricación. Por otro lado, el diámetro interno del canal por el cual se extruye el material ha incrementado su tamaño. El flujo de NYLSTRONG roza contra las paredes internas de la boquilla y la desgasta. A continuación, se puede observar al microscopio la erosión provocada por el procesamiento de nylon reforzado con fibra de vidrio sobre la boquilla de latón. Las fotografías de la izquierda muestran una boquilla nueva, mientras que las de la derecha, la boquilla utilizada durante la fabricación de NYLSTRONG. En las imágenes se puede observar la aparición de virutas negras y material solidificado alrededor de la boquilla desgastada. Esto se debe a la adhesión de material a la boquilla que, tras un largo periodo de tiempo, se quema y queda adherido a la misma. Las consecuencias sobre la impresión son despreciables si se realiza una limpieza habitual de la boquilla.



Ilustración 5.21. Disminución de la longitud de boquilla debido al desgaste

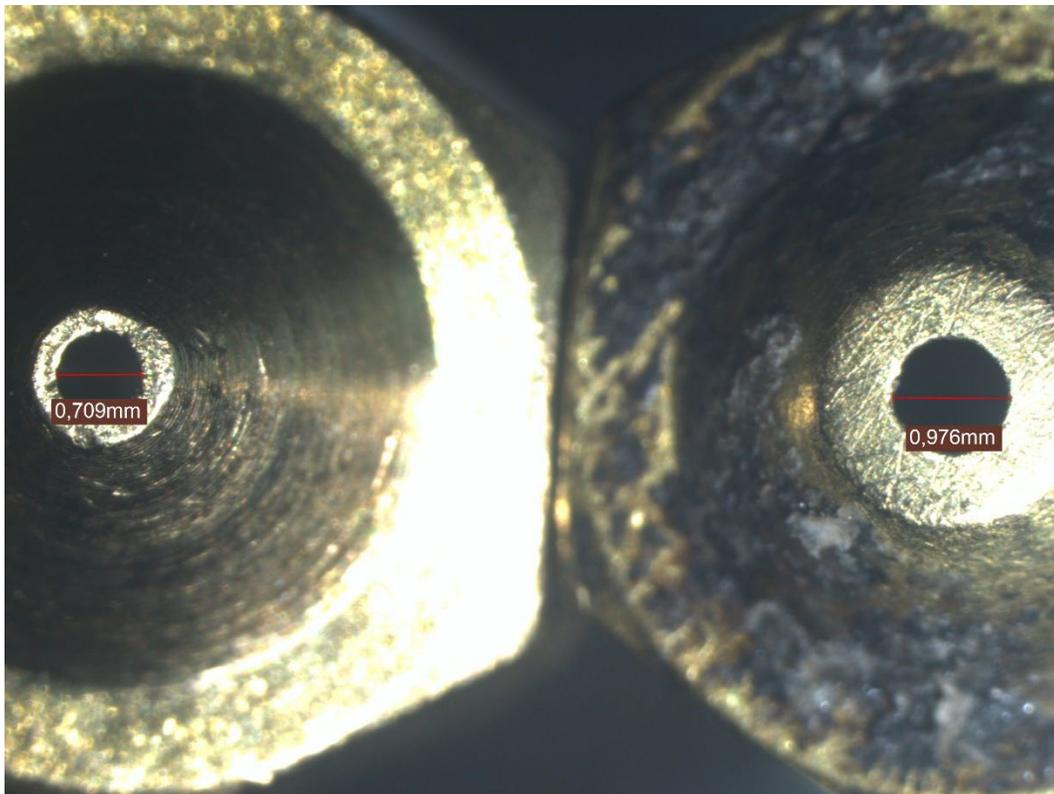


Ilustración 5.22. Diámetro de las boquillas de latón nueva (izquierda) y desgastada por el NYLSTRONG (derecha)

Una vez detectada una de las dificultades de procesamiento de NYLSTRONG, se sustituye la boquilla por una fabricada con acero endurecido, ralentizando así el desgaste. El recambio en la boquilla precisa también de una corta iteración en la optimización de los parámetros de proceso. La conductividad térmica del latón tiene un valor superior a la conductividad del acero endurecido, por lo que la transferencia de energía hacia el material será más difícil con la boquilla de acero endurecido que con la boquilla de latón. Se implementaron las siguientes modificaciones:

- La temperatura de extrusión se ha aumentado hasta los 280°C con el objetivo de paliar la disminución en la potencia térmica transferida al NYLSTRONG. Además, esta temperatura favorece la adhesión entre capas y disminuye la delaminación de la pieza.
- La temperatura de la plataforma de impresión se ha ajustado en 100°C, favoreciendo la adherencia y reduciendo la posibilidad de despegue.
- La velocidad de impresión se mantiene en 30 milímetros por segundo y la velocidad de rotación del husillo es 10 rpm, obteniendo espesores de pared real parejos a los valores nominales.

5.2.7 PET Reciclado

La fabricación de piezas en PETG virgen en formato pellet tiene como objetivo desarrollar un conocimiento previo para estudiar el potencial de reciclabilidad de las botellas de plástico, cuyo material de fabricación es el PET. En los últimos años, las consecuencias del cambio climático son cada vez más palpables y conseguir procesos de fabricación que permitan reusar y reutilizar material plástico es de gran utilidad. Las ventajas residen en una disminución de emisión de gases contaminantes a la atmósfera, reducción de los precios de transformación de la materia, reducción de material plástico enviado a incinerar, desechado al mar y reducción de los procesos de compostaje.

En el estudio aquí detallado se analiza la capacidad de reciclabilidad del material procedente de las botellas de plástico. Las botellas convencionales están fabricadas con polietileno (PET), mientras que los tapones de las botellas están hechos de polietileno de alta densidad (HDPE). Inicialmente, se trabajará con el polietileno de las botellas, debido a la gran cantidad de material potencial a reutilizar. Idealmente, la reutilización de material alcanzaría un 100%; sin embargo,

la experiencia muestra que deben realizarse mezclas con material compatible para la fabricación mediante tecnología FDM. En este caso, las mezclas estarán compuestas por pellets de PETG (modificación química del PET con adición de etilenglicol para facilitar la fabricación aditiva, ver apartado 4.1.2) y pellets de PET reciclado procedentes de las botellas.

A lo largo de los siguientes párrafos se irá destacando el procedimiento para la obtención de los pellets de PET reciclado, la creación de las mezclas y los parámetros de fabricación. Debido al proyecto al cuál esta investigación está asociada, no se hará distinción en la procedencia de las botellas y el material reciclado será conjuntamente almacenado y combinado. Adicionalmente, se buscará acortar al máximo la cadena de proceso y que el número de transformaciones intermedias previas a la fabricación sea mínimo. Existen diversas publicaciones en revistas científicas [63, 86] en donde se estudia la reciclabilidad de las botellas de plástico. Sin embargo, todas ellas realizan múltiples procesos de secado previos a la fabricación de componentes, dificultando el proceso y aumentando los costes asociados.

La cadena de proceso comienza con la transformación del material reciclado en forma de granza, capaz de ser procesado a partir de la técnica FPF. Es de suma importancia, que el tamaño promedio de los pellets de PET reciclado se asemeje al tamaño de los pellets de PETG virgen, con el objetivo de obtener una mezcla homogénea y que alimente de forma correcta el extrusor. Previo al triturado de las botellas, se debe realizar un procedimiento térmico para densificar el material y facilitar la transformación a formato granza. El motivo reside en la trituradora disponible. El material plástico de las botellas es muy flexible y se queda enganchado entre los dientes de la trituradora. El tratamiento térmico evita este impedimento. Obtenidas las preformas de las botellas, se tritura el material y se tamiza al tamaño de pellet deseado.

A continuación, se procede a la preparación de las mezclas de PETG virgen y PET reciclado. Puesto que se desconoce un punto de partida o el porcentaje másico máximo de carga de PET reciclado, se establecerá un procedimiento para la disposición de las mezclas. Se dispondrá de un total de 5 mezclas con contenido en PET reciclado de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%, siendo el resto de composición PETG virgen. Para este estudio se ha establecido como límite teórico un contenido de PET reciclado del 50%, con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos en la publicación [86], donde se investigan las propiedades reológicas de las mezclas de PET

reciclado y PETG virgen. Como se puede observar en el gráfico (ver Ilustración 80), el índice de fluidez de la mezcla disminuye considerablemente a partir del 50% en carga másica. Por tanto, la dificultad para la extrusión de la mezcla se ve afectada.



Ilustración 5.23. Procedimiento térmico para la preparación de botellas de plástico

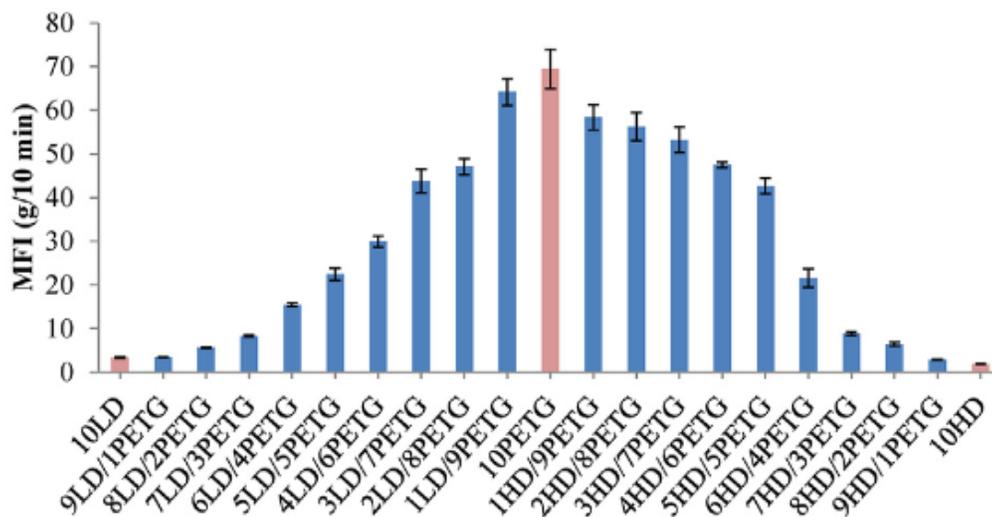


Ilustración 5.24. Índice de fluidez de las mezclas de PETG virgen con LDPE o HDPE reciclado [86]

El siguiente paso consiste en obtener los parámetros de proceso óptimos para la fabricación de las mezclas. Puesto que los componentes de las mezclas presentan similitudes entre sí y ambos proceden del PET, se establecen como parámetros de inicio los óptimos obtenidos para el procesamiento de PETG virgen (ver párrafo 5.2.2). Nuevamente, las primeras probetas a fabricar corresponden al cubo vacío.

La caracterización de las mezclas de PET reciclado fue sencilla. Los parámetros del PETG virgen se correspondían de manera fidedigna a lo requerido por las diferentes mezclas y solamente se precisó aumentar ligeramente la temperatura de extrusión. Obtener piezas de buena calidad con las mezclas de poca carga en reciclado apenas requirió un par de iteraciones. Sin embargo, según se aumenta la carga de PET reciclado, la mezcla comienza a fluir con mayor dificultad, corroborando los descubrimientos de la publicación [86]. Esto sugiere la existencia de un límite práctico de reciclabilidad. Con el procedimiento para la obtención de la granza aquí detallado, no se puede reciclar el material de aporte sin utilizar granza virgen de material compatible.

El factor de mayor importancia durante el procesamiento de PET reciclado es el control de temperatura. Se ha comprobado experimentalmente que la temperatura de degradación de las botellas de PET es de 280°C, apenas 10°C de temperatura por encima de su valor de fabricación. Cuando se producen los quemados, se generan atascos en el husillo que precisan de etapas asiduas de limpieza. El resultado son gotas de material quemado en color ocre o ámbar con una viscosidad altísima. La nula fluidez de estos compuestos genera un atasco que impide la entrada de nuevo material virgen. Además, la exposición durante largos periodos de tiempo a alta temperatura provoca atascos de mayor tamaño, dificultando aún más las tareas de limpieza.



Ilustración 5.25. Quemados de PETG

6 Resultados y perspectiva de futuro

El objetivo final de la realización de los experimentos anteriormente descritos residía en la obtención de unos parámetros de proceso óptimos para la fabricación de piezas a partir de polímeros técnicos y la redacción de guías de diseño para cada material estudiado. Se denomina guía de diseño al conjunto de recomendaciones y sugerencias de carácter geométrico expuestas por el ingeniero de fabricación con el objetivo de obtener la mejor calidad posible en la manufactura de piezas. Estas recomendaciones tienen en cuenta la técnica de fabricación, la maquinaria utilizada, el material a procesar, etc. Las guías de diseño se redactan para ayudar al diseñador y mostrar las limitaciones de la tecnología, las consideraciones geométricas a tener en cuenta y la precisión máxima alcanzable.

6.1 PARÁMETROS DE PROCESO

A lo largo del apartado 5 se ha indicado el procedimiento llevado a cabo a la hora de optimizar los parámetros de proceso que permiten fabricar piezas en los distintos materiales con la mejor calidad posible, independientemente del tiempo requerido para la fabricación. A continuación, se establecerán los pasos a realizar en el futuro con el objetivo de continuar con el proceso de optimización. Asimismo, se establecerá una clasificación en la dificultad de fabricación de los distintos materiales de estudio.

6.1.1 PLA

El PLA o ácido poliláctico ha sido el primer material de estudio en este trabajo, debido a su amplio empleo en la fabricación aditiva a través de la tecnología FDM. Durante las primeras fabricaciones, se ha comprendido por qué es el material más extendido en FDM: su simplicidad en la fabricación. Las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a parámetros de proceso se ajustan fidedignamente y facilitan la manufactura de piezas en este material. Pequeñas variaciones en los parámetros de proceso no tienen un gran impacto en el resultado de la fabricación. Adicionalmente, es un material barato, hay disponibilidad en muchos colores y se puede procesar en máquinas que no dispongan de cama de impresión calefactada. Los cambios necesarios para obtener piezas de calidad han sido mínimos y la precisión dimensional y superficial ha sido alta desde el primer prototipo realizado.

El PLA sin embargo no tiene unas características mecánicas o térmicas que lo hagan factible para el empleo como polímero técnico en aplicaciones de ingeniería. El punto de reblandecimiento apenas alcanza los 60°C, el módulo de elasticidad es bajo y su tenacidad es baja; en otras palabras, tiene una rotura frágil. Debido a su baja elongación, es difícil prever su fractura. No obstante, es interesante evaluar el comportamiento de este material antes esfuerzos mecánicos externos y comprobar la resistencia mecánica del PLA. Adicionalmente, se puede realizar una comparación entre las propiedades mecánicas de probetas tipo hueso según la normativa ASTM D412 en función de la tecnología de fabricación: FFF o FPF.

Tras realizar diversas probetas para la optimización de la impresión, los parámetros de proceso finales son:

Tabla 9. Parámetros de proceso del PLA

Parámetro de proceso	Valores numéricos
Temperaturas de extrusión	200°C/180°C
Temperatura de la plataforma de impresión	60°C
Velocidad de rotación del husillo	E340 (9,51 rpm)
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador de capa	100 %

Las probetas de la normativa ISO 52902 [93] han sido fabricadas utilizando los parámetros anteriormente indicados, obteniendo buena precisión dimensional y alta calidad superficial (se adjuntan gráficas con los resultados hallados en el Anexo).

6.1.2 PETG

El PETG se disputa junto con el PLA el primer puesto en la lista de materiales más utilizados en la tecnología FDM. Este material es una variación química del PET, el plástico de mayor utilización dentro de la industria. Es un material con mejores propiedades térmicas y mecánicas que el PLA, pero su procesamiento requiere mayor experiencia por parte del usuario. Amplias variaciones en los parámetros de proceso pueden tener un impacto significativo sobre la calidad final de las piezas. Adicionalmente, los parámetros de proceso pueden variar ligeramente en función del proveedor del material.

Debido a sus propiedades mejoradas en comparación con el PLA, este material sí puede tener cabida en aplicaciones industriales en donde las piezas no están sometidas a grandes esfuerzos. Adicionalmente, presenta buenas características para utilizarse como material de prototipos y maquetas físicas. Sin embargo, se requiere un análisis previo del comportamiento ante esfuerzos mecánicos. Además, se desconoce aún la temperatura máxima de trabajo y se desconoce su comportamiento frente a agentes externos como pueda ser humedad, polvo en suspensión o luz ultravioleta. Nuevamente, establecer una comparación entre las propiedades finales de la pieza fabricada a través de FFF o FPF es de gran interés, en particular para el diseño y utilización del PETG como material demostrador.

Los parámetros de proceso óptimos para la fabricación de PETG son:

Tabla 10. Parámetros de proceso del PETG virgen

Parámetro de proceso	Valores numéricos
Temperaturas de extrusión	260°C/150°C
Temperatura de la plataforma de impresión	80°C
Velocidad de rotación del husillo	E550 (15,38 rpm)
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador de capa	80 %

6.1.3 Lexan

El procesamiento del material Lexan ha dado lugar a diferentes inconvenientes durante la fabricación. Por un lado, se ha precisado realizar modificaciones a ciertos componentes estructurales de la máquina, así como la reposición de ellos. Por otro lado, la alta temperatura de fabricación requiere un control preciso de la misma. El comportamiento del material cuando se encuentra en un estado fluido ha dado lugar a atascos en el husillo que posteriormente han sido resueltos gracias a la variación en las temperaturas de fabricación.

El Lexan tiene unas propiedades térmicas excepcionales que lo convierten en un material ideal para el sector ferroviario. La estricta normativa internacional UNE-EN 45545 [99] obliga a los fabricantes de vehículos rodantes a utilizar materiales con características especiales para la lucha contra el fuego y el humo. Este material entra dentro de la clase R6 HL3, es decir, se puede utilizar para todo tipo de vehículos ferroviarios (la norma establece 3 grupos, siendo el HL3 el que tiene mayores restricciones puesto que se utiliza para vehículos que se encuentran a menudo en túneles, donde la seguridad contra el fuego y el humo debe ser máxima) y en aplicaciones tales como la estructura del asiento de viajeros (requisito R6).

Los experimentos llevados a cabo han concluido en los siguientes parámetros de proceso.

Tabla 11. Parámetros de proceso del Lexan

Parámetro de proceso	Valor numérico
Temperatura de extrusión	300°C/200°C
Temperatura de la plataforma de impresión	100°C
Velocidad de rotación del husillo	E400
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador de capa	0% (aún sin explorar su impacto en la calidad de impresión)

6.1.4 Alúmina

Los resultados de la fabricación con alúmina han sido bajos y desesperanzadores, puesto que no se ha obtenido ninguna pieza. En cualquier caso, se han planteado diversas teorías y conjeturas de las causas de estos fallos. En el futuro cercano, se debe realizar un análisis químico de las propiedades reológicas del material y reforzar o descartar las hipótesis planteadas. De esta forma, se podría evaluar la continuidad con el estudio de la procesabilidad de la alúmina a través de FPF o abandonar esta rama de innovación.

Otra línea de estudio sería modificar el proveedor de material y utilizar otro con una menor carga de alúmina y mayor carga en material polimérico, estudiando así el impacto sobre su procesamiento. Se conjetura que el índice de fluidez disminuya notablemente con mayores cargas de alúmina.

6.1.5 Luvocom

El procesamiento del material Luvocom ha sido también de alta complejidad. Por un lado, se requieren altas temperaturas de extrusión para poder fabricar piezas y el control de temperatura debe ser muy preciso. Desgraciadamente, la máquina no ha sido capaz de aguantar las cargas térmicas y han aparecido errores con la electrónica. Como posible solución existe la reposición de las resistencias térmicas por unas de mayor potencia y la sustitución de sondas de temperatura para obtener una mejor regulación. Por otro lado, el Luvocom está formado por una matriz polimérica de sulfuro de polifenileno (PPS) reforzada con fibra de carbono. La inclusión de fibras como refuerzo para conferirle mayor resistencia mecánica a la pieza dificulta la fabricación. Además, convierten al material en abrasivo y precisa de la utilización de boquillas de acero endurecido.

El Luvocom es un material con excelentes propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas ideal para el uso en el sector ferroviario. Al igual que el Lexan, cumple las especificaciones técnicas de la normativa UNE-EN 45545 [99] para el nivel de riesgo HL3, pero sus características lo hacen apto para los requisitos R22 y R23. Estos requisitos tratan componentes estructurales, como las juntas longitudinales en interiores y exteriores, equipos electrotécnicos y equipos mecánicos para la transmisión y conducción de combustibles y aceites en sistemas hidráulicos.

A continuación, se adjuntan los parámetros de proceso obtenidos para la última iteración realizada antes de mostrar errores en la lectura de la temperatura. Estos valores pueden tomarse como el punto de partida para la optimización en sucesivos estudios una vez se hayan implementado los cambios en la electrónica.

Tabla 12. Parámetros de proceso del Luvocom

Parámetro de proceso	Valor numérico
Temperatura de extrusión	395°C/300°C
Temperatura de la plataforma de impresión	50°C
Velocidad de rotación del husillo	E900 (25,17 rpm)
Velocidad de impresión	1000 mm/min
Ventilador de capa	20%

6.1.6 Nylon

El Nylon ha sido un polímero de dificultad media durante su procesamiento. Obtener precisiones dimensionales altas ha sido sencillo, pero la rugosidad de la pieza ha sido siempre elevada. Una posible causa de este inconveniente es la composición química del propio material. Por un lado, el nylon absorbe con facilidad la humedad y es recomendable someterlo a un proceso de secado en horno. Durante este estudio, no se ha analizado la posibilidad de someter el material a tratamientos de secado previo a la fabricación por no disponer de recomendaciones por parte del proveedor del material. En segundo lugar, la introducción de fibras de vidrio como agente reforzante compromete la homogeneidad de la mezcla y favorece la aparición de irregularidades en la superficie. Además, se desconoce el contenido en fibra de vidrio. Por último, el material utilizado es abrasivo (como se ha detallado durante la fase de experimentación) y desgasta

continuamente la boquilla de extrusión si no se selecciona el material correcto. Todos estos aspectos pueden afectar a la rugosidad final de la pieza.

La introducción de fibra de vidrio aumenta las propiedades mecánicas del material, pero mantiene la elasticidad del nylon (grupo poliamida 6). Además, tiene una gran resistencia térmica. Sus aplicaciones en la industria están aún por explorar, puesto que no se tiene todavía conocimiento empírico del comportamiento del material frente a esfuerzos externos. Actualmente, solo se dispone de las propiedades especificadas por el proveedor del material. Previo a su uso en la industria, se precisa tener un conocimiento en laboratorio del comportamiento de la pieza ante esfuerzos externos tales como fuerzas, torsiones, temperatura y humedad. Existen poliamidas cuyo alargamiento a rotura aumenta considerablemente con la humedad, haciendo que su rotura sea dúctil y facilitando las tareas de mantenimiento predictivo.

Los parámetros de proceso de fabricación obtenidos son.

Tabla 13. Parámetros de proceso del Nylon

Parámetro de proceso	Valor numérico
Temperatura de extrusión	280°C/150°C
Temperatura de la plataforma de impresión	100°C
Velocidad de rotación del husillo	E345 (9,65 rpm)
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador de capa	0%

6.1.7 PET reciclado

El PET reciclado ha dado lugar a numerosos inconvenientes durante su fabricación. Los experimentos llevados a cabo tienen un cariz de escala de laboratorio, es decir, se investiga la materia prima, los rendimientos y manejos de productos, etc. Esto permite una gran flexibilidad en el proceso, pero se trabaja exclusivamente con pequeñas cantidades y con maquinaria básica. El proceso de reciclaje de las botellas es largo y tedioso, y se obtienen bajos volúmenes de material para procesar.

En segundo lugar, se pretende reducir el tamaño de la cadena de proceso, eliminando el mayor número posible de etapas intermedias innecesarias. No se realizan grandes tratamientos térmicos o químicos previos a la obtención de pellets. La cadena de proceso consiste en la densificación de las botellas por acción de la temperatura, el triturado de las botellas y tamizado del polvo para obtener un tamaño de grano suficientemente pequeño para ser transformado por el cabezal. El resultado de las transformaciones es un material en forma de escamas, donde una dimensión es considerablemente inferior a las otras dos. Esto provoca dificultades y discontinuidades en la alimentación del husillo.

La mezcla de pellets de PETG virgen y PET reciclado no se realiza mediante ninguna mezcladora industrial, lo cual induce heterogeneidades en el agregado. El cabezal puede estar momentáneamente alimentado por PET o por PETG. Además, el control de temperatura en el cabezal debe ser preciso. El aumento en 5°C de temperatura en el husillo provoca el quemado de la materia y atascos, forzando continuas limpiezas en el extrusor.

Una línea de estudio para el futuro consiste en la caracterización de las propiedades mecánicas de la pieza en función de la carga de PET reciclado en la mezcla. Asimismo, se puede continuar con el estudio de los porcentajes y evaluar el límite práctico existente. Por otro lado, se podría plantear una escalabilidad del proceso de reciclaje y contemplar la posibilidad de utilizar maquinaria de mayor tamaño que permita obtener pellets en un proceso más automático. Se puede evaluar aplicar el tratamiento térmico previo mediante un horno industrial, facilitando la densificación de materia en grandes volúmenes (actualmente se emplea una pistola de calor). Por otro lado, se podría adquirir una trituradora industrial que permita obtener pellets esféricos en vez de escamas, lo cual facilitaría la alimentación del husillo.

Los parámetros de proceso obtenidos son.

Tabla 14. Parámetros de proceso de la mezcla al 50% de PET reciclado

Parámetro de proceso	Valor numérico
Temperatura de extrusión	270°C
Temperatura de la plataforma de impresión	60°C
Velocidad de rotación del husillo	E910
Velocidad de impresión	1800 mm/min
Ventilador de capa	20%-50%

6.2 GUÍAS DE DISEÑO

La finalidad de la fabricación de las probetas de la norma ISO 52902 era simultáneamente estudiar los parámetros de proceso óptimos y generar las recomendaciones de diseño y fabricación. De esta manera, las piezas ponían a prueba ciertos aspectos geométricos relevantes: precisión lineal, precisión circular, espesores mínimos de pared alcanzable, agujeros mínimos, inclinación máxima sin requerimiento de soportes, etc. Es importante destacar que los experimentos llevados a cabo no cubren la totalidad de las pautas necesarias para ejecutar correctamente diseños en CAD. Adicionalmente, la accesibilidad a instrumentos de medida clase A limita la información que puede ser obtenida de las probetas y solo se han fabricado aquellas piezas con capacidad de medición a partir de instrumentos sencillos.

La empresa 3D Hubs se caracteriza por haber desarrollado a lo largo de los años innumerables experimentos con distintas tecnologías de fabricación con el fin de generar guías de diseño. En total, se considera que existen un total de 11 geometrías clave para el correcto diseño de piezas fabricadas a partir de tecnologías aditivas:

1. Paredes soportadas

Se considera pared soportada o pared biapoyada a toda aquella geometría de bajo espesor que conecta dos zonas de la pieza. El parámetro delimitante en la construcción de estas geometrías es el espesor de pared. Así, valores muy pequeños pueden dar lugar a paredes con grosores irregulares, paredes con falta de material interior o incluso la no fabricación de las paredes.

2. Paredes no soportadas

Se consideran paredes no soportadas a aquellas que se encuentran conectadas a la pieza por una sola zona. Al igual que para las paredes soportadas, la dimensión delimitante es el espesor. En la tecnología de fabricación por filamento fundido (FFF) y fabricación por partículas fundidas (FPF) no existe distinción entre las paredes soportadas y no soportadas. Sin embargo, en técnicas como la estereolitografía los espesores mínimos varían.

3. Soportes y voladizos

El diseño de soportes es necesario para aquellas piezas donde existen zonas en voladizo y por tanto el material depositado no dispone de conexión directa a la plataforma de impresión. Este parámetro especifica el ángulo de inclinación máximo de las paredes, con respecto del eje horizontal, que pueden ser fabricadas sin necesidad de diseñar o imprimir soportes. Como recordatorio, los soportes consumen material, necesitan operaciones de post-procesado y ralentizan y encarecen el proceso productivo. Tener un conocimiento preciso de cuándo se requieren soportes ayuda a abaratar los costes de fabricación.

4. Detalles en relieve y grabados

Se conoce como relieves y grabados a geometrías de dimensiones pequeñas que sobresalen de la pieza. Es el caso de pequeñas elevaciones en la pieza o estampas con letra que se realizan sobre la geometría.

5. Puentes horizontales

En fabricación aditiva, se denomina como puentes a todas aquellas superficies que están sustentadas por dos pilares distantes el uno del otro. El puente, por tanto, es todo el material que se encuentra en voladizo. El estudio de las dimensiones máximas de los puentes horizontales es de gran relevancia, pues determina la necesidad de utilizar soporte, que, a posteriori, deberá ser retirado en etapas de acabado. La dimensión delimitante es la distancia máxima permitida entre los dos pilares.

6. Agujeros

La dimensión crítica a la hora de fabricar agujeros reside en su diámetro y su orientación. En primer lugar, es importante destacar que nunca se obtendrá un agujero con una perfecta concentricidad y cilindridad. Adicionalmente, agujeros con un diámetro muy pequeño no podrán ser obtenidos debido a las tolerancias dimensionales de fabricación de la máquina. En segundo lugar, la dirección del agujero es relevante a la hora de la fabricación. Agujeros cilíndricos cuyo eje de revolución sea horizontal pueden precisar de soportes si su diámetro es muy grande.

7. Piezas de conexión y movimiento

Las tecnologías aditivas permiten la fabricación de ensamblajes en una sola etapa de manufactura. Sin embargo, conocer el apriete o la holgura existente entre piezas es necesario para la producción correcta del conjunto. Se puede dar el suceso de dos piezas cilíndricas donde una precise deslizar internamente sobre la otra. En caso de no ajustar correctamente las geometrías, la pieza interna no entraría y requeriría un tedioso trabajo de post-procesado para lijar y desbastar la superficie, pudiendo dañarla e incluso no garantizando la seguridad de la misma.

8. Agujeros de escape

Es una geometría necesaria en aquellas tecnologías que utilizan material en polvo como materia prima, por ejemplo, estereolitografía. Este tamaño mínimo se utiliza para retirar correctamente soportes internos de la pieza y sustraer el material en polvo acumulado en la cavidad.

9. Característica mínima

Indica el tamaño mínimo de las características más sutiles a fabricar. Asimismo, da una idea de la precisión de fabricación de la tecnología.

10. Diámetro de pernos

Se conoce como perno a las piezas, comúnmente metálicas, con forma cilíndrica y longitud superior a su diámetro. En fabricación aditiva, este término es utilizado para los salientes o protrusiones de forma cilíndrica o similar y cuya relación longitud-radio se considera alta, es decir, superior a 4.

A continuación, se incluyen las guías de diseño sugeridas a partir de los experimentos realizados. Es de destacar que no se han analizado todos los campos especificados anteriormente debido a la corta disponibilidad de máquina y tiempo de impresión. Todos los resultados aquí expuestos hacen referencia a las mediciones realizadas sobre las probetas, cuyos datos se grafican en los anexos de esta memoria. No se adjuntan datos relativos al procesamiento de Luvocom y alúmina por no haberse obtenido resultados valiosos.

Tabla 15. Guía de diseño para los materiales de estudio

Parámetro	PLA	PETG	Lexan	Nylon	PET reciclado
Soporte y voladizos	70°	50°	35°	60°	50°
Muros biapoyados	2 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Agujeros	4 mm	4 mm	5 mm	5 mm	5 mm
Características mínimas	3 mm	3 mm	4 mm	3 mm	3 mm
Diámetro de bulones	4 mm	4 mm	4 mm	5 mm	5 mm
Tolerancia	±0,5 mm	±0,5 mm	±0,5 mm	±1 mm	±0,5 mm

Pese a todos los aspectos anteriormente destacados es conveniente desarrollar una guía de diseño aplicable a la tecnología y, por ende, a todos los materiales que puedan ser procesados. En otras palabras, englobar todas las recomendaciones de diseño. En este caso, la tecnología de fabricación por partículas fundidas (FPF) se rige por las siguientes pautas de diseño. Hay ciertos parámetros particulares de cada material procesado y, por tanto, no se incluyen dentro de las guías de diseño. Este es el caso del ángulo máximo de inclinación sin necesidad de implementar y diseñar soportes. Por ejemplo, en la tecnología de fusión de lecho en polvo, esto es muy destacable: para aluminio, 30°; para titanio, 40°; y para acero, 45°.

Tabla 16. Guía de diseño para la tecnología FPF

Aspecto	Valor numérico
Muros biapoyados	3 mm
Agujeros	5 mm
Características mínimas	4 mm
Diámetro de bulones	5 mm
Tolerancia	±1 mm

6.3 PERSPECTIVA DE FUTURO

Los experimentos realizados muestran que la tecnología de fabricación por partículas fundidas (FPF) tiene un gran potencial a la hora de expandir la utilización de polímeros técnicos en aplicaciones donde se precisa una gran libertad de diseño. Sin embargo, el conocimiento de esta tecnología es aún escaso y se precisa realizar numerosos ensayos e investigaciones para crear un marco teórico y práctico de aplicación. Por un lado, al igual que el conjunto de las tecnologías de fabricación aditiva, no existe un marco regulatorio que establezca la metodología de diseño y fabricación u otros aspectos como operabilidad de las máquinas o reposición de piezas [100]. Por otro lado, el análisis aquí realizado solo explora el impacto de los parámetros de mayor

relevancia sobre la calidad dimensional y superficial de la pieza. Es de gran interés examinar el mayor número de variables posibles que influyen sobre el resultado de la fabricación.

El proceso de fabricación determina asimismo las propiedades mecánicas y térmicas de la pieza final. Así, la resistencia y rigidez de un material variará ligeramente en función del proceso de fabricación y las transformaciones a las que se haya sometido. Esto será notable en la fabricación por partículas fundidas donde, como resultado, se obtiene una pieza con alta anisotropía. Con el objetivo de fabricar piezas resistentes y fiables que puedan utilizarse en sectores de la ingeniería, es necesario estudiar las propiedades del material, buscando los parámetros de proceso que optimicen los resultados deseados en base a la utilidad. Adicionalmente, ensayar probetas según la norma ASTM D412 permitirá evaluar las propiedades mecánicas de los materiales y establecer comparaciones entre la tecnología FPF, la tecnología FFF y la tecnología de moldeo por inyección.

En el apartado 2.2 se han destacado todas las ventajas de la fabricación aditiva sobre la fabricación convencional. Otra línea de estudio se puede centrar en la aplicación de nuevos materiales compuestos en la fabricación de partículas fundidas. El estudio realizado sobre la alúmina no ha dado lugar a resultados palpables en forma de piezas o geometrías, pero ha abierto un nuevo campo de aplicación. La teoría establece que el potencial de utilización de materiales poliméricos en formato pellets es ilimitado.

Por otro lado, se deben completar los campos especificados en las guías de diseño y así crear un conjunto de sugerencias al diseñador que ayuden a la fabricación final mediante la tecnología FPF.

Por último, una línea de estudio aún más ambiciosa sería diseñar un extrusor propio, con el objetivo de solventar ciertos problemas encontrados durante la experimentación. Se conjetura que los inconvenientes de una incorrecta alimentación de pellets sobre el husillo y aparición de atascos pueden desaparecer en caso de utilizar un extrusor de mayor longitud donde las dos zonas calefactadas estén más separadas en el espacio. No obstante, se plantearían nuevos retos en la construcción, puesto que el cabezal sería más pesado y las inercias y vibraciones de la máquina tendrían mayor impacto sobre la calidad final de la pieza.

7 Planificación y presupuesto

En este apartado se indicará la planificación inicial de la investigación y la consecución del Trabajo de Fin de Máster. Adicionalmente, se establecerá una comparación con los plazos reales ejecutados debido a la serie de dificultades encontradas durante el desarrollo de experimentos. De esta forma, en este apartado se adelantará brevemente información de importancia que estará explicada con mayor detalle en apartados posteriores.

7.1 PLANIFICACIÓN

El proyecto se ejecutará entre el 20/02/2022 y el 19/05/2022, periodo en el que se desempeñan las prácticas de empresa en la Fundación Idonial. Por tanto, la organización está acotada a 13 semanas naturales. Al comienzo de la estancia se marcaron, junto con el tutor de prácticas de la empresa, unas metas a alcanzar. Pese a no acordar fechas exactas en la ejecución del proyecto, se propusieron unos periodos estimatorios para la correcta elaboración del estudio experimental. Los plazos se concretaron en base a los materiales de trabajo y la experiencia previa de los trabajadores en la utilización de las mismas materias.

- Semana 1: la primera semana se utilizará para el conocimiento del ambiente de trabajo en la empresa, conocimiento de las instalaciones y familiarización con las herramientas de trabajo (informáticas y físicas). Asimismo, se estudiará el contexto actual de la fabricación aditiva en la industria, detallando las distintas tecnologías existentes, ventajas y desventajas de AM, conocimiento en planta de las tecnologías y comparación con las técnicas de fabricación convencional.
- Semana 2: establecido el marco teórico del Trabajo de Fin de Máster, la segunda semana se centrará en la estructuración del análisis experimental en máquina. De esta forma, se estudia en detalle la normativa internacional existente relativa a fabricación aditiva y se diseñan las piezas a producir. Adicionalmente, se establece el estándar de calidad de fabricación mediante la precisión dimensional de las piezas. Puesto que la tecnología de estudio es novedosa apenas existen registros sobre la calidad de fabricación esperable del proceso. Por ello, se han establecido los estándares de calidad en un $\pm 10\%$ de precisión y un ± 1 milímetro de desviación (ver apartado 6.2).

Durante esta semana se realizarán los primeros ensayos experimentales mediante la fabricación de piezas en PLA, material extensamente utilizado en la tecnología FFF (ver apartado 3.1), con similitudes a la fabricación aditiva de pellets. Simultáneamente, se dará a conocer los programas informáticos requeridos para el diseño de piezas (SolidWorks), preparación de archivos de máquina (Simplify 3D) y código máquina (código G).

Ecuación 3. Medición de la calidad de fabricación

$$\text{Precisión de medida} = \frac{\text{Medida real}}{\text{Medida teórica}} [-]$$

$$\text{Desviación de la medida} = \text{Medida real} - \text{Medida teórica} [\text{mm}]$$

- Semana 3: el estudio se centrará en la fabricación del material PETG y se continuará con el aprendizaje en los programas informáticos utilizados por la empresa. El PETG es el segundo material por excelencia utilizado en la fabricación por FFF. Por este motivo, se espera que su procesamiento sea sencillo y no precise de largos procesos de iteración en los parámetros de fabricación.
- Semanas 4 y 5: a partir de la cuarta semana, el foco se centrará en la fabricación de materiales poliméricos técnicos. En este primer caso, se estudiará el Lexan FST 3403T, un material ideal para su utilización en el sector ferroviario gracias a sus propiedades intrínsecas en la lucha contra el fuego y la llama. El Lexan ya ha sido anteriormente procesado por parte de la empresa y se posee un pequeño “know-how” sobre la fabricación. Sin embargo, no se han obtenido aún parámetros estables que permitan obtener piezas masivas y de gran tamaño.
- Semanas 6, 7 y 8: el material de estudio se trasladará al Luvocom 3F PPS CF 9938, un nuevo polímero técnico. Al igual que el Lexan, puede ser utilizado en el sector ferroviario, pero sus propiedades mejoradas lo hacen aplicable en otras piezas y estructuras de los vagones. Al comienzo de las prácticas, no se ha procesado aún ninguna pieza de Luvocom.
- Semanas 9, 10 y 11: el material de estudio se cambiará completamente, pasando a procesar cerámicas técnicas. La alúmina tiene unas propiedades excepcionales como

material refractario y su fabricación mediante tecnologías convencionales limita mucho su geometría. Por este motivo, la fabricación aditiva permite generar, a priori, cualquier diseño creado siempre y cuando se tengan en cuenta las restricciones de máquina. Adicionalmente, el procesamiento de cerámicas técnicas lleva asociado unos tratamientos térmicos y químicos de alta complejidad (desbanderizado y sinterizado), también presentes en las tecnologías convencionales.

- Semanas 12 y 13: estas semanas se reservarán para la redacción de la memoria y la solución de posibles problemas acaecidos durante el desarrollo del proyecto, tales como retrasos en los plazos.

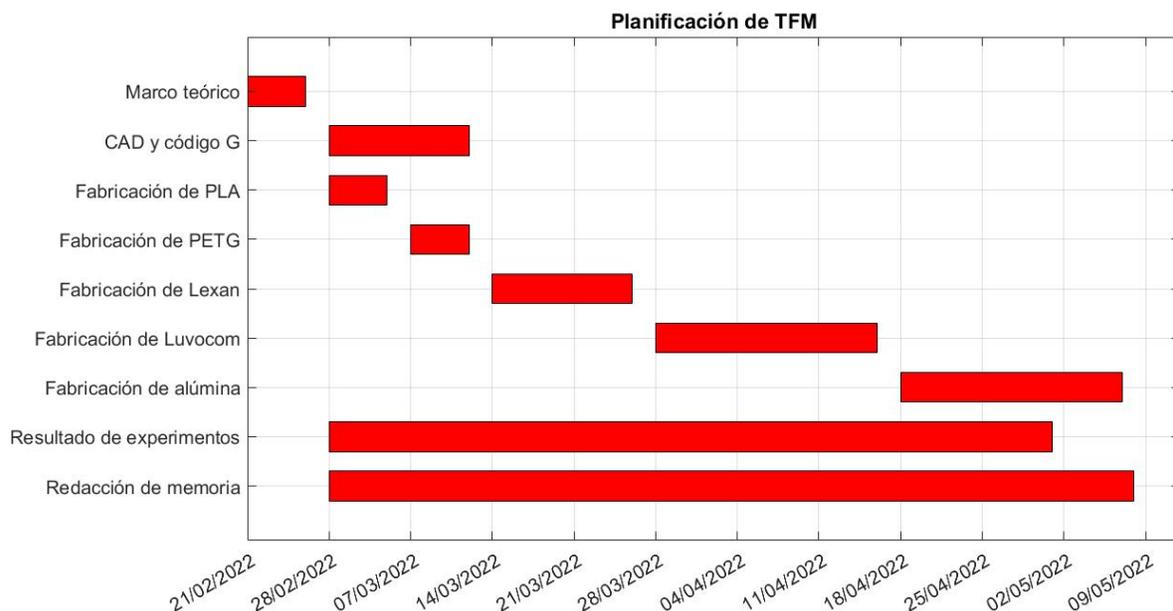


Ilustración 7.1. Planificación del TFM

Es de recalcar que cada lunes se llevó a cabo una reunión semanal con el responsable de máquina y el jefe de departamento para la discusión de resultados y evaluación de los progresos. Así, se podrán introducir modificaciones en el planteamiento inicial.

Como ocurre habitualmente, los plazos inicialmente establecidos sufren modificaciones. En este caso, la planificación inicial ha sufrido cambios debido a causas ajenas de la empresa. En primer lugar, la impresora 3D estaba en un proceso de mantenimiento y mejora en la semana previa a la incorporación en Idonial. El fabricante de la máquina se había comprometido a suministrar la

impresora la primera semana del proyecto (es decir, a partir del 21 de febrero). Sin embargo, se produjo un retraso de 4 semanas en la entrega y no se pudieron realizar las primeras pruebas hasta el 21 de marzo. Por ello, el periodo de ensayos se vio altamente impactado y los plazos fueron acortados. Afortunadamente, una extensión de tres meses en el periodo de prácticas permitió la compleción en los experimentos programados. Por otro lado, el procesamiento de dos materiales (Luvocom y alúmina) dio lugar a grandes inconvenientes (ver apartados 5.2.4 y 5.2.5) y se decidió incluir dos nuevos materiales dentro del estudio (Nylon y PET reciclado). De esta forma, las primeras cuatro semanas se utilizaron para obtener una mayor comprensión de la fabricación aditiva en todas sus vertientes y se llevó a cabo formación en otras tecnologías de fabricación aditiva (principalmente, SLS y DMLS).

La cronología real del proyecto es la siguiente.

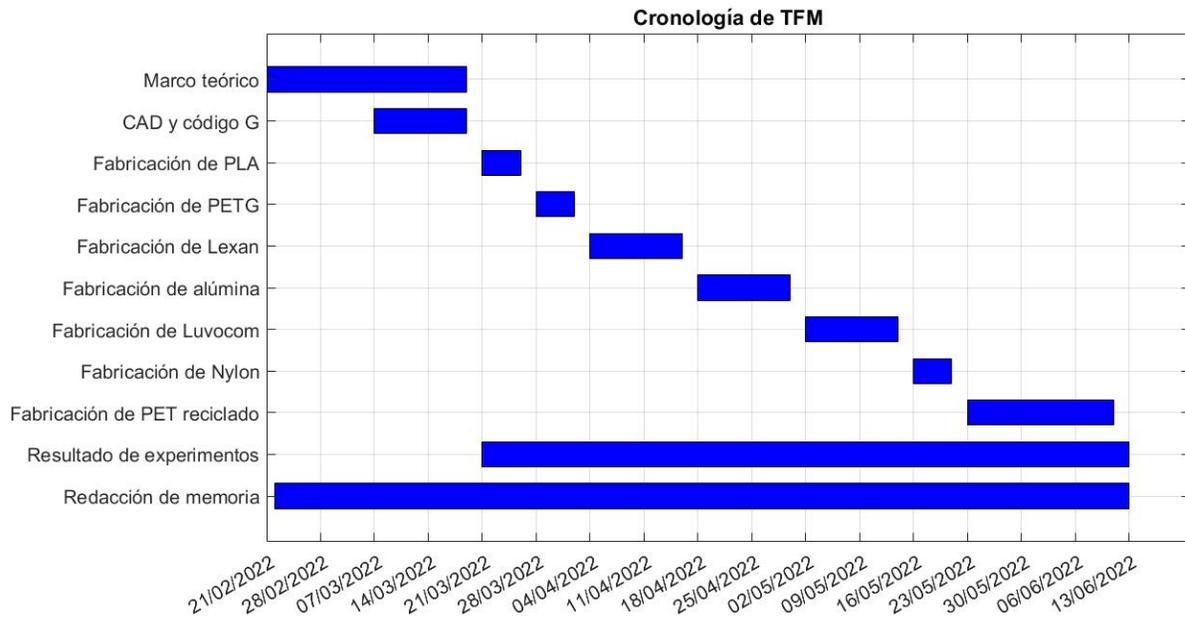


Ilustración 7.2. Cronología del TFM

7.2 PRESUPUESTO

El presupuesto está compuesto por dos tipos de costes:

- Costes directos: se incluye todo lo derivado del proyecto de investigación, por ejemplo, personal, maquinaria, equipos de procesamiento de información, etc.
- Costes indirectos: aquellos costes que no dependen del nivel de actividad, por ejemplo, agua, material de oficina, publicidad, Internet, etc. Se estima un peso del 10% sobre los costes directos.

7.2.1 Costes directos

A. Equipo informático y licencias software

El cálculo se basará en la siguiente fórmula matemática.

$$Coste = \frac{1}{N} * T * \theta * U$$

Donde:

- N: años de amortización del equipo. Para el cálculo de los años se utilizarán las tablas indicadas por el Ministerio de Hacienda en el manual de actividades económicas (apartado 3.5.4, tabla de amortización simplificada): se considera un plazo de 5 años para equipos informáticos.
- T: duración del proyecto en años. En este caso, la duración del proyecto son 13 semanas; lo que equivale a 0,25 años.
- θ : coste total del equipo. El precio de adquisición se estima en 1.000€ (IVA incluido).
- U: porcentaje de utilización del equipo. Se considera un 40%.

El coste imputable a los sistemas informáticos es de 20€.

B. Impresora 3D

El cálculo se basará en la fórmula anteriormente citada. En este caso, el periodo de amortización se establece en 10 años, el coste total del equipo asciende a 20.000€ (IVA incluido) y el porcentaje de utilización es del 70%. El coste imputable es de 350€.

C. Calibre

Para la extracción de información de las probetas se requirió la compra de instrumental de medida. En este caso, se compró el calibre de la marca Mitutoyo 500-196-30 con un coste de 180€ (IVA incluido). El periodo de amortización se establece en 5 años y el porcentaje de utilización es del 2%. El coste imputable es de 0,18€.

D. Ingeniería

El Boletín Oficial del Estado establece en el convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos unos salarios mínimos en base a la antigüedad y formación del trabajador. Se considerará una antigüedad nula en la empresa y personal titulado (artículo 17). Así, el salario bruto mínimo aplicable es de 14.000€ anuales. Adicionalmente, se debe tener en cuenta los gastos en los que incurre la empresa al contratar un trabajador: contingencia común (23,60%), desempleo (5,50%), fondos de garantía salarial (0,20%) y formación profesional (0,60%), ver Ministerio de Inclusión, Seguridad Social y Migraciones, sección Trabajadores. Englobando un periodo de trabajo de 13 semanas, los costes del trabajador son:

$$\text{Coste por salario} = \frac{14.000\text{€}}{52 \text{ semanas}} * 13 \text{ semanas} = 3.500\text{€}$$

$$\begin{aligned} \text{Costes adicionales} &= \text{Coste por salario} * \sum \text{Otros costes salariales} \\ &= 3.500\text{€} * (23,60\% + 5,50\% + 0,20\% + 0,60\%) = 1.046,50\text{€} \end{aligned}$$

$$\text{Coste del trabajador} = \text{Coste por salario} + \text{Costes adicionales} = 4.546,50\text{€}$$

E. Materiales

El análisis de los consumos de material es sencillo. En el punto de partida de los experimentos se disponía de una masa conocida de material. Al finalizar los experimentos, se registró el consumo efectuado y se computó los gastos de materia prima. Teniendo en consideración el precio de compra, se obtiene el desembolso total por costes de material. A continuación, se adjunta una tabla detallando la información.

Tabla 17. Consumos de material y precios

Material	Consumo (g)	Precio de compra (€/kg)
PLA	1250	12,95
PETG	2200	19,95
Lexan	1300	30
Luvocomo	250	50
Alúmina	300	130
Nylstrong	800	29,98

No se consideran gastos por utilización de botellas de plástico reciclado empleados durante el desarrollo del proyecto.

7.2.2 Tabla de presupuesto

A continuación, se resumen los costes directos e indirectos del proyecto, así como el beneficio industrial e impuestos.

Tabla 18. Resumen de costes directos

Concepto	Precio
Equipos informáticos y licencias	20€
Maquinaria	350€
Calibre	0,18€
Ingeniería	4.546,50€
Materiales	174,56€
Costes directos	5.091,24€

Tabla 19. Resumen de costes finales

Concepto	Precio
Costes directos	5.091,24€
Costes indirectos	509,12€
Coste total bruto	5.600,36€
Beneficio industrial (10%)	560,03€
Coste sin impuestos	6.160,39€
IVA (21%)	1.293,68€
COSTE TOTAL	7.454,07€

8 Referencias

- [1] S. Kalpakjian, “Manufactura, Ingeniería y Tecnología,”
- [2] V. S. Belén, “Revolución Industrial,” *Economipedia*, 25 sep., 2016. [Online]. Disponible en <https://economipedia.com/definiciones/primera-revolucion-industrial.html>.
- [3] Oficina Española de Patentes y Marcas, *James Watt: Bibliografía*. Consultado en 6 mar. 2022.285Z. [Online]. Disponible en http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Watt%2C+James.xml.
- [4] Francisco José Suárez Domínguez *et al.*, *Fábricas de futuro: la fábrica 4.0*. Oviedo, 2015.
- [5] Blog Ingenius, *FABRICACIÓN ADITIVA E INDUSTRIA 4.0 | Blog Ingenius*. Consultado en 1 mar. 2022.749Z. [Online]. Disponible en <https://eddm.es/blog-ingenius/fabricacion-aditiva-e-industria-4-0/>.
- [6] V. S. Belén, “Segunda Revolución Industrial,” *Economipedia*, 25 sep., 2016. [Online]. Disponible en <https://economipedia.com/definiciones/segunda-revolucion-industrial.html>.
- [7] Encyclopedia Britannica, *Maxwell's equations | Definition, Differential Form, & Facts*. Consultado en 20 abr. 2022.820Z. [Online]. Disponible en <https://www.britannica.com/science/Maxwells-equations>.
- [8] Endesa, *Historia de la electricidad*. Consultado en 6 mar. 2022.195Z. [Online]. Disponible en <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/historia-de-la-electricidad>.
- [9] Encyclopedia Britannica, *electric motor*. Consultado en 20 abr. 2022.252Z. [Online]. Disponible en <https://www.britannica.com/technology/electric-motor>.

- [10] Encyclopedia Britannica, *Nikola Tesla | Biography, Facts, & Inventions*. Consultado en 20 abr. 2022.236Z. [Online]. Disponible en <https://www.britannica.com/biography/Nikola-Tesla>.
- [11] Endesa, *¿Quién inventó realmente la bombilla?* Consultado en 20 abr. 2022.368Z. [Online]. Disponible en <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/otros/quien-invento-bombilla>.
- [12] *Integración de la red ferroviaria de la Península Ibérica en el resto de la red europea*. [Madrid]: Ministerio de Defensa, Secretaría General Técnica, 1994.
- [13] Economipedia, “Tercera Revolución Industrial,” *Economipedia*, 30 sep., 2016. [Online]. Disponible en <https://economipedia.com/definiciones/tercera-revolucion-industrial.html>.
- [14] Malen Ruiz de Elvira, “Inaugurada la primera central solar fotovoltaica de España,” *Ediciones EL PAÍS S.L.*, 30 mar., 1985. [Online]. Disponible en https://elpais.com/diario/1985/03/30/sociedad/480985207_850215.html.
- [15] J. Busquets, “El primer parque eólico de España entró ayer en funcionamiento en Gerona,” *Ediciones EL PAÍS S.L.*, 10 abr., 1984. [Online]. Disponible en https://elpais.com/diario/1984/04/10/economia/450396007_850215.html.
- [16] U. Nations, *De Estocolmo a Kyoto: Breve historia del cambio climático | Naciones Unidas*. Consultado en 23 abr. 2022.338Z.
- [17] federico, “El Fin del Trabajo, de Jeremy Rifkin,” *Revista En defensa del Marxismo*, 01 oct., 1997. [Online]. Disponible en <https://revistaedm.com/edm/edm18/el-fin-del-trabajo-de-jeremy-rifkin/>.
- [18] i-SCOOP, *Industry 4.0 and the fourth industrial revolution explained*. Consultado en 23 abr. 2022.017Z. [Online]. Disponible en <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>.
- [19] *Homepage*. Consultado en 23 abr. 2022.891Z. [Online]. Disponible en <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html>.

- [20] *¿Qué es el big data? | Oracle España.* Consultado en 23 abr. 2022.609Z. [Online]. Disponible en <https://www.oracle.com/es/big-data/what-is-big-data/>.
- [21] Iberdrola, *Realidad Aumentada: el mundo real con otros ojos.* Consultado en 24 abr. 2022.900Z. [Online]. Disponible en <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-realidad-aumentada>.
- [22] Airbus, *Airbus sees the future through the vision of “smart glasses”: Smart glasses for final assembly.* Consultado en 7 mar. 2022.831Z. [Online]. Disponible en <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-03-airbus-sees-the-future-through-the-vision-of-smart-glasses>.
- [23] Intel, *¿Qué es la Visión artificial?* Consultado en 24 abr. 2022.746Z. [Online]. Disponible en <https://www.intel.es/content/www/es/es/manufacturing/what-is-machine-vision.html>.
- [24] Intel, *DeepSight and Intel Help Tire Manufacturer Speed Up Flaw Detection.* Consultado en 24 abr. 2022.078Z. [Online]. Disponible en <https://www.intel.es/content/www/es/es/customer-spotlight/stories/deep-sight-defect-detection.html>.
- [25] Intel, *DC Water: Streamlined Sewer Pipe Inspection Analysis.* Consultado en 24 abr. 2022.305Z. [Online]. Disponible en <https://www.intel.es/content/www/es/es/customer-spotlight/stories/dc-water-customer-story.html>.
- [26] *Scopus preview - Scopus - Document details - Evaluation of robotic cardiac surgery simulation training: A randomized controlled trial.* Consultado en 24 abr. 2022.989Z. [Online]. Disponible en https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84960834561&origin=inward&txGid=9cc114621df93ed0e2b613d3c74edf62&featureToGgles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1.
- [27] E. E. Vinck, B. Smood, L. Barros y M. Palmen, “Robotic cardiac surgery training during residency: Preparing residents for the inevitable future,” *Laparoscopic, Endoscopic and*

- Robotic Surgery*, 2022. doi: 10.1016/j.lers.2022.03.002. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468900922000238>.
- [28] B. DeBoer, N. Nguyen, F. Diba y A. Hosseini, “Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 115, no. 1-2, pp. 413–432, 2021. doi: 10.1007/s00170-021-07173-5
- [29] Pedro Manuel Hernández Castellano *et al.*, *Tecnologías de Fabricación Aditiva*. [Online]. Disponible en https://spdc.ulpgc.es/libro/tecnologias-de-fabricacion-aditiva_109054/.
- [30] ISO, *ISO/ASTM 52900:2021*. Consultado en 1 mar. 2022.471Z. [Online]. Disponible en <https://www.iso.org/standard/74514.html>.
- [31] ISO, *ISO/ASTM 52910:2018*. Consultado en 1 mar. 2022.785Z. [Online]. Disponible en <https://www.iso.org/standard/67289.html>.
- [32] A. Cano-Vicent *et al.*, “Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects,” *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102378, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2021.102378
- [33] K. Rajaguru, T. Karthikeyan y V. Vijayan, “Additive manufacturing – State of art,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 628–633, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.728. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319322072>.
- [34] impresoras3d.com, “Una ronda de consejos para crear archivos .slt más ligeros sin perder detalle,” *Impresoras3d.com*, 01 ene., 2015. [Online]. Disponible en <https://www.impresoras3d.com/una-ronda-de-consejos-para-crear-archivos-slt-mas-ligeros-sin-perder-detalle/>.
- [35] S. Fafenrot, N. Grimmelsmann, M. Wortmann y A. Ehrmann, “Three-Dimensional (3D) Printing of Polymer-Metal Hybrid Materials by Fused Deposition Modeling,” (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 10, no. 10, 2017. doi: 10.3390/ma10101199

- [36] *Additive Manufacturing - ePLM Interoperability*. Consultado en 26 abr. 2022.262Z. [Online]. Disponible en <http://www.ap242.org/additive-manufacturing>.
- [37] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T.Q. Nguyen y D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, no. 2, pp. 172–196, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [38] Thomas Duda y L. Venkat Raghavan, “3D metal printing technology: the need to re-invent design practice,” *AI & SOCIETY*, vol. 33, no. 2, 2018. doi: 10.1007/s00146-018-0809-9. [Online]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/322967912_3D_metal_printing_technology_the_need_to_re-invent_design_practice.
- [39] *Neue Konstruktionsansätze in der additiven Fertigung - PDF Free Download*. Consultado en 24 abr. 2022.128Z. [Online]. Disponible en <https://docplayer.org/6001874-Neue-konstruktionsansaetze-in-der-additiven-fertigung.html>.
- [40] J. Gonzalez-Gutierrez *et al.*, “Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives,” (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 5, 2018. doi: 10.3390/ma11050840. [Online]. Disponible en <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/5/840>.
- [41] P. Moghimian *et al.*, “Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys,” *Additive Manufacturing*, vol. 43, p. 102017, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2021.102017. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421001822>.
- [42] H. Monteiro, G. Carmona-Aparicio, I. Lei y M. Despeisse, “Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing – A review for the

aeronautic and aerospace sectors,” *Energy Reports*, vol. 8, no. 194, pp. 298–305, 2022.
doi: 10.1016/j.egy.2022.01.035

- [43] Simon Bradshaw, Adrian Bowyer y Patrick Haufe, *The intellectual property implications of low-cost 3D printing*, 2010. [Online]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/265205466_The_intellectual_property_implications_of_low-cost_3D_printing.
- [44] A. M., “¿Deberíamos preocuparnos por las armas impresas en 3D?,” 20 ene., 2021. [Online]. Disponible en <https://www.3dnatives.com/es/armas-impresas-en-3d-071020202/>.
- [45] A. Jaisingh Sheoran y H. Kumar, “Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, no. 1, pp. 1659–1672, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.296. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319339823>.
- [46] Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, *Aerospace - Fraunhofer IAPT*. Consultado en 20 mar. 2022.599Z. [Online]. Disponible en <https://www.iapt.fraunhofer.de/de/Branchenloesungen/aerospace.html>.
- [47] DLRARTICLE DLR Portal, *Rocket recycling – catching rocket stages in the air after launch*. Consultado en 24 abr. 2022.945Z. [Online]. Disponible en https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2019/01/20190319_rocket-recycling-catching-rocket-after-launch.html.
- [48] Relativity Space, *Relativity Space: Homepage*. Consultado en 20 mar. 2022.915Z. [Online]. Disponible en <https://www.relativityspace.com/stargate>.
- [49] U. B. Sheela *et al.*, “3D printing in dental implants,” en *3D Printing in Medicine and Surgery : Woodhead Publishing Series in Biomaterials*, D. J. Thomas y D. Singh, eds.: Woodhead Publishing, 2021, pp. 83–104.

- [50] Wyss Institute, *3D Bioprinting of Living Tissues*. Consultado en 20 mar. 2022.537Z. [Online]. Disponible en <https://wyss.harvard.edu/technology/3d-bioprinting/>.
- [51] Wenbin Luo, Lanfeng Huang, He Liu, Wenrui Qu, Xin Zhao, Chenyu Wang, Chen Li, Tao Yu, Qing Han, Jincheng Wang, Yanguo Qin, “Customized Knee Prosthesis in Treatment of Giant Cell Tumors of the Proximal Tibia: Application of 3-Dimensional Printing Technology in Surgical Design,” (en), *Medical Science Monitor : International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, vol. 23, p. 1691, 2017. doi: 10.12659/MSM.901436. [Online]. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5391808/>.
- [52] J. Spallek y D. Krause, “Process Types of Customisation and Personalisation in Design for Additive Manufacturing Applied to Vascular Models,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 281–286, 2016. doi: 10.1016/j.procir.2016.05.022
- [53] Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, *Automotive - Fraunhofer IAPT*. Consultado en 21 mar. 2022.510Z. [Online]. Disponible en <https://www.iapt.fraunhofer.de/de/Branchenloesungen/Automotive.html>.
- [54] M.I.M. Sargini, S. H. Masood, S. Palanisamy, E. Jayamani y A. Kapoor, “Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 4601–4605, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.010. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321000237>.
- [55] *Topology Optimization Example - Motorcycle Components* | Ansys. Consultado en 25 abr. 2022.349Z. [Online]. Disponible en <https://www.ansys.com/blog/topology-optimization-motorcycle>.
- [56] Markforged Inc., *Materiales de impresión 3D*. Consultado en 27 mar. 2022.062Z. [Online]. Disponible en <https://markforged.com/es/materials>.
- [57] Stratasys, *Stratasys: Impresión 3D y fabricación aditiva*. Consultado en 27 mar. 2022.448Z. [Online]. Disponible en <https://www.stratasys.com/es>.

- [58] Wikipedia, *Proyecto RepRap*. Consultado en 27 mar. 2022. [Online]. Disponible en https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Proyecto_RepRap&oldid=140918419.
- [59] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza y P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143–157, 2017. doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303143>.
- [60] A. K. Gupta y M. Taufik, “Effect of process variables on performances measured in filament and pellet based extrusion process,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, no. 6, pp. 5177–5184, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.508
- [61] T. M. Karlsson *et al.*, “The unaccountability case of plastic pellet pollution,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 129, no. 1, pp. 52–60, 2018. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.041. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X18300523>.
- [62] A. L. Woern y J. M. Pearce, *3-D Printable Polymer Pelletizer Chopper for Fused Granular Fabrication-Based Additive Manufacturing*, 2018.
- [63] A. L. Woern *et al.*, “Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties,” (eng), *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 8, 2018. doi: 10.3390/ma11081413
- [64] ScienceDirect, *Residual stresses*. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/residual-stress>.
- [65] L. Jorgenson, “Nozzle Sizes, Materials, and Shapes for 3D Printers,” *Fargo 3D Printing*, 14 dic., 2017. [Online]. Disponible en <https://www.fargo3dprinting.com/nozzle-sizes-materials-shapes-3d-printers/>.

- [66] D. Moreno Nieto, V. Casal López y S. I. Molina, “Large-format polymeric pellet-based additive manufacturing for the naval industry,” *Additive Manufacturing*, vol. 23, no. 5, pp. 79–85, 2018. doi: 10.1016/j.addma.2018.07.012
- [67] “Materiales Poliméricos,” Libro, Ciencia de Materiales, Universidad de Oviedo, Oviedo.
- [68] E. Sirjani, P. J. Cragg y M. K. Dymond, “Glass transition temperatures, melting temperatures, water contact angles and dimensional precision of simple fused deposition model 3D prints and 3D printed channels constructed from a range of commercially available filaments,” *Chemical Data Collections*, vol. 22, p. 100244, 2019. doi: 10.1016/j.cdc.2019.100244
- [69] Plastics Europe, *Plásticos-Situación en 2020: Un análisis de los datos sobre producción, demanda y residuos de plásticos en Europa*. [Online]. Disponible en https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/ES_Plastics_the_facts-WEB-2020_May21_final_updatedJuly2021.pdf.
- [70] L. C., “Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico,” 23 oct., 2020. [Online]. Disponible en <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/#!>
- [71] *Motor paso a paso – tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso*. Consultado en 8 may. 2022.615Z. [Online]. Disponible en <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/>.
- [72] B.Y. Lee y Y.S. Tarnng, “Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, no. 1, pp. 61–66, 2000. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00582-3. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600005823>.
- [73] A.E. Abbas, L Yang, R Zapata, T.L. Schmitz y R And Schmitz, “Application of decision analysis to milling profit maximisation: An introduction,” *International Journal of*

- Materials and Product Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 1–2, 2009. doi: 10.1504/IJMPT.2009.025220. [Online]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/228368950_Application_of_decision_analysis_to_milling_profit_maximisation_An_introduction.
- [74] Impresión 3D Prototipado | 3D Printing Prototyping | Dima 3D, *Consejos de impresión en 3D con tecnología FFF (2ª parte)*. Consultado en 26 abr. 2022.182Z. [Online]. Disponible en <http://www.dima3d.com/consejos-de-impresion-en-3d-con-tecnologia-fff-2a-parte/>.
- [75] A. Forés-Garriga, M. A. Pérez, G. Gómez-Gras y G. Reyes-Pozo, “Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF,” *Materials & Design*, vol. 193, p. 108810, 2020. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108810. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520303440>.
- [76] Original Prusa 3D Printers, *Everything you need to know about infills - Original Prusa 3D Printers*. Consultado en 26 abr. 2022.677Z. [Online]. Disponible en https://blog.prusa3d.com/everything-you-need-to-know-about-infills_43579/.
- [77] T. J. Gordelier, P. R. Thies, L. Turner y L. Johanning, “Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review,” *RPJ*, vol. 25, no. 6, pp. 953–971, 2019. doi: 10.1108/RPJ-07-2018-0183
- [78] B. Wittbrodt y J. M. Pearce, “The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components,” *Additive Manufacturing*, vol. 8, no. 01, pp. 110–116, 2015. doi: 10.1016/j.addma.2015.09.006
- [79] *SABIC - ULTEM™ Resin*. Consultado en 27 abr. 2022.172Z. [Online]. Disponible en <https://www.sabic.com/en/products/specialties/ultem-resins/ultem-resin>.
- [80] Smart Materials 3D, *PEI ULTEM 9085™ el nuevo filamento de la gama Innovatefil*. Consultado en 27 abr. 2022.138Z. [Online]. Disponible en

<https://www.smartmaterials3d.com/blog/filamentos3d/pei-ultem-9085-el-nuevo-filamento-de-la-gama-innovatefil>.

- [81] *La importancia del ventilador de capa*. Consultado en 27 abr. 2022.146Z. [Online]. Disponible en https://filament2print.com/es/blog/76_importancia-ventilador-capa.html.
- [82] *Cómo solucionar problemas de adherencia a la base de impresión*. Consultado en 26 jun. 2022.133Z. [Online]. Disponible en https://filament2print.com/es/blog/140_solucionar-problemas-adherencia-base-impresio.html.
- [83] *Aplicaciones del PLA*. Consultado en 2 abr. 2022.284Z. [Online]. Disponible en http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/monica/aplicaciones_del_pla.htm.
- [84] M. Dieterle y J. Ginter, “Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 13–18, 2022. doi: 10.1016/j.procir.2022.02.003
- [85] ScienceDirect, *PET: Review*. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/polyethylene-terephthalate>.
- [86] L. Techawinyutham *et al.*, “Recycled LDPE/PETG blends and HDPE/PETG blends: mechanical, thermal, and rheological properties,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 2445–2458, 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.052. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421010334>.
- [87] Antala Industria, *Norma EN 45545 sobre la seguridad del sector ferroviario*. Consultado en 30 jun. 2022.316Z. [Online]. Disponible en <https://www.antala.es/norma-en-45545-seguridad-sector-ferroviario/>.
- [88] “LEXAN™ Copolymer_FST3403T_Europe_Technical_Data_Sheet,”
- [89] “Luvocom 3F PPS CF 9938 BK: Ficha técnica,”

- [90] Gobierno de España, *Fabricación de aluminio: Emisiones del proceso*. [Online]. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf.
- [91] Veronika Truxová, Jiří Šafka, Jiří Sobotka y Jakub Macháček and Michal Ackermann, “Alumina Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Comprehensive Study of Mechanical Properties and Porosity,”
- [92] LEARN @ CIRCUITROCKS, *Abrasive Filament* | LEARN @ CIRCUITROCKS. Consultado en 10 abr. 2022.355Z. [Online]. Disponible en <https://learn.circuit.rocks/abrasive-filament>.
- [93] ISO 52902.
- [94] S. Moylan, A. Cooke, K. Jurrens, J. Slotwinski y M. A. Donmez, “Microsoft Word - NISTIR 7858.docx,” doi: 10.6028/NIST.IR.7858
- [95] ¿Qué es el PETG? Consultado en 1 may. 2022.042Z. [Online]. Disponible en https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html.
- [96] L. A. Gileno y L. F. R. Turci, “Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes,” *Cleaner Environmental Systems*, vol. 3, p. 100057, 2021. doi: 10.1016/j.cesys.2021.100057. [Online]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789421000490>.
- [97] Xiujuan Wang, Xiuting Zheng, Meng Song y Sizhu Wu, “A study on the relationship between polycarbonate microstructure and performance as determined by a combined experimental and molecular dynamics simulation method,” (en), *e-Polymers*, vol. 14, no. 6, pp. 407–415, 2014. doi: 10.1515/epoly-2014-0065. [Online]. Disponible en <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/epoly-2014-0065/html>.

- [98] *Componentes y materiales* | SKF | SKF. Consultado en 18 abr. 2022.658Z. [Online]. Disponible en <https://www.skf.com/ar/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics/components-and-materials>.
- [99] *UNE-EN 45545-2:2013+A1:2016 Aplicaciones ferroviarias. Protecc.* Consultado en 28 may. 2022.610Z. [Online]. Disponible en <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056018>.
- [100] Cordis, *A strategic approach to increasing Europe's value proposition for Additive Manufacturing technologies and capabilities* | AM-motion Project | Fact Sheet | H2020 | *CORDIS* | European Commission. Consultado en 2 jul. 2022.546Z. [Online]. Disponible en <https://cordis.europa.eu/project/id/723560/es>.

Anexos

En este apartado se adjunta información de relevancia para la realización de los experimentos. En primer lugar, se incluyen gráficos con los resultados experimentales obtenidos. Estos gráficos se pueden conseguir mediante la ejecución del código de Matlab adjunto. Las guías de diseño se obtienen a través del análisis de los gráficos. Adicionalmente, se acompaña a la memoria los planos técnicos de las diferentes probetas diseñadas en el desarrollo de la memoria. Se incluyen por tanto la probeta de cubo vacío y las piezas según la normativa ISO 52902.

A1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PLA

Iteraciones realizadas en los parámetros de proceso de las probetas previos a partir de PLA.

Tabla 20. Iteraciones de parámetros de proceso en PLA

Probeta	Temperatura de extrusión	Temperatura de cama	Velocidad de rotación del husillo	Velocidad de impresión	Ventilador de capa	Comentarios adicionales
Cubo vacío número 1	200°C/180°C	45°C	E425 (23,87 rpm)	1800 mm/min	100%	El espesor de pared obtenido duplica el valor teórico
Cubo vacío número 2	200°C/180°C	45°C	E382 (21,46 rpm)	1800 mm/min	100%	El espesor de pared obtenido es ligeramente superior a su medida nominal. La calidad de la pieza ha aumentado considerablemente. La pieza se ha despegado de la plataforma de impresión
Cubo vacío número 3	200°C/180°C	60°C	E340 (19,10 rpm)	1800 mm/min	100%	Los espesores de pared obtenidos se ajustan al valor nominal. La calidad superficial y dimensional es buena.



Ilustración 0.3. Muestrario de piezas de PLA

A2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PETG VIRGEN

Iteraciones realizadas en los parámetros de proceso de las probetas previos a partir de PETG.

Tabla 21. Iteraciones de parámetros de proceso de PETG virgen

Probeta	Temperatura de extrusión	Temperatura de cama	Velocidad de rotación del husillo	Velocidad de impresión	Ventilador de capa	Comentarios adicionales
Cubo vacío número 1	250°C/200°C	80°C	E500 (28,09 rpm)	1800 mm/min	20%	La adhesión entre capas es nula y la pieza delamina fácilmente. Además, existe una falta de material considerable en las últimas capas impresas (atasco en el husillo)
Cubo vacío número 2	250°C/150°C	80°C	E450 (25,28 rpm)	1800 mm/min	20%	Desaparecen los problemas de atascos en el extrusor. Sin embargo, sigue existiendo falta de material en la pieza. Las esquinas están mal rematadas y las capas superiores tienen burbujas de una incorrecta extrusión de material. Los espesores de pared están por debajo de su valor nominal.
Cubo vacío número 3	260°C/ 150°C	80°C	E450 (25,28 rpm)	1800 mm/min	20%	Sigue existiendo una falta de material importante. No se extruye suficiente material para fabricar la pieza correctamente.
Cubo vacío número 4	260°C/150°C	80°C	E500 (28,09 rpm)	1800 mm/min	20%	Buen acabado superficial y las esquinas están bien rematadas. Sin embargo, aún existe una deficiencia de material, ya que los

						espesores de pared están ligeramente por debajo del valor nominal.
Cubo vacío número 5	260°C/150°C	80°C	E550 (30,89 rpm)	1800 mm/min	20%	Muy buen acabado superficial de la pieza. Los espesores de pared se ajustan al valor nominal
Primer bloque prismático de dimensiones 10x20x30 mm	260°C/150°C	80°C	E550 (30,89 rpm)	1800 mm/min	20%	La pieza se ha deformado térmicamente y las esquinas están mal rematadas. La lenta velocidad de enfriamiento del material depositado genera deformaciones en la pieza.
Segundo bloque prismático de dimensiones 10x20x30 mm	260°C/150°C	80°C	E550 (30,89 rpm)	1800 mm/min	50%	El aumento en la velocidad del ventilador de capa provoca una mejora cualitativa de la calidad de la probeta. Sin embargo, sigue habiendo problemas en las esquinas.
Tercer bloque prismático de dimensiones 10x20x30 mm	260°C/150°C	80°C	E550 (30,89 rpm)	1800 mm/min	80%	Gran acabado superficial y buena precisión dimensional. La esquina en donde se realiza el cambio de capa (costura de la pieza) tiene baja calidad.

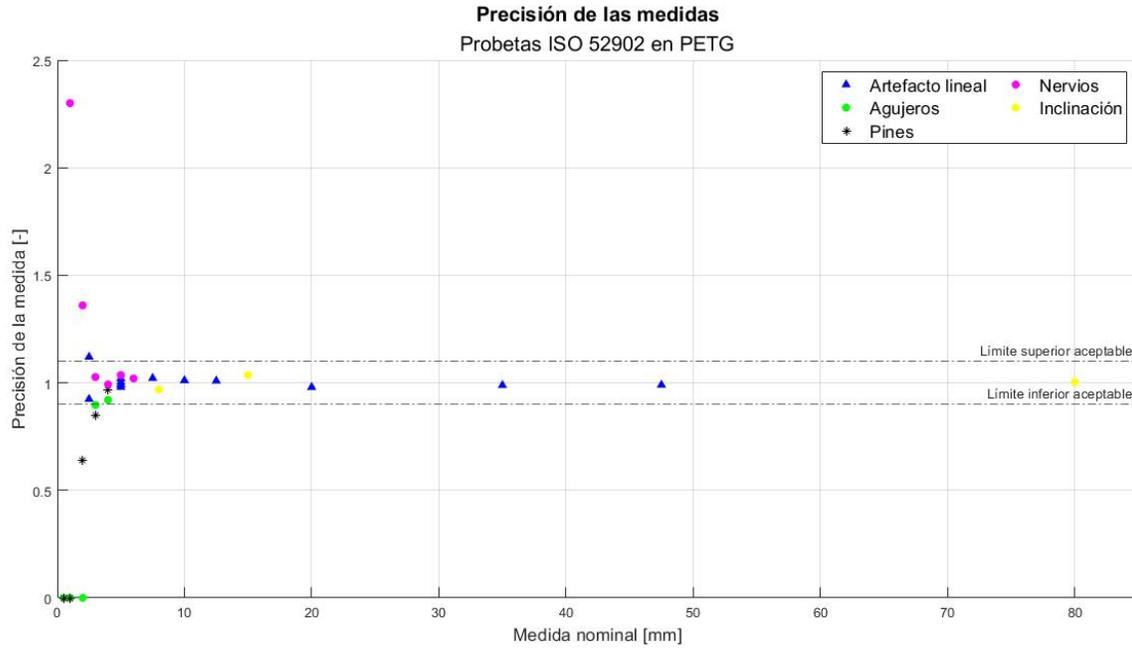


Ilustración 0.4. Precisión de las probetas ISO52902 en PETG virgen

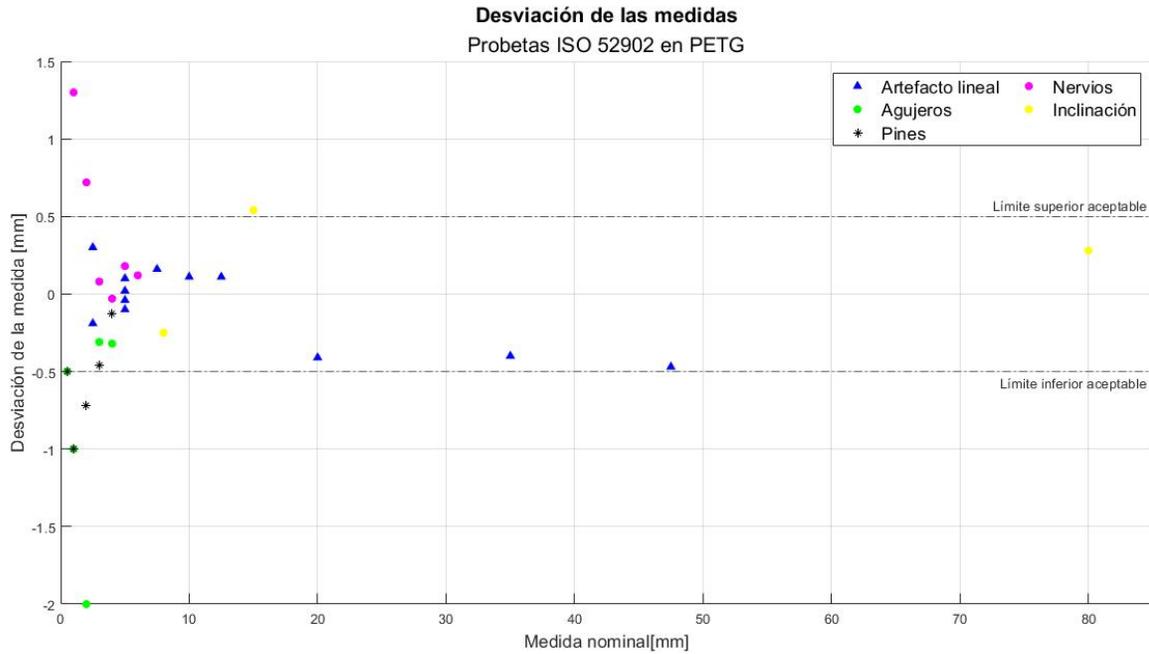


Ilustración 0.5. Desviación de las probetas ISO52902 en PETG virgen

A3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL LEXAN

Iteraciones realizadas en los parámetros de proceso de las probetas previos a partir de Lexan.

Tabla 22. Iteraciones de parámetros de proceso de Lexan

Probeta	Temperatura de extrusión	Temperatura de cama	Velocidad de rotación del husillo	Velocidad de impresión	Ventilador de capa	Comentarios adicionales
Cubo vacío número 1	280°C/200°C	100°C	E550 (30,89 rpm)	1800 mm/min	0%	Calidad superficial de la pieza buena, pero los espesores de pared son muy altos en comparación con su valor nominal.
Cubo vacío número 2	280°C/200°C	100°C	E400 (22,47 rpm)	1800 mm/min	0%	Los espesores de pared son muy cercanos al valor nominal, pero la probeta se delamina con facilidad. Baja difusión de material entre capas.
Cubo vacío número 3	300°C/200°C	100°C	E400 (22,47 rpm)	1800 mm/min	0%	Los espesores de pared son ligeramente superiores al valor nominal y la pieza no se delamina. Buen acabado superficial y las esquinas están bien rematadas.
Primer prisma de dimensiones 10x20x30 mm	300°C/200°C	100°C	E400 (22,47 rpm)	1800 mm/min	0%	Buen resultado, pero las capas superiores no muestran el relleno deseado.
Segundo prisma de	300°C/200°C	100°C	E400 (22,47rpm)	1800 mm/min	0%	El aumento en el número de capas sólidas arriba y abajo mejora

dimensiones 10x20x30						considerablemente el aspecto de la pieza.
Tercer prisma de dimensiones 10x20x30	300°C/200°C	100°C	E400 (22,47 rpm)	1300 mm/min	0%	La disminución en la velocidad de impresión mejora el acabado de las esquinas.
Cuarto prisma de dimensiones 10x20x30	300°C/200°C	100°C	E400 (22,47 rpm)	1300 mm/min	0%	Buena precisión dimensional y calidad superficial. Se concluye que estos son los parámetros óptimos de procesamiento.

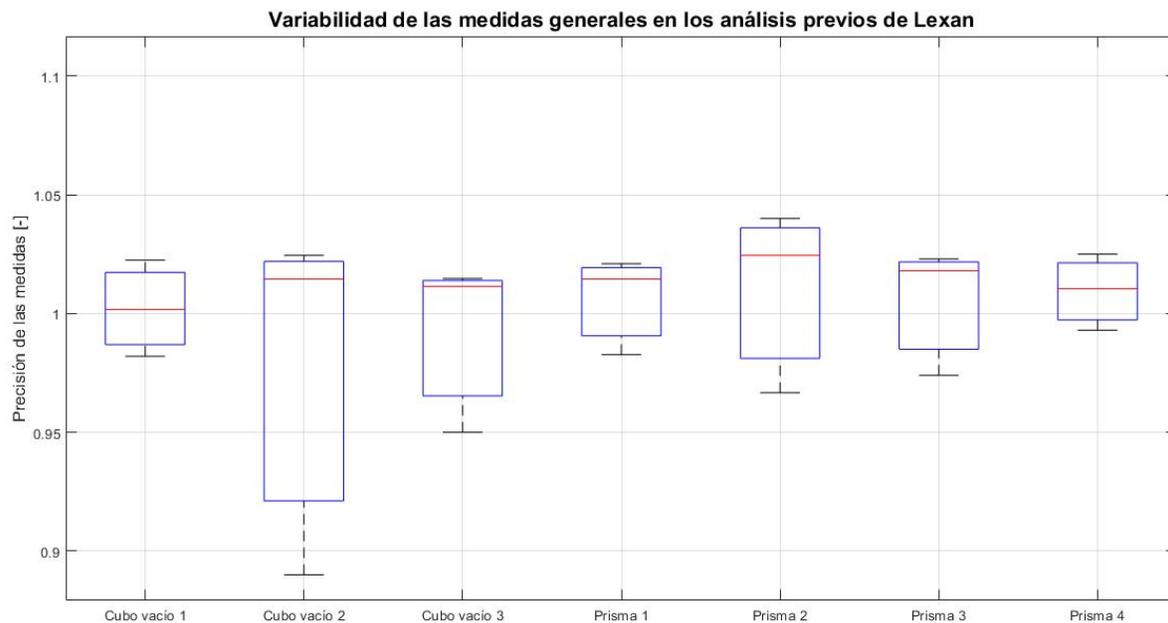


Ilustración 0.7. Variabilidad de las medidas generales en las probetas de cubo vacío y prismas

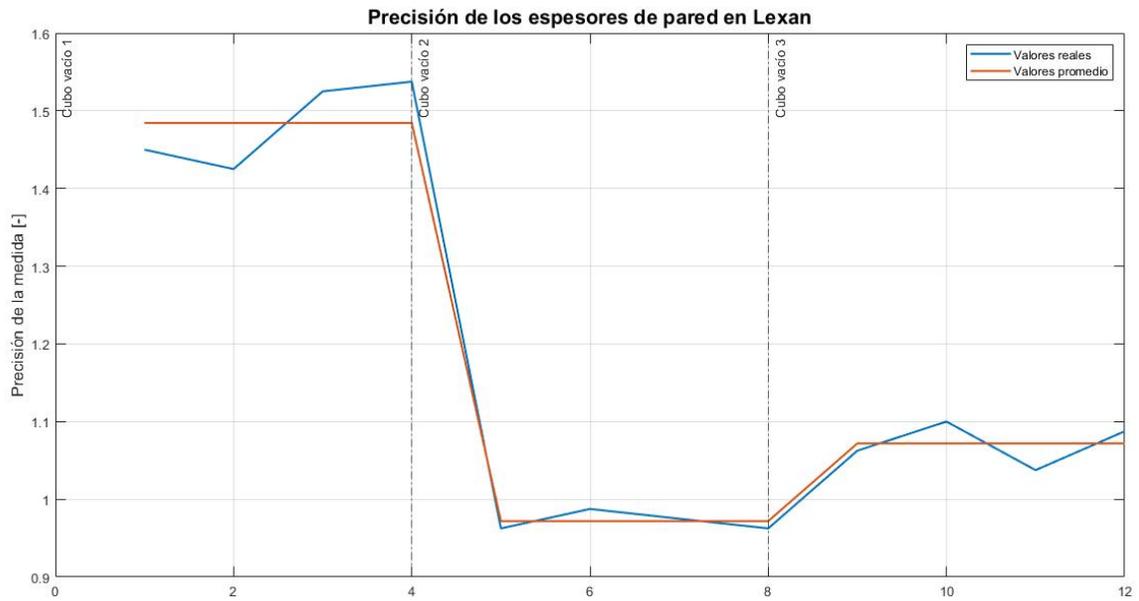


Ilustración 0.8. Precisión de los espesores de pared en los cubos vacíos de Lexan

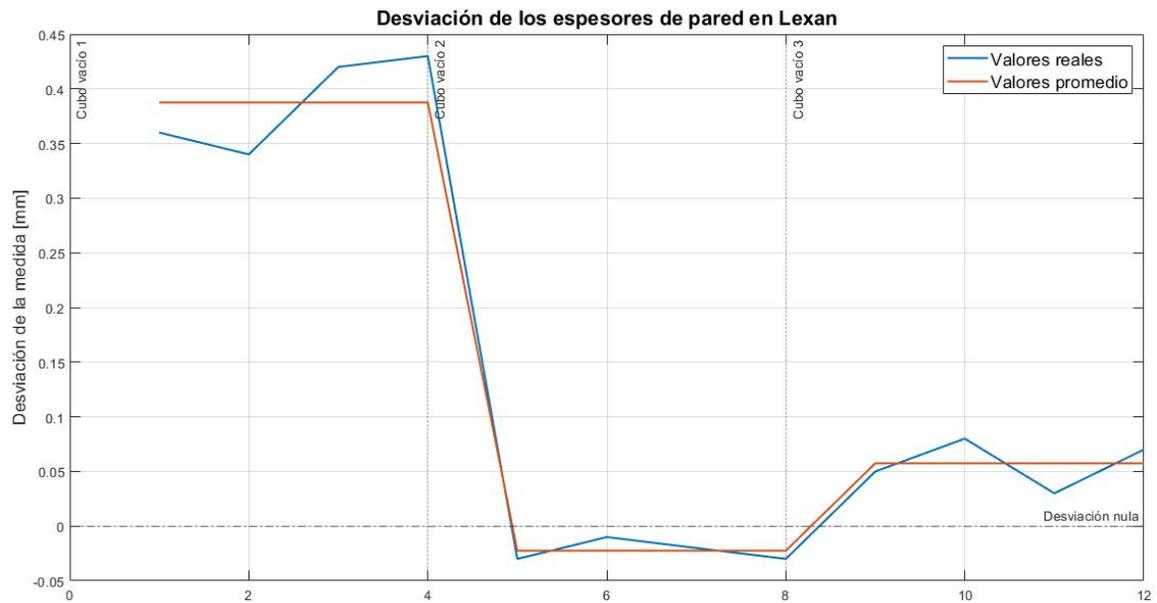


Ilustración 0.9. Desviación de los espesores de pared en los cubos vacíos de Lexan

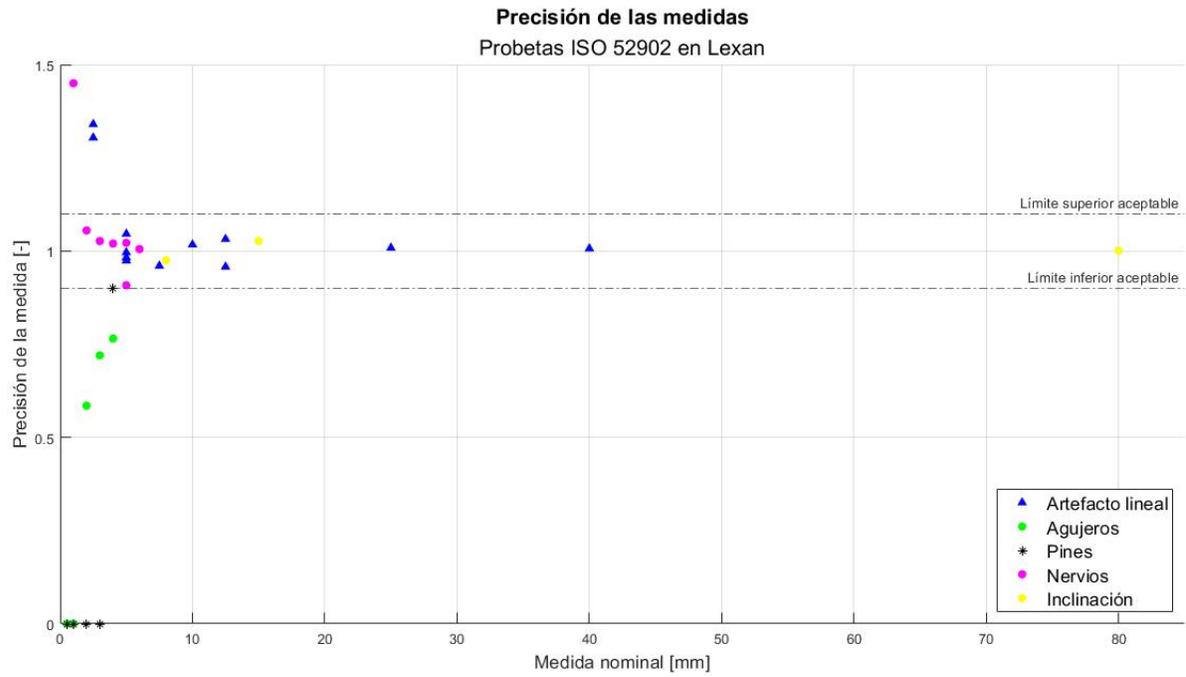


Ilustración 0.10. Precisión de las medidas de las probetas ISO 52902 en Lexan

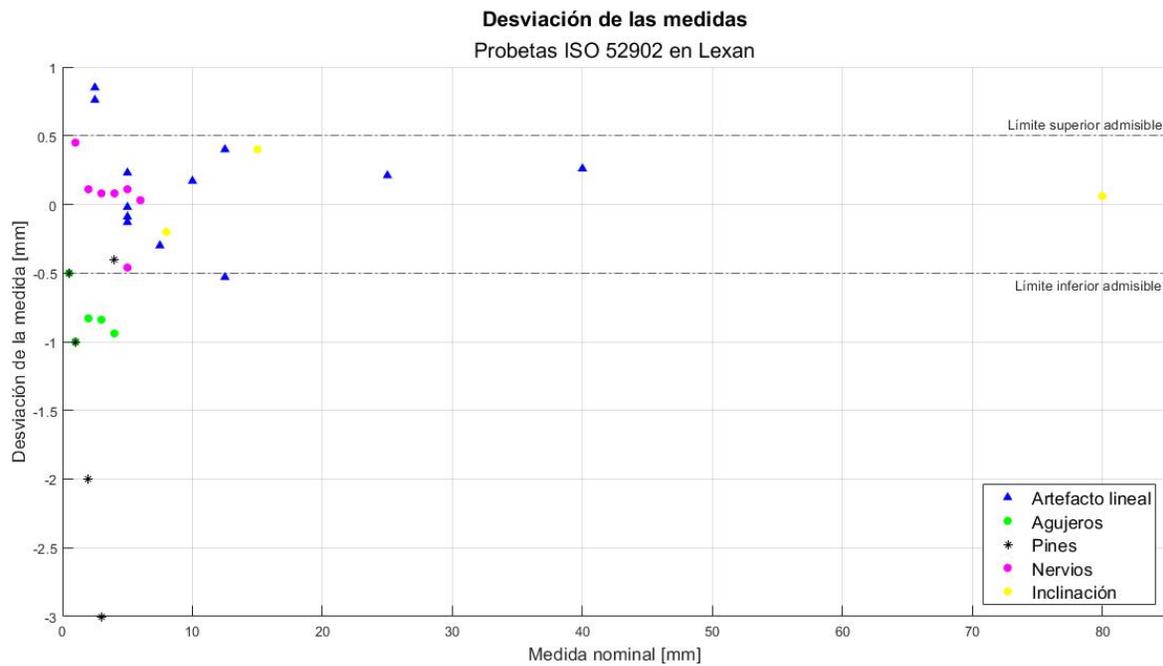


Ilustración 0.11. Desviación de las medidas de las probetas ISO 52902 en Lexan

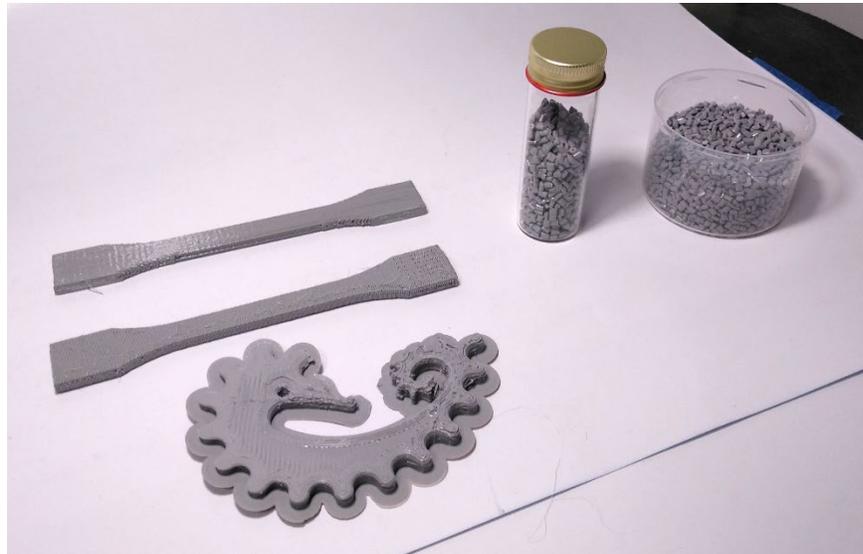


Ilustración 0.12. Muestrario de piezas en Lexan

A4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA ALÚMINA

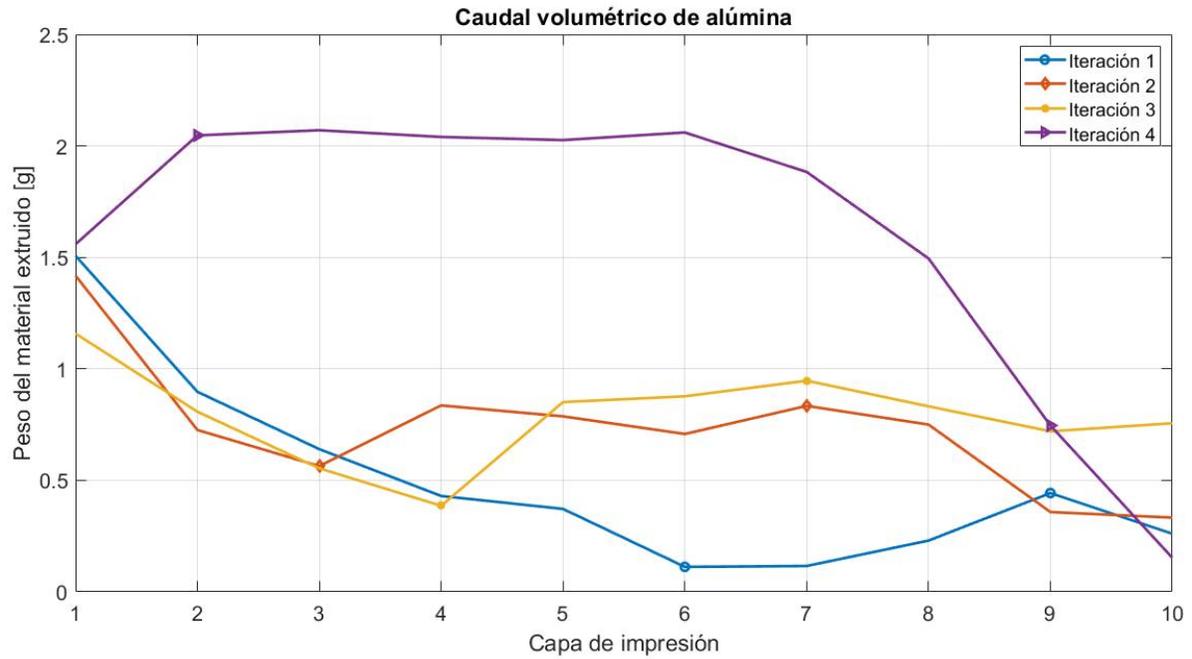


Ilustración 0.13. Evolución del caudal volumétrico de alúmina depositado en función de la capa de fabricación

A5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL LUVOCOM

Iteraciones realizadas en los parámetros de proceso de las probetas previos a partir de Luvocom.

Tabla 23. Iteraciones de parámetros de proceso de Luvocom

Probeta	Temperatura de extrusión	Temperatura de cama	Velocidad de rotación del husillo	Velocidad de impresión	Ventilador de capa	Comentarios adicionales
Cubo vacío número 1	380°C/250°C	60°C	E650 (36,51rpm)	1800 mm/min	0%	Falta considerable de material en la probeta. Las esquinas están completamente hundidas.
Cubo vacío número 2	380°C/250°C	60°C	E650 (36,51rpm)	1000 mm/min	0%	La calidad ha aumentado ligeramente, aunque aún existe una falta importante de material y las esquinas siguen estando hundidas.
Cubo vacío número 3	380°C/250°C	60°C	E800 (44,94 rpm)	1000 mm/min	0%	Aumento en la calidad. Falta de material en las últimas capas impresas de la probeta. Los espesores de pared son superiores al valor nominal. Se sugiere la necesidad de utilizar una cámara calefactada para disminuir el choque térmico al que se expone el material tras ser depositado.
Cubo vacío número 4	380°C/250°C	60°C	E800 (44,94 rpm)	1000 mm/min	0%	Los espesores de pared se ajustan a los valores nominales, pero las esquinas se hunden hacia el interior de la pieza a partir de una altura indeterminada. Se decide instalar la cúpula y el

						sistema de calefacción del volumen de impresión.
Cubo vacío número 5	390°C/270°C e instalación de la cúpula para atemperar el volumen de impresión	70°C	E800 (44,94 rpm)	1000 mm/min	0%	Falta de material en las últimas capas. El espesor de pared real es ligeramente superior al nominal. Adhesión excesiva de la pieza a la plataforma de impresión.
Cubo vacío número 6	390°C/270°C con cúpula	50°C	E900 (50,56 rpm)	1000 mm/min	0%	La calidad de la pieza aumenta perceptiblemente y la pieza se retira fácilmente de la cama. Las esquinas siguen estando hundidas y hay ciertos puntos en las paredes con escasez de material. Espesores de pared muy próximos al valor nominal.
Cubo vacío número 7	390°C/270°C con cúpula	50°C	E1150 (64,61 rpm)	1000 mm/min	0%	Muy buena calidad de pieza, pero aún existe una deficiencia en la deposición del material.
Cubo vacío número 8	395°C/300°C	50°C	E800 (44,94 rpm)	800 mm/min	0%	Los espesores de pared son ligeramente inferiores al valor nominal y sigue existiendo falta de material y las esquinas continúan hundiéndose.
Cubo vacío número 9	395°C/300°C	50°C	E900 (50,56 rpm)	1000 mm/min	0%	La calidad de las piezas es buena y los espesores de pared se ajustan a los valores nominales. Las esquinas se siguen hundiendo. Se decide variar el ventilador de capa.

Cubo vacío número 10	395°C/300°C	50°C	E900 (50,56 rpm)	1000 mm/min	20%	Errores en la lectura de la temperatura de extrusión. La fabricación no se inició a causa de los errores.
-----------------------------	-------------	------	------------------	-------------	-----	---

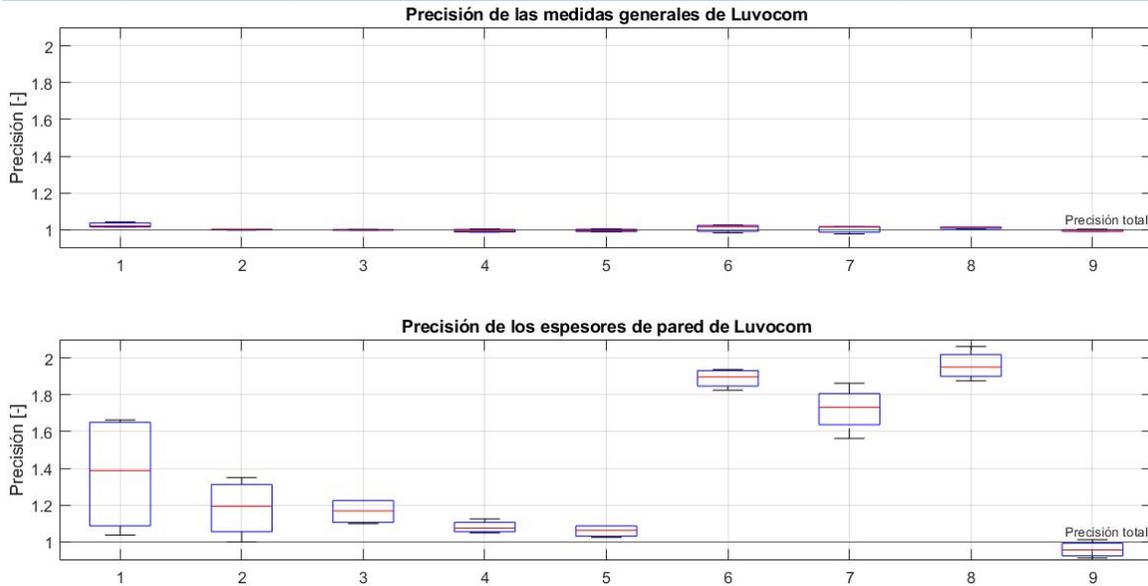


Ilustración 0.14. Variabilidad en la precisión de los espesores de pared y las medidas generales de cubos vacío en Luvocom

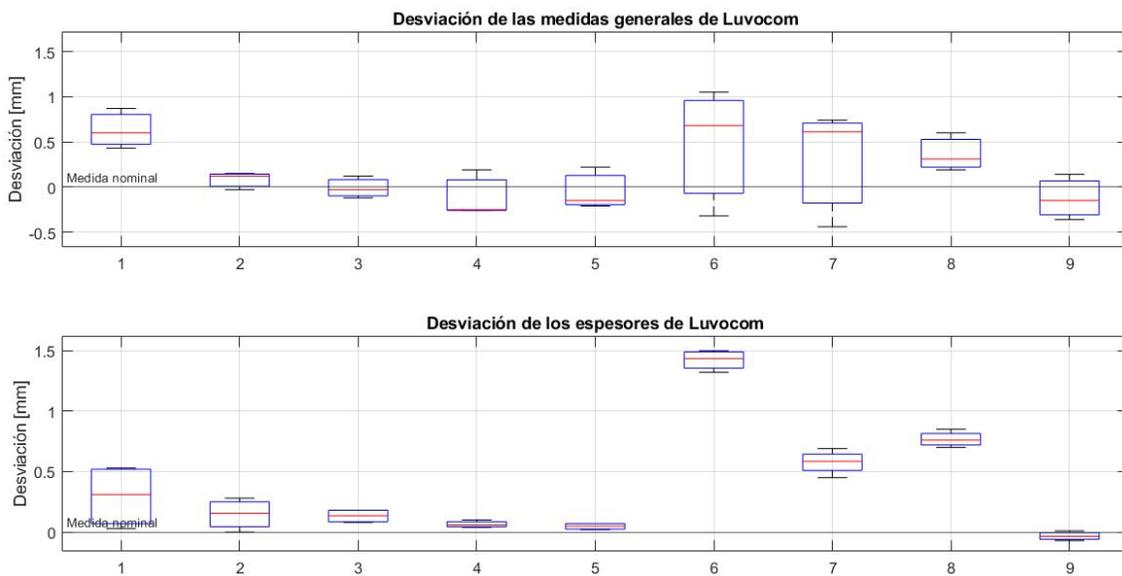


Ilustración 0.15. Variabilidad en la desviación de los espesores de pared y las medidas generales de cubos vacíos en Luvocom

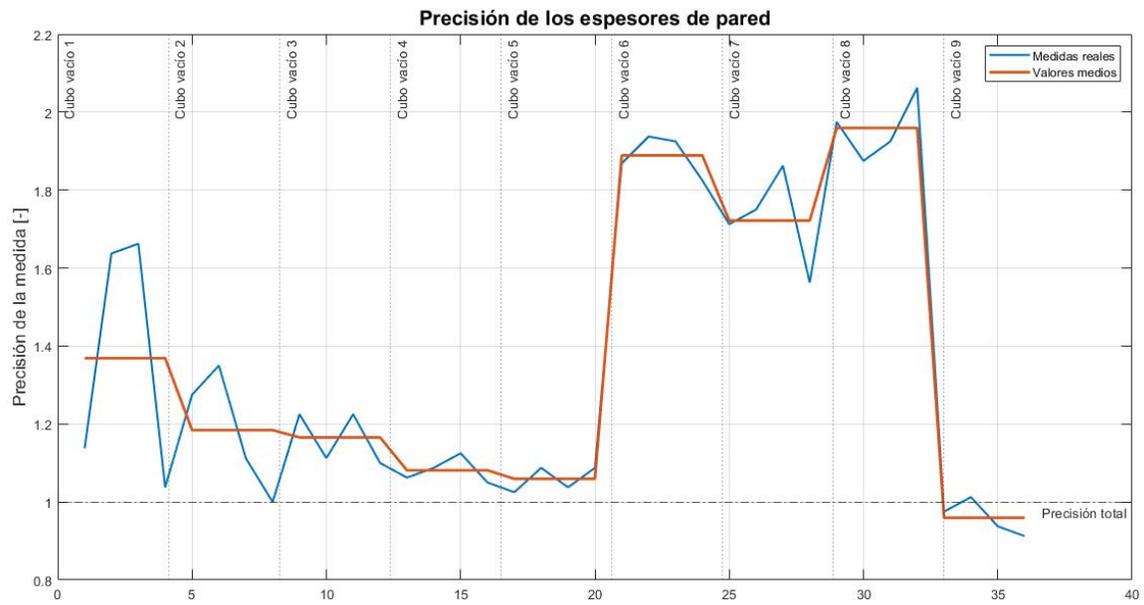


Ilustración 0.16. Precisión de los espesores de pared en las probetas de cubo vacío de Luvocom



Ilustración 0.17. Muestrario de piezas en Luvocom

A6 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL NYLSTRONG

Iteraciones realizadas en los parámetros de proceso de las probetas previos a partir de NYLSTRONG.

Tabla 24. Iteraciones de parámetros de proceso de Nylstrong

Probeta	Temperatura de extrusión	Temperatura de cama	Velocidad de rotación del husillo	Velocidad de impresión	Ventilador de capa	Comentarios adicionales
Cubo vacío número 1	265°C/150°C	90°	E450 (25,28 rpm)	1800 mm/min	40%	Los espesores de pared son muy altos y las superficies, muy rugosas. Buena precisión dimensional
Cubo vacío número 2	265°C/150°C	90°C	E450 (25,28 rpm)	2400 mm/min	40%	Los espesores de pared continúan siendo muy altos y las superficies, muy rugosas
Cubo vacío número 3	270°C/150°C	90°C	E365 (20,50 rpm)	2400 mm/min	40%	Los espesores de pared continúan siendo superiores al valor nominal y las superficies, rugosas
Cubo vacío número 4	270°C/150°C	90°C	E325 (18,26 rpm)	2400 mm/min	40%	La calidad de la pieza ha aumentado sustancialmente. Los espesores de pared se acercan más a su valor nominal, pero aún son superiores. La rugosidad continúa siendo muy alta.
Cubo vacío número 5	270°C/150°C	90°C	E325 (18,26 rpm)	2400 mm/min	40%	Se repite la probeta con los mismos parámetros para comprobar que se ha encontrado la buena dirección de estudio. Los espesores de pared son

						similares a los medidos en la probeta anterior.
Cubo vacío número 6	270°C/150°C	90°C	E285 (7,97 rpm)	1800 mm/min	40%	La calidad superficial aumenta y los espesores se ajustan a su valor nominal. Sin embargo, la primera capa tiene una calidad muy baja.
Cubo vacío número 7	270°C/150°C	90°C	E285 (16,01 rpm)	1800 mm/min	40%	Se modifica el ancho de extrusión de la primera capa. Aumenta la deposición de material y, por tanto, la calidad.
Cubo vacío número 8	280°C/150°C (boquilla de acero endurecido)	100°C	E345 (19,38 rpm)	1800 mm/min	0%	Los espesores de pared se acercan al valor nominal. La rugosidad de la pieza continúa siendo alta.
Cubo vacío número 9	280°C/150°C	100°C	E324 (18,20 rpm)	1800 mm/min	0%	Se decide disminuir la deposición de material con el objetivo de mejorar la rugosidad de la pieza. Sin impacto aparente. Falta de material en las paredes de la probeta.
Cubo vacío número 10	280°C/150°C	100°C	E345 (19,38 rpm)	1800 mm/min	0%	Los espesores de pared son similares al valor nominal. Se toman estos parámetros como los óptimos.

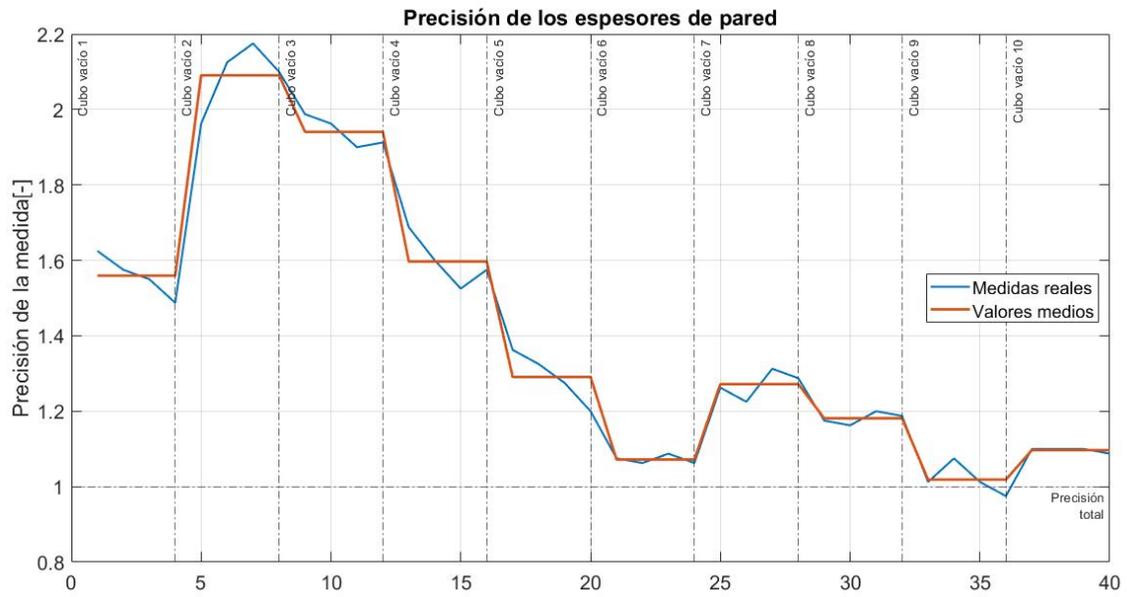


Ilustración 0.18. Evolución de la precisión de los espesores de pared en las probetas de cubo vacío de Nylstrong

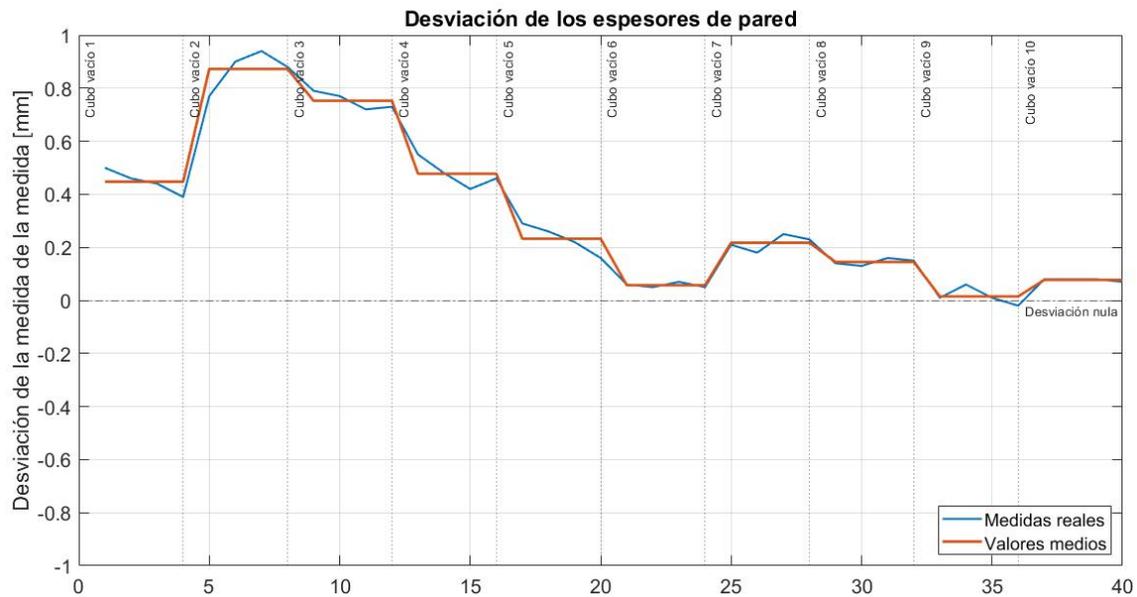


Ilustración 0.19. Desviación de los espesores de pared en probetas de cubo vacío en Nylstrong

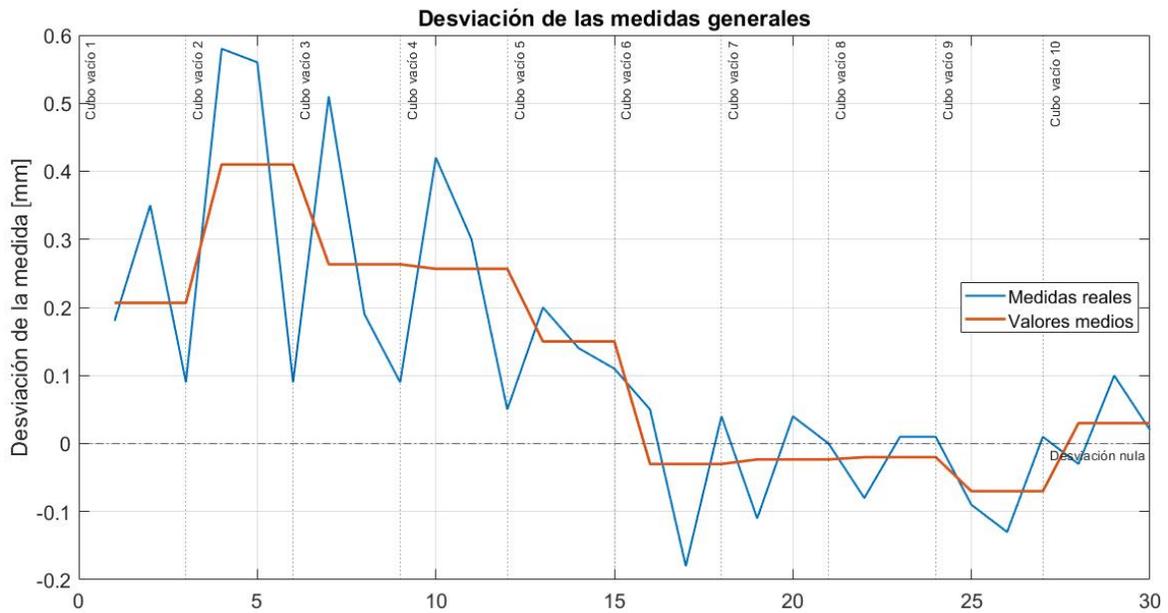


Ilustración 0.20. Desviación de las dimensiones de la probeta de cubo vacío en Nylstrong en los tres ejes espaciales

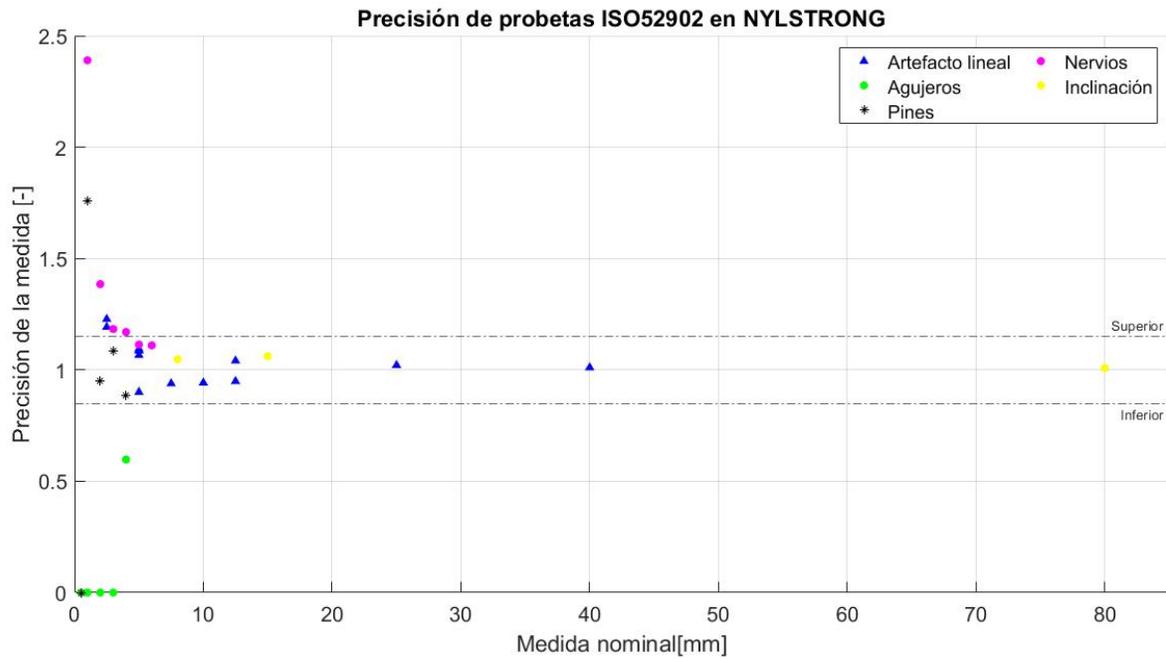


Ilustración 0.21. Precisión de las medidas de las probetas ISO 52902 en Nylstrong

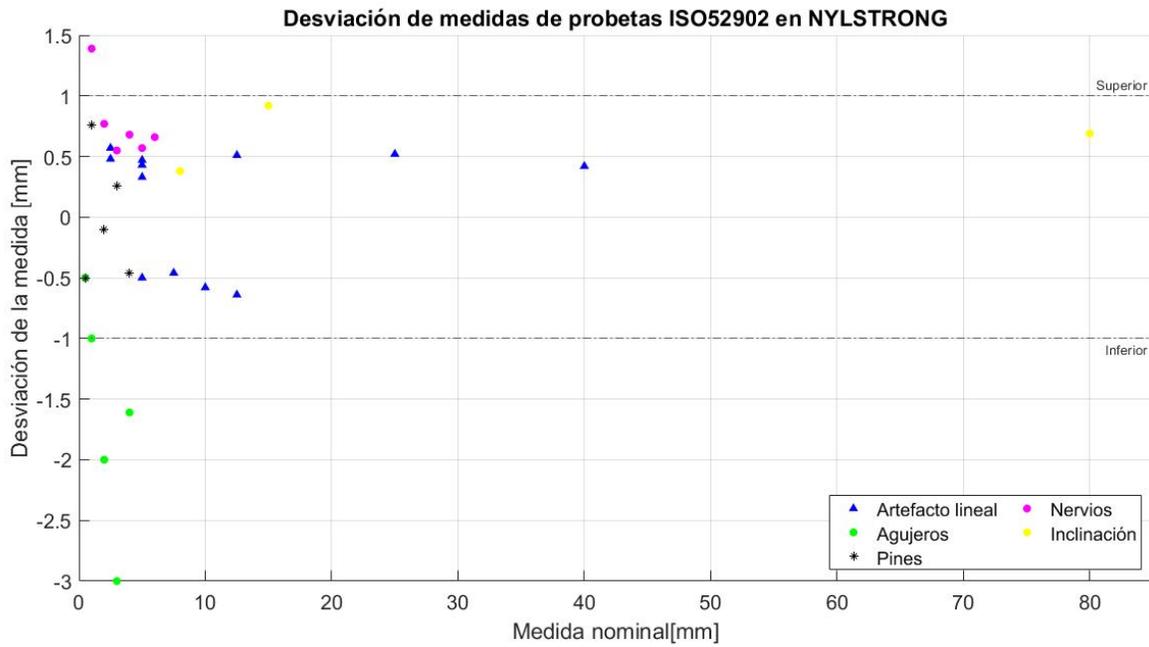


Ilustración 0.22. Desviación de las medidas de las probetas ISO 52902 en Nylstrong



Ilustración 0.23. Muestrario de piezas en Nylstrong

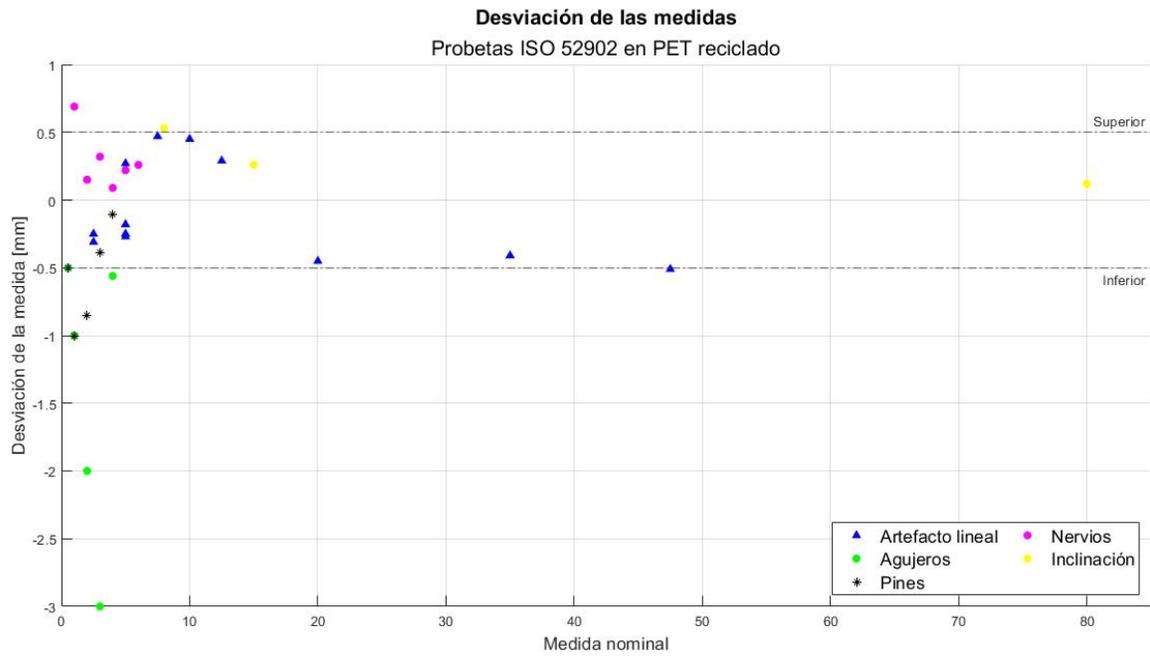


Ilustración 0.25. Desviación de las medidas de las probetas ISO 52902 en PET reciclado



Ilustración 0.26. Muestrario de piezas en PET reciclado