

CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS ESTRATEGIAS DE IMPRESIÓN DEL MATERIAL TÉCNICO PPS

TESIS DOCTORAL

presentada para optar al título de **Doctor Ingeniero Industrial**

Jone Retolaza Gaviña



DIRECTORES

Dr. Rubén Ansola Loyola

Dr. Koldo Gondra Zubieta

Bilbao, Enero 2024

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

INGENIARITZA
MEKANIKOA
SAILA
DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
MECÁNICA



Universidad Euskal Herriko
del País Vasco Unibertsitatea

Departamento de Ingeniería Mecánica
Ingenieritza Mekanikoa Saila

Tesis Doctoral

CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS ESTRATEGIAS DE IMPRESIÓN DEL MATERIAL TÉCNICO PPS

Presentada para optar al título de Doctor Ingeniero Industrial

Presentado por :

Jone Retolaza Gaviña

Directores:

Dr. Rubén Ansola Loyola

Dr. Koldo Gondra Zubieta

“¿Por qué esta magnífica tecnología científica, que ahorra trabajo y nos hace la vida más fácil, nos aporta tan poca felicidad? La respuesta es esta, simplemente: porque aún no hemos aprendido a usarla con tino.”

Albert Einstein.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de la autora y sus directores de tesis, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Agradecer hoy y siempre a mi familia, esta carrera de fondo ha sido posible gracias a mi madre, persona que siempre ha estado incondicionalmente en mi vida, apoyándome en mis decisiones y motivándome, cuando, desesperada, no quería avanzar más. A mis hermanos Miguel y Gorka, y a mi hijo Jon Mikel por ser la persona que ha compartido el mayor tiempo a mi lado, porque en su compañía las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en alegría y la soledad no existe.

De igual manera, mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis, Ruben Ansola y Koldo Gondra, cuya infinita paciencia conmigo, y conocimiento han hecho posible que pueda realizar este doctorando en una Universidad tan prestigiosa como es la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao.

A mis amigos, Enrique, Olatz, Imanol, Silvia, Jose Luis, Sandra, Enrique y Maria por todos los partidos de fútbol a los que no podía llevar a mi hijo y vinieron en mi rescate, por compartir conmigo los momentos más difíciles y alegrarse conmigo en los buenos momentos, por apoyarme cuando más necesitaba de ellos, sin poner nunca peros o darme negativas, sino todo lo contrario, son amigos con los que sé podré contar siempre.

A mis compañeros de Accenture, Carlos Vicente y Nacho Pindado, por brindarme su apoyo y ánimo en todo momento.

A mis compañeros de Gaiker, Jose Luis Gómez y Nagore Iráculis, por empujarme a hacer esta tesis, por confiar y creer en mí, y sobre todo por su valiosa amistad, por su apoyo y ánimo en cada etapa que se pasa y viene a lo largo de estos años de estudio.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

Por último, dedico este estudio a mi padre, quien ha sido mi referente y pilar a lo largo de mi vida, espero que allá donde estés te puedas sentirte orgulloso de tu hija.

RESUMEN

El principal objetivo de esta tesis es el análisis y caracterización del comportamiento mecánico del material técnico denominado polisulfuro de polifenileno (PPS) impreso mediante la tecnología "Fused Deposition Modeling", en adelante FDM. Los resultados obtenidos se verificarán a través de ensayos experimentales, contrastando dichos resultados con simulaciones realizadas mediante el método de los elementos finitos. Asimismo, se realizará un estudio comparativo de las características que presentan las topologías de fabricación más habituales, como son las que corresponden al patrón rectilíneo y al octogonal. De este modo, se dispondrá de una guía para el diseño y simulación numérica de piezas funcionales fabricadas con este material a través de la tecnología FDM, teniendo en cuenta el carácter anisótropo que presentan dichas piezas una vez fabricadas.

Durante los últimos años y gracias al movimiento "maker" o la Tercera Revolución Industrial, que se define como una cultura basada en el DIY ("Do it Yourself" o hágalo usted mismo), la tecnología FDM ha ido evolucionando y mejorando, convirtiéndose en una herramienta con un potencial enorme para la industria. La tecnología de impresión por FDM es un proceso de fabricación que permite obtener piezas complejas a unos costes muy competitivos. Numerosos estudios auguran el posicionamiento y crecimiento de la fabricación aditiva en la industria, destacando los sectores médico-sanitario, aeronáutico, bienes de consumo y automoción.

Sin embargo, esta tecnología presenta numerosos retos que debe superar para lograr su implantación industrial, como son la escasez de materiales técnicos, el control y la estabilidad del proceso, repetitividad, tolerancias dimensionales, escalabilidad para grandes producciones, velocidad de fabricación y modelización numérica, siendo este último un aspecto

fundamental para la industria. Hoy en día, apenas existe una caracterización precisa de las propiedades mecánicas de materiales técnicos impresos como el polisulfuro de fenileno (PPS) y, por lo tanto, resulta complejo diseñar y obtener piezas funcionales con las resistencias y rigideces deseadas.

El trabajo de la tesis presentada se ha centrado en dar respuesta a los criterios y las estrategias de diseño necesarias para obtener mediante fabricación FDM piezas de PPS que cumplan con los requerimientos mecánicos simulados mediante programas de análisis numérico. Es decir, cómo se va a comportar el producto anisótropo una vez fabricado y si es realmente predecible su comportamiento mecánico.

El estudio realizado se ha centrado en la caracterización del material técnico PPS (en concreto un grado comercial denominado "NPOWER" de 3NTR) así como en el estudio de sus estrategias de diseño y fabricación. Para ello se ha estudiado el efecto de diferentes variables como la orientación de la pieza impresa temperaturas de proceso, espesor de filamento, densidad, topología o tipo de patrón y defectos internos. El material PPS se ha seleccionado por ser un plástico de ingeniería de alto rendimiento con notables resistencias mecánicas y químicas a altas temperaturas, que suele utilizarse en componentes electrónicos, equipos quirúrgicos, aplicaciones en contacto con el agua y en piezas de automoción, juntas, bombas, válvulas, etc.

La principal novedad y aportación original de la presente tesis consiste en la obtención de parámetros y estrategias de diseño fiables para la impresión FDM, con los que poder diseñar y simular el comportamiento mecánico de piezas fabricadas con el material técnico PPS, material sobre el que se han realizado muy pocos estudios de fabricación por FDM, dada la complejidad

que ofrece su impresión al requerir de máquinas de impresión aptas para imprimir a altas temperaturas.

De ahí que los objetivos parciales de la presente tesis sean:

1. Definir aquellos parámetros de impresión que tienen mayor influencia en las propiedades mecánicas
2. Caracterizar el material mediante la elaboración de probetas en diferentes direcciones de fabricación
3. Investigar la influencia en las propiedades mecánicas de los parámetros de impresión que más afectan
4. Definir un plan que permita la realización de ensayos experimentales sobre el material caracterizado
5. Validar los resultados obtenidos en la simulación de elementos finitos a partir de los resultados experimentales

Por tanto, la principal novedad y aportación original de la tesis se puede resumir como la obtención de los parámetros y las estrategias de diseño para impresión mediante FDM de un material técnico de altas prestaciones con los que poder diseñar y simular mediante FEA el comportamiento mecánico de piezas para ser funcionales en el entorno industrial.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
ÍNDICE	11
Índice de imágenes.....	13
Índice de gráficos	17
Índice de tablas	19
Glosario de términos	21
1 CONTEXTO ACTUAL.....	23
1.1 Antecedentes/Motivación.....	25
1.2 Tecnología de impresión en la industria	27
1.3 La fabricación aditiva	39
1.3.1 Tecnologías de fabricación aditiva	39
1.3.2 Fabricación por extrusión de material	45
1.4 Materiales de impresión por FDM	51
1.4.1 Materiales no técnicos.....	52
1.4.2 Materiales técnicos	54
1.5 Influencia de los parámetros en el proceso de impresión y los materiales.....	59
1.6 Mejora de las prestaciones mecánicas y optimización topológica en la fabricación aditiva	71
1.7 Correlación entre FEA e impresión 3D.....	77
1.8 Análisis crítico de la situación actual.....	81
2 METODOLOGÍA.....	85
2.1 Modalidad	87
2.2 Materiales y Técnicas experimentales	89
2.2.1 Material utilizado	89
2.2.2 Caracterización del material de partida.....	91
2.3 Técnicas de procesado. Impresión de material.....	95
2.3.1 Caracterización mecánica del material impreso	98

2.3.2	Análisis estructural del material	102
2.4	Diseño	105
2.4.1	Estudio FEA.....	105
2.5	Método	107
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109
3.1	Caracterización de los polímeros de partida	113
3.1.1	Caracterización mediante calorimetría DSC.....	113
3.1.2	Caracterización mediante termogravimetría.....	115
3.2	Proceso de impresión del material	117
3.2.1	Puesta a punto del proceso	117
3.2.2	Efecto de los parámetros de impresión	127
3.3	Caracterización del material impreso	147
3.3.1	Ensayo de tracción	148
3.3.2	Microscopia electrónica de barrido SEM.....	155
3.3.3	Ensayo de flexión	157
3.3.4	Validación por simulación de flexión ANSYS	162
3.4	Caso práctico de caracterización.....	163
3.4.1	Diseño e impresión de pieza acodada.....	164
3.4.2	Ensayos pieza acodada con patrón rectilíneo y octogonal ...	170
3.4.3	Comparativa ANSYS	176
4	CONCLUSIONES.....	179
5	BIBLIOGRAFÍA	185

Índice de imágenes

Figura 1: “Roadmap” de la impresión en la industria. Fuente: Cellular 3D	31
Figura 2: Impacto de la impresión 3D en la cadena de suministro. Fuente: Stratasyss.....	32
Figura 3: Tecnología SLA. Fuente: 3DNatives.....	40
Figura 4: Tecnología SLS. Fuente: 3DNatives	41
Figura 5: Tecnología LOM. Fuente: 3D Natives	41
Figura 6: Tecnología FDM. Fuente: 3D Natives.	42
Figura 7: Esquema de impresión FDM. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 8: Conversión de un archivo 3D a formato .stl. Fuente: Stratasyss ...	46
Figura 9: Software (a) Slic3r, (b) Cura, (c) Simplify, (d) Kisslicer. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 10: Fases en el proceso de fabricación por capas. Fuente: Proc. ACM Interact.....	48
Figura 11: Esquema de funcionamiento. Fuente: 3D Natives.....	49
Figura 12: Direcciones de crecimiento. Fuente: Polymers.....	60
Figura 13: Contorno y trama. Fuente: Science Direct 2017	61
Figura 14: Detalle macroscópico de una pieza FDM. Fuente: elaboración propia.....	66
Figura 15: Comportamiento mecánico probeta. Fuente: elaboración propia	67
Figura 16: Ejemplo de optimización topológica. Fuente: Dassault Systems	72
Figura 17: Variaciones en el tamaño de celda. (a) modificación de porosidad a espesor constante, (b) modificación espesor a porosidad constante. Fuente: Materials&Design 2018.....	74
Figura 18: Ejemplo de pieza FDM con estructura “lattice” en su interior. Fuente: Ultimaker	75
Figura 19: Propiedades del material PPS. Fuente: Filament2print.....	90
Figura 20: Equipo DSC para determinación de Tg y temperatura de fusión	93
Figura 21: Máquina de impresión y material utilizado	96

Figura 22: Parámetros software de laminación Kisslicer.....	97
Figura 23: Impresión de probetas de ensayo en las tres configuraciones.	98
Figura 24: Probetas impresas preparadas para el ensayo	99
Figura 25: Probeta preparada para ensayo con sistema DIC	100
Figura 26: Sistema óptico de correlación digital de imágenes (DIC)	100
Figura 27: Ensayo de flexión según norma UNE-EN ISO 178-2011	101
Figura 28: Impresión probetas de flexión.....	102
Figura 29: Microscopio electrónico SEM empleado EVO 50.....	102
Figura 30: Inmersión probetas en Nitrógeno líquido	103
Figura 31: Probetas tras la fractura	103
Figura 32: Probetas metalizadas	104
Figura 33: Diseño probeta acodada.....	105
Figura 34: (a) medida diámetro en una zona de filamento (b) medida de diámetro en zona diferente del filamento	119
Figura 35: Software Kisslicer de probetas	121
Figura 36: Probetas impresas, plano XY	122
Figura 37: SEM probeta a 330 °C.....	125
Figura 38: SEM probeta a 315 °C.....	126
Figura 39: Software Kisslicer (a) 20 % rectilíneo, (b) 20 % octogonal	128
Figura 40: (a) probetas impresas en la dirección T^{flat} , (b) en la dirección T^{edge} , (c) en la dirección L	129
Figura 41: Superficie de respuesta (RSM).....	131
Figura 42: Comparativa entre resistencia, porcentaje de relleno y dirección de impresión	132
Figura 43: Probetas preparadas para análisis SEM	134
Figura 44: Comparativa patrón rectilíneo y octogonal con diferentes porcentajes de relleno.....	137
Figura 45: Patrón rectilíneo T^{flat} al 50 % altura de capa de 0,3 mm	140
Figura 46: Patrón rectilíneo T^{flat} al 50 % altura de capa de 0,2 mm	141
Figura 47: Secuencia de fabricación con bajo espesor de piel y porcentaje de relleno	143
Figura 48: Impresión con 20 % de patrón octogonal.....	143

Figura 49: Secuencia de fabricación con alto espesor de piel y bajo porcentaje de relleno	144
Figura 50: Direcciones de fabricación. (a) Configuración plana "flat", (b) configuración de borde "edge", (c) configuración vertical "L", (d) configuración a 10°.....	151
Figura 51: Configuraciones "edge" y "flat" de la muestra de tracción. Fuente: elaboración propia.....	152
Figura 52: Configuración de muestra de tracción en vertical y configuración a 10°	153
Figura 53: Distribución de la deformación de una probeta	153
Figura 54: Probetas ensayadas.....	154
Figura 55: Patrón rectilíneo.....	156
Figura 56: Distancia entre capas	157
Figura 57: Impresión de las muestras de flexión	158
Figura 58: Ensayo de flexión según normas UNE-EN-ISO 178-2011	159
Figura 59: Simulación de elementos finitos de la probeta sometida a flexión para una carga de 18N.....	162
Figura 60: Diseño de pieza acodada	164
Figura 61: Diseño "G-code" de probeta y soporte	165
Figura 62: Probetas impresas con relleno 50 % rectilíneo	166
Figura 63: Diseño de probeta acodada en software Kisslicer.....	167
Figura 64: Relleno octogonal al 50 %.....	168
Figura 65: Alabeo de pieza octogonal.....	168
Figura 66: Probeta acodada patrón octogonal con aumento de temperaturas.....	169
Figura 67: Probeta acodada patrón octogonal aumentando temperatura material soporte	169
Figura 68: Ensayo tracción probeta acodada rectilíneo al 50 %.....	171
Figura 69: Ensayo de tracción pieza acodada octogonal al 50 %	172
Figura 70: Diseño de probeta acodada en ANSYS	177
Figura 71: Simulación ANSYS pieza acodada	177

Índice de gráficos

Gráfico 1: Crecimiento de ventas por servicios de fabricación. Fuente: Wohlers Report 2021	28
Gráfico 2: Análisis de la evolución del mercado aditivo metálico. Fuente: Smar Tech	29
Gráfico 3: Razones para comprar una impresora 3D. Fuente: Gartner	30
Gráfico 4: Incidencia de la fabricación aditiva en los diferentes sectores. Fuente: Wohler Report 2021	35
Gráfico 5: "Hype Cycle" de la impresión 3D de Gartner. Fuente: Gartner.	36
Gráfico 6: Esquema de estudio y experimentación realizado. Fuente: elaboración propia.....	111
Gráfico 7: DSC de material PPS.....	114
Gráfico 8: TGA de material PPS.....	116
Gráfico 9: Proceso de estudio realizado. Fuente: elaboración propia	117
Gráfico 10: Curvas comparación entre patrón rectilíneo y octogonal.....	133
Gráfico 11: Esquema de estudio sobre el material impreso	147
Gráfico 12: Esquema validación realizada. Fuente: elaboración propia ..	163

Índice de tablas

Tabla 1: Tecnologías de fabricación aditiva.	42
Tabla 2: Descripción y uso de materiales no técnicos.	53
Tabla 3: Descripción y uso de materiales técnicos.....	56
Tabla 4: Propiedades mecánicas	69
Tabla 5: Condiciones de ensayo	99
Tabla 6: Metodología realizada.....	107
Tabla 7: Resultados DSC	115
Tabla 8: Parámetros impresión para el material PPS.....	121
Tabla 9: Parámetros de impresión para el material soporte SSU05.....	122
Tabla 10: Valor peso y dimensiones a 315 °C.....	123
Tabla 11: Valor peso y dimensiones a 330 °C.....	124
Tabla 12: Valores ensayo de tracción a 315 °C.....	124
Tabla 13: Valores ensayo de tracción a 330 °C.....	125
Tabla 14: Patrón rectilíneo de 0,2 mm de altura de capa con porcentaje de relleno 50 % - 40 % - 30 %.....	129
Tabla 15: Patrón octogonal de 0,2mm de altura de capa con porcentaje de relleno 50 % - 40 % - 30 %.....	130
Tabla 16: Análisis de la varianza (ANOVA)	130
Tabla 17: Comparativa en tiempos de impresión.....	139
Tabla 18: Comparativa de la resistencia según altura de capa de 0,3 mm y 0,2 mm	140
Tabla 19: Comparativa para patrón octogonal entre espesor de piel, porcentaje de relleno, espesor de probeta, peso, tiempo de impresión y acabado superficial.....	144
Tabla 20: Resultados obtenidos para cada configuración	154
Tabla 21: Valores finales.....	154
Tabla 22: Matriz de propiedades del material	155
Tabla 23: Valores de desplazamiento para ensayo de flexión.....	160
Tabla 24: Peso probetas acodadas impresas patrón rectilíneo al 50 % ...	166

Tabla 25: Peso probetas acodadas patrón octogonal y porcentaje de relleno 50 %.....	169
Tabla 26: Resultado desplazamientos ensayo tracción patrón rectilíneo	174
Tabla 27: Resultado desplazamientos ensayo tracción patrón octogonal	175

Glosario de términos

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

ABSi: Acrilonitrilo butadieno estireno resistente a impacto

ASA: Acrilonitrilo estireno acrilato

DIC: Correlación digital de imágenes

DSC: Calorimetría diferencial de barrido

FDM: *Fused Deposition Modeling* (Modelado por deposición fundida)

FEA: *Finite element analysis* (Análisis de elementos finitos)

LOM: Laminación de láminas

PC: Policarbonato

PEEK: Polieteracetona

PEI: Polietilenimina

PLA: Ácido poliláctico

PPSF/PPSU: Polifenilsulfona

PPS: Polisulfuro de polifenileno

PSU: Polisulfona

SEM: Microscopía electrónica de barrido

SLA: Estereolitografía

SLS: Sinterizado láser selectivo

TGA: Termogravimetría

UV: Ultravioleta

1. CONTEXTO ACTUAL

1.1 ANTECEDENTES/MOTIVACIÓN

La investigación bibliográfica realizada expone los antecedentes y estudios realizados por otros científicos en el ámbito de la fabricación aditiva en general, haciendo hincapié en los estudios en torno a la fabricación aditiva por deposición de filamento fundido.

El análisis bibliográfico realizado demuestra que, si bien se han realizado numerosos estudios en torno a la impresión 3D de materiales como el acronitilo butadieno estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA), son mucho menos numerosas las investigaciones en materiales más técnicos como el poliéter éter cetona (PEEK), la polietermida (PEI) o la polisulfona (PSU). Tal división también se extrapola a los parámetros de fabricación y caracterización de propiedades elásticas para poder diseñar y fabricar piezas funcionales con prestaciones mecánicas predefinidas. De esta forma, todos los estudios analizados establecen cómo afectan los parámetros de fabricación al comportamiento mecánico de las piezas, pero son menos los que indican cómo aplicarlos para obtener piezas finales con características mecánicas mejoradas.

El estudio llevado a cabo se divide en los siguientes cinco apartados para contextualizar la investigación llevada a cabo:

1. Tecnología de impresión en la industria
2. Influencia de los parámetros de proceso en la impresión
3. Mejora de las prestaciones mecánicas, optimización topológica en la fabricación aditiva
4. Correlación entre FEA e impresión 3D
5. Análisis crítico del contexto actual

1.2 TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN EN LA INDUSTRIA

A partir del 2010 y gracias al movimiento “maker” es cuando la fabricación aditiva ha dado el gran salto a la industria por su enorme potencial. Grandes analistas y expertos económicos e industriales prevén que la fabricación aditiva traerá un cambio en el modelo productivo mundial. Esta modalidad de fabricación supone una nueva revolución industrial, ya que los medios de fabricación tradicionales son sustractivos, es decir, las piezas se obtienen basándose en la sustracción de material, como son el mecanizado, troquelado, etc.

Pero estos procesos tienen limitaciones cuando se quieren construir piezas complejas, siendo este caso un ejemplo donde la fabricación aditiva resulta diferencial. Al tratarse de un proceso de fabricación en el que el material se va añadiendo en las zonas donde se necesite, se puede fabricar prácticamente cualquier geometría. Además de ser, entre otras ventajas, un proceso en el que se prescinde de herramientas y utillajes de fabricación.

Las ventajas de este proceso de fabricación, sumadas a la creciente demanda de personalización de los productos sin encarecer el producto final, han sido catalizadores para el estudio y desarrollo de este proceso productivo.

Wohler Associates ⁽¹⁾, en su publicación del 2021 sobre la impresión 3D y la Industria, analiza el impacto de COVID-19 en la industria de la Fabricación Aditiva, concluyendo que incluso con la pandemia, esta industria tuvo una expansión del 7,5 % a casi 12 800 millones de dólares en 2020. No obstante, el crecimiento se redujo en comparación con el crecimiento promedio del 27,4 % durante los 10 años anteriores. Esto es debido fundamentalmente a

1. CONTEXTO ACTUAL

una disminución en las ventas de equipos. Sin embargo, el aumento en el negocio de los proveedores de servicios de fabricación aditiva favoreció el crecimiento de toda la industria. El siguiente gráfico del informe de Wohlers Report 2021 muestra un crecimiento del 7,1 % de los proveedores de servicios independientes en todo el mundo, lo que da como resultado casi 5300 millones de dólares de ingresos de este grupo.

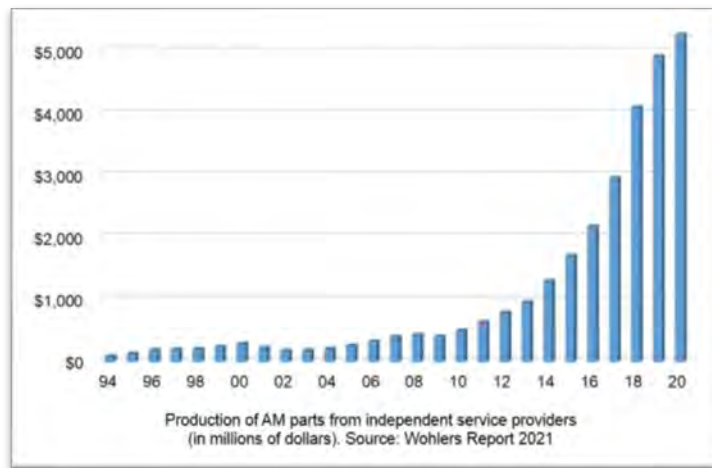


Gráfico 1: Crecimiento de ventas por servicios de fabricación. Fuente: Wohlers Report 2021

En el análisis realizado por SmarTech ⁽²⁾ se puede apreciar la evolución y la previsión a 2029 del mercado de fabricación aditiva (FA) de metal, que está más enfocada a piezas finales y no prototipos.

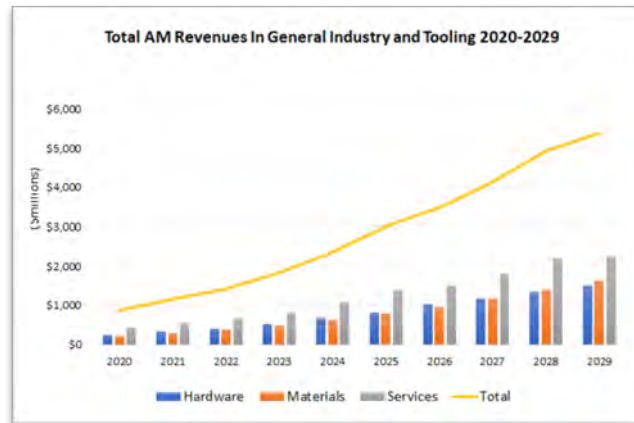


Gráfico 2: Análisis de la evolución del mercado aditivo metálico. Fuente: Smar Tech

La gran ventaja que ofrece la fabricación aditiva es la posibilidad de obtener piezas de prototipo y conceptuales, lo que permiten acortar el tiempo de puesta de un producto en el mercado (“time to market”). Pete Basilier ⁽³⁾ en su estudio ha analizado las principales razones por las que la industria está apostando por la impresión 3D y cómo está afectando en las decisiones de compra. Siendo las siguientes, por orden de importancia, las aplicaciones más significativas para la industria:

- Prototipado: con un porcentaje de 24,5 %, gracias a la fabricación aditiva la industria puede fabricar prototipos en plazos de tiempo significativamente más cortos respecto a los procesos tradicionales. Según Segula Technologies, ⁽⁴⁾ grupo global de ingeniería y pionero en la aplicación industrial de tecnologías digitales, se puede alcanzar hasta un 90 % de reducción. Además, en algunos casos donde no se requieran altas prestaciones, pueden llegar incluso a ser prototipos funcionales.
- Desarrollo de producto: con un porcentaje de 16,1 %, el proceso de fabricación aditiva, tal y como se ha mencionado anteriormente, permite crear geometrías complejas sin necesidad de fabricar moldes, utillajes o herramientas específicas. Esto es una gran ventaja

1. CONTEXTO ACTUAL

competitiva para la industria cuando desarrolla un nuevo producto, tanto desde el punto de vista económico como del tiempo de puesta del producto en el mercado.

- Innovación: con un porcentaje de 11,1 %, la innovación es en sí misma un proceso iterativo, donde se va desarrollando el escalado de un producto, proceso de fabricación o servicio. En este caso, las ventajas de la fabricación aditiva permiten agilizar este proceso y validar conceptos con un coste menor que empleando procesos tradicionales.

El Gráfico 3 muestra el estudio que realizó Gartner ⁽⁵⁾ de las razones por las que la industria está apostando por esta tecnología.

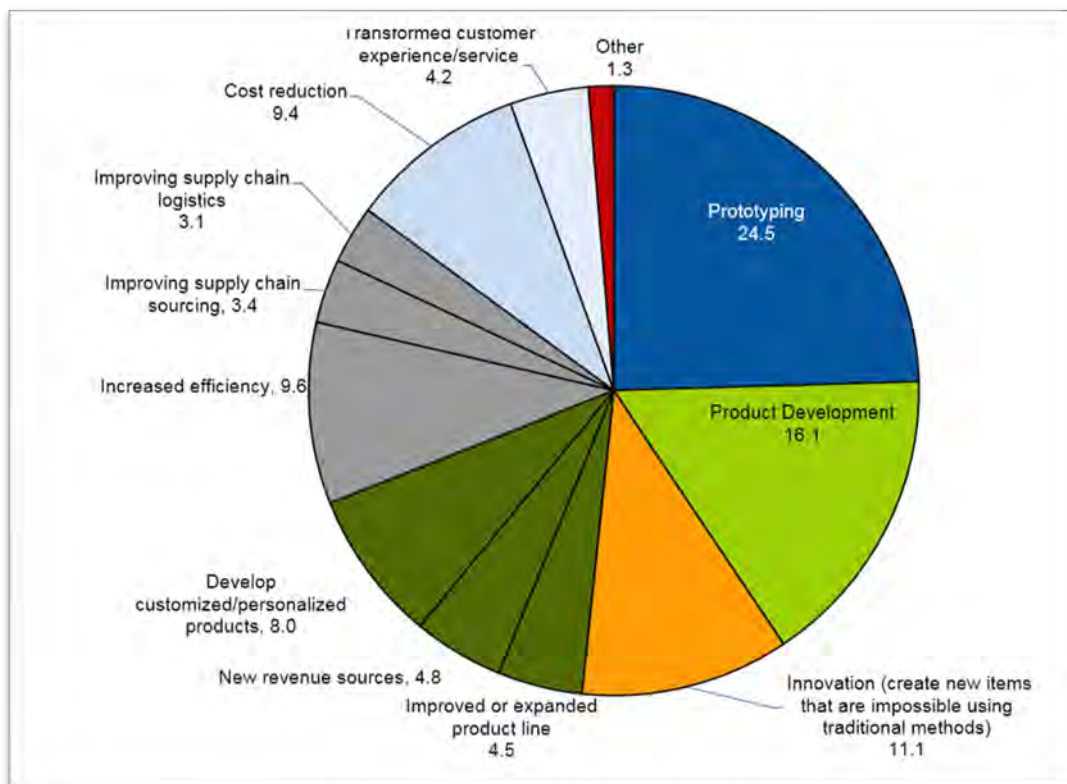


Gráfico 3: Razones para comprar una impresora 3D. Fuente: Gartner

Sin embargo, se espera que a medio plazo esto cambie, dado que la mayoría de los sectores industriales empiezan a visualizar la impresión 3D como un nuevo proceso de fabricación para la obtención de piezas y componentes finales, funcionales y personalizados, adaptándose así a la tendencia de la sociedad de buscar productos personalizados. La Figura 1 muestra el “roadmap” de la fabricación aditiva diseñado por Richard Mac Comas⁽⁶⁾ y aplicado a los seis sectores de la industria en los que tiene más presencia.

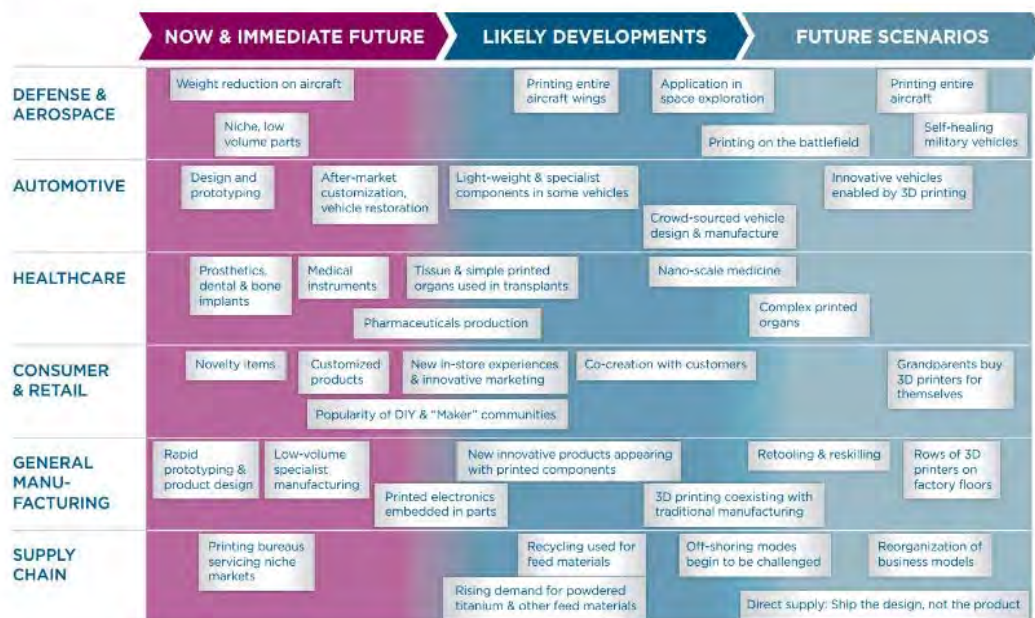


Figura 1: "Roadmap" de la impresión en la industria. Fuente: Cellular 3D

Stratasys⁽⁷⁾ en su artículo sobre el impacto de la impresión 3D en la cadena de valor analiza cómo la adopción de la fabricación aditiva acorta la tradicional cadena de suministro, destacando, por un lado, la rapidez en la entrega de piezas personalizadas, y por otro analizando el coste asociado a la producción de dichas piezas, que requiere menos proveedores siendo en la mayoría de los casos proveedores locales por lo que no es necesario salir

1. CONTEXTO ACTUAL

al extranjero en busca de mano de obra barata y cuyos costes de utillaje son mínimos. En la Figura 2 se muestra el flujo descrito.

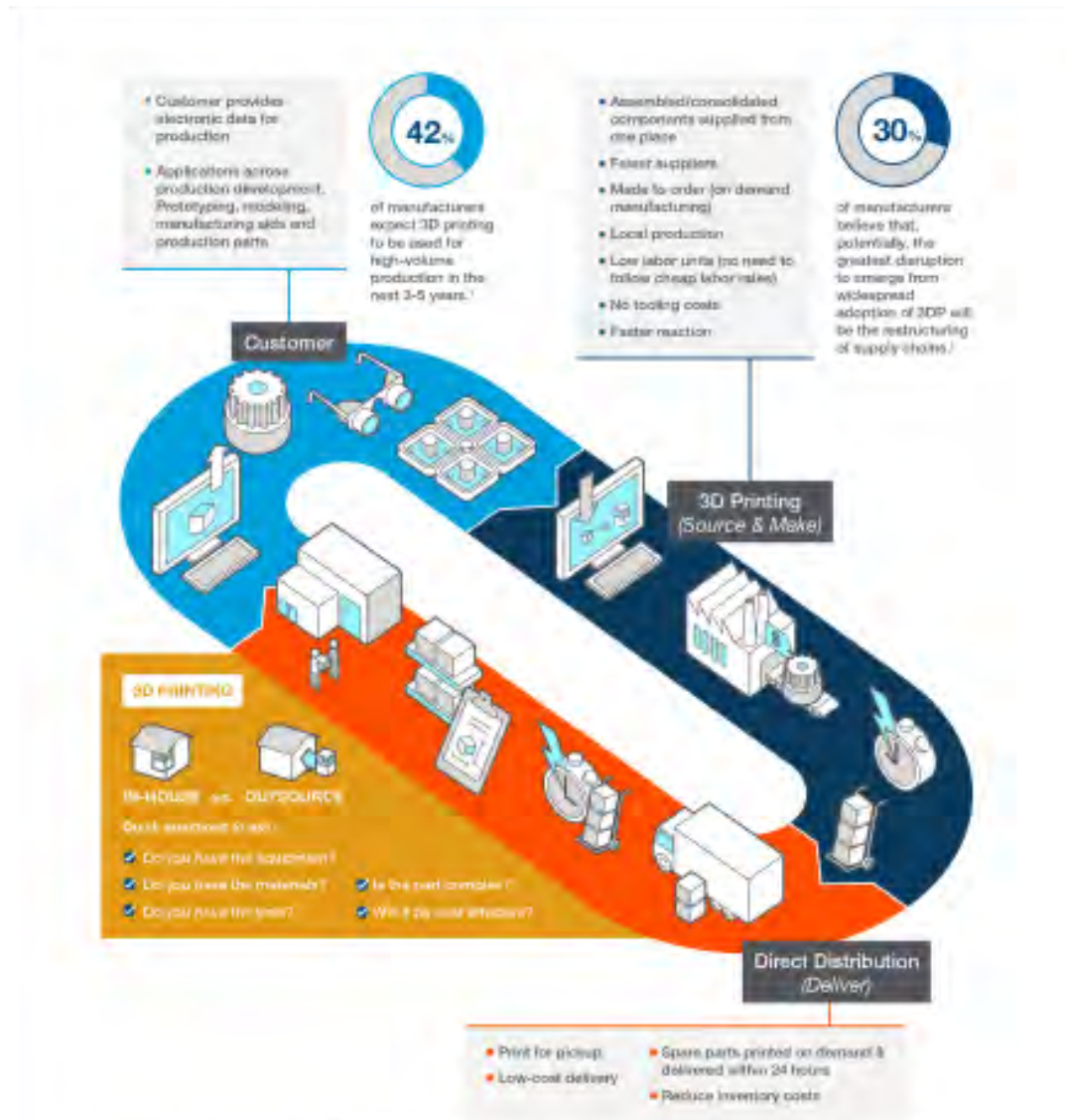


Figura 2: Impacto de la impresión 3D en la cadena de suministro. Fuente: Strasys

Así, en los últimos años, se ha empezado a usar esta tecnología en sectores como la automoción, aeronáutico, médico, dental, fabricación de exoesqueletos, etc. Casi todos los sectores han empezado a estudiar la

viabilidad de incorporar tecnología de fabricación aditiva en su proceso de fabricación. La libertad de diseño que ofrece la impresión FDM permite a los diseñadores olvidarse de las restricciones de los procesos de fabricación convencionales y les obliga a pensar de manera diferente en el diseño de piezas, pudiendo obtener piezas huecas y con canales internos imposibles de fabricar por otros métodos o a costes muy elevados.

Además, la complejidad geométrica que se puede conseguir no encarece el proceso; características como esbeltez, vaciados, canales internos, o espesores variables, son retos que las tecnologías tradicionales tienen resuelto mediante ensamblajes o procesos de coste muy elevado. Sin embargo, conviene indicar que la fabricación aditiva es competitiva cuando hablamos de series cortas o personalizaciones, a día de hoy sería impensable que compitiese con las tecnologías tradicionales para series de fabricación elevadas, por lo que es una tecnología complementaria a las existentes.

El sector médico ⁽⁸⁾ ha sido uno de los sectores pioneros y que más está apostando por la fabricación aditiva en sus procesos. Este cambio tan radical en el proceso permite diseñar productos con una mayor interacción con el usuario que se adaptan a las particularidades antropométricas de cada individuo sin afectar a los costes de fabricación. Así mismo, también es factible jugar con la porosidad de los materiales o incluso aportar simultáneamente varios materiales diferentes.

Se pueden, por tanto, obtener piezas complejas en un plazo de tiempo razonablemente corto, lo que permite obtener guías quirúrgicas, plantillas y biomodelos reales de la zona de operación para que el cirujano planifique la operación, o "scaffolds", estructuras porosas que propician el crecimiento de tejidos artificiales, como el óseo o el cartilaginoso.

Otros sectores de aplicación que están impulsando estas tecnologías son el aeronáutico y el de automoción, donde se exige un compromiso óptimo entre la resistencia mecánica de las piezas, su peso y la necesidad de utilizar geometrías complejas. La mayor ventaja para estos sectores es la posibilidad de fabricar piezas sin limitación de diseño. Además, se pueden crear estructuras "laticce" internas que proveen a las piezas de propiedades mecánicas notables y reducen el peso de la pieza final.

En el sector aeronáutico, esta tecnología se está utilizando actualmente para piezas de pocas prestaciones mecánicas (botones, conductos...) pero la mayoría de los fabricantes están invirtiendo para que en el futuro sea de uso generalizado. No obstante, uno de los mayores inconvenientes que presenta este sector es la necesidad de una normativa precisa de homologación y fabricación.

En el caso de la automoción, se está utilizando para la creación de prototipos que permitan la validación de procesos de ingeniería y diseño, con lo que se acorta el tiempo de puesta en mercado del producto. Asimismo, también se está utilizando en la fabricación de moldes y utillajes y en la fabricación de piezas especiales y complejas para series cortas. Un ejemplo de ello es la reducción de peso que obtuvo BMW en el asidero del coche al sustituir el interior sólido por nervios internos. Otros fabricantes que también la están utilizando son Mazda, Citroën o Renault.

En el sector de productos de consumo y electrónicos también está teniendo una fuerte penetración, ya que los diseñadores pueden ofrecer al mercado en un corto plazo productos personalizados, como por ejemplo juguetes, artículos del hogar, equipamiento deportivo, etc. Uno de los objetivos a futuro de este sector es la fabricación de textiles y calzado a gran escala.

En el campo de la electrónica también se espera que se produzca una revolución. Actualmente, ya se pueden imprimir componentes pasivos básicos (resistencias, diodos, bobinas...) y existen también materiales conductores imprimibles, mientras se sigue trabajando en nuevos materiales y en mejorar la conductividad de los mismos.

El Gráfico 4 muestra la incidencia de la fabricación aditiva por sectores según Wohlers Report 2021 ⁽¹⁾.

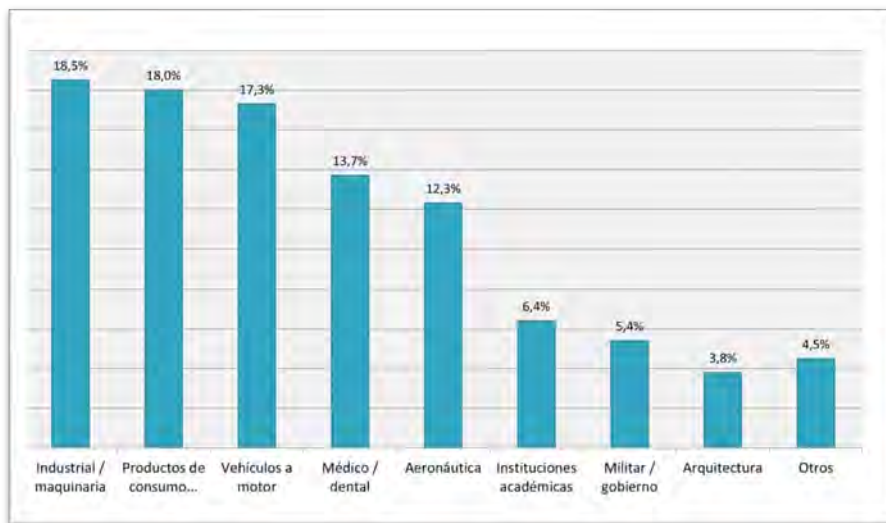


Gráfico 4: Incidencia de la fabricación aditiva en los diferentes sectores. Fuente: Wohler Report 2021

El Gráfico 5 es el "Hype Cycle" de Gartner de la impresión 3D, donde se muestra a lo largo de los años las expectativas y la evolución de la tecnología de impresión 3D asociado a los sectores industriales.

1. CONTEXTO ACTUAL

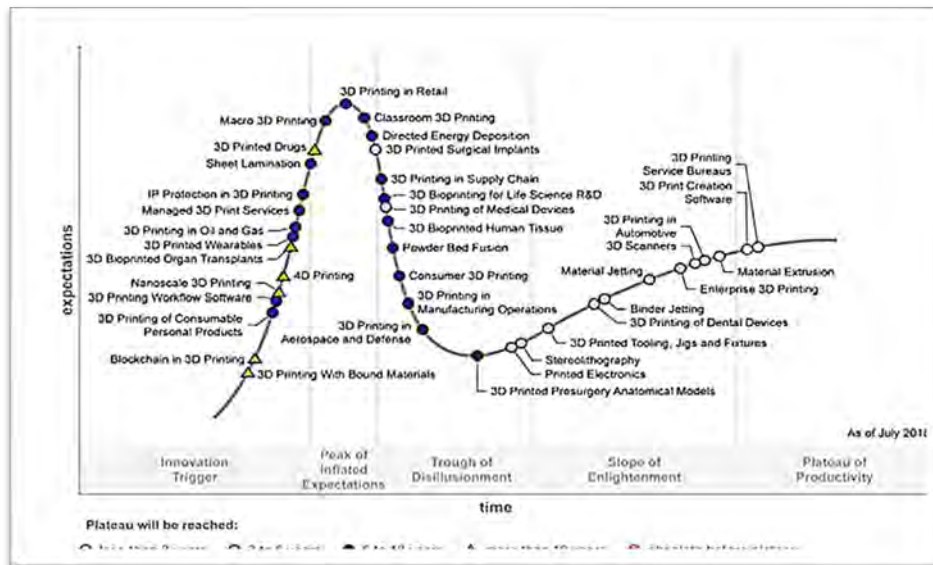


Gráfico 5: "Hype Cycle" de la impresión 3D de Gartner. Fuente: Gartner

Incluso el equipo "Made in Space" de la NASA ⁽⁹⁾ ha enviado una máquina de fabricación FDM a la Estación Espacial Internacional. Su objetivo es que esta tecnología sea capaz de imprimir piezas de repuesto en el espacio con los materiales que tienen a su alrededor, piezas propias de la nave, arena, etc. Además, están experimentando con materiales como el ABS y policarbonato acrilonitrilo butadieno (PC/ABS) para la impresión de componentes de un Rover, un medio de transporte que permite alojar a una pareja de astronautas durante días mientras estudian la superficie de otros planetas. Entre las piezas impresas en 3D en el Rover de la NASA se incluyen carcasas y respiraderos ignífugos, soportes para cámara, puertas grandes, una gran pieza que hace las veces de parachoques y diversos montajes personalizados.

Sin embargo, como ya se ha señalado anteriormente, la impresión FDM presenta numerosos retos que debe superar para lograr su implantación industrial, como son: escasez de materiales técnicos, control y estabilidad del proceso, repetitividad, tolerancias dimensionales, escalabilidad para grandes producciones, velocidad de fabricación y modelización.

Estos aspectos son fundamentales para la industria y es necesario solventarlos para que la fabricación aditiva por FDM se acabe implementando como un proceso industrial. Para ello es necesario obtener una buena caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales técnicos impresos, lo que actualmente es escaso (si lo comparamos con materiales como el ABS) en materiales como el polisulfuro de polifenileno (PPS). Sin una caracterización del material que nos permita diseñar piezas, pudiendo predecir cuál va a ser su comportamiento mecánico, resulta imposible diseñar y obtener piezas funcionales aplicables en la industria.

Numerosas empresas emergentes y grandes químicas están trabajando en el desarrollo de nuevos materiales técnicos que puedan ofrecer las prestaciones demandadas por la industria para la obtención de piezas funcionales. Pero tal y como se ha mencionado anteriormente, si no se dispone de una buena caracterización del material que permita predecir su comportamiento una vez impreso, así como el estudio de la influencia en la pieza final de los parámetros de impresión, difícilmente será posible diseñar y fabricar piezas que cumplan requerimientos técnicos, independientemente de las propiedades del material.

1.3 LA FABRICACIÓN ADITIVA

1.3.1 Tecnologías de fabricación aditiva

Con el objetivo de establecer un marco que ayude a satisfacer las necesidades de nuevas normas técnicas en el campo de la fabricación aditiva, la Organización Internacional de Normalización o Estandarización (ISO) y la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) han elaborado conjuntamente la estructura para el desarrollo de estándares en la fabricación aditiva. Para ello, han definido la fabricación aditiva como el proceso de unión de capa sobre capa de materiales para construir objetos desde un modelo digital en tres dimensiones, en contraposición a los métodos de fabricación "sustractivo", como el mecanizado.

Otro término ampliamente utilizado entre los usuarios y fabricantes de estas tecnologías es el de impresión 3D definido por la ISO y ASTM como la fabricación de objetos mediante la deposición de material utilizando un cabezal de impresión, boquilla o alguna otra tecnología de impresión.

Desde finales de la década de los años 80 una gran variedad de tecnologías de fabricación aditiva se han desarrollado y continúan su evolución hasta la fecha. En 1987, surge comercialmente la estereolitografía (SL), proceso que solidifica delgadas capas de un polímero líquido sensible a la luz ultravioleta mediante un láser.

A partir de 1990 comienza la comercialización de procesos como la fabricación de objetos laminados (LOM), el FDM y el sinterizado láser selectivo (SLS), solo por mencionar algunos de los procesos de fabricación aditiva. Después de más de dos décadas de investigación, desarrollo y uso, la industria continúa su expansión con la introducción de nuevas

1. CONTEXTO ACTUAL

tecnologías, métodos, materiales, aplicaciones y modelos de negocio. A continuación, se detallan las tecnologías más importantes de fabricación aditiva ⁽¹⁰⁾.

La tecnología denominada estereolitografía (SLA) que se muestra en la Figura 3, emplea un láser ultravioleta (UV) que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible de forma que, cuando está expuesta a radiación UV, solidifica construyendo así capa a capa la pieza. En este tipo de tecnología, los prototipos son sometidos a un curado posterior en un horno especial de rayos UV para obtener unas características mecánicas óptimas.

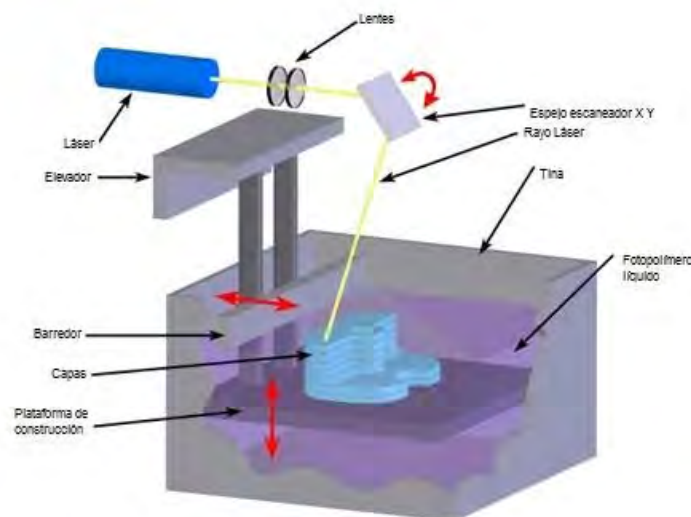


Figura 3: Tecnología SLA. Fuente: 3DNatives

El proceso de sinterización selectiva por láser (SLS) mostrado en la Figura 4 deposita una capa de polvo de unas décimas de milímetro en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. La pieza se va creando capa a capa con un láser CO₂ que sinteriza el polvo en los puntos seleccionados para construir la pieza.

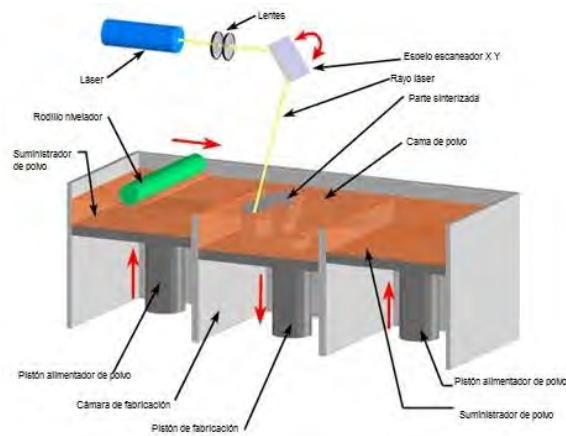


Figura 4: Tecnología SLS. Fuente: 3DNatives

En el proceso de laminación de láminas (LOM) mostrado en la Figura 5, cada capa se crea con una hoja de papel encolada que se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.

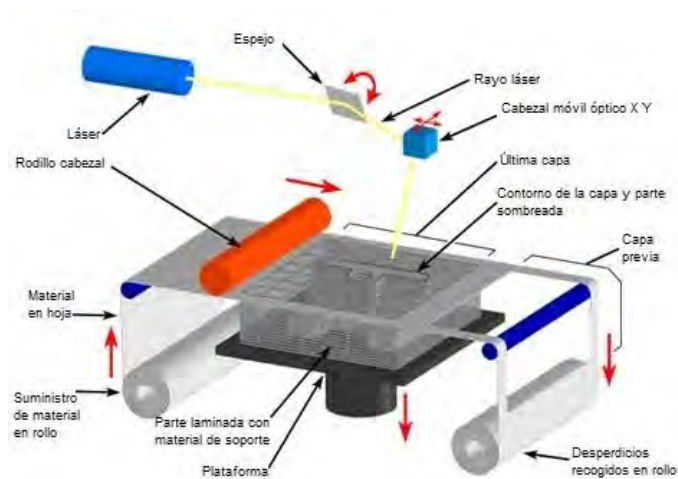


Figura 5: Tecnología LOM. Fuente: 3D Natives

La tecnología que se ha utilizado en esta investigación se denomina FDM. La Figura 6 muestra el proceso que consiste en una boquilla de extrusión

1. CONTEXTO ACTUAL

que se mueve en el plano XY horizontal, y cada capa se crea por la deposición de un filamento termoplástico por debajo de su punto de fusión.

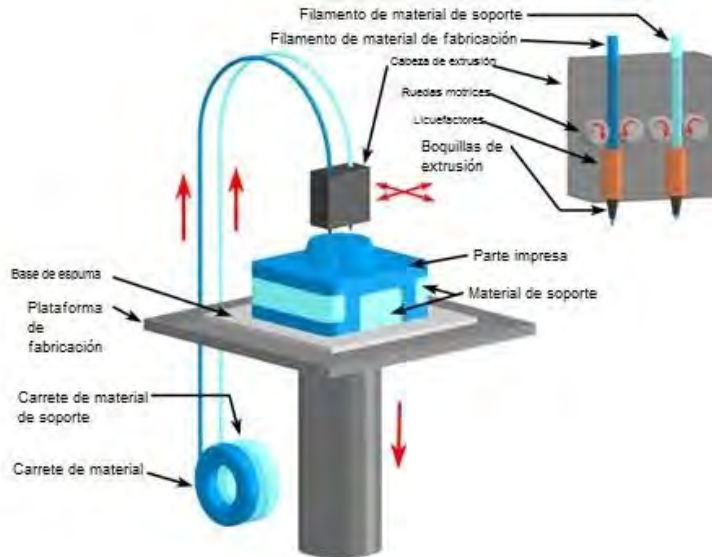


Figura 6: Tecnología FDM. Fuente: 3D Natives.

Las principales propiedades y materiales utilizados en las tecnologías descritas anteriormente se han resumido en la Tabla 1.

Tabla 1: Tecnologías de fabricación aditiva.

	SLA	SLS	LOM	FFF
Tecnología	Polimerización	Sinterización	Corte laminado	Deposición de hilo
Láser	SI	SI	SI	NO
Tamaño máximo de las piezas en centímetros	51 × 51 × 60	Diámetro de 38	25,4 × 33 × 38	30,5 × 30,5 × 30,5

	SLA	SLS	LOM	FFF
Ventajas	Tecnología más madura, rápido, precisión del 2 %	Material más barato, más variedad de materiales, no hacen falta soportes	Precisión hasta 0,1 %, de 5 a 10 veces más rápido que otros métodos, material más barato	Material más barato, inodoro, no hacen falta soportes, más rápido que el SLA
Desventajas	Modelos traslúcidos, quebradizos, algunas partes requieren soportes	Tolerancias del 5 %, el proceso es más nuevo, salvo el PVC, todas las piezas tienen un aspecto laminado	Deformación en las láminas	Apariencia granulada

A pesar de las diferencias que se han visto entre los procesos de fabricación aditiva, todos ellos tienen en común un esquema de los pasos que hay que seguir desde la conceptualización de la idea hasta la obtención de la pieza impresa, siendo los cuatro primeros pasos críticos para poder asegurar el producto final. Dicho proceso es el siguiente:

1. Generación del modelo digital 3D de la pieza que se quiere construir. Se debe partir de un modelo CAD en 3D que cumpla con los requerimientos, y en cuyo diseño se hayan tenido en cuenta y aplicado todas las reglas de diseño o condiciones aplicables a la tecnología que se va a utilizar. Además, dichos requerimientos deben ser validados previamente. Es importante destacar que dichos requerimientos no serán los mismos, aunque se trabaje con el mismo material, si la tecnología de impresión es diferente. Como ya se ha

1. CONTEXTO ACTUAL

- mencionado en esta investigación se ha estudiado el PPS, aplicando la tecnología de FDM.
2. Conversión del modelo a un lenguaje triangular estándar (formato STL), es decir, las superficies del sólido generado se aproximan a triángulos. Los parámetros que utilice el software para realizar esta conversión influirán en el resultado de la pieza final, pudiendo lograr mayor o menor detalle.
 3. Manipulación del archivo y transferencia de datos a la máquina: el modelo 3D se divide en capas, este proceso que se denomina "slicing".
 4. Establecimiento de parámetros de construcción. Consiste en la definición de parámetros como la orientación de la construcción, estructuras soporte, si son necesarias para la impresión de la pieza, temperaturas del proceso (material, cámara, cuna), tipo de relleno, etc. Estos parámetros se establecen con softwares específicos para ello.
 5. Construcción de la pieza. Hay que tener en cuenta que antes de comenzar con la construcción de la pieza es necesaria la preparación correcta del material, en el caso de FDM será necesario eliminar la humedad del mismo para evitar porosidad y puntos frágiles en la pieza final.
 6. Extracción de la pieza, una vez acabada la impresión.
 7. Procesamiento posterior. Según el proceso de fabricación será necesario someter a la pieza a un procesamiento posterior, pudiendo consistir en un lijado para obtener un acabado superficial óptimo o

incluso un proceso de recocido para aumentar las propiedades mecánicas de la pieza.

1.3.2 Fabricación por extrusión de material

La presente tesis se enfoca en el proceso FDM[®], término que es propiedad de Stratasys Inc., mientras que el término equivalente acuñado por los miembros del proyecto RepRap⁽¹¹⁾ para proporcionar una frase que pueda ser usada sin limitaciones legales es fabricación por filamentos fundidos (FFF). El proceso de FDM descrito en el apartado anterior se divide, simplificando, en los siguientes pasos que se muestran en la Figura 7.

1. Diseño: El objeto que se desee imprimir se puede diseñar en cualquier programa CAD de los actualmente existentes (Autocad, Catia, Solid Works, Rhinoceros, Microstation, Inventor...) siempre y cuando pueda exportarse a un fichero tipo ".stl", que es el formato con el que trabajan los softwares laminadores de impresión 3D. La Figura 8 muestra el paso de conversión de un fichero 3D a un fichero ".stl".⁽¹²⁾

1. CONTEXTO ACTUAL

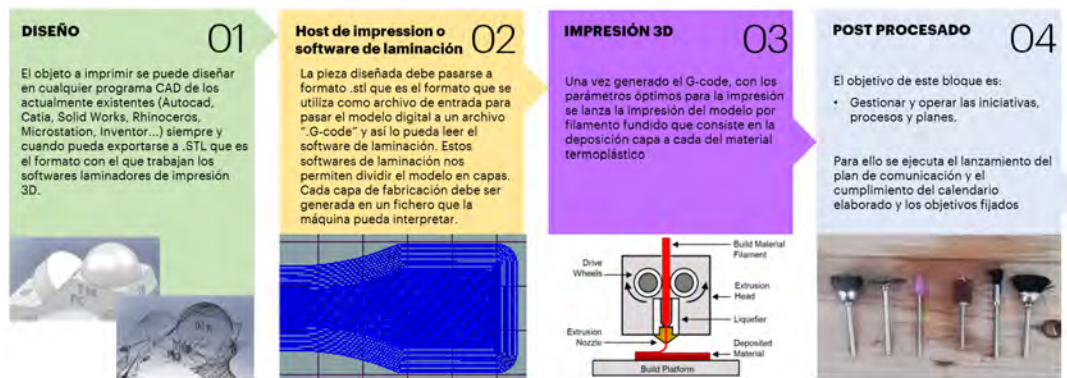


Figura 7: Esquema de impresión FDM. Fuente: Elaboración propia

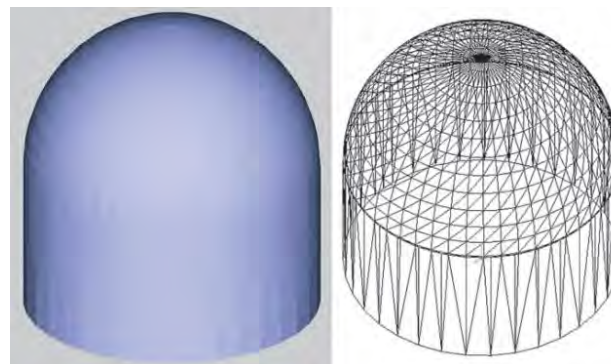


Figura 8: Conversión de un archivo 3D a formato .stl. Fuente: Stratasys

2. "Host de impresión" o software de laminación: La pieza diseñada en formato ".stl" que es el formato que se utiliza como archivo de entrada se convierte en un archivo "G-code" para que lo pueda leer el "host de impresión" o software de laminación. Estos softwares de laminación dividen el modelo en capas, ya que, al ser un proceso de fabricación por capas, cada capa debe ser generada en un fichero que la máquina pueda interpretar. De este modo, el fichero "G-code" generado es el que contiene las órdenes a ejecutar por la impresora 3D. Existen diferentes softwares de código abierto o cerrado para la conversión, los más utilizados a día de hoy son Slic3r, Cura,

Simplify3D, y Kisslicer, siendo este último el que se ha utilizado en esta investigación por ser el que utiliza la máquina de impresión que se ha empleado. La Figura 9 muestra la comparativa entre diferentes softwares de laminación para creación de una capa de patrón rectilíneo.

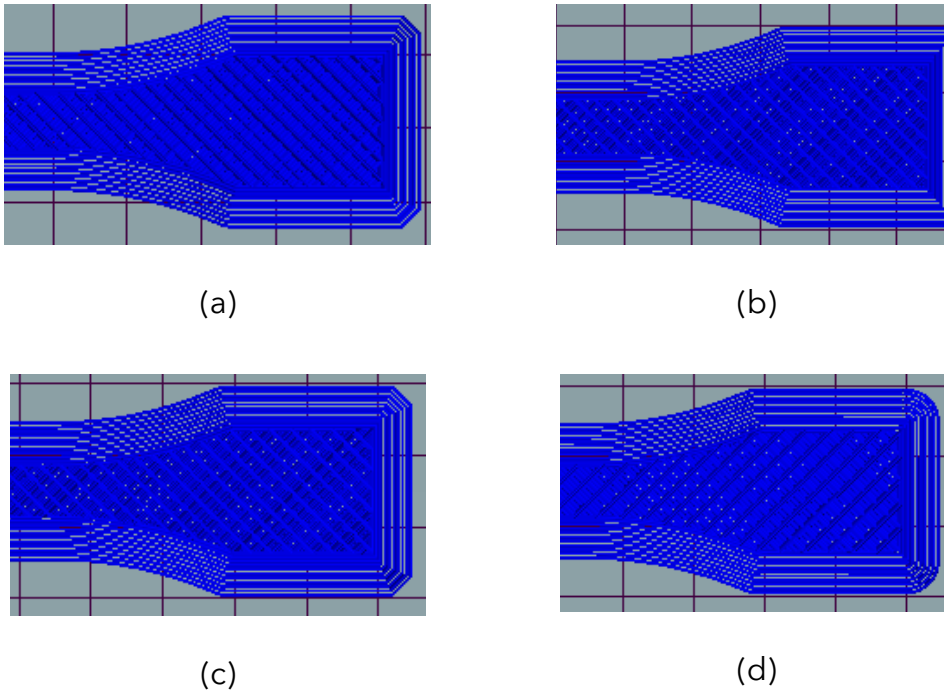


Figura 9: Software (a) Slic3r, (b) Cura, (c) Simplify, (d) Kisslicer. Fuente: elaboración propia

Los tres pasos que se han descrito se ilustran en la Figura 10 sobre una pieza tipo, donde se puede ver desde la generación del modelo CAD 3D, la conversión de dicho modelo a un formato ".stl" y finalmente el laminado de dicho modelo a un formato "G-code" que la máquina pueda interpretar y que contenga las órdenes de impresión de cada capa⁽¹³⁾.

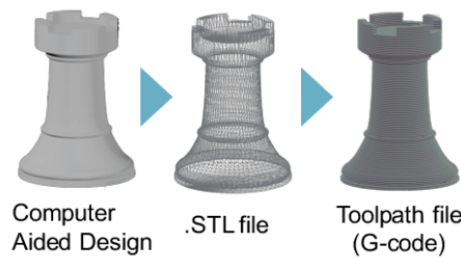


Figura 10: Fases en el proceso de fabricación por capas. Fuente: Proc. ACM Interact

3. Impresión 3D: Una vez generado el "G-code" con los parámetros óptimos para la impresión, se lanza la impresión del modelo por filamento fundido, que consiste en la deposición capa a capa del material termoplástico. La selección de los parámetros de impresión es determinante para una correcta impresión, y el estudio de estos parámetros en función del material es uno de los campos que más se está investigando en los últimos años. En esta tesis también ha sido necesario realizar dicho estudio para el material PPS por la escasez de estudios de impresión que hay sobre este material. Alguno de estos parámetros son los siguientes: temperatura de filamento, de cuna y de cámara, patrón de impresión o porcentaje de relleno, entre otros. Estos parámetros se configuran en función de la calidad de la pieza a obtener, por ejemplo, menor porcentaje de relleno si se quiere una impresión rápida para validar un modelo no funcional, pero otros, como la temperatura del filamento o de la cuna, son parámetros fijos para cada material y si se modifican fuera del rango de tolerancia la unión entre las capas es defectuosa y la pieza resultante no es válida o no se consigue llegar a imprimir.

Durante el proceso de impresión, el material en formato de filamento (de diámetro 2,85 mm o 1,75 mm, según la impresora) se calienta por

el extrusor y se deposita a través de una boquilla sobre la cuna o plataforma. El diámetro de la boquilla, la temperatura de extrusión y la de cuna, son valores críticos en la impresión que se deben definir correctamente para una óptima impresión. La fabricación de la pieza es capa a capa, lo que quiere decir que la pieza va creciendo en el eje Z, siendo cada capa la sección que se va imprimiendo para un determinado valor de la coordenada. La Figura 11 muestra el esquema de este proceso de impresión capa a capa.

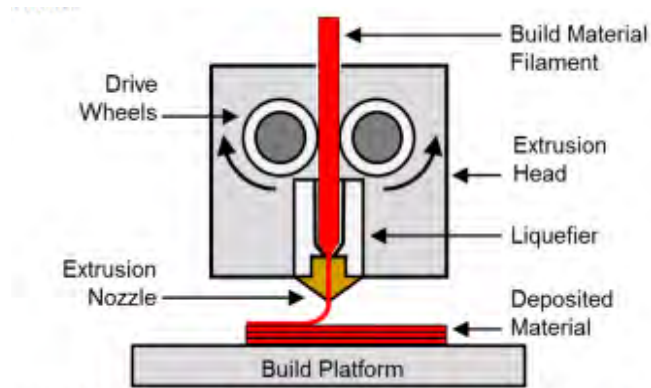


Figura 11: Esquema de funcionamiento. Fuente: 3D Natives

4. Procesamiento posterior: El último paso es de procesamiento posterior y/o eliminación de soportes y acabado final de la pieza. Este paso no es obligatorio, y en función de la aplicación final de la pieza, será necesario aplicar un procesamiento posterior u otro.

Los post-procesamientos posteriores más utilizados son:

- a. Aplicación a la pieza impresa de procesos químicos o abrasivos, con objeto de mejorar el acabado superficial
- b. Adición durante la impresión de la pieza de insertos físicos

1. CONTEXTO ACTUAL

- c. Uniones con otras piezas fabricadas por FDM mediante procesos térmicos o químicos
- d. Aplicación de sellados en determinadas partes de las piezas impresas
- e. Aplicación de pintura y recubrimientos
- f. Aplicación a las piezas impresas de procesos de mecanizado: barrenado, torneado, rimado y fresado con el objetivo de mejorar la exactitud de la pieza

1.4 MATERIALES DE IMPRESIÓN POR FDM

El abanico de materiales comerciales está continuamente creciendo para aumentar las aplicaciones de la tecnología FDM. En el mercado se pueden encontrar filamentos flexibles, con fibras reforzadas, fibras de madera o cobre, diferentes tipos de nylon, incluso filamentos que cambian su color con la temperatura a la que son expuestos, con partículas reflectantes y con partículas de hierro, entre otros. Sería difícil hacer una lista de todos, puesto que la gama disponible aumenta constantemente. Además, la mayoría de los fabricantes no ofrecen hojas de características técnicas de sus productos, y hay una gran variabilidad en las propiedades para el mismo material y tipo de filamento según el fabricante, por lo que resulta difícil conocer las propiedades de los mismos.

Los materiales más comunes y usados hoy en día se dividen en materiales no técnicos y técnicos. Los más comunes e investigados son los no técnicos, ya que son materiales termoplásticos con los que se puede trabajar por debajo de los 300 °C de extrusión, temperatura con la que pueden trabajar casi todas las máquinas de impresión por FDM. El PPS, material objeto de estudio de esta investigación, entra en la categoría de material técnico.

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso FDM es un proceso de fabricación por capas, por lo que es necesario que la unión entre estas sea lo más fuerte y homogénea posible (sin poros) para obtener una pieza de calidad. Esta tecnología funciona mejor para polímeros de naturaleza amorfa que para polímeros altamente cristalinos. Tal y como estudiaron Jafferson y Chatterjee⁽¹⁴⁾ los polímeros amorfos son extruidos en forma de pasta viscosa y se ajustan mejor al proceso que los de baja viscosidad. Esto

es debido a que, en el caso de los polímeros amorfos, al no poseer un punto de fusión definido, fluyen mejor al aumentar la temperatura, lo que favorece la unión de las capas. Además, la viscosidad a la cual los polímeros amorfos pueden ser extruidos bajo presión es lo suficientemente alta para que conserven su forma después de la extrusión y, por lo tanto, sean capaces de solidificar rápidamente formando uniones homogéneas entre las capas.

1.4.1 Materiales no técnicos

Los materiales no técnicos son los que más se han estudiado y sobre los que existe más bibliografía, dado que son materiales que no requieren altas temperaturas de extrusión y, por lo tanto, gran parte de las impresoras de código abierto existentes en el mercado pueden imprimirlos de forma óptima. Entre estos materiales nos encontramos el ABS, PLA, combinaciones con madera, cobre, etc. Son materiales cuyas temperaturas de extrusión rondan entre los 180 °C y los 250 °C y la temperatura de cuna los 50 °C.



Estos materiales son ampliamente usados en la industria para validación de conceptos, prototipos no funcionales, o para piezas con acabados estéticos (siendo en este caso necesario realizar un procesamiento posterior).

La siguiente tabla muestra la descripción y uso de algunos de estos materiales, así como imágenes de piezas impresas.

Tabla 2: Descripción y uso de materiales no técnicos.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
ABS	Es un material muy asequible, lo que permite a los ingenieros y diseñadores realizar varias iteraciones, realizando muchos prototipos y llevar a cabo pruebas más exhaustivas. Tiene alta resistencia al impacto y muy buena tolerancia a las altas temperaturas. Pero presenta baja resistencia química ante disolventes y ácidos.	
ABSi	Material con el que se pueden imprimir piezas capaces de permitir el paso de la luz, utilizándose en la industria automotriz principalmente. Las piezas traslúcidas también permiten supervisar el movimiento de un fluido, por ejemplo, en prototipos de dispositivos médicos.	
ABS-M30i	Material que se caracteriza por su fuerza y dureza, siendo al mismo tiempo un material liviano y resistente. Es un material biocompatible y esterilizable por rayos gamma, lo que permite a los diseñadores de los sectores médico, farmacéutico y de envases de alimentación producir modelos para planificación quirúrgica, herramientas y envases.	
ABS-ESD7	Material con capacidad de disipación electrostática que permite a los fabricantes de componentes electrónicos ampliar el uso de la impresión 3D pudiendo usarlo en la línea de montaje.	

1. CONTEXTO ACTUAL

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
ASA	Es un material que combina robustez y resistencia a los rayos UV con buena estética. Se usa para fabricar prototipos duraderos para pruebas de ajuste, forma y función	
Flexible: TPE, Soft PLA	Los materiales flexibles son elastómeros termoplásticos (TPE) muy usados para elementos protectores, decorativos, juguetes, y el sector médico y robótica. Estos materiales se imprimen a unas temperaturas en torno a los 210 °C - 230 °C. Son materiales resistentes a la fricción y al desgaste.	

1.4.2 Materiales técnicos

Entre los materiales técnicos o de ingeniería destacan el PC-ABS, policarbonato (PC), poliéter imida (PEI) nombre comercial ULTEM, sulfuro de polifenileno (PPS), filamentos con fibra de carbono, poliéter éter cetona (PEEK), poliamida (PA) etc. Estos materiales se imprimen a unas temperaturas mucho más elevadas entre los 340 °C y 450 °C y requieren una temperatura de plataforma en torno a los 130 °C con unas condiciones ambientales también atemperadas. La impresión 3D de termoplásticos técnicos se traduce en piezas más resistentes y prototipos con propiedades similares al producto final. Sin embargo, el rango de precios de estos materiales técnicos es elevado.

En la presente tesis se va a trabajar con PPS, ya que tiene una procesabilidad relativamente fácil en comparación con otros termoplásticos de ingeniería. En 1888, Friedel y Crafts descubrieron el PPS, pero no fue hasta el 1967

cuando se desarrolló la metodología de producción y hasta 1972 cuando Phillips Petroleum Company lo comercializó. Desde entonces, se ha producido y utilizado en las industrias aeroespacial, automotriz y de renovables como la energía eólica.



Se trata de un material termoplástico semicristalino con una cadena asimétrica rígida compuesta por anillos de fenileno y átomos de azufre. Es un polímero con buena estabilidad dimensional a altas temperaturas, resistencia química e ignifugación retardante de llama, es resistente al envejecimiento y a la radiación, siendo además un material fácil de procesar. Kishore et al. ⁽¹⁵⁾ formularon termoplásticos semicristalinos de alto rendimiento con PPS y poliéter cetona y analizaron las propiedades reológicas y las propiedades térmicas de estos materiales y determinaron los parámetros más importantes para la impresión de los mismos.




Fitzharris et al. ⁽¹⁶⁾ por su parte, analizaron el alabeo de las piezas impresas en PPS y en PP debido a tensiones residuales durante el enfriamiento y para diferentes velocidades de impresión mediante análisis de elementos finitos. Magri et al. ⁽¹⁷⁾ estudiaron la influencia de la temperatura de la boquilla, la velocidad de impresión y el grosor de la capa para optimizar el módulo de Young y la resistencia a la tracción. Concluyendo que el grosor de la capa fue el parámetro de impresión que más influyó en el módulo de Young y que los parámetros óptimos de impresión se definen para una temperatura de la boquilla de extrusión de 338 °C, una velocidad de impresión de 30 mm/s y un grosor de la capa de 0,17 mm.

La siguiente tabla muestra la descripción y uso de estos materiales, así como imágenes de piezas impresas con dichos materiales.

1. CONTEXTO ACTUAL

Tabla 3: Descripción y uso de materiales técnicos

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
PC-ABS	<p>El policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno (PC-ABS) es un material que combina las mejores características del policarbonato y el material ABS, combinando la resistencia al calor del PC y la resistencia a la flexión del ABS, obteniendo una de las resistencias al impacto más altas de cualquier termoplástico FDM. Es perfecto para el prototipado funcional, herramientas duras y piezas de producción, con mejores propiedades mecánicas y resistencia a la temperatura que el ABS. Se usa en aplicaciones tales como el prototipado de herramientas potentes y en la fabricación de equipos industriales.</p>	
Nylon 12CF	<p>El nylon 12 con fibra de carbono (nylon 12CF) combina nylon 12 y fibras de carbono para lograr mayor resistencia a la flexión y relación rigidez/peso. Su impresión por FDM es más limpia que SLA con propiedades de resistencia equivalentes. Se caracteriza por tener una resistencia y rigidez similar al metal en ciertas aplicaciones (para validar diseños con prototipos funcionales de fibra de carbono, en lugar de prototipos de metal costosos y que toman mucho tiempo).</p> <p>Este material es ideal para aplicaciones que exigen una gran resistencia a la fatiga, entre las que se incluyen piezas de encaje a presión repetitivo e inserciones de ajuste por fricción.</p>	

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
PC	<p>El policarbonato (PC) es un material de dimensión estable, resistente al calor y con buena resistencia al impacto. Su rigidez y estabilidad permiten que las piezas impresas conserven su forma y la precisión dimensional. La resistencia de alto impacto hace que sea un material duro, idóneo para aplicaciones de alta durabilidad, como el prototipado funcional y herramientas de manufactura. Es uno de los materiales más utilizados en la industria, se caracteriza por su alta resistencia a la tracción, a la flexión y a la temperatura. Es ideal para necesidades de prototipados exigentes, creación de herramientas y montajes.</p>	
PEI	<p>Este material ofrece una resistencia térmica, química y al desgarrar mayor que las de cualquier termoplástico de FDM. Se suelen imprimir con él herramientas médicas como guías quirúrgicas que soportan la esterilización mediante autoclave, moldes resistentes a la temperatura, incluso componentes aeroespaciales externos a la cabina.</p>	
PEI+PC	<p>Termoplástico de alto rendimiento ignífugo, con una alta relación resistencia/peso y excelente resistencia al impacto. También posee características favorables de llama, humo y toxicidad (FST). Es un material termoplástico ideal para aplicaciones aeroespaciales, militares y de automoción gracias a su elevado índice resistencia/peso. Permite a los ingenieros de fabricación y diseño imprimir en 3D prototipos funcionales avanzados.</p>	

1. CONTEXTO ACTUAL

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
PPS	El Sulfuro de polifenileno un material más resistente que el policarbonato, este material ofrece altísima resistencia térmica comparado con cualquier termoplástico FDM, además de una buena resistencia mecánica y resistencia a agentes químicos, petróleo y disolventes. El PPS también se puede esterilizar mediante métodos con vapor, autoclave, plasma, químicos y radiación.	
PEEK y PSU	La polietercetona (PEEK) y la Polisulfona (PSU) son materiales que tienen muchas ventajas frente a otros polímeros y puede reemplazar metales. Son utilizados en muchas industrias, especialmente adecuados para la producción de series pequeñas, diseños especiales, prototipos y utillaje. Se utilizan en sectores como la automotriz, componentes electrónicos, semiconductores e ingeniería mecánica para la fabricación de: casquillos de fricción, rodillos, arandelas de empuje, engranajes, etc. En el sector aeroespacial se usan para aplicaciones de resistencia al calor y al choque.	

1.5 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EN EL PROCESO DE IMPRESIÓN Y LOS MATERIALES

En cualquier proceso de fabricación, los parámetros de proceso y el material afectan a las propiedades de la pieza final. En el caso de la impresión por FDM, el estudio de los parámetros de proceso es un campo muy poco conocido, ya que según el material a imprimir los parámetros deben ser diferentes. Si bien es cierto que se han realizado muchos estudios en torno a los parámetros de impresión de materiales comunes como el ABS y PLA, hay menos estudios para materiales técnicos, principalmente por las limitaciones existentes para su procesado, no existir en el mercado hasta hace bien poco y por carecer de máquinas de impresión capaces de procesarlos.

En el proceso FDM, la orientación, la dirección de impresión y los parámetros de impresión son variables clave en el comportamiento mecánico de la estructura. Es un proceso en el que la pieza resultante tiene propiedades anisótropas, dado que se producen dos tipos de uniones: entre hilos de una misma capa y entre las capas. Estas uniones dependen de la energía térmica de los hilos y de la unión de las cadenas poliméricas de cada uno de los hilos, de tal forma que, al transcurrir un tiempo entre capa y capa, la inferior se enfría y pierde energía térmica, por lo que la unión entre capas es más débil. En consecuencia, los hilos de la misma capa tienen una unión más fuerte con respecto a las uniones con los hilos de diferentes capas. Dada la naturaleza del material a estudiar en la presente tesis, que precisa condiciones de altas temperaturas de extrusión, este será uno de los parámetros a controlar durante el proceso de impresión.

1. CONTEXTO ACTUAL

No obstante, tal y como se ha expuesto anteriormente ⁽¹⁷⁾, de manera genérica, la gran mayoría de los estudios concluyen que los parámetros de impresión que más afectan en la impresión y en el acabado de las piezas son: porcentaje de llenado, tipo de patrón, ángulo de orientación, espesor de capa, temperatura de extrusión, temperatura de la cuna y la dirección de impresión o dirección de fabricación.

La orientación de una pieza también se puede denominar dirección de fabricación, ya que hace referencia a la colocación de la pieza respecto al plano de coordenadas de la máquina. Las capas se crean durante el "slicing" en el plano XY, y estas se van apilando unas sobre otras en la dirección del eje Z. Existen tres direcciones de crecimiento, en el eje X, en el Y o en el Z tal y como se muestra en la Figura 12 ⁽¹⁸⁾.

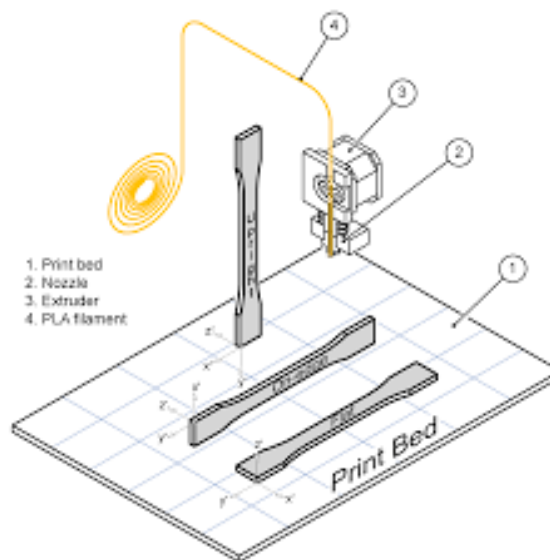


Figura 12: Direcciones de crecimiento. Fuente: Polymers

Dentro de cada capa se distinguen dos tipos de trayectorias, que son el contorno y la trama, y forman el "build style", o trayectoria que sigue la boquilla para fabricar cada capa.

El contorno es la trayectoria que delimita las superficies exteriores e interiores de cada capa. La cantidad de capas de contorno que tenga una pieza va a influir en su capacidad de absorber impactos, siendo mayor cuantas más capas de contorno tenga. Omar Ahmed ⁽¹⁹⁾ analizó mediante SEM el contorno de dos geometrías, una con un contorno de capa única y otra con un contorno de 10 capas y observó que, a mayor número de capas de contorno, menor porosidad y, por tanto, mejores prestaciones mecánicas de la pieza.

La trama es la trayectoria que recorre la boquilla para rellenar la sección interior delimitada por los contornos (ver Figura 13). En cuanto a la trama, Ahmed estudió cómo afectan el "gap" (distancia entre zonas sin material), la trayectoria y la orientación, concluyendo que, bajo comportamiento dinámico, el "gap" es el que tiene mayor influencia. Si es nulo o cero, se disminuye el coeficiente de transmisión de calor y, por tanto, aumentan las tensiones internas que fragilizan el material. En cambio, en el caso de "gap" positivo, aunque se generan poros, se minimizan las tensiones internas y se favorece la fluidez del material, por lo que se pueden cerrar los "gaps" generados.

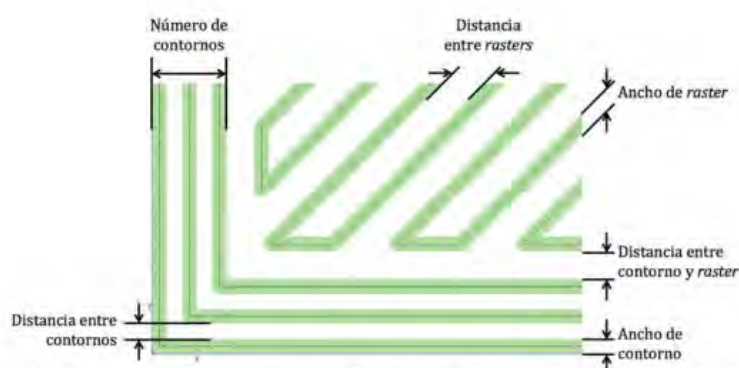


Figura 13: Contorno y trama. Fuente: Science Direct 2017

Bernat Martí Rodríguez ⁽²⁰⁾ estudió la influencia de los parámetros de impresión en el PLA concluyendo que son los siguientes (por orden descendente de influencia): orientación, altura de capa y densidad de relleno. De tal modo que, si queremos obtener piezas con mayor resistencia a la tracción deben estar orientadas 0° en el plano OZ, y si queremos con el mayor alargamiento elástico posible, a 45° en el OX. Además, a mayor altura de capa mejor resistencia, pero peor alargamiento elástico.

Miguel Fernandez Vicente ⁽²¹⁾ ha demostrado con sus investigaciones que la fuerza de resistencia a la tracción está directamente relacionada con el porcentaje de relleno. En concreto, para el ABS se ha demostrado que, a mayor porcentaje de relleno, mayor fuerza de resistencia a tracción, de forma que un patrón rectilíneo con un 100 % de relleno tiene valores de la resistencia a tracción en torno a un 1 % inferior al dato suministrado por el fabricante de la materia prima. Sin embargo, para valores de relleno por debajo del 100 % la estructura de nido de abeja es la que da mejores resultados de resistencia a tracción.

Constance Ziemian ⁽²²⁾ estudió la relación entre las propiedades mecánicas del ABS y el comportamiento anisotrópico del mismo al imprimirse por FDM, verificando cómo la unión de las capas es uno de los factores que más influyen en el módulo elástico, de tal forma que, modificando el patrón de impresión se consiguen mejores propiedades mecánicas. La dirección de fabricación más adecuada será aquella que tiene las uniones entre capas de modo perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. Además, si los hilos están alineados con la dirección de la fuerza, la pieza es más resistente a tracción, y a la inversa si hablamos de compresión. Por tanto, si la orientación de la dirección de los hilos, y la densidad de impresión es tal que los hilos son paralelos a la dirección del esfuerzo, la resistencia de la pieza impresa mejorará.

Jaret C Riddick et al. ⁽²³⁾ fueron más allá al estudiar cómo diferentes combinaciones de dirección de crecimiento y orientación de patrón, que producen secciones con similar orientación, tienen valores de la resistencia a tracción muy diferentes. Esto es debido a cómo es la unión entre las capas mientras se está imprimiendo, de tal forma que, si cuando se está construyendo cada capa, se forman uniones de refuerzo que favorecen la adhesión, las propiedades mejoran. Cuando el relleno se genera paralelo al contorno la unión es más débil, para evitarlo se puede realizar un relleno en zigzag, sin embargo, este tipo de relleno lleva mucho tiempo y gasto de material.

Ognjan Luzanin ⁽²⁴⁾ estudió la influencia del espesor de capa, ángulo de deposición y porcentaje de relleno en el comportamiento a flexión, concluyendo que el espesor de capa es el parámetro que más influye en la fuerza a flexión del material, y que la relación entre ángulo de deposición y el porcentaje de relleno también tiene una influencia relevante.

M. Velasco Peña ⁽²⁵⁾ demostró cómo el ABS presenta una mayor resistencia a tracción a mayor espesor de capa y menor porosidad y ángulo de trama (0°-90°), debido a que se aumenta el área transversal que soporta la carga de las probetas.

Numerosos estudios avalan que existe una relación casi lineal entre la velocidad de impresión y la temperatura para materiales como el ABS (240 °C) y el PLA (220 °C). Pero esta conclusión no es aplicable cuando estamos hablando de materiales técnicos, con temperaturas de extrusión muy elevadas, en torno a los 400 °C, y donde el diseño del propio extrusor desempeña un papel muy importante. Aun así, la tecnología FDM tiene una relación directa entre la velocidad de impresión/temperatura de extrusión, y el acabado y prestaciones que se pueden obtener.

Si la temperatura de extrusión es muy baja, el filamento no fluye correctamente, por lo que pueden quedar huecos entre las capas, lo que origina que se separen (mala adherencia), si por el contrario la temperatura es demasiado alta, también se puede producir degradación térmica y porosidad interna por la generación de gases. Además, la presencia de aditivos de coloración también afecta en la temperatura de extrusión. En la presente tesis se trabajará con material sin colorear para eliminar factores que puedan dar lugar a conclusiones erróneas.

Otro parámetro que afecta es la temperatura de la cuna de impresión, de forma que un aumento en la temperatura de la cuna provoca una mayor temperatura en las capas, lo que provoca una difusión mayor y se consigue una mejor unión. Un aumento en la temperatura de la boquilla provoca el mismo efecto porque, aunque no aumente la temperatura de la capa en reposo, lo hace la de la nueva capa extruida.

En el caso de los materiales técnicos los parámetros de impresión y su influencia en el proceso es diferente. Así lo demostró Jason Cantrel ⁽²⁶⁾ al realizar una comparación de las propiedades mecánicas entre el ABS y el Policarbonato. No obstante, de manera general, cuanto más densidad de relleno, mayor cantidad de hilos que actúan como fibras de refuerzo y, por tanto, mejorarán su rigidez y resistencia a la deformación.

Wenzhen Wu ⁽²⁷⁾ y su equipo verificaron cómo el espesor de capa y la orientación influyen en las propiedades mecánicas de los materiales ABS y PEEK, observando que para el PEEK la mejor orientación es 0°/90°, siendo el espesor de capa óptimo de 0,3 mm. Así mismo constataron que las propiedades mecánicas son inferiores en ambos materiales si las comparamos con la materia prima y las propiedades de inyección, pero que el PEEK tiene en torno a un 110 % mejores propiedades mecánicas que el ABS por lo que parece un material muy interesante para la industria.

En cualquier caso, aún queda mucho por investigar en torno a los mejores parámetros y condiciones óptimas para la impresión de materiales técnicos. En el caso de los termoplásticos semicristalinos como el PEEK, es necesario ajustar la temperatura de la cuna y la temperatura ambiente para conseguir la mejor adherencia entre capas, y, por tanto, mejores propiedades mecánicas, tal y como estudió Sun Xiaoyong ⁽²⁸⁾. Así, las propiedades mecánicas mejoran cuando el material se imprime ajustando las diferentes temperaturas que influyen en el proceso. Por su parte, el porcentaje de relleno influye en las propiedades mecánicas de tal forma que, para un porcentaje del 100 % las propiedades mecánicas son mejores que para un porcentaje del 50 %.

Como se ha mencionado anteriormente, si la fuerza está alineada con los hilos extruidos, la pieza resistirá mucho más que si está alineada con la dirección de fabricación, es decir, si los hilos están alineados con la fuerza, actúan como fibras de refuerzo aumentando la resistencia mecánica. Por lo tanto, para mejorar la resistencia de una pieza, siempre habrá que orientarla al construirla de tal manera que las tensiones a resistencia a tracción mayores estén alineadas con los contornos más largos. En la Figura 14 se muestra detalle macroscópico de una pieza impresa por FDM.

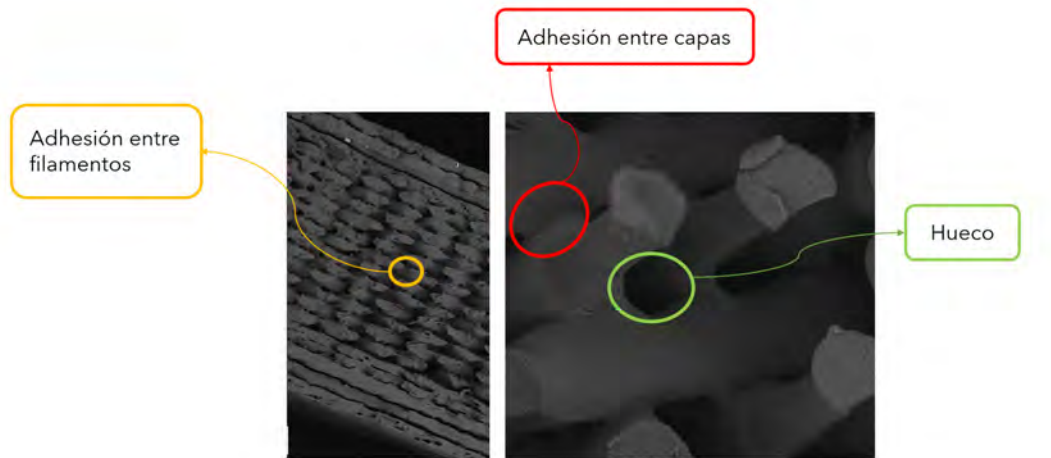


Figura 14: Detalle macroscópico de una pieza FDM. Fuente: elaboración propia

En compresión ocurre justo lo contrario, cuando la dirección de fabricación es paralela a la fuerza, el pandeo que se produce en cada capa hace que sea menos resistente. La resistencia longitudinal se puede controlar variando el tipo de material utilizado mientras que la resistencia transversal depende en mayor medida de los parámetros de impresión. A continuación, la Figura 15 muestra un esquema del comportamiento mecánico en función de los esfuerzos aplicados en una pieza.

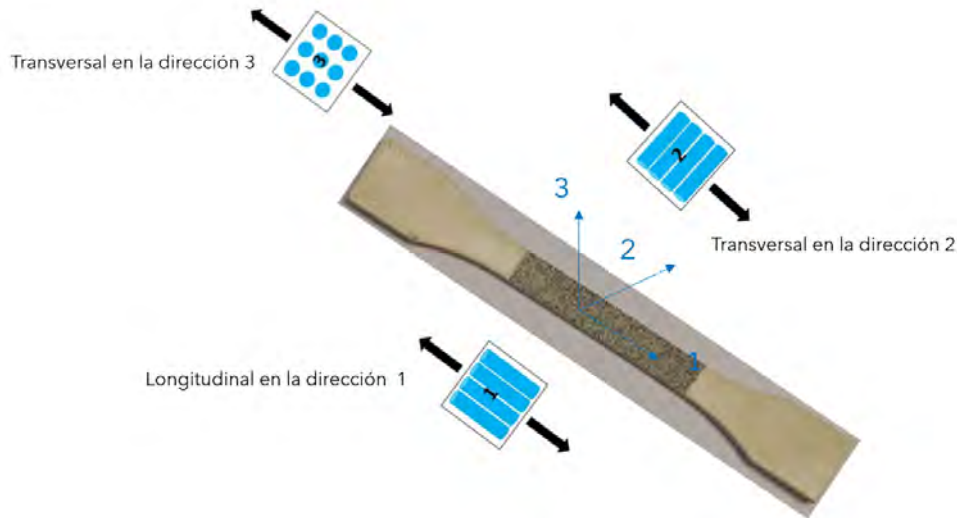


Figura 15: Comportamiento mecánico probeta. Fuente: elaboración propia

Rahman ⁽²⁹⁾, Wu ⁽²⁷⁾ y Gianluca Cicla ⁽³⁰⁾ estudiaron por separado la influencia de ciertos parámetros de impresión como la temperatura de extrusión, la de la plataforma y la ambiente en las propiedades mecánicas de los materiales técnicos. Observaron que, la temperatura de extrusión y de cuna, tienen una gran influencia en la unión entre las capas y en la formación de poros, y por tanto, en las propiedades mecánicas de las piezas. Por ello, en el presente estudio será necesario realizar el ajuste de parámetros que minimicen la formación poros.

Peng Geng et al ⁽³¹⁾, estudiaron cómo para el PPS las propiedades mecánicas de las piezas impresas no sólo dependen de las propiedades del material (es decir, cristalización), sino también de los parámetros de impresión 3D (por ejemplo, el relleno y las condiciones de procesamiento térmico). De tal forma que la resistencia a la tracción, y la resistencia al impacto, están influenciados por el grado de cristalinidad y reticulación. Estudiaron, además, cómo la difusión de la capa intermedia, el alabeo, y la

1. CONTEXTO ACTUAL

delaminación, dependen de las condiciones térmicas durante la impresión, de tal forma que, gracias a la optimización de las condiciones térmicas del procesado se puede mejorar la resistencia de la capa intermedia, y obtener muestras de PPS de alto rendimiento impresas en 3D.

A continuación, a modo de resumen se muestra una tabla de propiedades mecánicas para diferentes materiales comerciales, según Stratasys.⁽³²⁾

Tabla 4: Propiedades mecánicas

Material	Resistencia a tracción XZ (MPa)	Resistencia a tracción ZX (MPa)	Módulo XZ a tensión (MPa)	Módulo ZX a tensión (MPa)	Resistencia a flexión XZ (MPa)	Resistencia a flexión ZX (MPa)	Módulo a flexión ZX (MPa)	Módulo a flexión XZ (MPa)	Elongación a rotura ZX (%)	Elongación a rotura XZ (%)	Temperatura de transición vítrea (°C)
ULTEM 1010	64	42	2.770	2.200	144	77	2.820	2.230	3,30	2,00	215
ULTEM 9085	47	33	2.150	2.270	112	68					186
PPSF	55		2.100		110		2.300	250	5,80	2,20	230
PC-ISO	57		2.000		90		2.200		4,00		161
PC-ABS	41		1.900		68		1.900		6,00		125
PC	40	30	1.944	1.958	89	68	2.006	1.800	2,20	2,00	161
Nylon 12	32	26	1.282	1.138	67	61	1.276	1.180	2,40	2,70	
Nylon 6	49,3	28,9	2.232	1.817	97,2	82	2.196	1.879	2,30	1,70	
ASA	29	27	2.010	1.950	60	48	1.870	1.630	2,00	2,00	108
ABS-M30i	36		2.400			61	2.300		4,00		108
ABS-M30	31	26	2.230	2.180	60	48	2.060	1.760	7,00	2,00	108
ABSi	37		1.920		62		1.920		4,40		116

1. CONTEXTO ACTUAL

1.6 MEJORA DE LAS PRESTACIONES MECÁNICAS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

La gran ventaja de la fabricación aditiva es que se pueden obtener geometrías directamente del modelo digital de la pieza, llegando a producir estructuras complejas muy difíciles de fabricar por medios tradicionales, pero el proceso de impresión es lento y requiere un gran consumo de material debido al relleno interior de la pieza, que en muchos casos no tiene ninguna función.

La optimización topológica consiste en encontrar la mejor distribución de material dentro de un volumen definido, tal que la estructura resultante maximice algún tipo de función objetivo. En la presente investigación se realiza un estudio comparativo de las propiedades de las piezas modificando tanto su tipo de patrón como porcentaje de relleno y espesor de filamento, con el objetivo de analizar la mejor distribución del material (optimizar topológicamente el diseño) en función de lo que el diseñador requiera, ya sea resistencia, acabado superficial o tiempo de impresión.

Gracias a la optimización topológica se pueden obtener estructuras aligeradas en piezas sin sacrificar su resistencia aplicando algoritmos que nos indican dónde retirar material de las zonas donde no existen líneas de esfuerzo (tal y como se aprecia en la Figura 16). La optimización de estructuras es actualmente un campo en constante evolución, en el cual se ha progresado de forma importante en estos últimos años, siendo en la actualidad una herramienta de diseño muy utilizada.

1. CONTEXTO ACTUAL

Fue la industria automotriz quien más desarrolló este sistema ya que una reducción de unos pocos gramos de material por vehículo supone un ahorro económico elevado en la fabricación de millones de coches. El sector aeronáutico también lo instauró para aligerar los aviones y conseguir ahorro en el combustible consumido. Yuang Jin ⁽³³⁾ estudió cómo la optimización topológica en piezas impresas por fabricación aditiva permite reducir tiempo y consumo de material sin afectar a las propiedades mecánicas de compresión.

En general, un problema de optimización consiste en buscar ciertos valores para determinadas variables, de forma que, cumpliendo un conjunto de requisitos representados habitualmente por ecuaciones o inecuaciones algebraicas, nos proporcionan el mejor valor posible para una función que es utilizada para medir el rendimiento de nuestro diseño.



Figura 16: Ejemplo de optimización topológica. Fuente: Dassault Systems

Tal y como describe Alejandra Guzmán ⁽³⁴⁾ existen diversas metodologías para realizar el proceso de optimización topológica, L. Siva Rama Krishna ⁽³⁵⁾ aplicó el método SIMP (“Solid Isotropic Microstructure with Penalization”) a una viga impresa en ABS por FDM sometida a una carga puntual en el centro, verificando que, si se modifican las regiones de diseño se puede

obtener para una misma estructura comportamientos diferentes como mayor rigidez o menor peso.

Guzmán aplicó el método BCBTOA ("Bacterial Topology Optimization Algorithm") a la fabricación aditiva y concluyó que, para porcentajes de relleno entre 60 % y 90 % las piezas con menor porcentaje de peso soportaban mayor carga mientras que la zona plástica disminuía al disminuir el porcentaje de peso. Esto es debido a que a pesar de que la estructura diseñada soporte peor la carga a mayor porcentaje de peso, no posee zonas críticas que pongan en peligro el colapso de la estructura, siendo la estructura optimizada al 70 % la que mejores resultados promedio daba.

Osman lyibilign ⁽³⁶⁾ estudió la resistencia y el módulo para estructuras "lattice" fabricadas mediante FDM en material ABS 30, concluyendo que la estructura de nido de abeja daba unas mejores propiedades de resistencia a tracción y compresión respecto a otras de tipo rectangular, triangular o diamante. Osman estudió el efecto de la porosidad en la estructura de nido de abeja modificando el tamaño de la celda de dos formas, una modificando la porosidad a espesor constante, y modificando el espesor a porosidad constante (tal y como se aprecia en la Figura 17) y observó que, en ambos casos, a mayor porosidad en una estructura menores valores de resistencia a la deformación y módulo de compresión. Sin embargo, el tiempo de fabricación aumenta cuanto menor sea la porosidad.

Gracias a las tecnologías de fabricación aditiva, es posible obtener piezas con estructuras "lattice", dichos materiales están formados por celdas unitarias o en grupo que se repiten de forma periódica con lo que confieren a la pieza aligeramiento sin perder prestaciones mecánicas o incluso dotándolo de nuevas funcionalidades como pueden ser: aislamiento térmico, acústico, "Poisson" negativo, etc.

1. CONTEXTO ACTUAL



Figura 17: Variaciones en el tamaño de celda. (a) modificación de porosidad a espesor constante, (b) modificación espesor a porosidad constante. Fuente: *Materials&Design 2018*

Inoj Gautam ⁽³⁶⁾ analizó el comportamiento de estructuras “lattice” Kagome impresas en ABS por FDM, llegando a la conclusión de que las propiedades mecánicas de la estructura “lattice” dependen de su densidad relativa, siendo mejores cuanto mayor sea dicha densidad relativa. De igual modo, determinó que existe una diferencia en torno a un 17 % de desviación entre los valores de módulo elástico real y el calculado, siendo dicha desviación debida a los agujeros y poros generados en la impresión.

Si bien es cierto que no se han encontrado evidencias de estudios sobre la optimización topológica de estructuras “lattice” para materiales técnicos de impresión, sí que se han encontrado estudios de optimización para materiales como el ABS, PLA y material elastomérico. Por ejemplo, Andrés Clausen ⁽³⁷⁾ demostró con su investigación que, para una misma densidad, el patrón nido de abeja muestra una mayor resistencia a la tensión que el patrón rectilíneo, y presentan un módulo elástico muy diferente. Por ello la optimización topológica (tipo de patrón, porcentaje de relleno, espesor...) es clave para alcanzar las mejores propiedades mecánicas, y obtener diseños funcionales aligerados.

A su vez Simon R.G Bates ⁽³⁹⁾ demostró la viabilidad de generar estructuras que absorben energía mediante la fabricación por FDM de estructuras de nido de abeja en diferentes materiales elastoméricos comerciales, diseñando y ajustando las densidades de las celdas y los parámetros de impresión para evitar huecos y obtener los mejores valores de absorción de energía.

La figura 18 se muestra un ejemplo de pieza impresa con el concepto de estructura interior "lattice".

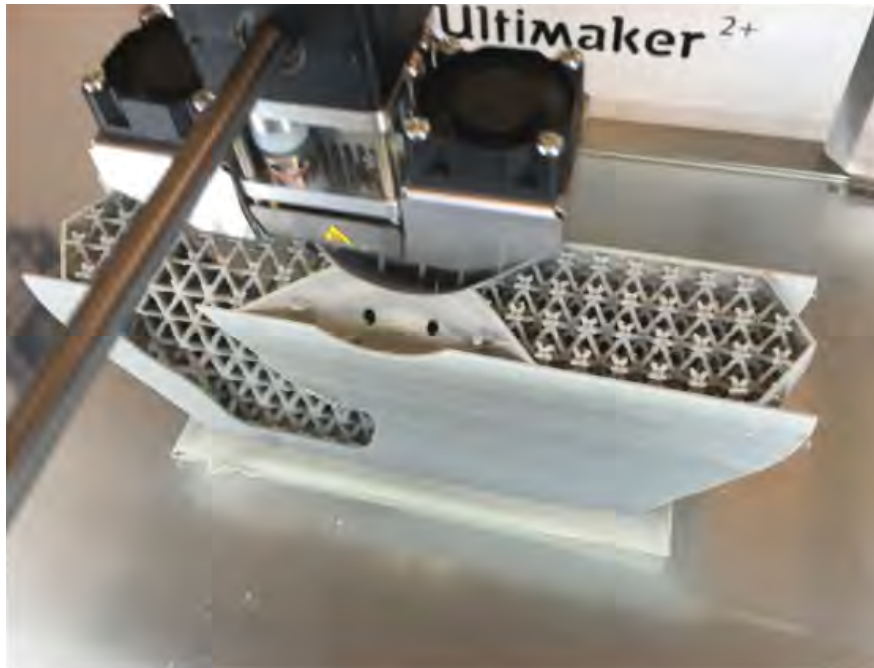


Figura 18: Ejemplo de pieza FDM con estructura "lattice" en su interior. Fuente: Ultimaker

CORRELACIÓN ENTRE FEA E IMPRESIÓN 3D

Las herramientas de diseño CAD son necesarias en la fabricación aditiva y se han ido optimizando para ayudar en el diseño de piezas para procesos de fabricación tradicionales. La mayoría de estas herramientas trabajan con la premisa de que el interior de la pieza es homogéneo desde el punto de vista del material y geometría. Sin embargo, en el caso de la fabricación aditiva una herramienta de CAD apropiada deberá permitir tener libertad en cuanto a la composición y materiales del interior de la pieza, ya que con estas tecnologías se pueden obtener piezas con geometrías muy complejas que no se pueden fabricar por métodos tradicionales.

Hoy en día apenas existen herramientas que puedan simular el proceso de impresión y predecir las propiedades mecánicas de la pieza impresa. El software Digitmat AM se ha presentado como el único del mercado que simula el proceso de impresión de materiales poliméricos tanto para FDM como para SLS. Siemens, por su parte, ha anunciado el lanzamiento de un software de gestión de procesos, diseño integrado, simulación, fabricación digital y gestión de datos. ANSYS también ha comenzado a ofertar soluciones como el SpaceClaim para realizar la optimización topológica de piezas impresas por 3D.

Las tecnologías aditivas fabrican piezas utilizando únicamente la materia prima y el fichero CAD 3D de la pieza. Estos son procesos que, tal y como se ha mencionado, permiten colocar selectivamente el material donde sea necesario, pudiendo obtenerse estructuras espaciales en 3D para aligeramiento, espesores de pieza variables, zonas reforzadas, etc. Por tanto, el diseño de un producto puede ser totalmente orientado a la función que debe realizar. Para comprobar su funcionamiento, se realizan

simulaciones y cálculos mediante ordenador por el método de elementos finitos. Gracias a la combinación de las herramientas de elementos finitos y las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas se pueden obtener productos de alto valor añadido.

Las simulaciones FEA permiten analizar el comportamiento de un diseño de acuerdo con las sollicitaciones a las que se verá sometido. Dadas unas cargas y condiciones de contorno, mediante iteraciones y variaciones de la geometría inicial, estas herramientas orientan al ingeniero indicándole que región de la pieza trabaja menos que otras, y por tanto, en qué zonas puede reducirse la cantidad de material y en qué zonas debe reforzarse.

Cuando se diseñan piezas para fabricar por impresión FDM hay que tener en cuenta que las propiedades isotrópicas del material se pierden dado que la unión entre las capas de una pieza impresa por FDM no es perfecta, quedando zonas huecas entre las capas debilitando las propiedades mecánicas, tal y como estudiaron Y Zhang y K Chou ⁽⁴⁰⁾ y Alafaghani ⁽⁴¹⁾. Al introducir los "gaps" en el diseño pudieron explicar el patrón de fallo, así como los puntos de concentración de tensiones, pero consideraron en todo caso la pieza con propiedades isotrópicas. Pero tal y como se ha comentado, el comportamiento de las piezas impresas por FDM es anisótropo. Y los diseñadores hoy en día, deben analizar el comportamiento de las piezas impresas aproximándolo en base a resultados experimentales.

Yizhuo ⁽⁴²⁾ estudió la deformación de una pieza fabricada en ABS por FDM usando FEA, observando que, existe una misma tendencia entre los datos teóricos y los experimentales, pero esta tendencia no tiene una correlación cuantitativa. Robert Sayre ⁽⁴³⁾ y Koray Ozsoy ⁽⁴⁴⁾ por su parte realizaron un análisis similar, obteniendo como resultado que, efectivamente las propiedades mecánicas teóricas del material isotrópico son superiores a las obtenidas al realizar los ensayos sobre las piezas impresas donde el material

deja de ser isotrópico. A su vez, se demostró que, para conseguir una aproximación más real, es necesario aproximar el comportamiento de la pieza a un material composite laminado.

Miguel Domingo Spin ⁽⁴⁵⁾ demostró que la simulación del comportamiento mecánico de piezas de PC fabricadas por FDM es posible mediante el método de elementos finitos, siendo válido un modelo isotrópico determinado mediante ensayos de resistencia a tracción siempre que no se supere el límite elástico del material. Si se supera, es necesario usar un modelo ortótropo que tenga en cuenta los límites elásticos en las tres direcciones.

Dhruv Bhate ⁽⁴⁶⁾ realizó una evaluación de los posibles enfoques para abordar el comportamiento de un modelo de FDM de tal forma que den mayor fiabilidad al análisis realizado mediante FEA. Estudió cómo el comportamiento más conservador y sencillo aproxima el material a un comportamiento isotrópico, por lo que ignora el efecto de la unión y defectos entre capas. Por lo tanto, no recomienda el uso de esta aproximación.

En el caso de diseñar un modelo con propiedades ortotrópicas siguiendo la ley de Hooke es necesario conocer los valores de los tres módulos elásticos, ratios de "Poisson" y módulos de cortadura, obteniendo estos valores de modo experimental. Sin embargo, este modelo será válido para unos parámetros de construcción específicos con los que se han construido los modelos para realizar los ensayos. No obstante, el error que se obtiene para cargas y deformaciones bajas es aceptable.

Esto es lo que determinó R.H. Hambali ⁽⁴⁷⁾, que estudió el comportamiento real y el simulado mediante FEA

de una pieza impresa por FDM, obteniendo los valores de la matriz ortotrópica a partir de los ensayos ASTM 638, "Método de prueba estándar para la tracción, propiedades de los plásticos", de probetas impresas en las tres direcciones. En este estudio concluyó que la aproximación ortotrópica es la más apropiada, puesto que permite un cierto nivel de optimización de la orientación de la construcción, así como comparaciones significativas del diseño y de las características esperadas de otras tecnologías como la inyección. El comportamiento del proceso FDM es muy parecido a un composite laminar diferenciándose en que en un composite se utiliza una resina para unir las capas.

Jhonatan Rodríguez y Deivi Gonzalo ⁽⁴⁸⁾ compararon el comportamiento real y el simulado mediante FEA de estructuras porosas fabricadas mediante FDM en dos materiales diferentes: ABS y PLA. Para ello, realizaron un análisis morfológico con el microscopio, evidenciando que la estructura porosa generada por la impresora es diferente al patrón original, por lo que es necesario ajustar el modelado geométrico CAD, y realizar un análisis de convergencia para replicar las propiedades, obteniendo como conclusión que para ambos materiales se puede simular de manera aproximada el comportamiento del desplazamiento y la deformación de la probeta, pero no el del esfuerzo.

Por su parte D. Garcia- Gonzalez ⁽⁴⁹⁾ estudió cómo el comportamiento del PEEK (material técnico) en una simulación de elementos finitos a impacto considerando el material como metal dúctil, era muy semejante al comportamiento experimental de las probetas ensayadas. Entre los softwares más utilizados para abordar el análisis por elementos finitos en piezas construidas mediante fabricación aditiva se encuentran Design Space de Ansys, Tosca Dassault Systèmes, Within LABs de Autodesk o Inspire de Solid Thinking. En este trabajo se usará el de Ansys.

1.7 ANÁLISIS CRÍTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Hasta la fecha no se ha realizado una profunda actividad investigadora en el campo de los materiales técnicos para impresión FDM, particularmente para materiales tipo PSU y PC. Esto es debido a que hasta hace bien poco el abanico de materiales era escaso, el coste de estos elevado y muy difícil de imprimir con las máquinas de código abierto existentes debido a los rangos de temperatura con los que hay que trabajar. Todo esto hacía que no fuera una tecnología viable ni para la industria ni para uso doméstico. Sin embargo, durante los últimos años, gracias a la caída en 2014 y 2015 de las patentes clave de fabricación aditiva y al movimiento "maker", la tecnología FDM ha ido evolucionando y mejorando, convirtiéndose en una herramienta con un potencial enorme para la industria.

Sectores como automoción, aeronáutica, ferroviario, consumo, etc. están viendo la fabricación aditiva como una herramienta más para acortar el tiempo de puesta de un producto en mercado o "time to market" y ser más competitivos al integrar en su desarrollo una tecnología complementaria a sus procesos industriales. Algunas de las principales ventajas que las tecnologías de fabricación aditiva aportan a la industria manufacturera son una mayor flexibilidad de diseño, ligereza, reducción del uso de energía y del tiempo de comercialización. La tecnología de impresión por FDM es un proceso de fabricación que permite obtener piezas complejas a unos costes muy competitivos, pudiendo fabricarse geometrías imposibles de fabricar mediante los procesos tradicionales. Al construir capa a capa aportando material.

Gracias a la impresión 3D no es descabellado pensar que a medio plazo será posible imprimir piezas con propiedades y funcionalidades diversas en función del proceso de impresión y el material a imprimir, de tal forma que

1. CONTEXTO ACTUAL

en una sola pieza se consigan diferentes propiedades "a la carta" (ligereza, propiedades mecánicas localizadas...)

Del estudio bibliográfico en los principales medios de divulgación científica se puede ver la evolución temporal de los principales temas de investigación, siendo estos los siguientes:

1. En primer lugar, las investigaciones se dirigen hacia la mejora de las tecnologías y los materiales empleados en la construcción de prototipos
2. Tras desarrollar las tecnologías aparecen términos como la optimización de parámetros y generación de algoritmos informáticos para mejorar el proceso. Es decir, una evolución de los softwares de procesado
3. Con la mejora de los CAE aparecen las primeras investigaciones centradas en el análisis estructural de las piezas fabricadas
4. A continuación, se estudian sistemas de abaratamiento de los equipos, así como la caracterización microestructural

Sin embargo, hoy en día aún queda un largo recorrido en cuanto al desarrollo de materiales y a la optimización del proceso de impresión, tanto desde el punto de vista de optimización de máquinas como de software que facilite el diseño de piezas acorde a unas especificaciones definidas. Además, existen pocos códigos de elementos finitos que implementen soluciones orientadas a FDM debido, por un lado, a la complejidad del despegado de capa y por otro, del diseño de cada trazado de capa que se debe tener en cuenta a la hora de analizar piezas impresas, por lo que debemos recurrir a datos de ensayos para obtener datos que nos permitan realizar simulaciones aproximadas y que nos den conclusiones fiables.

En este contexto, y teniendo en cuenta que el objetivo principal de la tesis es estudiar, predecir y optimizar el comportamiento de un material técnico, el PPS, impreso mediante tecnología FDM, se pretende caracterizar y ajustar los parámetros de impresión para obtener una guía para que los ingenieros puedan diseñar piezas aligeradas con las mejores propiedades mecánicas posibles, y contrastar los resultados experimentales con los teóricos obtenidos mediante el análisis de elementos finitos.

En el proceso de fabricación por FDM las propiedades de las piezas impresas son anisótropas y se ven muy influidas por los parámetros de impresión, lo que hace crítico realizar una caracterización exhaustiva del material, así como un estudio de los parámetros de impresión y su influencia en las propiedades. Este tipo de análisis se han realizado para materiales comunes y de baja temperatura de trabajo, como el ABS o el PLA, sin embargo, hay muy pocos estudios para el caso de materiales más técnicos tipo PPS, PEEK, PEI, PC... debido a la escasez hasta hace bien poco de los mismos y a que las máquinas de impresión difícilmente podían imprimir este tipo de materiales de alta temperatura.



2. METODOLOGÍA

MODALIDAD

El desarrollo del presente estudio se basa en un diseño de investigación experimental fundamentado en la comparación de las propiedades de impresión FDM sobre un material técnico de alta temperatura, la anisotropía del proceso y la obtención de una matriz ortotrópica. La finalidad es evaluar las propiedades mecánicas del material a fabricar en función de los parámetros de impresión y realizar un estudio comparativo de los patrones de fabricación rectilíneo y octogonal para crear una guía de diseño para la obtención de piezas funcionales impresas. Para ello se emplearán, entre otros, ensayos de tracción, flexión y el estudio de la estructura interna de las configuraciones (SEM), realizando una evaluación final con la matriz caracterizada sobre una pieza acodada, donde se compararán los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación de elementos finitos.

2.1 MATERIALES Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En este apartado se definirán las técnicas de caracterización, equipamiento y software utilizado para analizar el material, su comportamiento una vez impreso y las comparativa entre las propiedades mecánicas obtenidas y las simuladas.

2.1.1 Material utilizado

El material objeto de la presente tesis se trata de un grado de PPS comercializado bajo el nombre "NPOWER" por la empresa 3NTR.

Este material se caracteriza por su alta resistencia a agentes químicos y resistencia mecánica, baja absorción de agua (lo que favorece su impresión ya que la humedad del material afecta negativamente en el proceso) y buena estabilidad dimensional. En concreto, las propiedades del material utilizado dadas por el fabricante son las mostradas en la Figura 19.


 Polymer technical datasheet			
<h1 style="margin: 0;">N-Power 3ntr</h1>			
Intrinsically self-extinguishing PPS having high chemical resistance and good thermal one.			
Mechanical property*	Standard	Unit	Value
Young modulus	ISO 527-2	MPa	2000
Yield tensile strenght	ISO 527-2	MPa	43.2
Tensile strength at break	ISO 527-2	MPa	30.5
Elongation at yield	ISO 527-2	%	3.4
Elongation at break	ISO 527-2	%	12.8
Flexural modulus	ISO 178	MPa	9900
Flexural yield strength	ISO 178	MPa	47.1
Flexural strength at break	ISO 178	MPa	–
Flexural elongation at yield	ISO 178	%	0.9
Flexural elongation at break	ISO 178	%	–
Impact resistance (Charpy), unnotched	ISO 179-1	KJ/m ²	107.8
Compression modulus	ISO 604	MPa	1615
Compression strength at yield	ISO 604	MPa	47.2
Compression strain at yield	ISO 604	%	8.6
Thermal property	Standard	Unit	Value
Melting temperature	ISO 11357	°C	285
Cold cristallization temperature	ISO 11357	°C	123
HDT at 1,80 MPa (unannealed)	ASTM D 648	°C	105
Other	Standard	Unit	Value
Density (specific gravity)	ISO 1183-1	g/cm ³	1.26
Electrical dissipation factor			–
Flame resistance	UL94		V0**
Railroad application compatibility	EN 45545		No
Biocompatibility			No
Blue card			No
Water contact			No
Food contact	FDA 21; EU 10/2011		No

Figura 19: Propiedades del material PPS. Fuente: Filament2print

El fabricante realiza las siguientes aclaraciones sobre las propiedades del material, las cuales son relevantes ya que si se quiere usar para aplicaciones en entorno industrial es necesaria realizar una investigación sobre la correcta impresión del material, el comportamiento y sus propiedades mecánicas para diferentes configuraciones, lo que es objetivo de la presente tesis.

- Los valores anteriores se obtienen de muestras impresas en la máquina de impresión A4v4 para un grosor de capa de 0,2 mm.
- La información presentada en este documento se debe utilizar únicamente con fines comparativos y de autoaprendizaje y no pretende sustituir las pruebas del cliente para certificar la idoneidad del material para el uso y la aplicación del cliente.
- Los valores reales variarán según la configuración de producción, las condiciones de prueba y la geometría de la pieza del usuario; los valores anteriores no deben usarse como especificación de diseño o valores de referencia de las pruebas de control de producción.

2.1.2 Caracterización del material de partida

El estudio se comienza analizando las propiedades del material de partida en formato filamento. El material que se va a analizar es un PPS que tiene una alta temperatura de fusión (entre 270 - 290 °C) y, por tanto, requiere altas temperaturas de procesado (cercanas a 350 °C). Este rango de temperaturas es un obstáculo en el uso del material debido a la necesidad de equipos de procesado no convencionales, que operan a altas temperaturas, lo que implica un incremento de costes en el producto final.

2.1.2.1 Estudio térmico

El objetivo de este estudio es obtener, mediante los análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de fusión (T_f) y la temperatura a la que se inicia la degradación térmica (T_d).

La T_g y la T_f nos indican los rangos de temperatura a los que es recomendable trabajar en la impresión 3D. La temperatura de la cámara de impresión 3D, suele ser próxima a T_g y la temperatura en el extrusor de

dosificación suele ser ligeramente superior a la temperatura de fusión en los materiales semicristalinos. En el caso de los amorfos, al no existir temperatura de fusión, suele tomarse como referencia la T_g , siendo en este caso la temperatura del extrusor unos 100 °C superior. Por lo tanto, para optimizar el proceso se necesitan conocer la T_g , y la T_f , que se obtienen mediante DSC, así como las temperaturas a las que se inicia la degradación térmica que se obtiene a través de la termogravimetría.

Estas características son de las más influyentes a la hora de definir las variables del proceso de impresión porque influyen en la calidad (externa e interna) de las piezas impresas y, por lo tanto, en las propiedades de la pieza final.

2.1.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Para determinar la T_g y la T_f se realiza un análisis mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). Este análisis permite estudiar las principales transiciones térmicas que tienen lugar en un material durante un determinado tratamiento térmico.

La Figura 20 muestra el analizador térmico diferencial DSC1 de Mettler Toledo (propiedad de Gaiker) utilizado en el estudio. El procesado de los datos se ha efectuado con la ayuda del programa TA STARs Software.



Figura 20: Equipo DSC para determinación de T_g y temperatura de fusión

El estudio de las medidas calorimétricas se ha llevado a cabo realizando tres barridos entre 25 °C y 425 °C con una velocidad de calentamiento de 10°/min y en atmósfera controlada de N₂ con un caudal de 50 cm³/min.

2.1.2.2.1 Análisis termogravimétrico

La termogravimetría (TGA) es una técnica analítica mediante la cual se registra, de manera continua, la variación de la masa de una muestra bajo una atmósfera controlada, bien en función de la temperatura, o bien en función del tiempo, y que proporciona información sobre la estabilidad térmica y composición de muestra inicial, así como de los mecanismos de descomposición de la muestra, el residuo y los productos volátiles que pueden generarse.

El equipo utilizado ha sido un analizador termogravimétrico TGA/DSC 1 Mettler Toledo, con calentamiento mediante resistencias eléctricas. El procesamiento de datos se ha realizado empleando el programa TA STARe

2. METODOLOGÍA

Evaluation Software. Para la realización de las medidas TGA se realizan tres barridos entre 25° A y 900 °C a velocidad de 20°/min en atmósfera de N₂ de 50 ml/min. El peso de la muestra ha sido aproximadamente de 30 mg.

2.2 TÉCNICAS DE PROCESADO. IMPRESIÓN DE MATERIAL

Para la impresión del material se utiliza la máquina de impresión A2V2 del fabricante 3NTR (Figura 21), propiedad de Gaiker. Esta máquina se caracteriza porque se trata de una impresora 3D de tecnología FDM profesional, diseñada para uso en un entorno industrial con un volumen de impresión de 620 × 355 × 500 mm, lo que posibilita la impresión de objetos, de gran tamaño o de menor tamaño pero mayor número de piezas impresas en la cámara, con un acabado de alta calidad y a un coste muy competitivo.

La máquina empleada lleva tecnología de triple extrusor para imprimir las geometrías complejas con dos materiales (por ejemplo, uno flexible y otro rígido) y uno de soporte soluble o que se elimine mecánicamente.

La impresora alcanza una temperatura de extrusión de 450 °C y cuenta con cámara de impresión con temperatura controlada, aspecto clave en la impresión de materiales técnicos de alta temperatura como el PPS, ya que evita cambios de temperatura que darían lugar a una impresión con piezas defectuosas. El PPS habitualmente trabaja con una temperatura de 85°C en la cámara de impresión tal y como indica el fabricante.



Figura 21: Máquina de impresión y material utilizado

El software del programa laminador que utiliza esta máquina es el denominado Kisslicer ("Keep It Simple Slicer"). Este software laminador divide el modelo 3D a imprimir (en formato .stl) en capas y generan el fichero "G-code" correspondiente. Este fichero será el que contendrá las órdenes a ejecutar por la impresora 3D para que, al ir depositando sucesivamente el material según esas capas previamente definidas, fabrique la pieza física. Las probetas se han impreso con una base o "raft" del material de soporte específico para el "NPOWER" denominado SSU05 (material que se ha analizado en este estudio y es un ABS) de la misma casa comercial. Este "raft" se imprime para evitar alabeos de la pieza. Además, para poder eliminarlo fácilmente sin deformaciones de las probetas se ha definido una distancia entre la base elaborada con el material de soporte y la pieza de 0,15 en Z+ (como se aprecia en la Figura 22). La Figura 22 muestra el proceso de generación del "G-code" así como el proceso de impresión de las probetas.

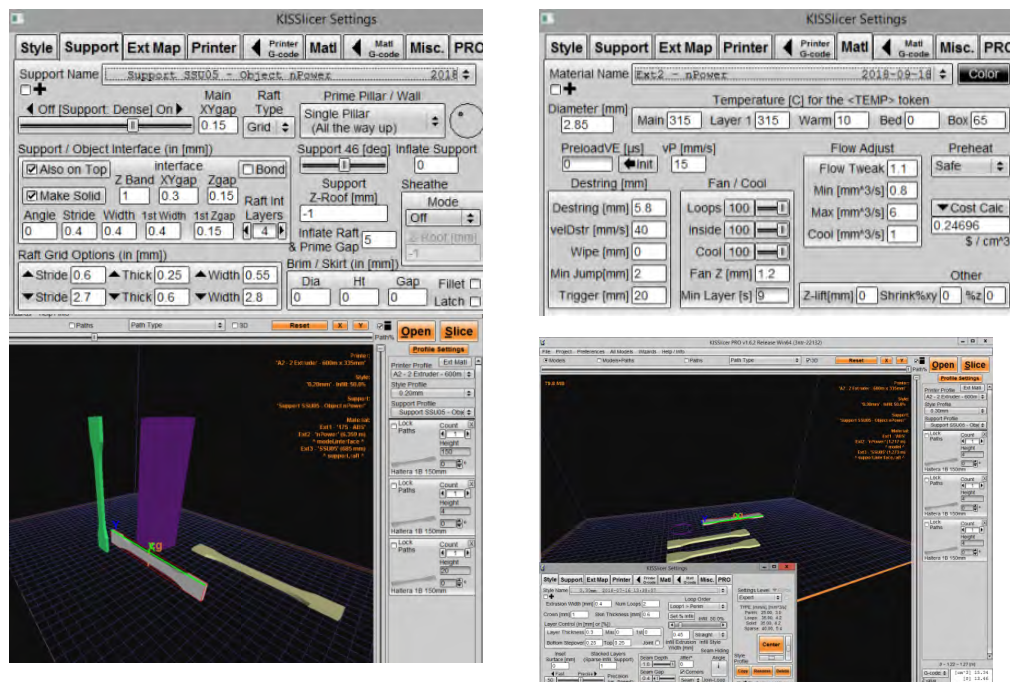


Figura 22: Parámetros software de laminación Kisslicer

Para obtener los nueve parámetros de la matriz ortotrópica que definen las propiedades del material en el programa de diseño ANSYS /Structural, se han estudiado y fijado los parámetros de impresión óptimos y se han impreso cinco probetas en cada dirección de crecimiento ejes X, Y, Z, denominándose a cada configuración T^{flat} , T^{edge} , L (Figura 23).

Para realizar la investigación se seleccionan cuatro parámetros críticos que más afectan a las propiedades mecánicas del material, dichos parámetros son: altura de capa, patrón de relleno, porcentaje de relleno y temperatura de extrusión.

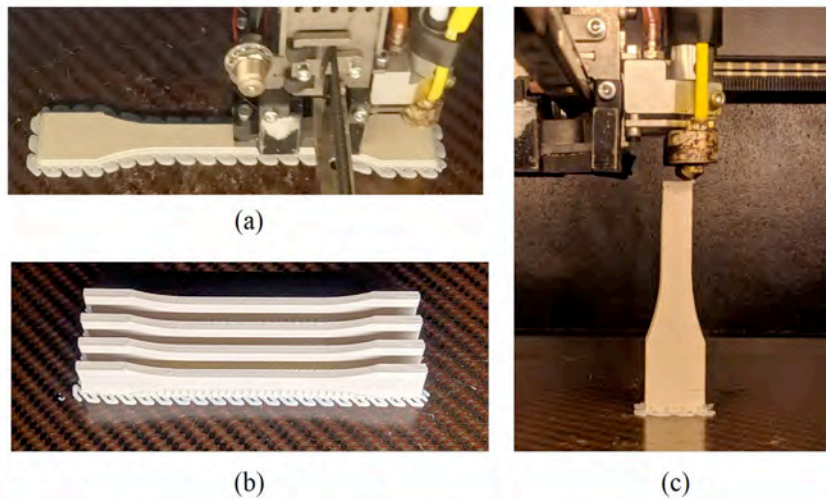


Figura 23: Impresión de probetas de ensayo en las tres configuraciones

2.2.1 Caracterización mecánica del material impreso

Para realizar la caracterización del material impreso se realiza el estudio mecánico y el análisis de rotura de la pieza. El objetivo de estudiar la resistencia del material para cada dirección de crecimiento, configuración de patrón y porcentaje de relleno.

2.2.1.1 Resistencia a la tracción y límite elástico

El ensayo se lleva a cabo en una máquina de ensayos universal, de la marca Shimadzu y modelo AGX 100 a distintas temperaturas, de acuerdo con la norma "UNE-EN ISO 527: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción.". En la Tabla 5 muestra las condiciones del ensayo que se ha realizado. Siendo el objetivo de este ensayo determinar la carga de rotura y el módulo de elasticidad en tracción.

Tabla 5: Condiciones de ensayo

Parámetro	Valor
Condiciones de la habitación	23°C y 40% HR
Máquina de ensayo universal	Zwick/Roell
Carga de la cáscara	10 kN
Velocidad del ensayo	2 mm/min
Distancia entre mandíbulas	119 mm
Sistema DIC	GOM - ARAMIS
Análisis de volumen DIC	125 mm x 100 mm
Distancia DIC	845 mm
Frecuencia de muestreo DIC	1 Hz

Para la medida de la deformación, se ha utilizado un sistema DIC ("Digital Image Correlation"), propiedad de la universidad de Mondragón. Este sistema DIC es un método óptico basado en el tratamiento de las imágenes de la superficie de la probeta durante el ensayo. Para ello, previo a la realización de los ensayos, se ha pintado con espray un mapa de puntos aleatorio en la superficie de cada probeta, tal y como se observa en la Figura 24.



Figura 24: Probetas impresas preparadas para el ensayo

Durante el ensayo, el sistema DIC analiza el movimiento o desplazamiento

2. METODOLOGÍA

de cada uno de los puntos y determina el nivel de deformación de cada zona (Figuras 25 y 26).



Figura 25: Probeta preparada para ensayo con sistema DIC



Figura 26: Sistema óptico de correlación digital de imágenes (DIC)

2.2.1.1.1 Resistencia de flexión.

El ensayo se ha llevado a cabo en una máquina de ensayos universal, de la marca Shimadzu y modelo AG-X 100, para determinar las propiedades de flexión de acuerdo con la normativa UNE-EN-ISO 178 2011. Para las medidas del módulo de flexión se utilizó un video-extensómetro (DVE-201; Sony, Inc.), con una precisión del 1 % y se ha utilizado una celda de carga 5KN.

En este ensayo, una probeta de sección rectangular de $80 \times 10 \times 4$ mm que descansa sobre dos soportes se flexiona por un elemento de carga que actúa sobre el punto medio de la probeta entre los soportes, tal y como se ilustra la Figura 27. La probeta se flexiona a velocidad constante, hasta que se rompe o hasta que alcanza un máximo de deformación del 5 %.

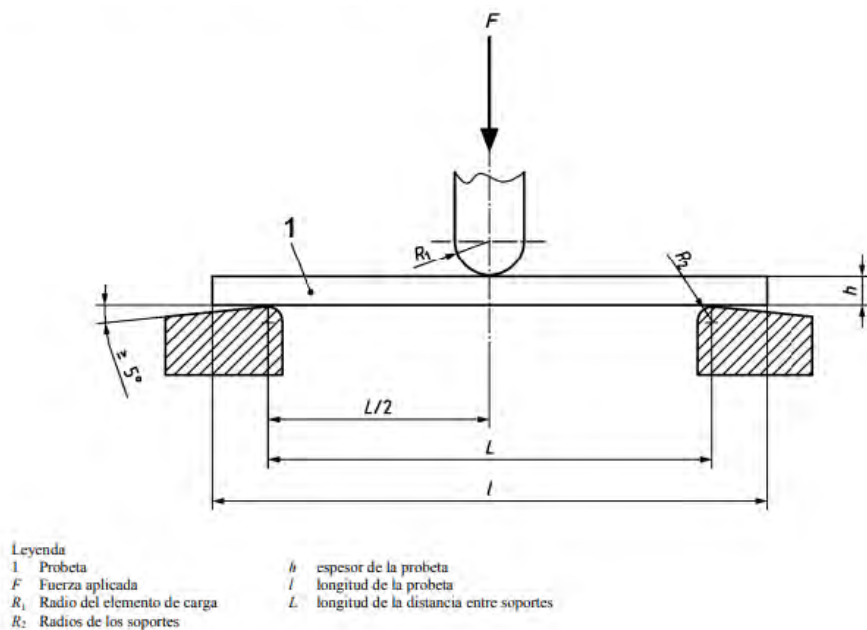


Figura 27: Ensayo de flexión según norma UNE-EN ISO 178-2011

La Figura 28 muestra la impresión de las probetas para la realización del ensayo a flexión.

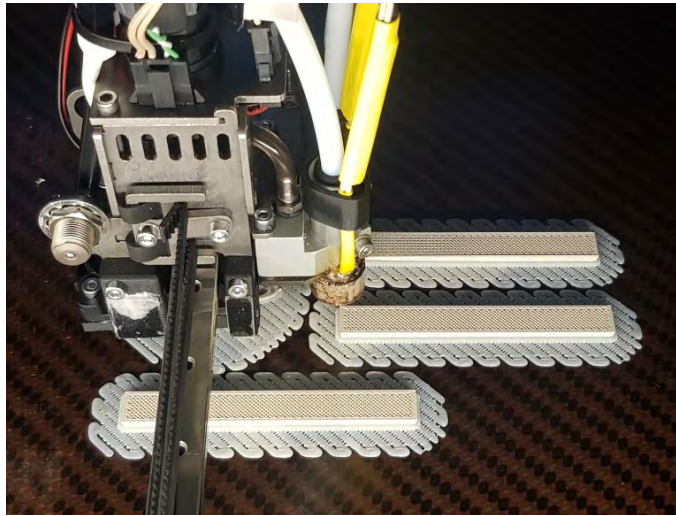


Figura 28: Impresión probetas de flexión

2.2.2 Análisis estructural del material

Para realizar el análisis estructural del material se utiliza un microscopio electrónico de barrido (SEM) de la marca ZEISS (modelo EVO50), propiedad de Gaiker, (Figura 29).



Figura 29: Microscopio electrónico SEM empleado EVO 50

Para realizar este estudio es necesario obtener una fractura de la muestra lo más limpia posible, para conseguirlo se sumergen en nitrógeno líquido (Figura 30) y se fracturan manualmente las probetas, consiguiendo así una fractura limpia tal y como se muestra en la Figura 31.



Figura 30: Inmersión probetas en Nitrógeno líquido



Figura 31: Probetas tras la fractura

2. METODOLOGÍA

Para poder analizar las muestras sin problemas de cargas electrostáticas, estas deben ser conductoras, por lo que es necesario metalizarlas. Esto se consigue mediante un recubrimiento metálico de una aleación de oro y paladio (80/20 % wt.), que se deposita superficialmente, realizando un vacío previo para llevar a cabo el proceso, con 30 segundos de tiempo de ciclo y 30 mA de intensidad se consigue una capa metálica de 5-10 nm. En este estudio se utiliza el equipo de Sputtering Leica EM SCD 005 de la Figura 32.

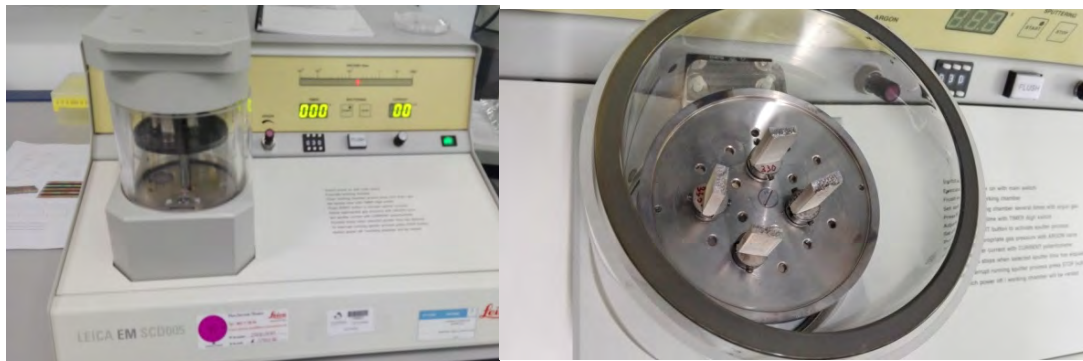


Figura 32: Probetas metalizadas

2.3 DISEÑO

2.3.1 Estudio FEA

Para el estudio de la comparativa entre las propiedades experimentales y las teóricas se ha utilizado el software de análisis estructural ANSYS. Este análisis se ha realizado para validar la matriz caracterizada realizando la comparativa, en primer lugar, sobre probetas impresas sometidas a flexión. Además, para realizar la validación final, se ha diseñado una pieza acodada adicional, por ser la forma acodada una geometría común en piezas/moldes industriales, sometida a un estado de tensiones más complejo que en el caso de la probeta a flexión previamente analizada (véase la Figura 33).

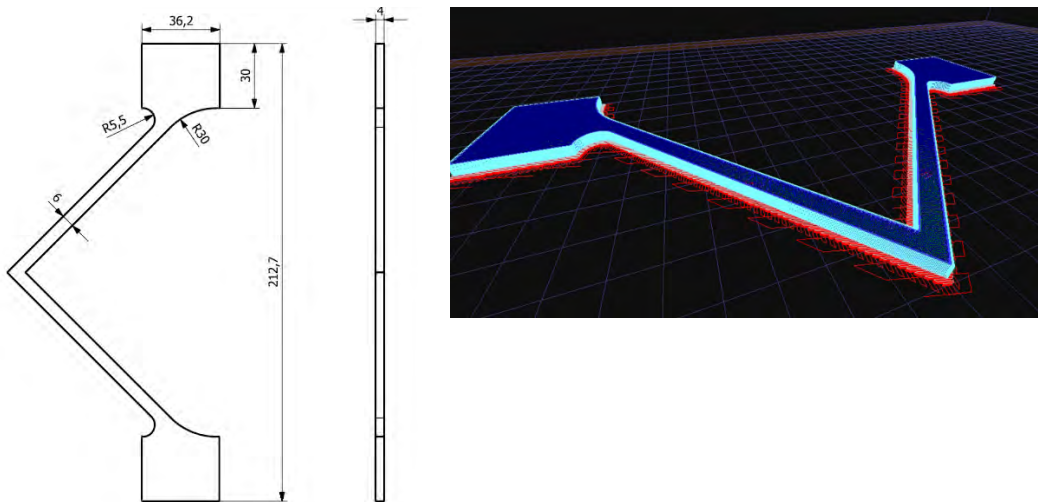


Figura 33: Diseño probeta acodada

2.4 MÉTODO

La investigación se ha llevado a cabo siguiendo tres pasos que se muestran en la Tabla 6. En primer lugar, se ha estudiado el material para poder seleccionar los parámetros óptimos para la impresión del material con el objetivo de obtener las mejores propiedades mecánicas del mismo. En este estudio también se ha realizado un análisis de las propiedades mecánicas para diferentes configuraciones de patrón, porcentaje de relleno, altura de capa. En segundo lugar, se ha realizado un estudio para obtener la matriz ortotrópica del material y por último se ha realizado un caso práctico a fin de validar los resultados obtenidos.

Tabla 6: Metodología realizada

Estudio proceso impresión	Caracterización matriz	Caso práctico
<ol style="list-style-type: none"> 1. Estudio de las propiedades del material 2. Selección parámetros de impresión 3. Estudio de propiedades mecánicas en función a las variables de impresión (patrón, porcentaje de relleno, altura de capa, tiempo) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtención de matriz ortotrópica para la configuración seleccionada, aquella que combina mejores propiedades mecánicas con estabilidad del proceso. 2. Validación mediante análisis FEM sobre probeta de flexión 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicación de la matriz obtenida a una pieza con forma de codo. 2. Validación y conclusiones

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describe a alto nivel el proceso de experimentación realizado, el cual se ha dividido en etapas consecutivas con el objetivo de llevar a cabo la investigación mediante un proceso estructurado que conduzca a resultados sólidos.

EXPERIMENTACIÓN REALIZADA

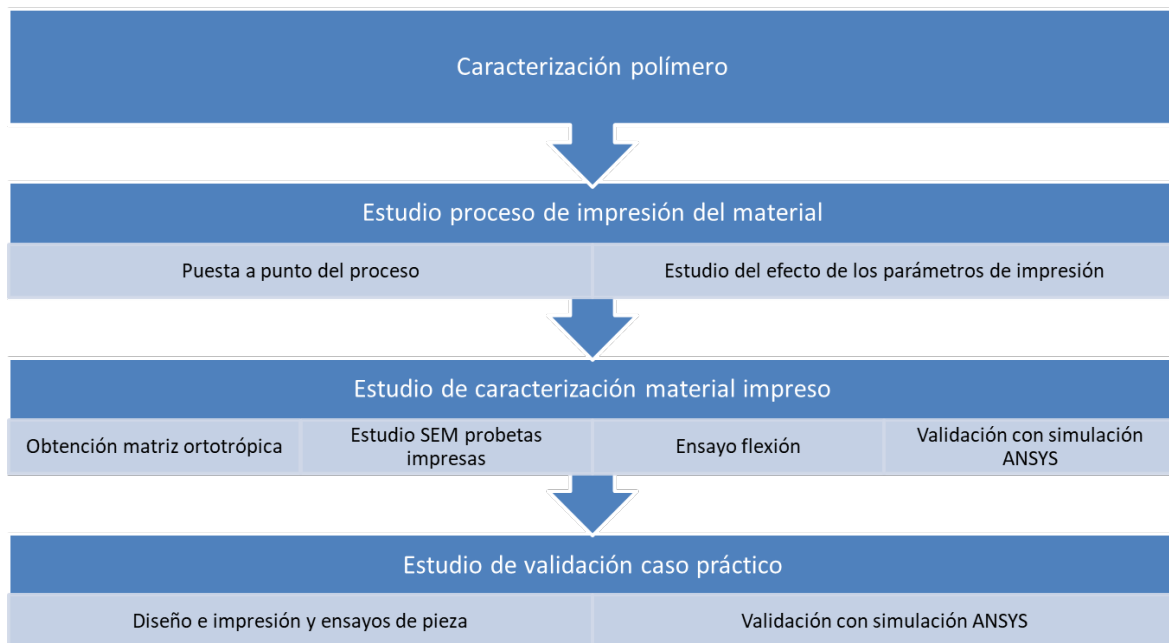


Gráfico 6: Esquema de estudio y experimentación realizado. Fuente: elaboración propia

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE PARTIDA

3.1.1 Caracterización mediante calorimetría DSC

La utilización de la calorimetría diferencial de barrido y la termogravimetría (DSC y TG) para realizar la caracterización térmica de los materiales de impresión 3D, es una herramienta con la que se obtienen los valores de las temperaturas de transición vítrea (T_g), fusión cristalina (T_f), y degradación térmica (T_d), que determinan los valores de las temperaturas a utilizar en el proceso de impresión 3D.

En el análisis realizado sobre el material se han obtenido los valores de las temperaturas T_g , T_f , y T_d . Los termogramas del Gráfico 6 y Gráfico 7 son un ejemplo de la caracterización térmica del PPS (semicristalino) NPOWER.

En el Gráfico 6 la curva solo tiene un pico lo cual indica que la muestra tiene un único tipo de material polimérico, por lo que se puede afirmar que el único polímero semicristalino que hay en la muestra es PPS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

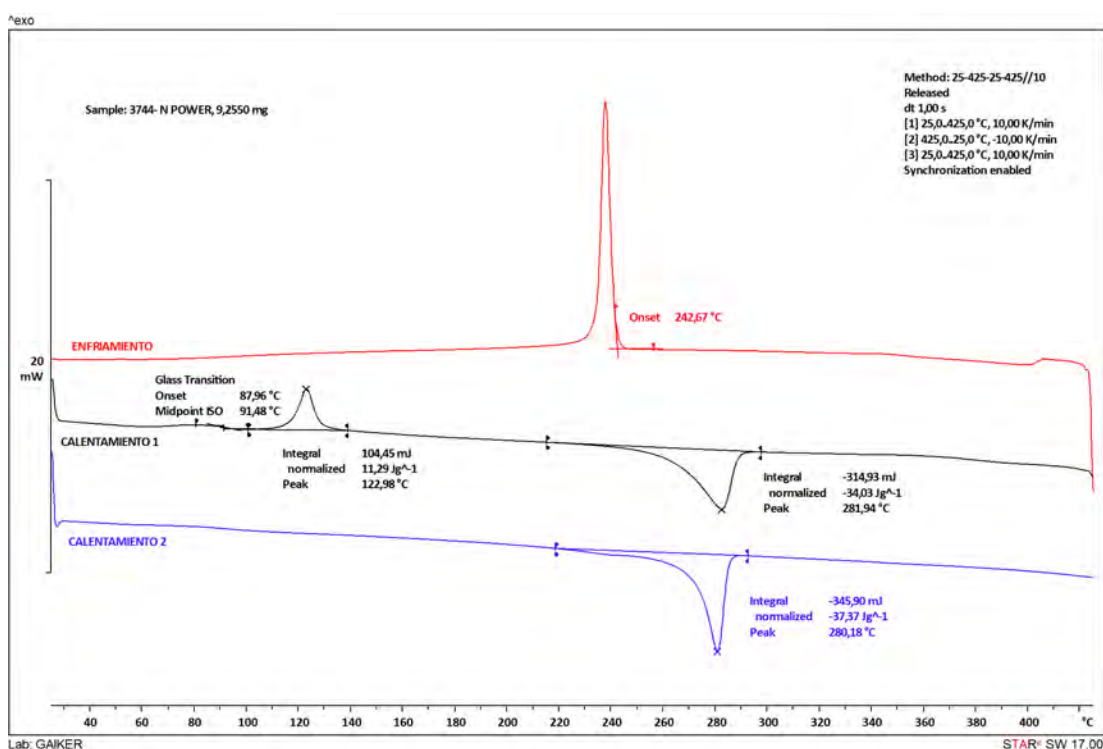


Gráfico 7: DSC de material PPS

La Tg determina el grado de reordenamiento de las cadenas poliméricas de un material amorfo. De forma que, para valores de temperatura por encima de la Tg los segmentos de las cadenas poliméricas se pueden reordenar y rotar, permitiendo desplazamientos que se traducen en deformaciones viscoelásticas. Según se va incrementando la temperatura se produce la cristalización hasta alcanzar finalmente la Tf. De forma que, el nivel más alto de disposición podría alcanzarse calentando el material hasta alcanzar la temperatura correcta de Tg.

La Tg es la temperatura en la que un polímero pasa de un estado completamente sólido a un estado líquido. Es la temperatura en la que el polímero disminuye su densidad, dureza y rigidez. Conocer el valor de la Tg nos va a permitir mejorar las propiedades de piezas impresas porque en el caso de los polímeros semicristalinos, trabajando en la cámara de

construcción en el entorno de la T_g se facilita el reordenamiento de la cadena molecular del material, es decir, más parecida a los polímeros cristalinos.

Los resultados de la T_g , T_f y T_d obtenidos se muestran en la Tabla 6. Como la T_g del material ronda los 92 °C, la unión entre capas se produce por encima de esta temperatura, para conseguir una buena unión entre capas y, por lo tanto, mejores prestaciones mecánicas, se debe mantener el máximo tiempo posible en torno a esa temperatura. Esto se consigue aumentando la temperatura de unión, o con un enfriamiento más lento, el cual se consigue manteniendo la temperatura de cámara constante.

Tabla 7: Resultados DSC

Parámetro	Valor (°C)
Temperatura de transición vítrea	91,23
Temperatura de cristalización	122,98
Temperatura de fusión	281,94

3.1.2 Caracterización mediante termogravimetría

Con objeto de analizar la temperatura a la que se inicia la degradación térmica y la composición del material, se ha realizado un análisis TGA, tal y como se muestra en el Gráfico 8. Dicho análisis se ha llevado a cabo analizando la velocidad de descomposición del material, observando que la temperatura a la que se inicia está en torno a los 400 °C. Se ha observado que al final queda un residuo carbonoso (61,65 %) del propio material (el fabricante no indica que está cargado), debido a que el ensayo se ha realizado en nitrógeno, es decir en atmósfera inerte.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

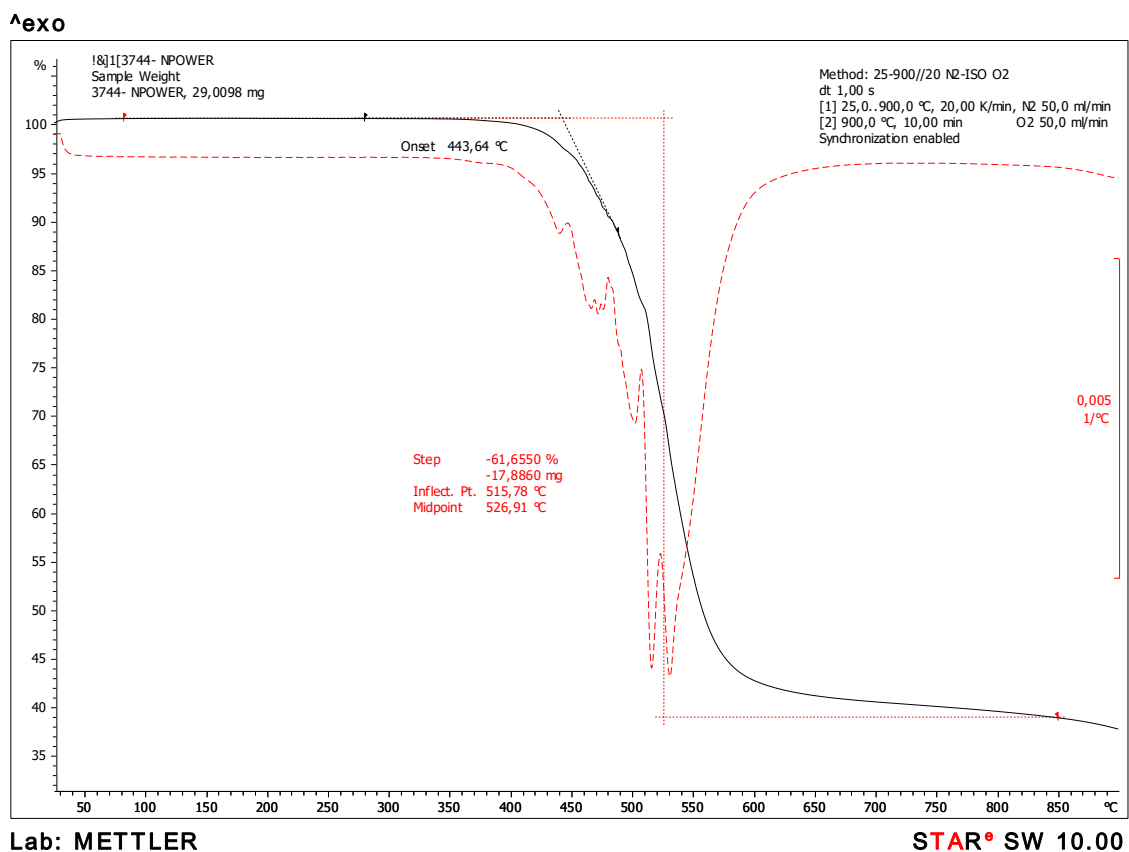


Gráfico 8: TGA de material PPS

3.2 PROCESO DE IMPRESIÓN DEL MATERIAL

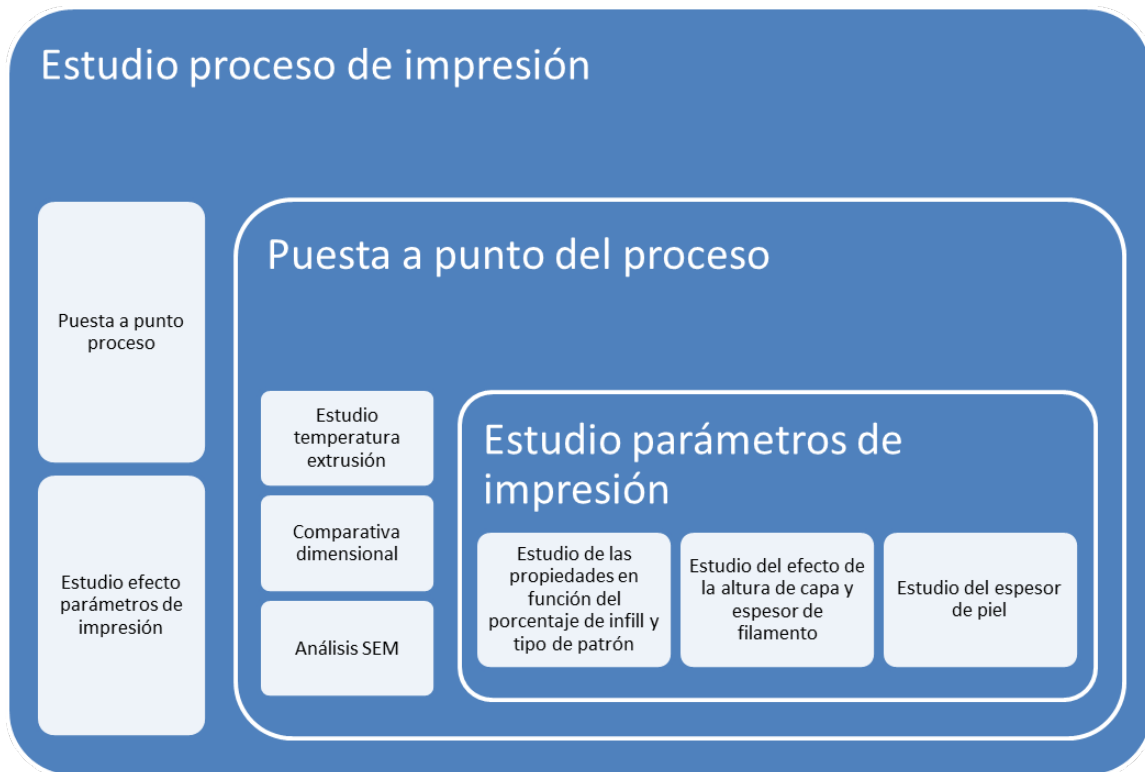


Gráfico 9: Proceso de estudio realizado. Fuente: elaboración propia

3.2.1 Puesta a punto del proceso

3.2.1.1 Estudio de la temperatura de extrusión

La correcta definición de la temperatura de extrusión y de cuna es crítico para conseguir una buena impresión, evitar problemas de obturación en la boquilla, y que la pieza impresa tenga una buena adhesión entre capas, lo que se traduce en mejores propiedades, mejor acabado, y menos problemas durante la impresión.

Partiendo de los datos del fabricante y los obtenidos en los análisis DSC, Tg y también la temperatura de la cámara de construcción, que se elige en el entorno del valor de la Tg se analiza la temperatura de extrusión y temperatura de la cuna óptimas para la impresión del material. Como la temperatura de fusión es de 281,94 °C, la de extrusión deberá estar en un rango superior, por lo que va a ser importante alcanzar temperaturas elevadas de impresión en torno a 330 °C (temperatura aconsejada por el fabricante), y que la cuna o cama esté atemperada en torno a 110 °C, para evitar así un contraste brusco de temperatura. Esto originaría, por un lado, que el material se enfriara rápidamente y que no exista buena adhesión, y por otro, que el material se contraiga, originando desviaciones importantes en las dimensiones, y alabeos en la pieza a imprimir. Además, será necesario mantener atemperada la cámara de impresión con el objetivo de evitar contrastes de temperatura durante la impresión, ya que las variaciones de temperatura originan una mala impresión y adherencia entre las capas debido al enfriamiento del material.

Antes de la realización de las impresiones se ha realizado un análisis mediante SEM para validar la circularidad del rollo de filamento de PPS. Si esta circularidad no es homogénea, puede dar lugar a problemas en la boquilla de extrusión por exceso o por defecto de material. De forma que, si presenta una desviación en los valores superior a 2 %, el filamento no será válido. Es decir, la buena circularidad del filamento es un parámetro que afecta en la calidad de la impresión y, por tanto, es necesario validarlo antes de comenzar el estudio.

La Figura 34 muestra una sección del material en diferentes zonas donde se aprecia que el diámetro del material es de 2,87 mm y de 2,84 mm. El diámetro nominal del filamento es 2,85 mm por lo que la desviación es inferior al 2 %. El filamento, por lo tanto, parece mantener la circularidad de

manera uniforme a lo largo de las diferentes secciones, por lo que se va a trabajar con este rollo de filamento.

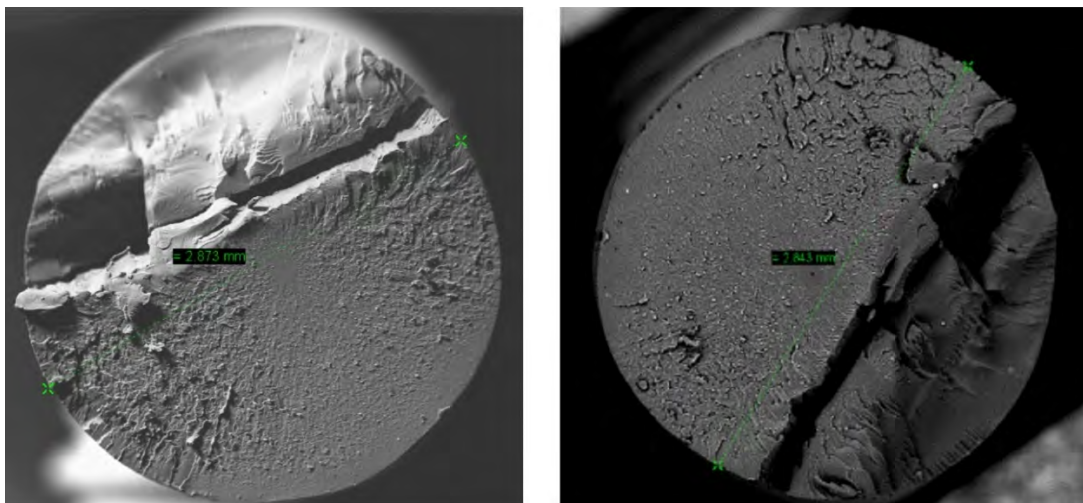


Figura 34: (a) medida diámetro en una zona de filamento (b) medida de diámetro en zona diferente del filamento

Para determinar la temperatura de extrusión óptima de trabajo se ha realizado un análisis de la adherencia entre las capas, ya que, una mala adherencia entre capas da problemas en las propiedades mecánicas del material. Esta mala adherencia principalmente es debida a que la temperatura de extrusión no es óptima, ya que existen variaciones bruscas de la misma, por lo que capa a capa los filamentos no se fusionan correctamente. Para realizar este estudio se dejan fijos todos los parámetros de impresión, excepto la temperatura en la boquilla de extrusión, que se va a modificar entre los valores 315 °C y 330 °C.

No existe ningún ensayo definido/normalizado para calcular la adherencia entre las capas de una pieza impresa, por lo que se toma como modelo el ensayo de tracción UNE-EN ISO 14130/1:1999, y se realiza una comparativa entre los valores de resistencia obtenidos a las diferentes temperaturas. Además, con objeto de analizar los huecos y superficies en las zonas de

unión de las diferentes capas, se realiza un análisis de microscopía SEM, y se analiza el peso por si hubiera alguna diferencia.

Tal y como se ha analizado, la Tg del material ronda los 92 °C, por lo que la unión entre capas se produce por encima de esta temperatura, para conseguir una buena unión entre capas y, por tanto, mejores prestaciones mecánicas, la temperatura se debe mantener el máximo tiempo posible por encima de la Tg.

El proceso de impresión se ha realizado cargando el fichero ".stl" de Probeta Altera y ajustando los parámetros de impresión en el programa Kisslicer, tal y como se muestra en la Figura 35 y en la Tabla 8. Con los parámetros definidos se procede a imprimir las probetas para realizar cada ensayo, imprimiendo 5 probetas por configuración. En la Figura 36 se muestran las probetas impresas en el plano XY. Para mantener la trazabilidad de las probetas impresas, se codifican de la siguiente manera: temperatura, porcentaje de relleno y número de probeta.

En general, para conseguir una buena adherencia a la cuna es aconsejable imprimir un "raft" (material impreso en la base para una correcta adherencia), el material aconsejado por la casa comercial y que se ha utilizado en este estudio, se denomina SSU05, y se trata de un ABS.

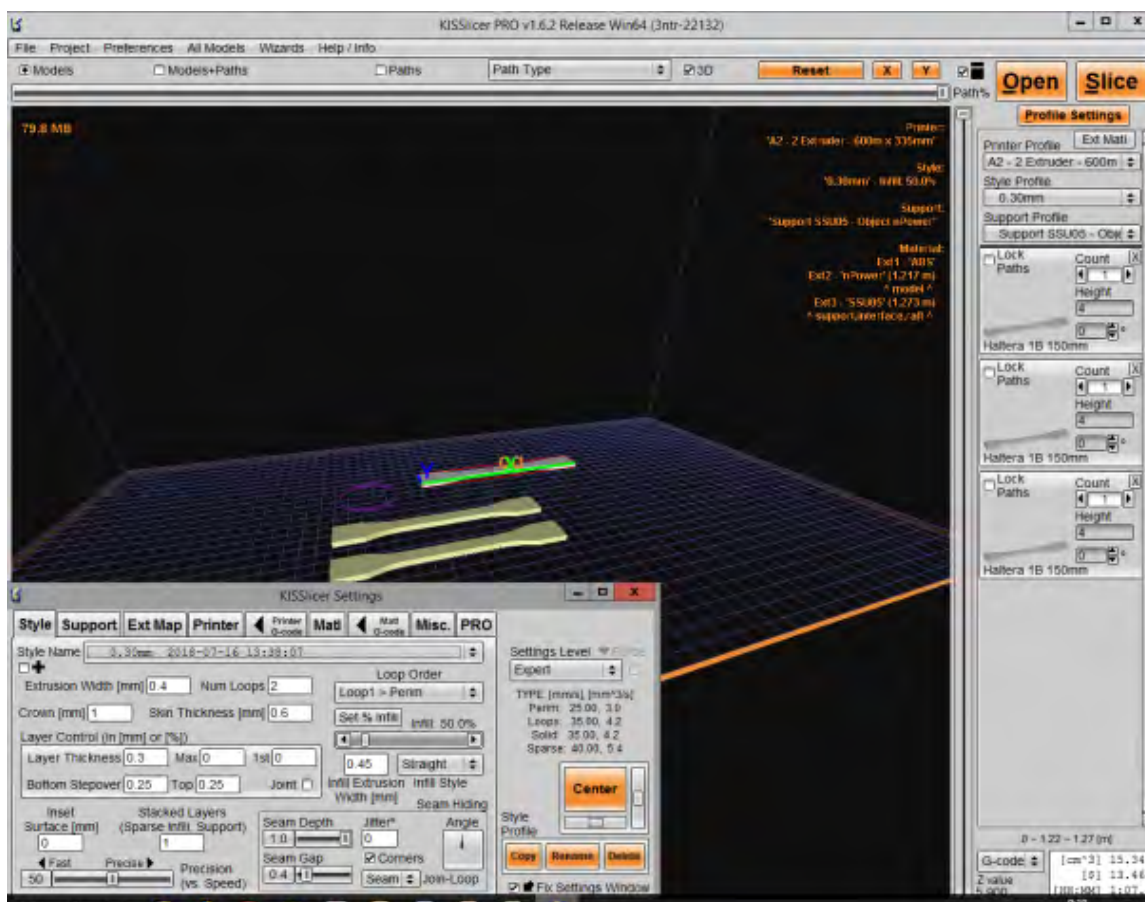


Figura 35: Software KISSlicer de probetas

Los parámetros definidos para el PPS y el material soporte SSU05 se muestran en las Tablas 8 y 9 respectivamente.

Tabla 8: Parámetros impresión para el material PPS

Material	Parámetro	Valor
PPS	Tª extrusor	315°C - 330°C
	Tª cuna	110°C
	Tª cámara	85°C
	Anchura extrusión (mm)	0,4mm
	Altura de capa (mm)	0,3mm
	Espesor de piel (mm)	0,6mm
	Porcentaje de infill	50%

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 9: Parámetros de impresión para el material soporte SSU05

Material	Parámetro	Valor (°C)
SSU05	T ^a extrusor	245
	T ^a cuna	110
	T ^a cámara	70



Figura 36: Probetas impresas, plano XY

Una vez impresas las probetas a ambas temperaturas se realiza una primera inspección morfológica, ya que, si aparecen rugosidades, alabeos, y deformaciones, la impresión no sería correcta. De esta impresión visual se determina que:

- Para ambas temperaturas el aspecto superficial de las piezas es correcto, no apreciándose mala adherencia entre capas, ni alabeos, ni porosidades.
- No se aprecian diferencias en el acabado superficial entre las piezas impresas a 315 °C y las impresas a 330 °C.

3.2.1.1.1 Peso y dimensiones

Las Tablas 10 y 11 muestran los valores de peso y dimensiones para cada temperatura. Observándose que no hay diferencia en el peso por realizar la impresión a diferentes temperaturas, aunque la probeta 1 para una temperatura de 330 °C pesa 0,1 g más, el resto de los valores son muy estables. Del análisis realizado sobre las dimensiones a ambas temperaturas se observa que, a 315 °C la probeta es algo más ancha y tiene menor espesor, lo que nos indica que el extrusor está ejerciendo más presión en cada capa, es decir, el efecto producido es de compactación de las capas, lo que, tal y como se analizará en el ensayo de tracción, es probable que exista una mejoría en la resistencia mecánica, al estar las capas más fundidas unas con otras.

Tabla 10: Valor peso y dimensiones a 315 °C

Probeta	Peso (g)	Anchura (mm)	Espesor (mm)
315501	8,2	10,15	4,17
315502	8,2	10,18	4,24
315503	8,2	10,18	4,19
315504	8,2	10,15	4,17
315505	8,2	10,15	4,18
Media 315 °C	8,2	10,16	4,19
Desviación 315 °C	0	0,02	0,01

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 11: Valor peso y dimensiones a 330 °C

Probeta	Peso (g)	Anchura (mm)	Espesor (mm)
330501	8,3	10,15	4,25
330502	8,2	10,12	4,2
330503	8,2	10,13	4,23
330504	8,2	10,14	4,24
330505	8,2	10,12	4,22
Media 330 °C	8,22	10,13	4,23
Desviación 330 °C	0,04	0,01	0

3.2.1.1.2 Ensayo de tracción

Para poder definir la temperatura óptima, y como no se aprecian diferencias importantes en el acabado superficial, se realiza un análisis cuantitativo para ver si hay diferencias en cuanto a la resistencia mecánica. Las Tablas 12 y 13 muestran los resultados de dichos ensayos, donde se puede observar que no hay una diferencia apreciable en cuanto a la resistencia, siendo algo superior a 315 °C, lo que valida la hipótesis realizada al analizar las dimensiones, donde se ha visto que las capas están más compactas y, por tanto, tienen una mejor unión.

Tabla 12: Valores ensayo de tracción a 315 °C

Probeta	Resistencia tracción (Mpa)
315501	25,3
315502	24,6
315503	25,6
315504	25,1
315505	25,3
Media 315 °C	25,2
Desviación 315 °C	0,37

Tabla 13: Valores ensayo de tracción a 330 °C

Probeta	Resistencia tracción (Mpa)
330501	25,1
330502	25,2
330503	25,1
330504	24,7
330505	25,4
Media 330 °C	25,1
Desviación 330 °C	0,26

3.2.1.1.3 Análisis SEM

El objetivo de realizar un análisis SEM es validar la estructura interna de las piezas a ambas temperaturas. De dicho análisis se concluye que no se aprecian poros ni mala adherencia en ninguna de las dos temperaturas, por lo que, a priori, la adherencia es buena en ambos casos. Las Figuras 37 y 38 muestran el análisis SEM realizado para cada temperatura.

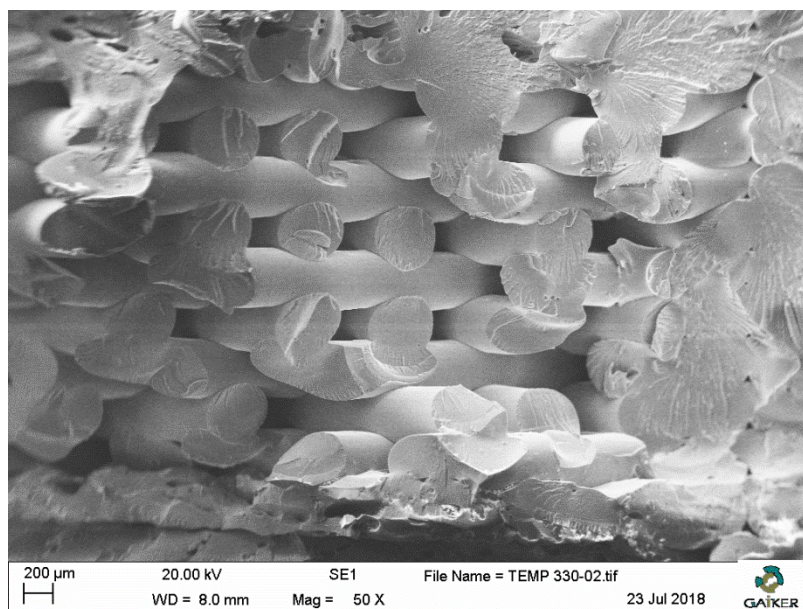


Figura 37: SEM probeta a 330 °C

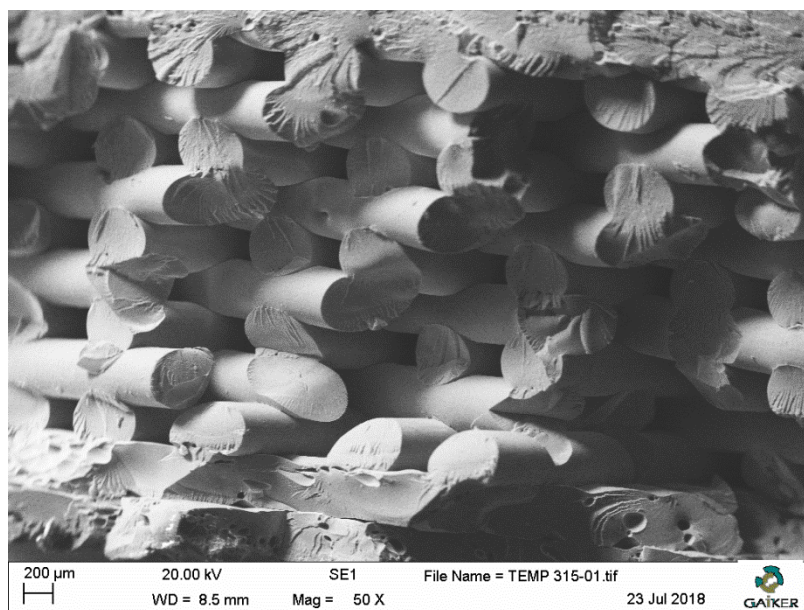


Figura 38: SEM probeta a 315 °C

Con los resultados de este estudio de temperaturas, se puede concluir que a pesar de no existir prácticamente diferencias en la impresión a ambas temperaturas durante la impresión a 315 °C las capas quedan más compactas, lo cual se ha verificado al analizar las dimensiones de las probetas, donde el espesor de la probeta impresa a 315 °C es algo menor y el ancho es algo mayor.

Es decir, la boquilla ejerce mayor presión sobre las capas y, en consecuencia, aumenta el contacto entre las capas mejorando la fusión entre las mismas. Al mejorar la unión se mejora la adherencia entre capas, y las propiedades mecánicas, lo que se ha verificado con los ensayos realizados al obtenerse una resistencia a tracción algo superior a 315 °C. Por lo tanto, se va a dejar fijo el parámetro de temperatura de extrusión del material en 315 °C para todos los casos de este estudio.

3.2.2 Efecto de los parámetros de impresión

3.2.2.1 *Análisis de las propiedades en función del porcentaje de relleno y patrón*

Con el objetivo de evaluar cómo el porcentaje afecta a la resistencia y, por tanto, poder definir una estrategia de impresión acorde a las necesidades funcionales del diseñador, se realiza un estudio comparativo entre el patrón rectilíneo y el octogonal con tres porcentajes de relleno 30 %, 40 % y 50 % y 0,2 mm de altura de capa.

Estos patrones se han seleccionado por ser, según los resultados recogidos por otros investigadores en la bibliografía sobre el tema, los que mejores prestaciones mecánicas versus estabilidad de proceso dan a las piezas impresas⁽¹⁾. La selección de porcentaje de relleno se ha realizado, por un lado, según la recomendación del fabricante, que no aconseja imprimir este material por encima del 50 % porque puede dar problemas de impresión, y por otro, porque para un porcentaje menor del 30 % los acabados superficiales no son buenos, tal y como se ha analizado posteriormente en esta investigación. De forma general, se utilizan porcentajes por debajo del 30 % para la fabricación de piezas de concepto, es decir, para validar geometrías y aspectos no funcionales, ya que al ser el porcentaje de relleno bajo las piezas impresas tienen demasiados huecos internos y, por tanto, muy bajas propiedades mecánicas.

La Figura 39 (a) y (b) muestra el aspecto de los dos tipos de patrones seleccionados, tal como se presentan a través del software laminador Kisslicer (software utilizado en este estudio), para un porcentaje de relleno del 20 %. Aunque el estudio es sobre el 50 % se ha seleccionado este porcentaje para poder ilustrar las diferencias en la geometría, pero como se ha mencionado anteriormente, este porcentaje tan bajo no es óptimo para piezas funcionales.

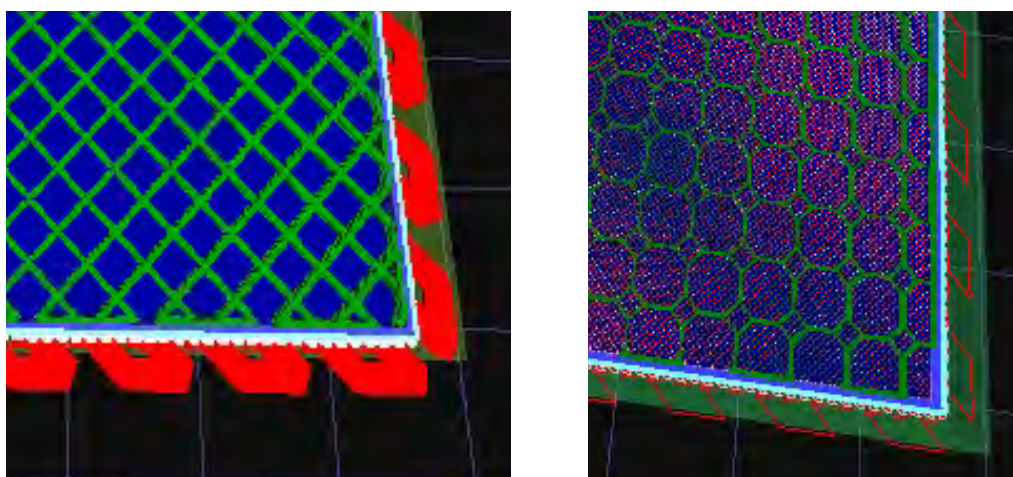


Figura 39: Software Kisslicer (a) 20 % rectilíneo, (b) 20 % octogonal

3.2.2.1.1 Estudio de las propiedades mecánicas

Para realizar el estudio se han impreso y ensayado a tracción cinco probetas de cada configuración seleccionada y en cada dirección de fabricación, denominadas en este estudio T^{flat} , T^{edge} y L, con los parámetros de impresión definidos por el fabricante y la temperatura de extrusión óptima definida en el estudio realizado, es decir 315°C. La Figura 40 muestra las probetas impresas para la realización de los ensayos en las tres direcciones de crecimiento.

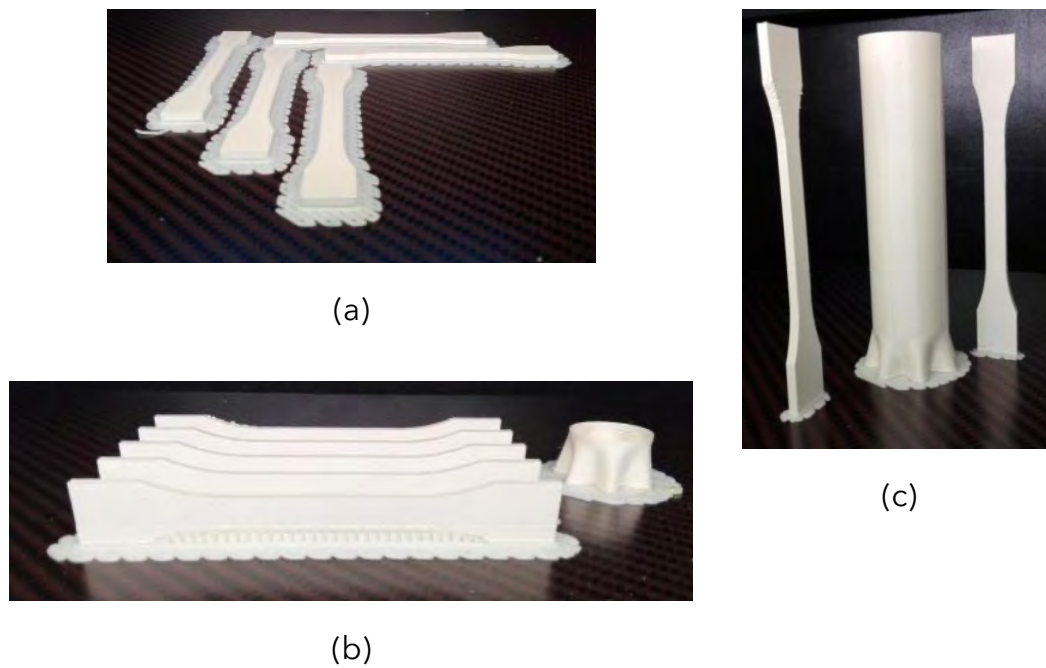


Figura 40: (a) probetas impresas en la dirección T^{flat} , (b) en la dirección T^{edge} , (c) en la dirección L

Las Tablas 14 y 15 muestran los resultados de los ensayos de resistencia a tracción obtenidos para cada patrón, rectilíneo y octagonal en función del porcentaje de relleno con una altura de capa constante de 0,2 mm.

Tabla 14: Patrón rectilíneo de 0,2 mm de altura de capa con porcentaje de relleno 50 % - 40 % - 30 %

Porcentaje de relleno	Dirección impresión	Resistencia a tracción (MPa)	Desviación estándar
50%	T^{flat}	29,20	0,29
	T^{edge}	32,40	0,15
	L	15,40	1,87
40%	T^{flat}	24,00	1,30
	T^{edge}	31,70	0,40
	L	14,40	1,96
30%	T^{flat}	23,60	0,80
	T^{edge}	29,40	0,40
	L	14,00	1,60

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 15: Patrón octogonal de 0,2mm de altura de capa con porcentaje de relleno 50 % - 40% - 30 %

Porcentaje de relleno	Dirección impresión	Resistencia a tracción (Mpa)	Desviación estándar
50%	T ^{flat}	38,90	0,40
	T ^{edge}	45,50	2,40
	L	15,60	4,30
40%	T ^{flat}	25,60	0,70
	T ^{edge}	24,30	0,15
	L	15,00	0,50
30%	T ^{flat}	26,80	0,40
	T ^{edge}	22,70	0,70
	L	8,77	2,10

Los resultados se han analizado mediante el análisis de varianza ANOVA, como se muestra en la Tabla 16, para determinar la influencia que tienen las variables independientes (porcentaje de relleno, dirección y patrón de impresión) sobre la variable dependiente (resistencia a la tracción).

Para realizar dicho análisis ANOVA, las variables de dirección de impresión se codifican como L, -1; T^{edge}, 0; T^{flat}, 1, y las variables de patrón se codificaron como patrón octogonal, -1; patrón rectilíneo, 1.

Tabla 16: Análisis de la varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor F
Regresión	4	1233,54	80,58%	1233,54	308,39	13,49	0,00
Relleno	1	223,00	14,57%	223,00	223,00	9,75	0,01
Dirección de impresión	2	1005,97	65,72%	1005,97	502,99	22,00	0,00
Patrón de impresión	1	4,57	0,30%	4,57	4,57	0,20	0,66
Error	13	297,20	19,42%	297,20	22,86		
Total	17	1530,74	100,00%				

El análisis de varianza (ANOVA) indica que el porcentaje de relleno y la dirección de impresión son estadísticamente significativos ($p = 0,008$ y $p =$

0,000 respectivamente). Y que el patrón no es significativo lo que puede ser debido a que la estructura interna generada (patrón) para el ensayo realizado no es tan influyente.

Las superficies de respuesta (RSM) se construyeron como se muestra en la Figura 41 para encontrar la configuración óptima y con el mejor rendimiento mecánico. Teniendo en cuenta las posibilidades reales de impresión, no imprimir por encima del 50%, los mejores resultados de resistencia a la tracción se obtuvieron con un 50% de relleno y una dirección de impresión T^{edge} , independiente del patrón de impresión.

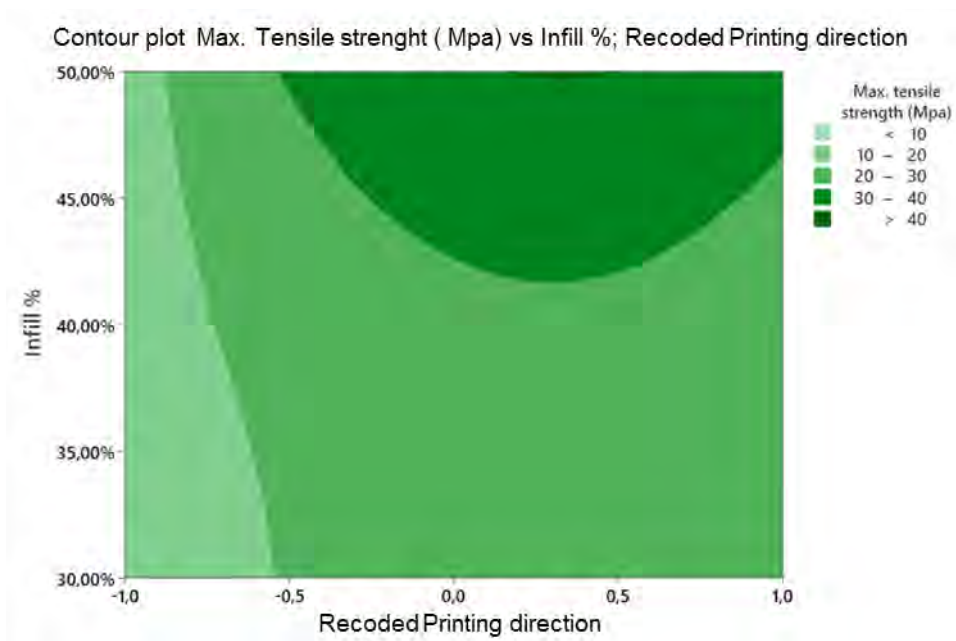


Figura 41: Superficie de respuesta (RSM)

En Figura 42 se observa cómo a menor porcentaje de relleno, para ambas configuraciones, la resistencia es menor. También se observa que no existe una linealidad en los resultados obtenidos. Esto puede deberse a la

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

combinación del comportamiento anisótropo de las piezas impresas por FDM, con la inestabilidad proceso, que se ve afectado por el tipo de material, su porcentaje de humedad, la circularidad del filamento, la temperatura ambiente, y desviaciones en la dosificación del extrusor.

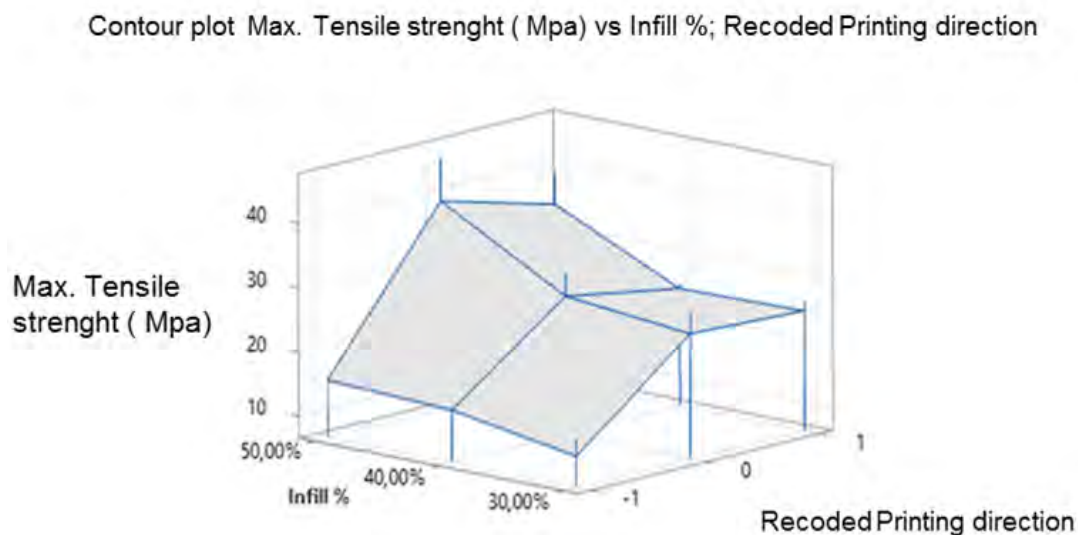


Figura 42: Comparativa entre resistencia, porcentaje de relleno y dirección de impresión

No obstante, a pesar de no existir esta linealidad, sí que se observa que, a menor porcentaje de relleno, hay mayor ahorro de material y tiempo de impresión, pero peores propiedades mecánicas, debido a que hay más huecos y, por tanto, menos zonas de unión entre las capas. Tal y como se aprecia también en el Gráfico 10.

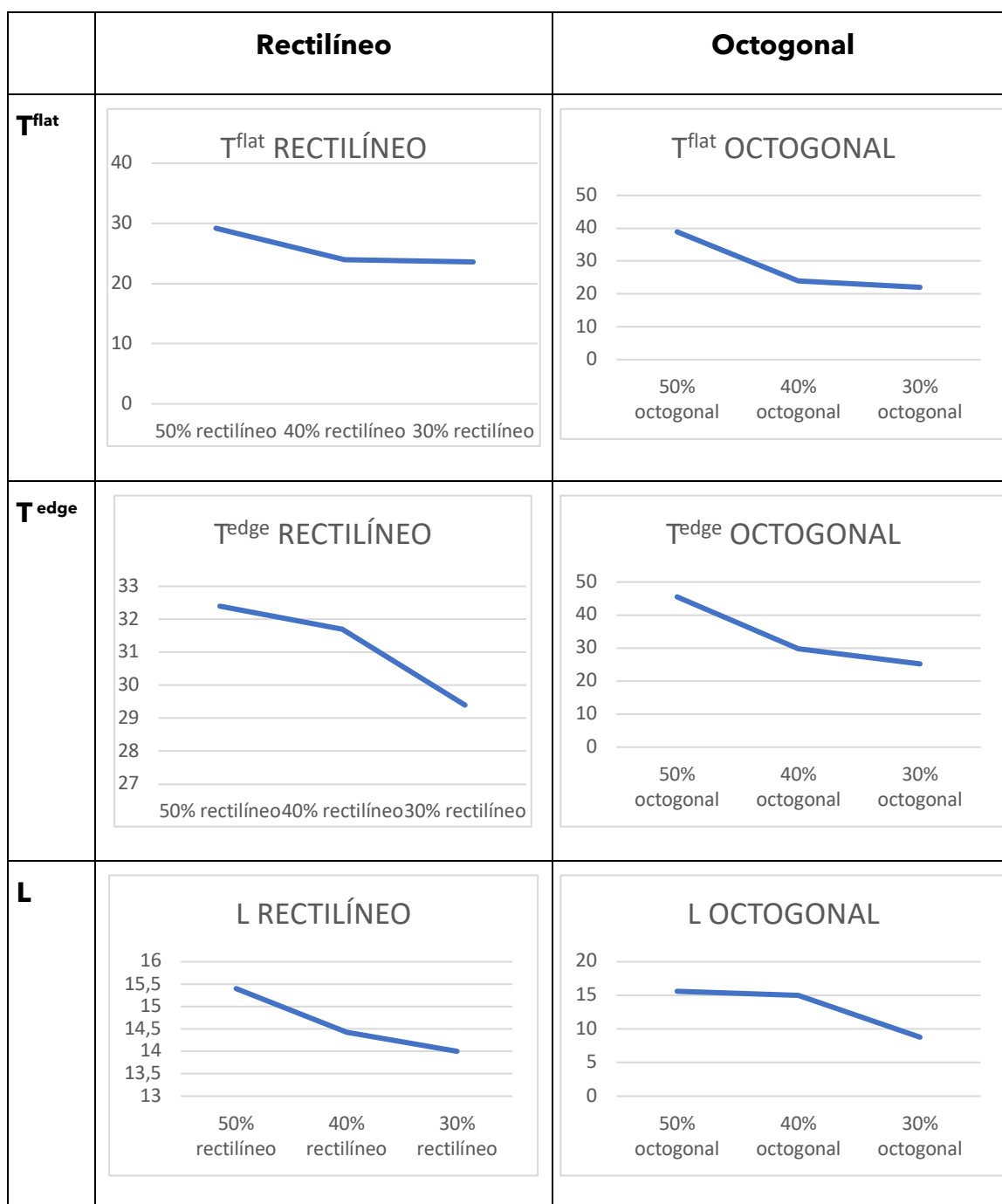


Gráfico 10: Curvas comparación entre patrón rectilíneo y octogonal

Por lo tanto, se puede concluir que en todas las configuraciones el patrón octogonal al 50 % tiene, ligeramente, mejores propiedades de resistencia, y que la configuración L en ambos patrones es la que peores propiedades tiene, un aspecto previsible ya que en esta configuración la dirección de

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

crecimiento y, por tanto, de cada capa es perpendicular al ensayo realizado, mientras que en las configuraciones "flat" y "edge" el ensayo se realiza en la misma dirección que la deposición del filamento.

3.2.2.1.2 Análisis con microscopía SEM

El objetivo de este análisis es analizar el comportamiento interno durante la impresión, es decir, la estructura interna de los diferentes porcentajes de relleno, para evaluar si algún porcentaje o configuración no mantiene su estructura interna, lo que puede ocasionar problemas en las propiedades mecánicas del material que no se pueden detectar con una visión superficial de la pieza impresa. Asimismo, se pretende estudiar la relación entre las propiedades mecánicas y el tipo de patrón y porcentaje de relleno.

Entre las probetas ensayadas se seleccionan las que tienen una fractura más limpia para poder realizar un análisis con microscopía SEM, si la fractura no es limpia este análisis resulta complicado de realizar.

La Figura 43 muestra las probetas metalizadas, así como su colocación en el porta probetas del SEM.

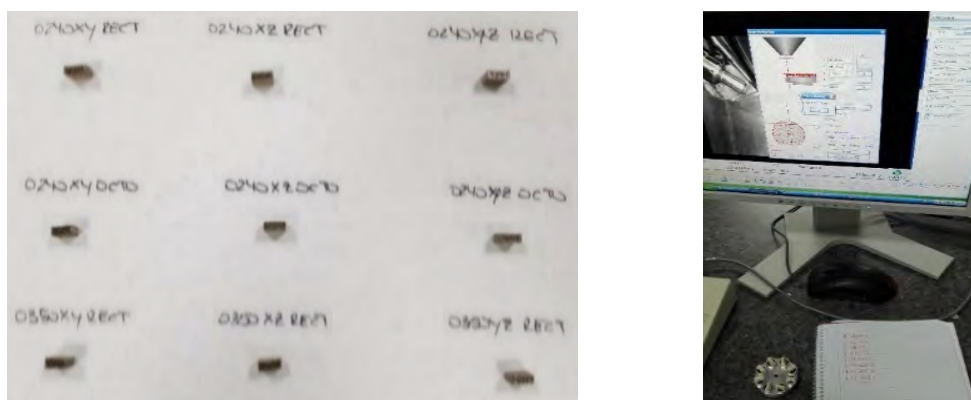
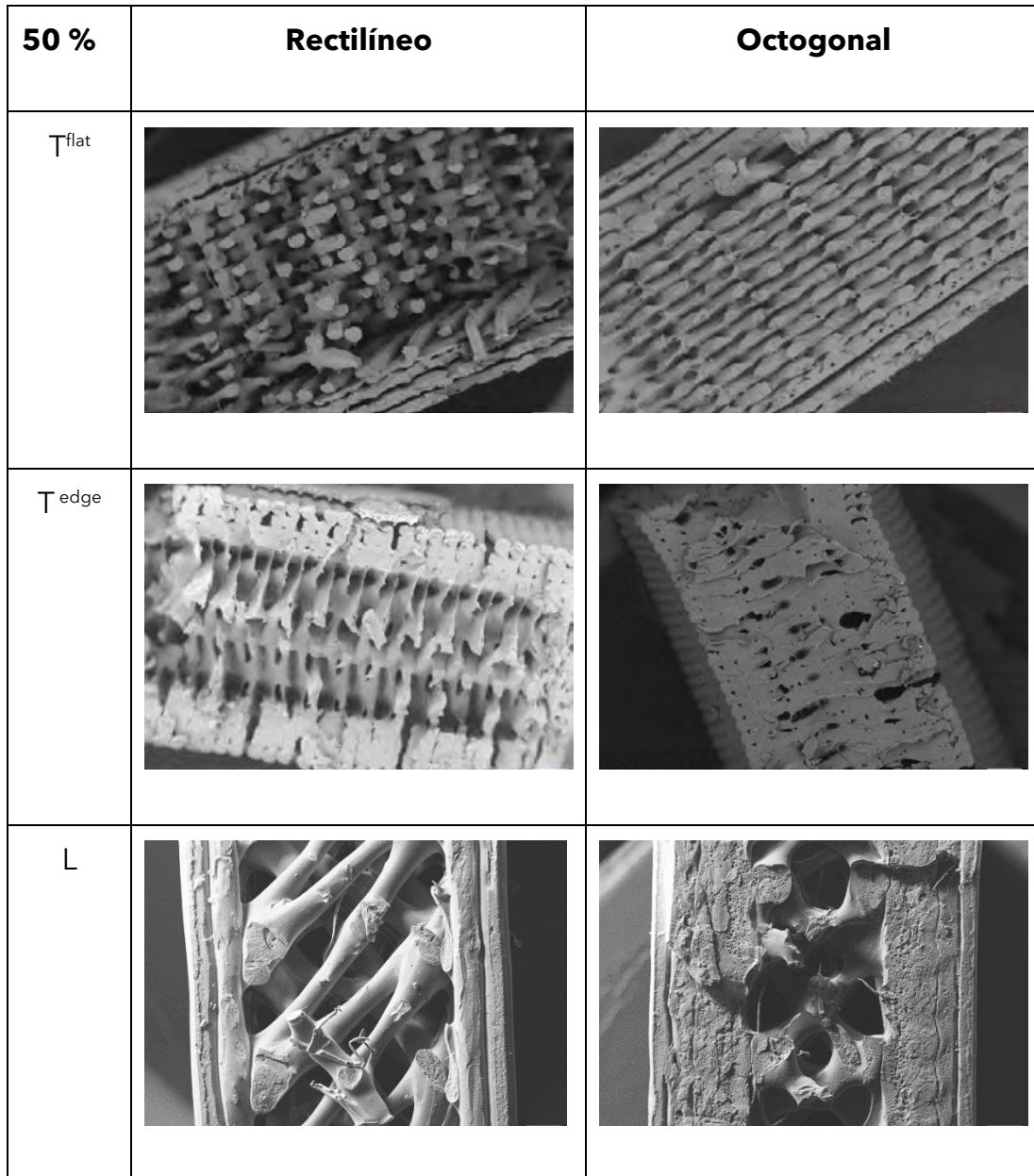


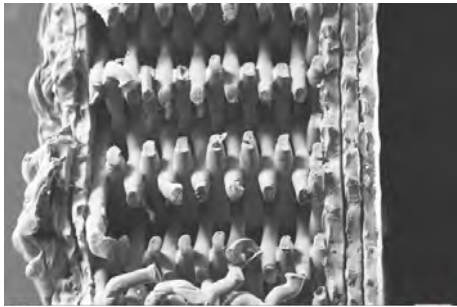
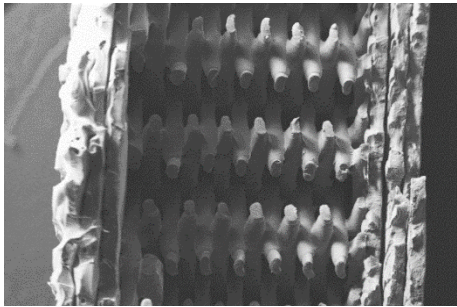
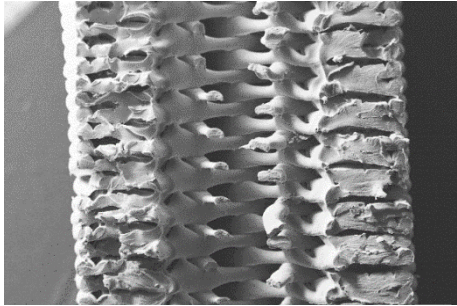
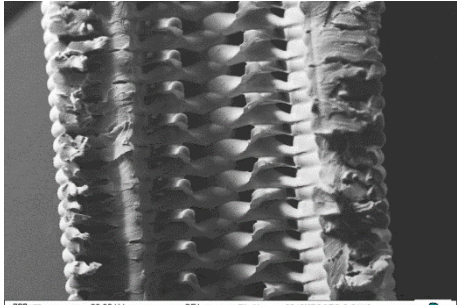
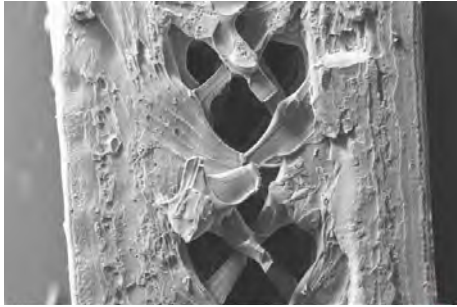
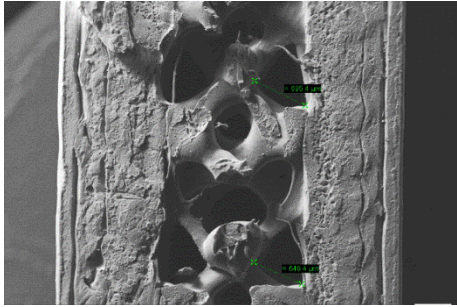
Figura 43: Probetas preparadas para análisis SEM

La Figura 44 muestra la comparativa SEM de ambas configuraciones con tres porcentajes de relleno en las tres direcciones.



Continúa siguiente página

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

40 %	Rectilíneo	Octogonal
T_{flat}		
T_{edge}		
L		

Continúa siguiente página

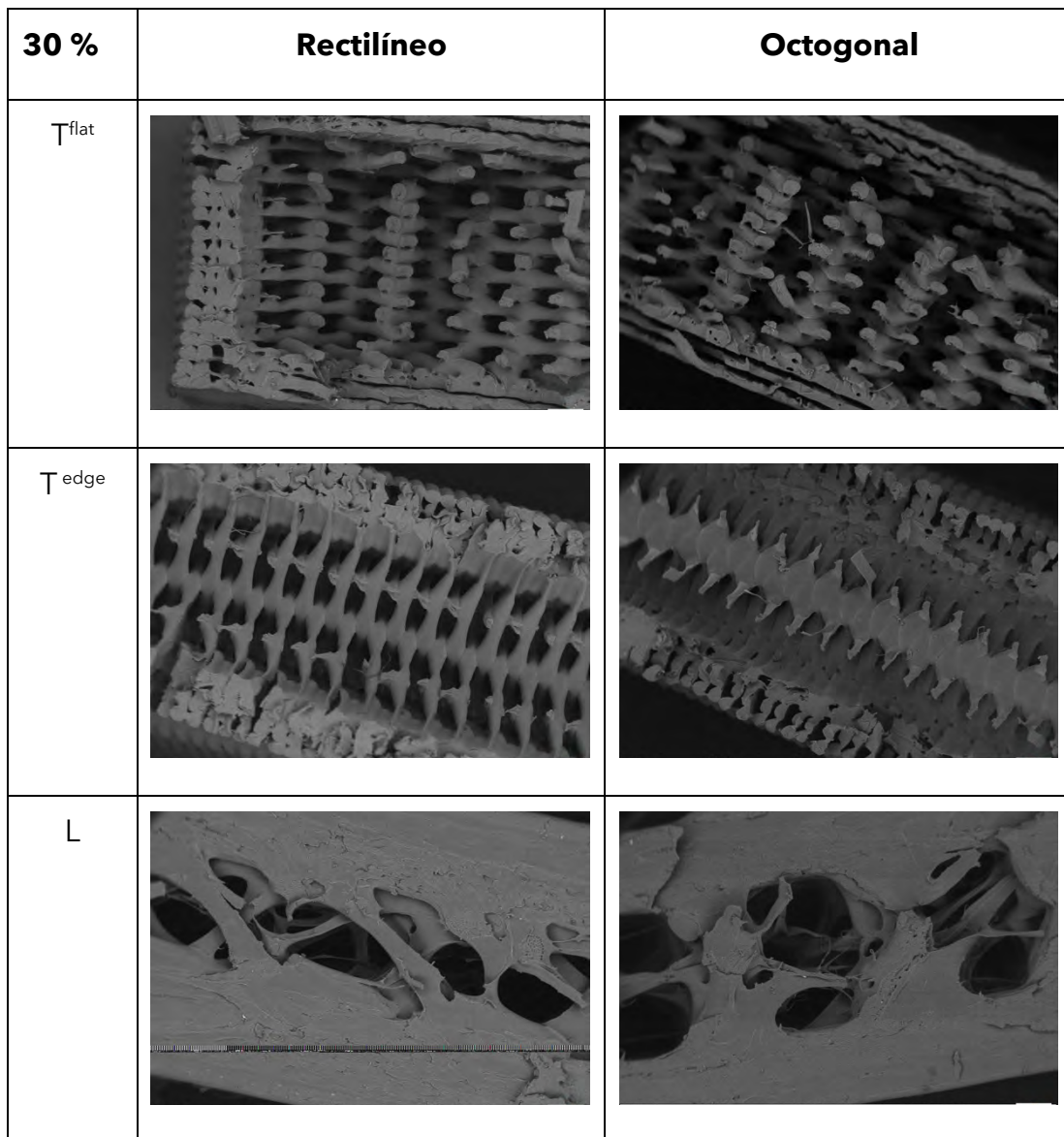


Figura 44: Comparativa patrón rectilíneo y octogonal con diferentes porcentajes de relleno

Del análisis realizado se puede concluir que, para ambas configuraciones, porcentajes, y direcciones de crecimiento, la impresión genera una estructura interna constante, por lo que ninguna de estas configuraciones es descartable desde el punto de vista de mala impresión, o proceso de impresión no estable.

Asimismo, se aprecia cómo el tamaño de huecos aumenta conforme baja el porcentaje de relleno, tal y como se esperaba al ser las propiedades mecánicas menores. Cuanto mayor sean los huecos, la unión entre las capas es más débil, y, por tanto, las propiedades bajan.

Para ambos patrones, en la configuración T^{edge} los huecos son menores, lo que favorece la adhesión entre capas y las propiedades mecánicas, confiriéndole mejores propiedades. Y al igual que ocurre con la configuración T^{flat} , la fractura no presenta deformación plástica.

Comparando los mismos porcentajes para cada patrón, se aprecia que en el octogonal los huecos generados entre las capas son inferiores a la estructura rectilínea, por lo que hay mayor continuidad y, por tanto, mejores propiedades mecánicas.

3.2.2.2 Análisis de las propiedades en función de la altura de capa, 0,2 mm y 0,3 mm

A continuación, se ha estudiado la influencia de la altura de capa en las propiedades mecánicas y en el tiempo de impresión, realizando también un estudio mediante SEM para verificar la estructura interna. Para ello se han tomado como parámetros de diseño la geometría de las probetas normalizadas para el ensayo de tracción con patrón rectilíneo y porcentaje de relleno 50 %.

En primer lugar, se ha realizado una comparativa teórica de tiempos de impresión según la altura de capa 0,3 mm, 0,2 mm y 0,1 mm, observándose que la impresión con 0,1 mm no es viable si estamos pensando en un entorno industrial, porque el tiempo de fabricación es demasiado largo, tres

veces superior si lo comparamos con la altura de capa 0,2 mm, tal y como se aprecia en la Tabla 17.

Por lo tanto, a nivel experimental para la realización de los ensayos de tracción únicamente se ha estudiado la impresión para las dimensiones de altura de capa de 0,3 mm y 0,2 mm.

Tabla 17: Comparativa en tiempos de impresión

Altura de capa (mm)	Dirección	Valor
0,3	T ^{flat}	49 min
	T ^{edge}	52 min
	L	1h 10 min
0,2	T ^{flat}	1h 39 min
	T ^{edge}	2h 22 min
	L	2h 22 min
0,1	T ^{flat}	3h 24 min
	T ^{edge}	6h 44 min
	L	7h 10 min

La Tabla 18 nos muestra los valores de resistencia obtenidos de probetas impresas en las tres direcciones concluyendo que, a menor altura de capa, mejores propiedades de resistencia ya que se generan menos huecos y, por tanto, la unión entre capas es más fuerte.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 18: Comparativa de la resistencia según altura de capa de 0,3 mm y 0,2 mm

Altura de capa	Resistencia	Valor (Mpa)
0,3	σ_T^{flat}	20,9
	σ_T^{edge}	22,6
	σ_L	12,4
0,2	σ_T^{flat}	29,2
	σ_T^{edge}	32,5
	σ_L	15,4

Con el objetivo de validar que la dimensión de la altura de capa se mantiene constante en ambos casos, y es acorde a los parámetros de 0,2 mm y 0,3 mm definidos, se realiza el análisis SEM a las piezas impresas. Tal y como se ilustra en las Figuras 45 y 46 para ambas configuraciones se aprecia que la dimensión de los huecos es estable dentro de la misma estructura, y mantiene valores acordes a la altura de capa definida 220 μ para la altura de capa de 0,2mm y 306 μ . para la altura de capa 0,3mm.

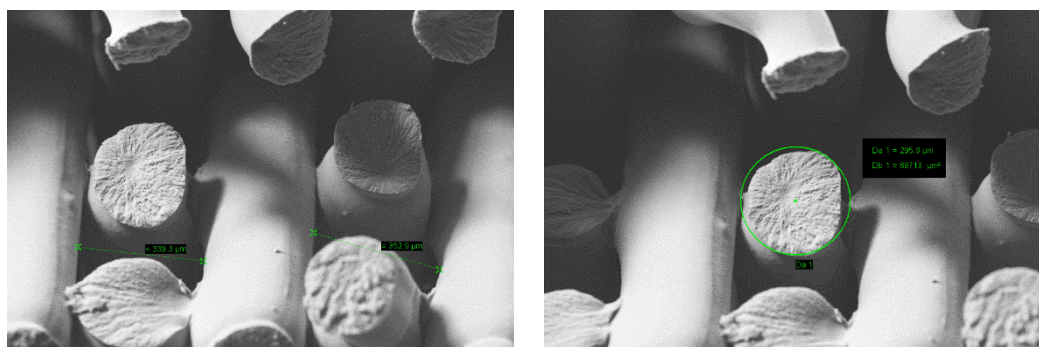


Figura 45: Patrón rectilíneo T^{flat} al 50 % altura de capa de 0,3 mm

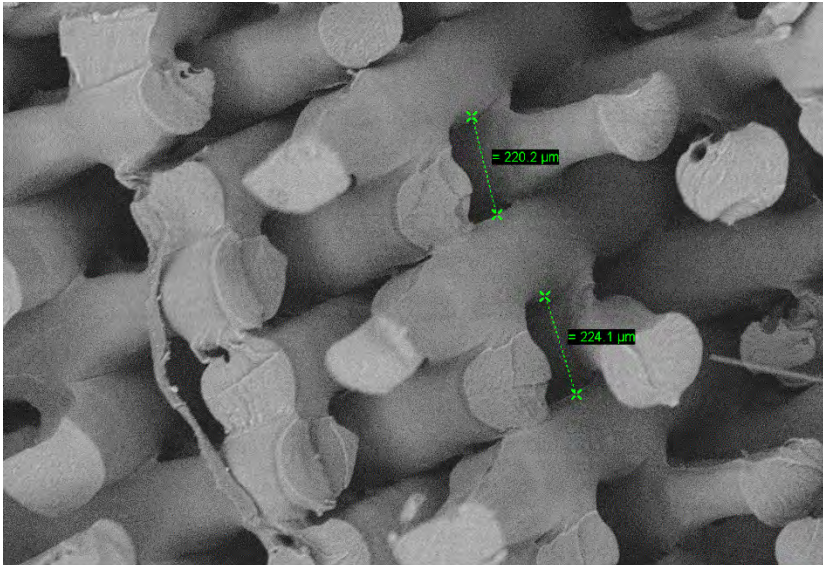


Figura 46: Patrón rectilíneo T^{flat} al 50 % altura de capa de 0,2 mm

Por lo tanto, con una altura de capa de 0,2mm se obtienen mejores propiedades mecánicas, pero también es mayor el tiempo de impresión, por lo que el diseñador deberá decidir, en cada caso, y en función de los requerimientos, qué altura de capa seleccionar.

3.2.2.3 Análisis de las propiedades en función al espesor de piel

Análisis comparativo del efecto del espesor de piel y el porcentaje de relleno

Tal y como se ha comentado previamente, cuando se imprime con porcentaje de relleno por debajo del 30 %, el acabado superficial empieza a empeorar apareciendo poros en la superficie. Además, las propiedades mecánicas con este tipo de relleno son muy bajas, y el fabricante no recomienda para usos industriales usar un porcentaje de relleno tan bajo. Sin embargo, cuando se quieren obtener piezas no funcionales y de forma rápida para validar conceptos y geometrías, porcentajes bajos de relleno

pueden servir para poder realizar una primera validación y, por lo tanto, acortar la fase inicial de diseño de piezas, y el denominado tiempo de comercialización o "time to market".

Por ello, se ha realizado una comparativa estudiando variaciones en el porcentaje de relleno entre un 10 % y 20 % y espesor de piel 0,4 mm y 0,8 mm, analizando el efecto de estas variables en el acabado superficial, en el peso de las piezas finales y el tiempo de impresión. Para realizar este estudio se han impreso placas de dos espesores (alturas) 6 mm y 12 mm y dimensiones: longitud de 100 mm y anchura de 60 mm, modificando los porcentajes de relleno y espesores de piel. El patrón seleccionado es el octagonal por ser, según se ha comprobado anteriormente en este estudio, la geometría que genera poros de menor tamaño, lo que va a favorecer la obtención de un mejor acabado superficial.

Estudio modificando la altura de capa con espesor de piel 0,4 mm

Se imprime una placa de altura 6 mm con bajo espesor de piel, 0,4 mm y bajo porcentaje de relleno, entre un 10 % y un 20 %. Durante la impresión se puede observar que se producen defectos superficiales en la capa superior de las placas imprimidas. Esto se debe a que la capa de piel depositada no tiene suficiente espesor para cubrir las irregularidades de los hilos de material depositados que cubren los espacios vacíos debidos al bajo porcentaje de relleno. La Figura 47 ilustra esta secuencia y los defectos producidos.

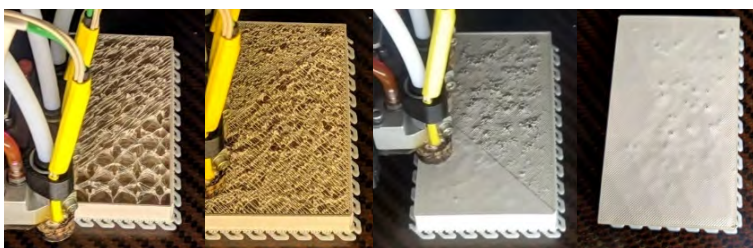


Figura 47: Secuencia de fabricación con bajo espesor de piel y porcentaje de relleno

Para minimizar los efectos producidos, se aumenta la altura de placa a 12 mm, manteniendo el espesor de piel 0,4 mm y el porcentaje de relleno de 20 %. En la Figura 46 se aprecia que la superficie de la pieza sigue mostrando defectos muy visibles. Por lo tanto, el aumento de altura de la placa no consigue corregir las protuberancias producidas por el salto de los hilos depositados para cubrir los huecos del patrón.

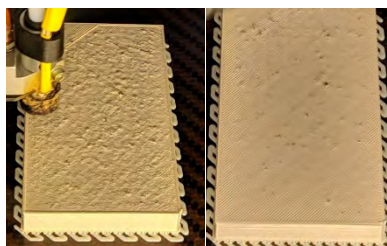


Figura 48: Impresión con 20 % de patrón octogonal

Estudio aumentando el espesor de piel a 0,8 mm.

La Figura 49 ilustra la secuencia correspondiente a la impresión de una placa con 12 mm de altura, un espesor de piel de 0,8 mm y con porcentaje de relleno entre 10 % y 20%, observándose un buen acabado superficial.

Se concluye, por tanto, que con porcentajes de relleno por debajo del 20 % es recomendable trabajar con un espesor de piel superior a los 0,8 mm para conseguir un buen acabado superficial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

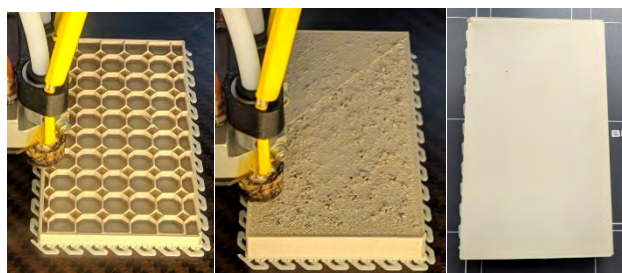


Figura 49: Secuencia de fabricación con alto espesor de piel y bajo porcentaje de relleno

La Tabla 19 muestra los resultados del estudio completo realizado, donde se han comparado para un patrón octogonal y dos espesores de piel 0,4 mm y 0,8 mm el efecto del porcentaje de relleno, el espesor de probeta, peso, tiempo de impresión y acabado superficial.

Tabla 19: Comparativa para patrón octogonal entre espesor de piel, porcentaje de relleno, espesor de probeta, peso, tiempo de impresión y acabado superficial.

Espesor de piel (mm)	Porcentaje relleno	Espesor probeta (mm)	Peso (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Tiempo	Acabado superficial
0,4	10%	6	13,26	0,38	2h 10min	NOOK
		12	17,35	0,39	2h 35min	NOOK
	20%	6	13,28	0,40	2h 15min	NOOK
		12	19,95	0,41	2h 50min	NOOK
0,8	10%	6	20,13	0,56	2h 35min	NOOK
		12	26,5	0,57	3h 05min	OK
	20%	6	22,36	0,60	2h 45min	NOOK
		12	33	0,62	3h 40 min	OK

Se concluye que con un bajo espesor de piel (0,4 mm) se producen defectos superficiales en la capa exterior superior de las placas impresas, especialmente cuando el porcentaje de relleno es bajo (10 %). Aumentado el espesor de piel (0,8 mm) solo se consigue un buen acabado superficial cuando se aumenta también el espesor de la probeta, consiguiendo un buen acabado para ambos porcentajes de relleno de 10 % y 20 %.

Además, se ha observado que el espesor de piel en el caso de piezas con poco espesor (altura) afecta significativamente al valor de la densidad total de la pieza impresa. Y que a medida que aumenta el espesor total de la

pieza impresa, el parámetro que tiene mayor influencia en la densidad global de la pieza, es el porcentaje de relleno.

Comparando los tiempos de impresión, se observa que el tiempo de impresión para obtener una pieza con buen acabado superficial y bajo porcentaje de relleno es muy elevado, por lo que se desaconsejaría si el diseñador está buscando buenos acabados superficiales.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL IMPRESO

En general, la ficha técnica de los materiales que suministran los proveedores es sobre una pieza inyectada, sin embargo, las propiedades de una pieza inyectada no son iguales a las propiedades de la pieza impresa, debido a que ambos procesos de fabricación son muy diferentes. En la inyección, el material en estado fundido se inyecta en un molde y se aplica presión para que el plástico llene todas las partes del molde. Una vez finalizada la inyección, el plástico fundido se enfría y forma una pieza sólida. Mientras que, en el proceso de impresión, si se imprimiera con el 100 % de relleno para tratar de asemejarse al proceso de inyección, la resistencia dependería de la calidad de la unión entre capas, dado que el material se deposita capa a capa en forma de filamento.

Esta diferencia en los procesos de fabricación hace aún más necesario realizar la caracterización de las propiedades del material impreso, con el objetivo de obtener una caracterización útil y veraz para los diseñadores.

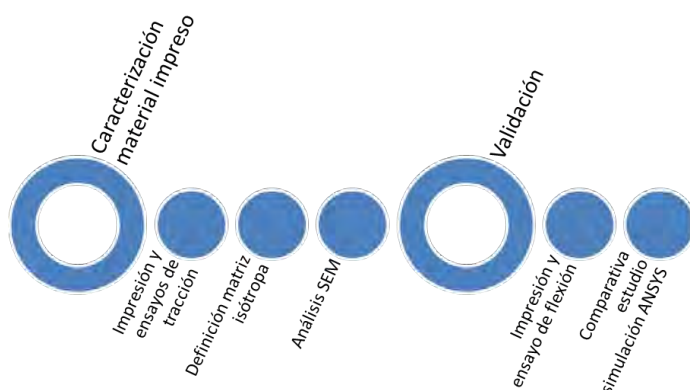


Gráfico 11: Esquema de estudio sobre el material impreso

3.3.1 Ensayo de tracción

3.3.1.1 Relaciones constitutivas

La ecuación constitutiva en notación matricial para un material ortotrópico en el sistema de coordenadas cartesianas es proporcionada por la matriz mostrada en Eq. (1) y Eq. (2). La descripción completa requiere nueve parámetros independientes debido a la simetría del tensor. Teniendo en cuenta las seis relaciones existentes entre los coeficientes de Poisson y los módulos de elasticidad longitudinal, solo tres deben determinarse experimentalmente, ya que el resto de coeficientes de Poisson representan cantidades dependientes debido a la simetría.

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & \frac{-\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_x} & \frac{-\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

En el caso de la impresión por FDM, es razonable simplificar su comportamiento mecánico como materiales transversalmente isotrópicos⁽¹⁸⁾, tal y como se corroborará también en la parte experimental de esta tesis. El gradiente entre las direcciones en el plano de la capa de material es relativamente pequeño en relación con las constantes elásticas para

termoplásticos no reforzados ⁽²⁰⁾. La capa de material es el plano transversal (XY) y las propiedades mecánicas en este plano son las mismas, mientras que las propiedades mecánicas en la dirección que es perpendicular a la capa de material (Z) son diferentes de las del plano transversal ⁽²²⁾.

Los materiales transversalmente isotrópicos se pueden describir mediante cinco constantes elásticas independientes (E_T , E_L , ν_T , ν_{TL} , G_L) donde T representa la dirección transversal (plano de la capa del material) y L representa la dirección longitudinal (perpendicular al plano de la capa del material). Comparando estas constantes elásticas con los coeficientes de la matriz en Eq. 2, obtenemos las siguientes relaciones.

$$E_T = E_x = E_y \quad (3)$$

$$E_L = E_z \quad (4)$$

$$\nu_{TT} = \nu_{xy} = \nu_{yx} \quad (5)$$

$$\nu_{TL} = \nu_{yz} = \nu_{xz} \quad (6)$$

$$G_{xy} = E_T/2(1 + \nu_T) \quad (7)$$

$$G_{LT} = G_{yz} = G_{xz} \quad (8)$$

Los ensayos mecánicos de tracción y cizallamiento para obtener los coeficientes elásticos y la resistencia del material se realizan utilizando las normas UNE-EN-ISO-527-2 [Y] y UNE-EN-ISO-14129 [Z], recogidos en las referencias ²³ y ²⁴ respectivamente. El módulo elástico en las diferentes direcciones, E_i , se puede obtener mediante de la Eq. 9:

$$E_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\varepsilon_i} = \frac{\sigma'_i - \sigma_i}{\varepsilon'_i - \varepsilon_i} \quad (9)$$

donde σ_i es la tensión medida para un valor de deformación unitario $\varepsilon_i = 0,05 \%$ y σ'_i es la tensión medida para un valor de deformación $\varepsilon'_i = 0,25 \%$. Los coeficientes de Poisson, ν_{ij} , se obtienen de la siguiente manera:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \quad (10)$$

donde ε_j representa el alargamiento longitudinal por unidad de longitud en la dirección del eje de la muestra, y ε_i corresponde al acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada. Una vez obtenidos los valores de estas constantes elásticas, la simetría del tensor debe validarse de acuerdo con la siguiente relación:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_j} = \frac{\nu_{ji}}{E_i} \quad (11)$$

Finalmente, el módulo de cizallamiento, G_L , se puede obtener de una pieza con un ángulo de impresión de 10° en el plano XZ ("flat") o YZ ("edge") y aplicando la siguiente ecuación:

$$G_{LT} = \left(\frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{\frac{1}{E_\theta} - \frac{(\cos \theta)^4}{E_T} - \frac{(\sin \theta)^4}{E_L} + \frac{2\nu_{TL} (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{E_L}} \right) \quad (12)$$

3.3.1.2 Ensayos de tracción

Se imprimen cinco probetas por cada dirección de crecimiento, imprimiendo todas las probetas en las mismas condiciones: 50 % de relleno

patrón rectilíneo y 0,2mm de espesor de filamento. La Figura 50 muestra la diferente orientación de las piezas impresas según las normas UNE-EN-ISO-ASTM 52921:2017.

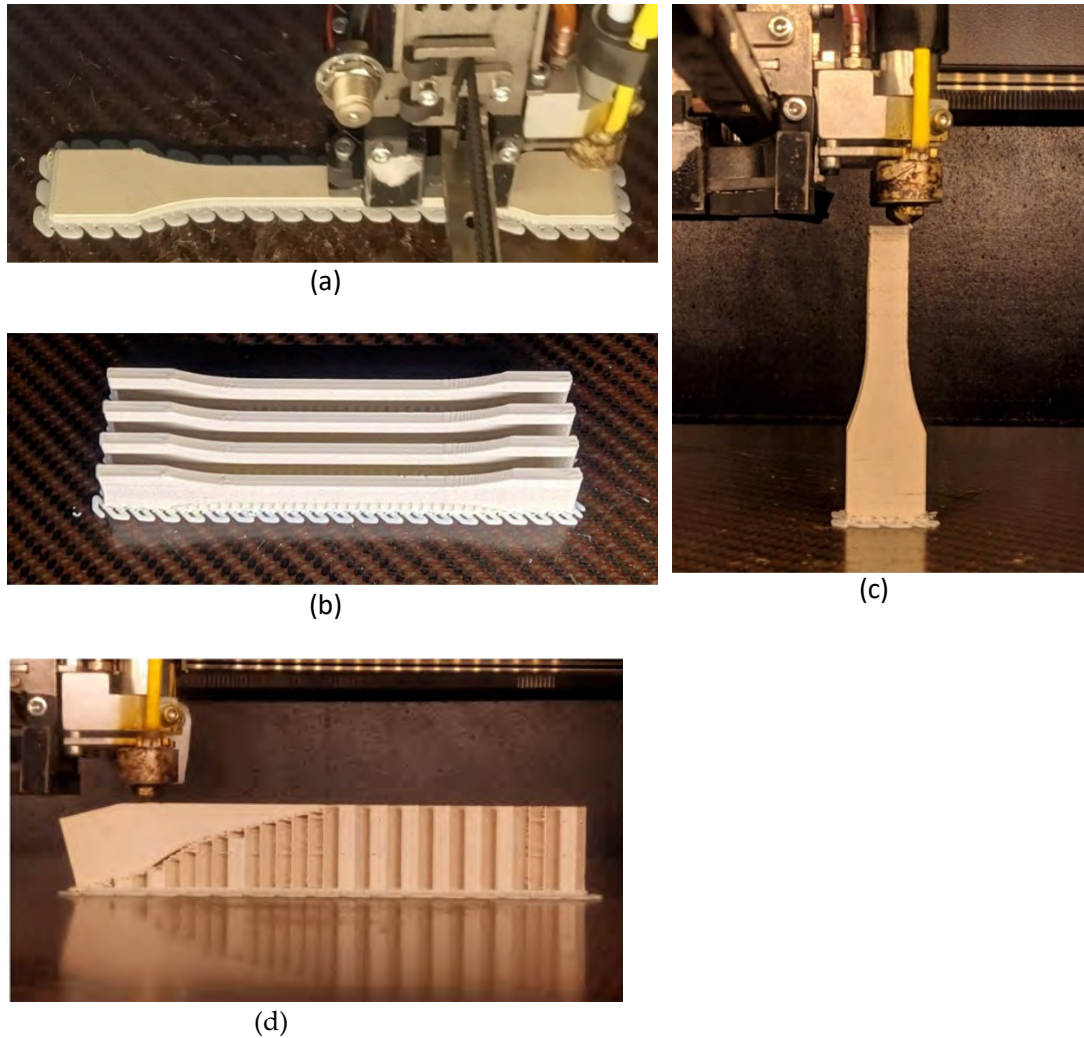


Figura 50: Direcciones de fabricación. (a) Configuración plana "flat", (b) configuración de borde "edge", (c) configuración vertical "L", (d) configuración a 10°.

El módulo de elasticidad transversal, E_T , puede determinarse a lo largo de la dirección longitudinal de la muestra de tracción para una muestra

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

fabricada en la configuración que llamaremos "flat", o para una girada en 90° a lo largo del eje longitudinal "edge". La Figura 51 muestra las dos configuraciones redundantes mediante las cuales se podría obtener el módulo de elasticidad transversal, E_T . Esta investigación propone emplear el promedio de ambos valores para obtener una única matriz transversalmente isotrópica que pueda aplicarse a efectos de cálculo numérico ⁽¹⁸⁾.

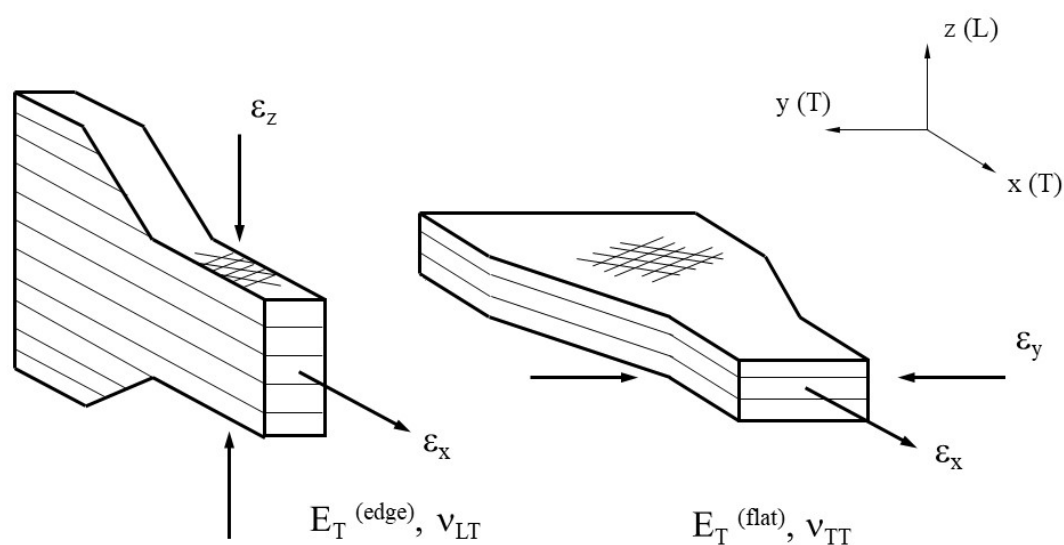


Figura 51: Configuraciones "edge" y "flat" de la muestra de tracción. Fuente: elaboración propia

La Figura 52 muestra la configuración vertical de la muestra de tracción para la obtención de E_z , ν_{TL} y G_{LT} .

Para determinar el módulo de cizallamiento G_{LT} , que está inclinado por un ángulo de 10° al eje X o Y se utiliza una muestra inclinada 10° , para lo cual será necesario imprimir material de soporte.

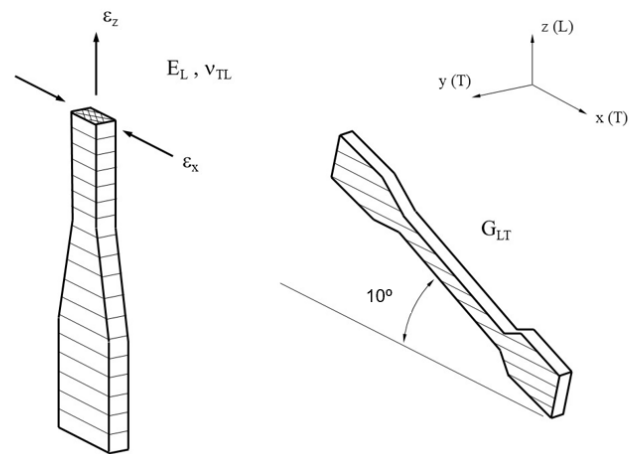


Figura 52: Configuración de muestra de tracción en vertical y configuración a 10°

Se imprimieron, con los parámetros de impresión definidos, y ensayaron cinco muestras en cada una de las direcciones de crecimiento. En la Figura 53 se aprecia la distribución de la deformación que va sufriendo la probeta según se va realizando el ensayo hasta llegar a la rotura (Figura 54)

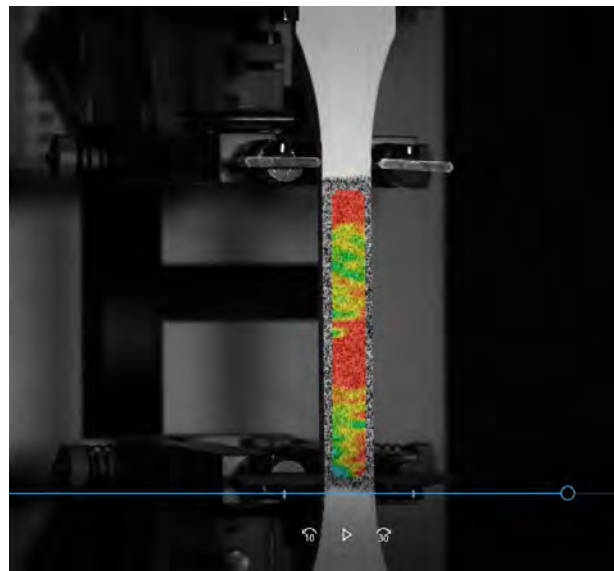


Figura 53: Distribución de la deformación de una probeta

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 54: Probetas ensayadas

3.3.1.3 Obtención de la matriz anisotrópica

La Tabla 20 muestra la media de los valores de los ensayos realizados a las probetas para cada configuración.

Tabla 20: Resultados obtenidos para cada configuración

Módulo de Young	Valor (Gpa)	Coefficiente de Poisson	Valor	Módulo de cizallamiento	Valor (Gpa)	Resistencia a la tracción	Valor (Mpa)
E_T^{flat}	1,38	ν_{TT}	0,40	G_{TT}^{flat}	0,49	σ_T^{flat}	29,20
E_T^{edge}	1,58	ν_{LT}	0,39	G_{TT}^{edge}	0,56	σ_T^{edge}	32,30
E_L	1,60	ν_{TL}	0,40	G_{LT}	0,67	σ_L	15,41

Para cada parámetro y configuración se obtienen los valores finales, tal y como se muestra en la Tabla 21, aplicando la condición de simetría de las relaciones de Poisson, la cual ha sido validada de acuerdo con la Eq 11. La desviación porcentual es del 1_%, y se puede considerar que es aceptable.

Tabla 21: Valores finales

Módulo de Young	Valor (Gpa)	Coefficiente de Poisson	Valor	Módulo de cizallamiento	Valor (Gpa)	Resistencia a la tracción	Valor (Mpa)
$E_T^{average}$	1,48	ν_{TT}	0,40	$G_{TT}^{average}$	0,52	$\sigma_T^{average}$	30,80
		ν_{LT}	0,39				
E_L	1,60	ν_{TL}	0,40	G_{LT}	0,67	σ_L	15,41

La Tabla 22 muestra la resistencia a la tracción y las constantes elásticas de la matriz obtenida. Dichos valores podrán ser utilizados para alimentar los datos de material necesarios cuando se desee realizar la simulación numérica de una pieza mediante un software de análisis por elementos finitos, por ejemplo, el ANSYS. Dado que los resultados son diferentes en las tres direcciones, una aproximación isotrópica para tener valores únicos para E , ν y G , nos llevaría a errores de cálculo importantes.

Tabla 22: Matriz de propiedades del material

Coefficiente elástico	Valor
E_T	1,48 GPa
E_L	1,60 GPa
ν_{TT}	0,40
ν_{LT}	0,39
G_{LT}	0,67 GPa

3.3.2 Microscopía electrónica de barrido SEM

La fractura producida se analiza mediante microscopía SEM para comprobar si la pieza se ha impreso correctamente y, si el patrón, y el porcentaje de relleno, se han mantenido constantes durante la impresión. Siendo la altura de la capa de impresión seleccionada de 0,2 mm y el porcentaje de relleno es del 50 %. En la Figura 55 se observa que la impresión ha mantenido constante el patrón definido, ya que no se aprecian deformaciones, ni zonas con aparente falta o exceso de material, es decir, el patrón se mantiene constante. La Figura 56 muestra cómo la distancia entre las capas o altura de la capa es constante y de valor 0,22 mm, siendo

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

la altura de capa definida de 0,2 mm, se puede concluir que la impresión es correcta, ya que, se mantienen las dimensiones internas y el patrón es constante.

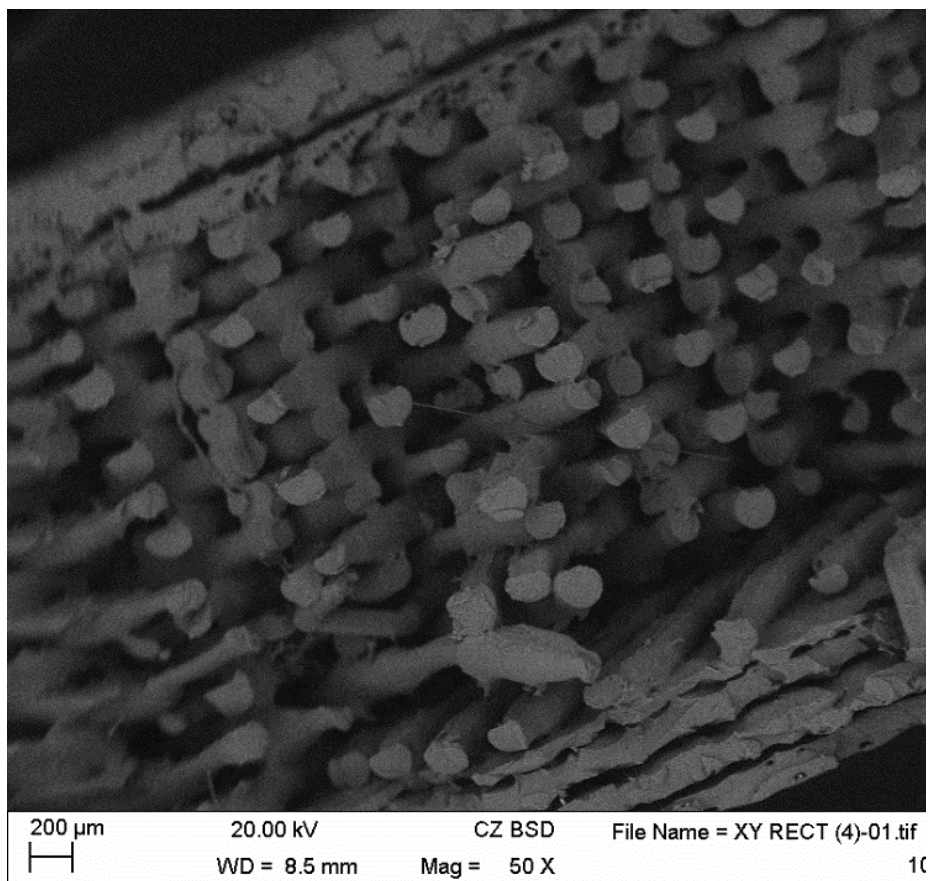


Figura 55: Patrón rectilíneo

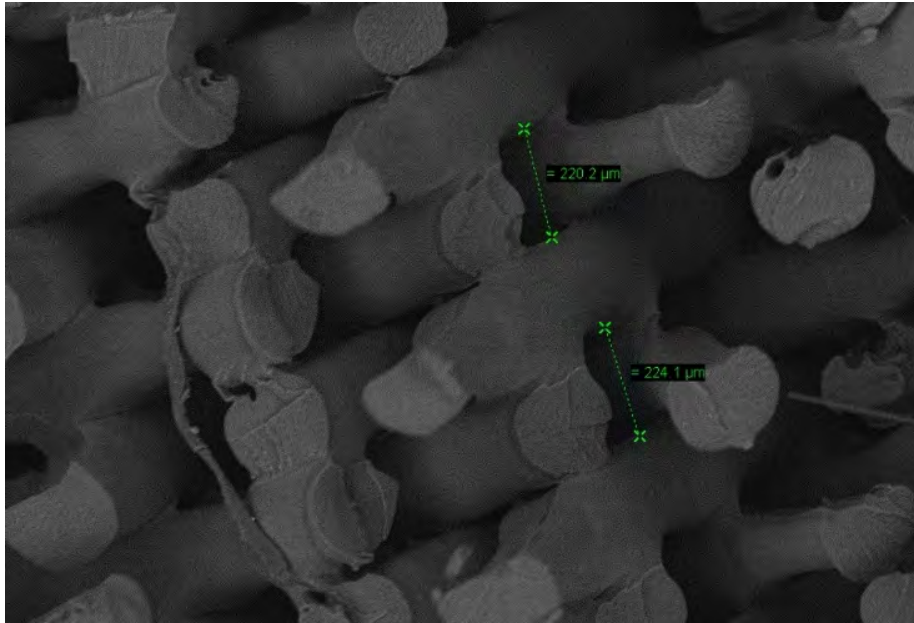


Figura 56: Distancia entre capas

3.3.3 Ensayo de flexión

Para poder validar la matriz constitutiva obtenida se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos al realizar el ensayo de flexión UNE-EN-ISO 178-2011 sobre cinco muestras impresas con relleno 50 % rectilíneo, y una la simulación por elementos finitos introduciendo los datos necesarios sobre el material en ANSYS a partir de la matriz caracterizada. Las Figuras 57 y 58 muestran la impresión de las 5 probetas y el ensayo de flexión sobre una de las probetas respectivamente.

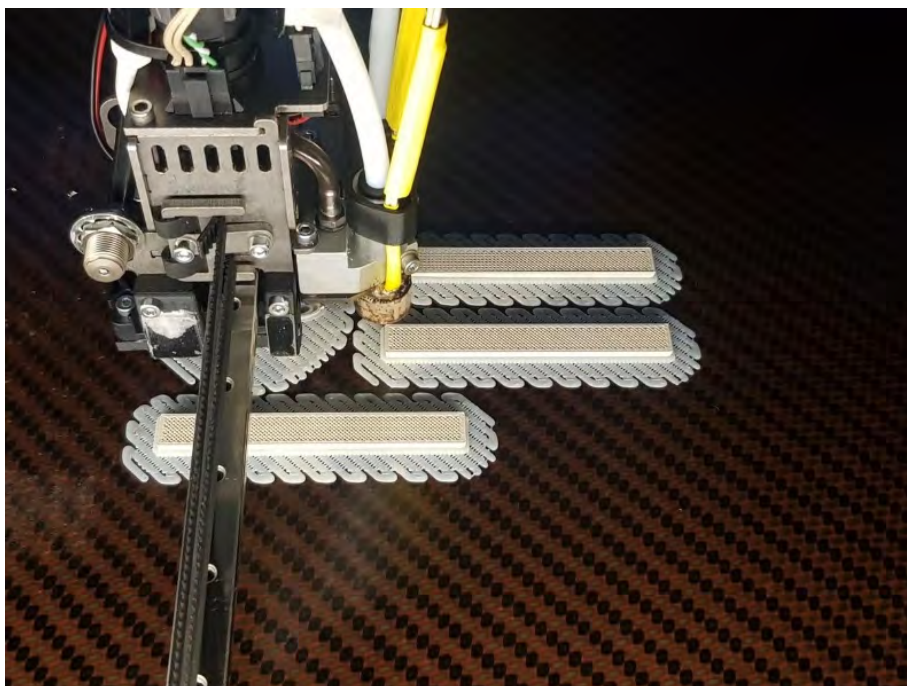


Figura 57: Impresión de las muestras de flexión

En este apartado, por lo tanto, se plasman en primer lugar los ensayos mecánicos de flexión realizados sobre probetas normalizadas e impresas con los parámetros de impresión óptimos definidos, y posteriormente se muestran los resultados de la simulación numérica que intenta recrear las condiciones del citado ensayo de flexión, para finalmente analizar la validez de la matriz del material definida.

Para la realización de los ensayos se utilizó un utillaje específico (acorde a la norma) incorporado a la máquina de ensayos (Figura 58).

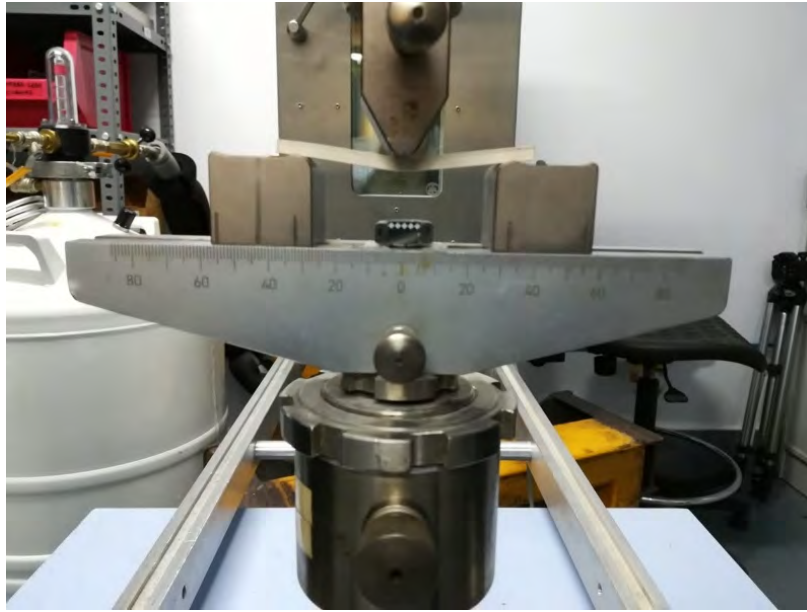


Figura 58: Ensayo de flexión según normas UNE-EN-ISO 178-2011

Los resultados de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 23, donde se observa cómo para una fuerza media de 18N la deformación ronda los valores de 1 mm a 1,03 mm, siendo este valor similar para las cinco muestras impresas, una desviación estándar de 1,5 % entre los valores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 23: Valores de desplazamiento para ensayo de flexión

Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3			Probeta 4			Probeta 5		
Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0	2,026	0,000	0	2,002	0,000	0	2,027	0,000	0	2,127	0,000	0	2,0011	0,0000
10	7,234	0,333	10	7,484	0,333	10	7,068	0,332	10	7,137	0,332	10	7,2551	0,3333
20	12,506	0,667	20	12,867	0,667	20	12,325	0,666	20	12,744	0,666	20	12,6871	0,6667
25	15,201	0,833	25	15,606	0,833	25	15,077	0,832	25	15,455	0,832	25	15,3430	0,8333
30	17,907	1,000	30	18,543	1,000	30	17,845	0,999	30	18,293	0,999	30	18,1246	1,0000
31	18,427	1,033	31	19,170	1,033	31	18,347	1,032	31	18,750	1,032	31	18,7516	1,0334
40	23,508	1,333	40	24,257	1,333	40	23,427	1,332	40	23,855	1,332	40	23,7171	1,3333
45	26,160	1,500	45	27,130	1,500	45	26,274	1,499	45	26,737	1,499	45	26,4891	1,5000

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.4 Validación por simulación de flexión ANSYS

Para realizar la validación mediante la simulación por elementos finitos a través del software comercial ANSYS, el material se define por la matriz ortotrópica obtenida en la Tabla 16. La Figura 59 muestra la simulación realizada de la prueba de flexión, apreciándose que el desplazamiento máximo producido bajo una carga perpendicular de 18 N es de 1,03 mm.

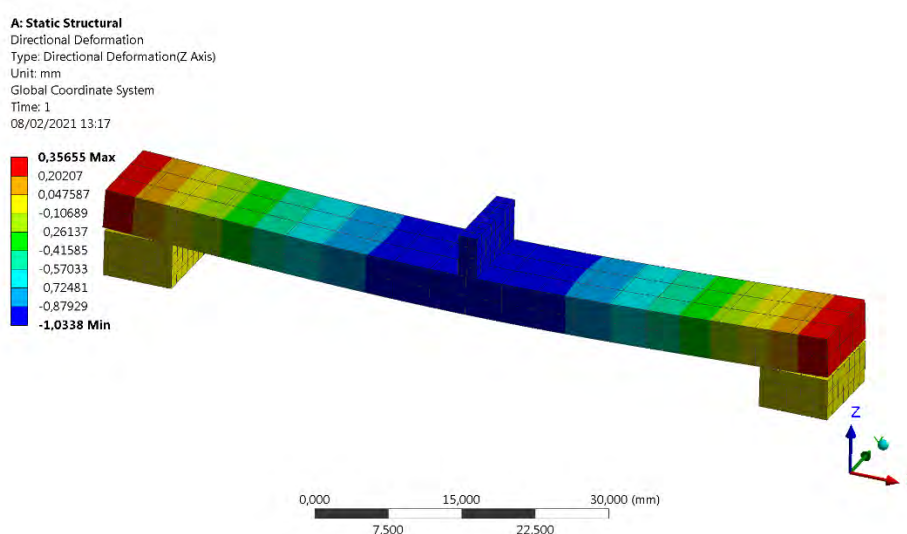


Figura 59: Simulación de elementos finitos de la probeta sometida a flexión para una carga de 18N

Por tanto, y en primera instancia, se puede concluir que el coeficiente elástico obtenido en la simulación ANSYS se ajusta a los obtenidos por ensayos experimentales y en consecuencia la matriz caracterizada es correcta.

3.4 CASO PRÁCTICO DE CARACTERIZACIÓN

Dado que la validación de la matriz realizada sobre el ensayo de flexión nos indica, a priori, que ésta es correcta, se analiza dicha matriz aplicándola ahora a un caso práctico más complejo y cercano a la realidad, para lo cual se diseña una pieza con geometría acodada, ya que este tipo de geometría es muy común en moldes, utillajes y bastidores.

La pieza diseñada se imprime con los parámetros de impresión definidos, con relleno al 50 %, altura de capa 0,2mm y en los patrones rectilíneo y octagonal, siendo el objetivo doble, por un lado, validar la matriz caracterizada para patrón rectilíneo, y por otro, estudiar el comportamiento de ambas configuraciones durante la impresión.



Gráfico 12: Esquema validación realizada. Fuente: elaboración propia

3.4.1 Diseño e impresión de pieza acodada

En este subcapítulo, se plasman en primer lugar el diseño de pieza acodada realizado, así como las pruebas de impresión realizadas sobre piezas impresas con relleno rectilíneo al 50 % e relleno octogonal al 50 %, en segundo lugar, se hace una comparativa de la calidad/tiempo de impresión con ambos patrones.

La Figura 60 muestra el diseño de la probeta acodada que se va a utilizar para la validación complementaria de los resultados.

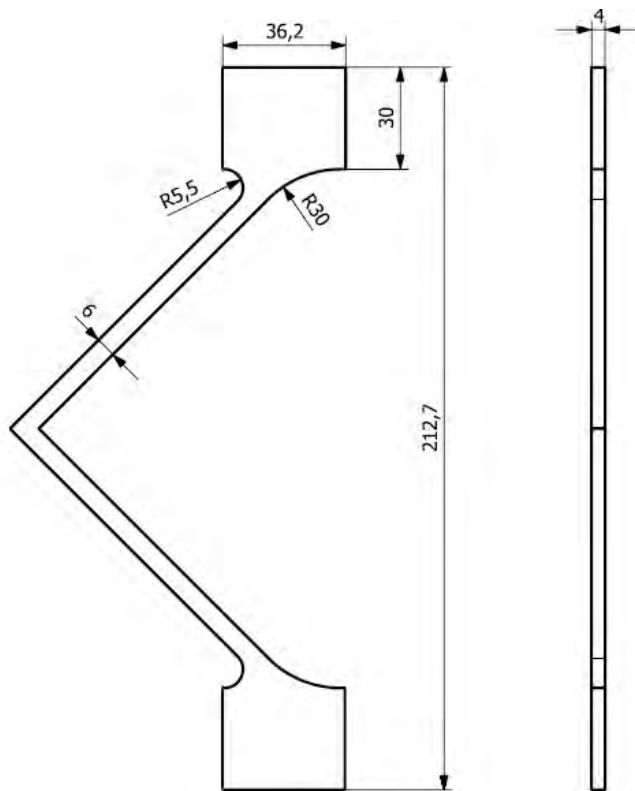


Figura 60: Diseño de pieza acodada

3.4.1.1 Impresión de probeta acodada: relleno rectilíneo del 50 %

Con la pieza diseñada en CAD se procede a su impresión, comenzando con la generación del "G-code" con el programa "Kisslicer" tal y como se muestra en la Figura 61.

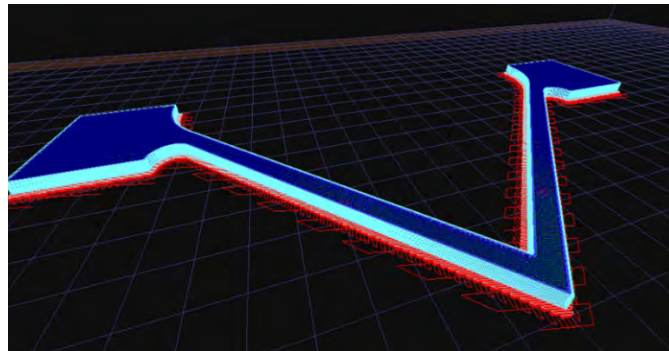


Figura 61: Diseño "G-code" de probeta y soporte

Se procede a realizar la impresión de la pieza introduciendo los parámetros óptimos definidos, y se observa que no se ha producido ningún alabeo, ni hay problemas durante el proceso tal y como se aprecia en la Figura 62.



Continúa siguiente página

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

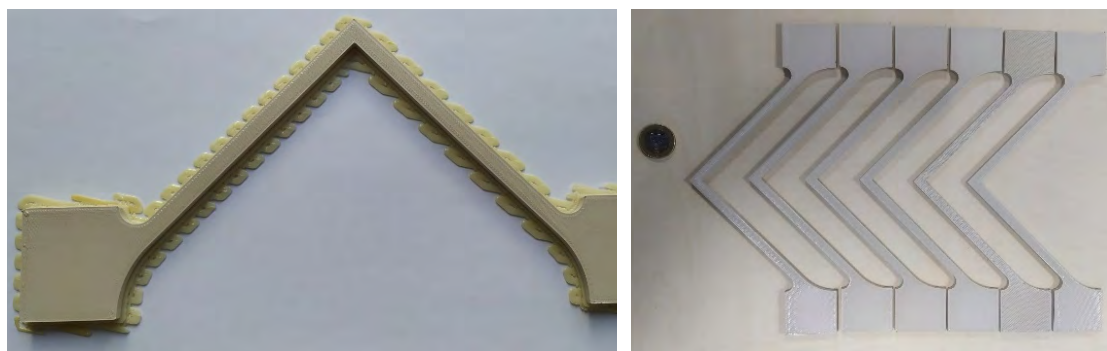


Figura 62: Probetas impresas con relleno 50% rectilíneo

Para poder realizar una validación rápida de la calidad de impresión, y que no destruya las muestras, las probetas se pesan, tal y como se muestra en la Tabla 24. De esta forma, si no hay grandes variaciones en el peso, se puede suponer que el proceso ha sido estable. En este caso la desviación estándar es de un 11 %, por lo que se da por válida la impresión.

Tabla 24: Peso probetas acodadas impresas patrón rectilíneo al 50 %

Probeta	Peso (gr)
1	13,73
2	13,47
3	13,32
4	13,55
5	13,64

Como los resultados de esta tesis están enfocados a su utilización en el ámbito industrial, un parámetro a considerar es el tiempo de impresión. Tal y como se ha estudiado en la selección del espesor de filamento, se realiza una comparativa doble, por un lado, entre el tiempo teórico de impresión y el tiempo real de cada configuración, y por otro, entre las configuraciones. El estudio de tiempo de impresión se realiza porque a pesar de no ser un parámetro que influye directamente en la calidad de la pieza impresa, sí que

es relevante si se piensa en un uso industrial, ya que a la hora de imprimir utillaje en la industria los tiempos de fabricación son importantes.

En el caso rectilíneo el tiempo teórico de impresión es de 1 h 56 minutos y el tiempo real de impresión 1 h 53 minutos, la impresión, por tanto, ha sido un 3 % más rápido que lo teórico, lo que a priori es favorable para el proceso industrial.

3.4.1.2 Impresión de probetas acodada. Relleno octogonal del 50 %

Se sigue el mismo procedimiento para la impresión de piezas octogonales al 50 %, siendo la Figura 63 una representación de la pieza en el programa Kisslicer.

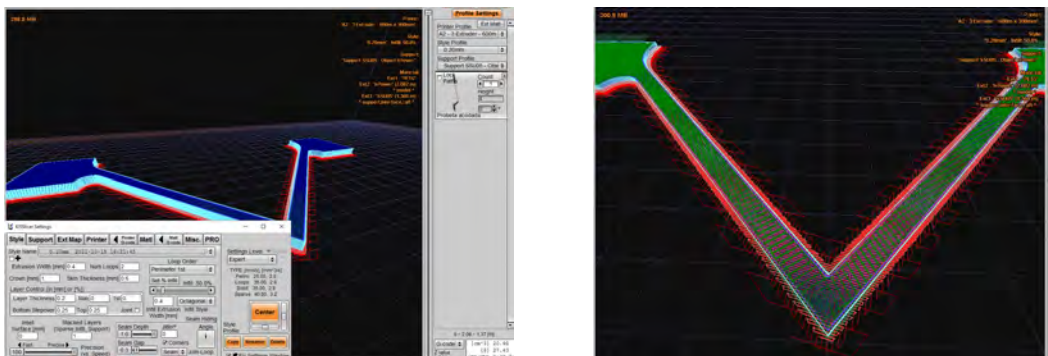


Figura 63: Diseño de probeta acodada en software Kisslicer

Durante la impresión se observa que, tal y como se ha estudiado anteriormente en la impresión de las probetas, el patrón octogonal presenta una mayor compactación en respecto al patrón rectilíneo, como se aprecia en la Figura 64.



Figura 64: Relleno octogonal al 50 %

Sin embargo, esta mayor compactación crea tensiones internas en la pieza que dan lugar al defecto de alabeo y despegado como se aprecia en la Figura 65.



Figura 65: Alabeo de pieza octogonal

Para minimizar este efecto de alabeo se aumentan las temperaturas de impresión. Se imprime una segunda probeta, aumentando la temperatura de la base a 120 °C, la temperatura de la cámara hasta 85 °C y la temperatura de impresión del PPS desde hasta 320 °C. La Figura 66 muestra que la probeta impresa bajo las nuevas condiciones mejora el defecto, ya que hay una reducción del alabeo, pero no es suficiente.



Figura 66: Probeta acodada patrón octogonal con aumento de temperaturas

La Tabla 25 muestra el peso de las piezas impresas, observando que es superior al peso de las impresas con patrón rectilíneo, lo que era de esperar al ser mayor la compactación.

Tabla 25: Peso probetas acodadas patrón octogonal y porcentaje de relleno 50 %

Probeta	Peso (gr)
1	15,56
2	15,59

Se imprime una tercera probeta, Figura 67, con las condiciones de la segunda, pero aumentando la temperatura de impresión del material de soporte desde los 245 °C hasta los 250 °C con objeto de que la pieza se adhiriera más a la base, sin embargo, se sigue produciendo un alabeo parcial de la probeta acodada.

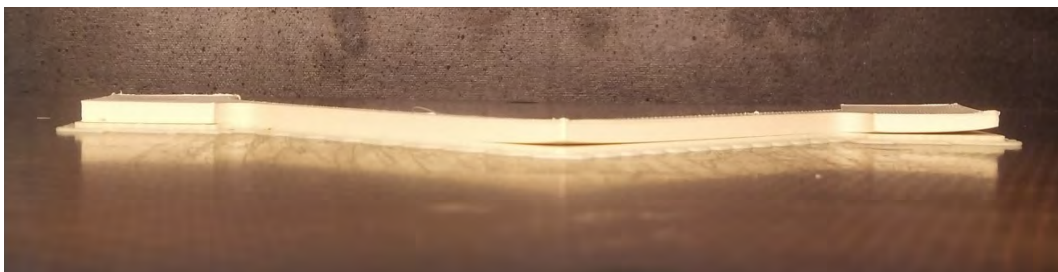


Figura 67: Probeta acodada patrón octogonal aumentando temperatura material soporte

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar la comparativa entre el tiempo teórico de impresión 2 h 23 minutos, y el tiempo real 2 h 13 minutos, la impresión real, al igual que ocurre con el patrón rectilíneo, ha sido un 5 % más rápida que la teórica

Durante la impresión de la pieza acodada con ambos patrones se ha observado que:

- Al pasar del tipo de patrón rectilíneo al 50 % a un patrón octogonal al 50 % de densidad se produce un fenómeno no deseado de alabeo en la probeta acodada. Este fenómeno de alabeo es debido a la mayor compactación del patrón octogonal, además de ser más marcado en piezas con dimensiones significativas en largo y ancho, como es el caso de la probeta acodada.
- La impresión de la pieza con patrón octogonal al 50 % supone, respecto al patrón rectilíneo al 50 %, un incremento en el tiempo de impresión de un 16 % además de un incremento en el peso de la pieza.
- La impresión con patrón octogonal es más inestable, por lo que no se aconseja este tipo de porcentaje y patrón para piezas con geometrías acodadas.

3.4.2 Ensayos pieza acodada con patrón rectilíneo y octogonal

Se procede a realizar el ensayo de tracción sobre las piezas impresas, si bien es cierto que las piezas con patrón octogonal no han resultado de buena calidad y, por tanto, se desaconseja el uso para este tipo de geometrías, aun así, se someten al ensayo para su evaluación.

Las Figuras 68 y 69 muestran la realización del ensayo de tracción al 50 % rectilíneo y al 50 % octogonal respectivamente. Observándose cómo en

ambos casos la fractura se produce en el codo, lo que era previsible al ser el punto débil.

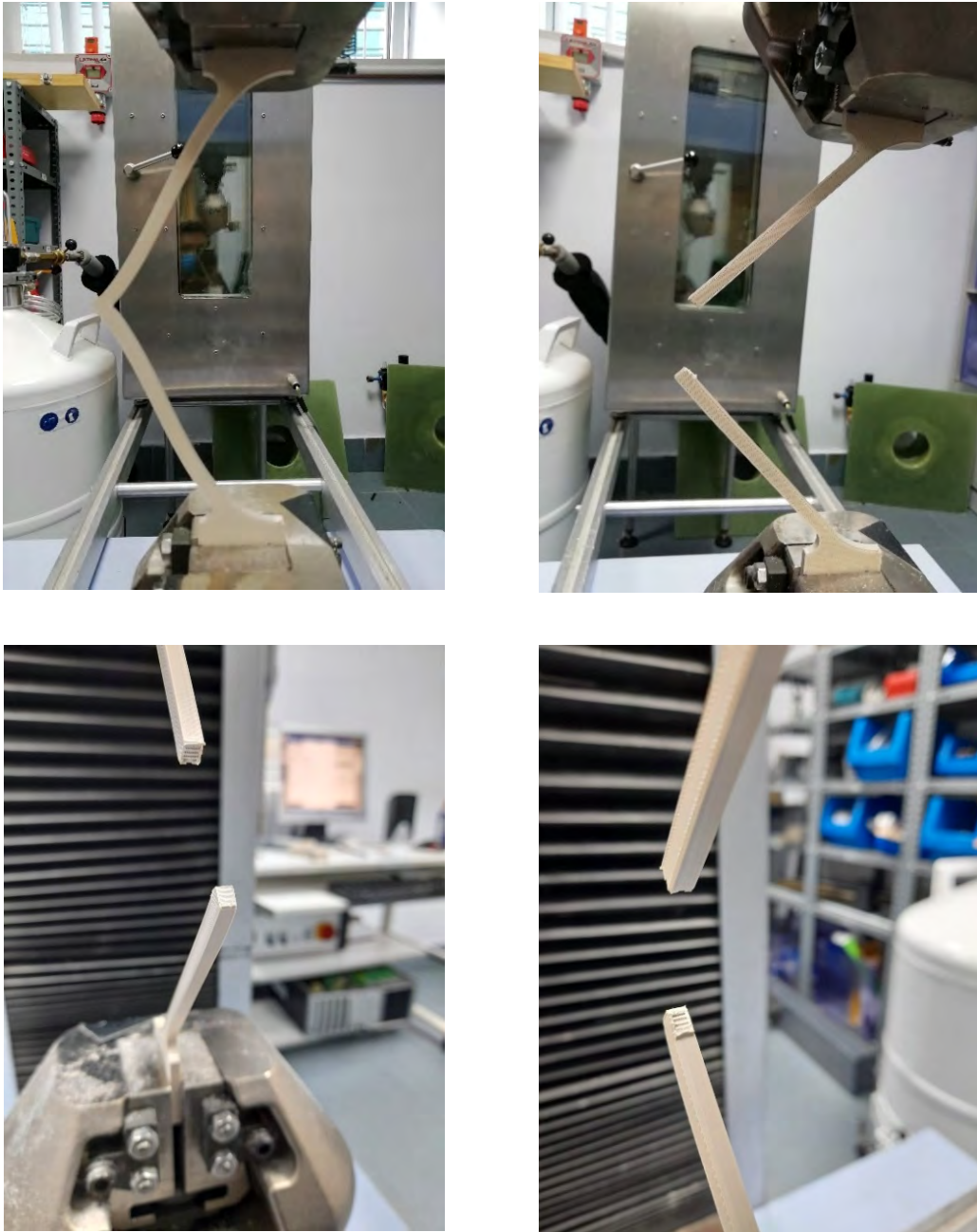


Figura 68: Ensayo tracción probeta acodada rectilíneo al 50 %

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

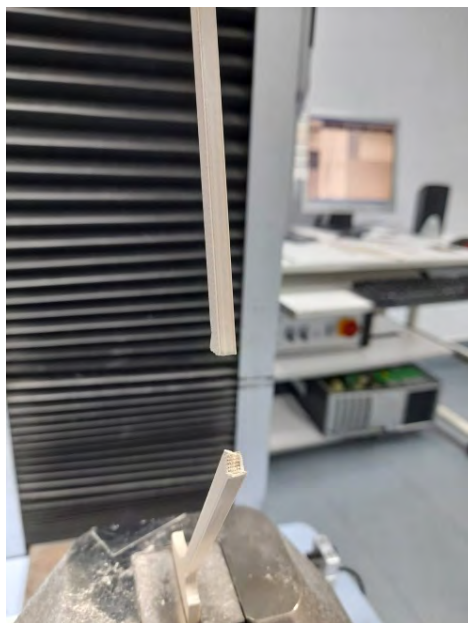
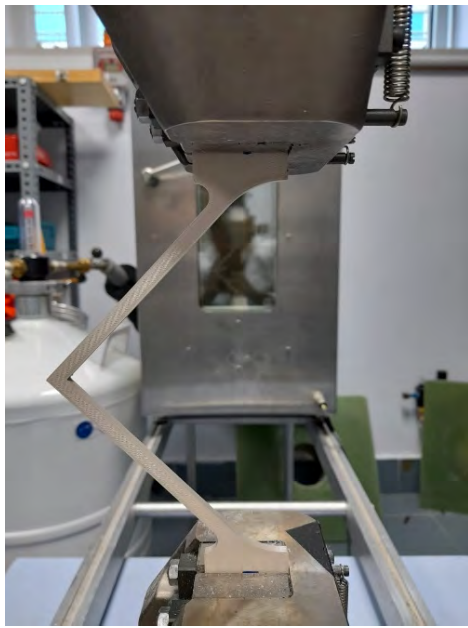


Figura 69: Ensayo de tracción pieza acodada octogonal al 50%

Los resultados de estos ensayos sobre las piezas acodadas se muestran en las siguientes Tablas 26 y 27. Siendo la Tabla 26 la correspondiente al patrón rectilíneo y la Tabla 27 al patrón octogonal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 26: Resultado desplazamientos ensayo tracción patrón rectilíneo

Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3			Probeta 4			Probeta 5		
Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0	0,6517	0	0	1,11262	0	0	0,81062	0	0	1,1444	0	0	1,0331	0
23,42	15,0045	7,7875	23,04	14,9886	7,6608	24,8	14,9886	8,2474	24,27	14,9886	8,0708	24,35	14,9886	8,097
23,43	15,0363	7,7908	23,07	15,0204	7,6708	24,81	14,9886	8,2508	24,32	15,0204	8,0875	24,46	15,0522	8,134
23,44	15,0363	7,7941	23,09	15,0204	7,6775	24,85	15,0204	8,2641	24,33	15,0522	8,0908	38,17	24,9863	12,704
23,53	15,0998	7,8242	37,68	25,0181	12,5408	38,98	24,9863	12,9742	38,52	24,9704	12,8208	38,18	25,0022	12,707
37,3	25,0181	12,4142	37,69	25,0498	12,5441	39,02	25,0022	12,9874	38,63	25,0498	12,8575	51	34,9999	16,980
37,32	25,0340	12,4208	50,24	34,9999	16,7274	39,03	25,0340	12,9908	51,58	34,9999	17,1742	51,01	35,0316	16,984
37,33	25,0498	12,4241	50,25	34,9999	16,7307	39,05	25,0498	12,9974	51,66	35,0793	17,2007	51,08	35,0793	17,007
37,4	25,0975	12,4475	50,26	35,0157	16,7341	39,11	25,0816	13,0175	51,67	35,0793	17,2040	63,02	44,9975	20,987
49,62	34,9999	16,5208	50,29	35,0634	16,7442	51,82	34,9999	17,2542	63,47	44,9816	21,1375	63,07	45,0452	21,004
49,63	34,9999	16,5241	50,3	35,0793	16,7475	51,91	35,0793	17,2841	63,55	45,0611	21,1641	63,14	45,0611	21,027
49,64	35,0157	16,5275	62,89	45,0293	20,9441	64,15	44,9816	21,3641	63,56	45,0770	21,1675	63,15	45,0929	21,030
49,67	35,0475	16,5375	62,9	45,0452	20,9475	64,16	45,0134	21,3674	63,57	45,1088	21,1708	77,88	54,9793	25,940
49,72	35,0793	16,5542	62,91	45,0611	20,9508	64,17	45,0293	21,3708	77,76	54,9793	25,9008	77,96	55,0270	25,967
61,66	44,9975	20,5342	77,58	54,9952	25,8408	64,24	45,0611	21,3941	77,86	55,0906	25,9341	78,02	55,0588	25,987
61,69	45,0293	20,5441	77,59	55,0111	25,8441	96,92	64,9770	32,2874	98,84	64,9611	32,9275	98,01	64,9929	32,650
76,36	55,0111	25,4341	77,64	55,0588	25,8608	96,99	65,0088	32,3108	98,85	64,9770	32,9308	98,39	65,0088	32,777
76,37	55,0270	25,4374	77,74	55,0906	25,8941	97,06	65,0406	32,3341	98,96	65,0088	32,9675	117,1	75,0383	39,014
76,38	55,0270	25,4408	77,75	55,0906	25,8974	97,07	65,0406	32,3375	117,24	74,9906	39,0608	117,17	75,0701	39,037
99,21	65,0088	33,0508	102,14	64,9770	34,0274	120,22	74,9906	40,0542	117,25	75,0065	39,0641			
99,22	65,0088	33,0541	102,3	65,0088	34,0808				117,35	75,1177	39,0975			
114,78	75,0224	38,2408	117,32	75,0701	39,0875									

Tabla 27: Resultado desplazamientos ensayo tracción patrón octogonal

Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (seg)	Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
0,00	2,7657	0	0	2,845128	0	0	0	0,5086263
12,11	10,0295	4,0175	11,35	10,0295	3,7641	13,82	10,0295	4,5874
25,20	20,0272	8,3808	24,09	20,0272	8,0108	25,69	20,0272	8,5441
37,16	30,0090	12,3675	35,83	30,0090	11,9241	36,77	30,0090	12,2375
48,10	40,0066	16,0141	46,99	40,0066	15,6442	47,09	40,0066	15,6774
59,36	50,0043	19,7675	57,88	50,0043	19,2742	56,86	50,0361	18,9342
71,83	60,0179	23,9241	70,67	60,0179	23,5375	67,32	60,0179	22,4208
78,69	65,0088	26,2108	78,69	64,8181	26,2108	73,11	65,0088	24,3508
82,20	66,9797	27,3808				79,31	70,0156	26,4175
						86,85	75,0065	28,9308
						87,48	75,0383	29,1408

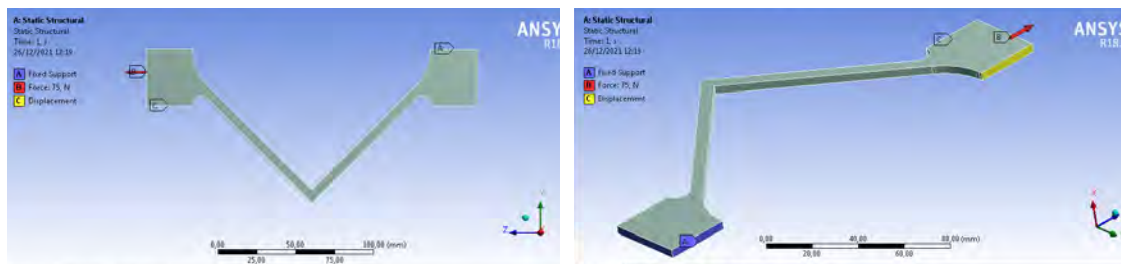
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los resultados se concluye que:

- Las piezas con patrón octogonal presentan menor resistencia, lo que a priori sería contradictorio basándonos en los resultados de la impresión de probetas de tracción, donde los resultados de las probetas con patrón octogonal son superiores al rectilíneo. Sin embargo, al diseñar una pieza acodada se generan tensiones durante la impresión con patrón octogonal que hacen que la impresión de la pieza no sea un proceso robusto, apareciendo el fenómeno de alabeo, lo cual se traduce en que la unión entre las capas no es buena.
- El proceso de impresión con patrón octagonal comparando con el rectilíneo es más lento, utiliza más material y es menos estable.

3.4.3 Comparativa ANSYS

A continuación, se va a realizar el estudio ANSYS con la matriz ortotrópica caracterizada sobre el diseño de pieza acodada rectilíneo al 50 %, y sobre la que se va a aplicar una fuerza de 75N. La Figura 70 muestra el diseño en ANSYS de la pieza.



Continúa siguiente página

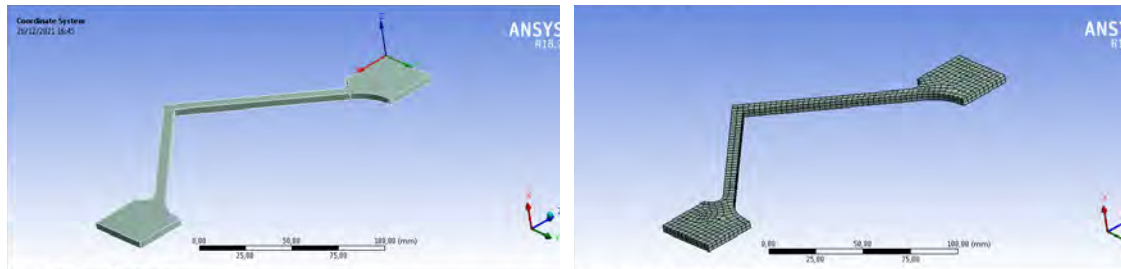


Figura 70: Diseño de probeta acodada en ANSYS

Al realizar la simulación, como se observa en la Figura 71, el desplazamiento para una fuerza de 75N es de 40,19 mm, mientras que en los ensayos realizados para una fuerza de 75N el desplazamiento medio es de 39,15 mm.

El error entre el resultado teórico y el real es de 2,58 %, lo que se considera aceptable y, por tanto, la aproximación realizada en este estudio se puede asumir que es correcta.

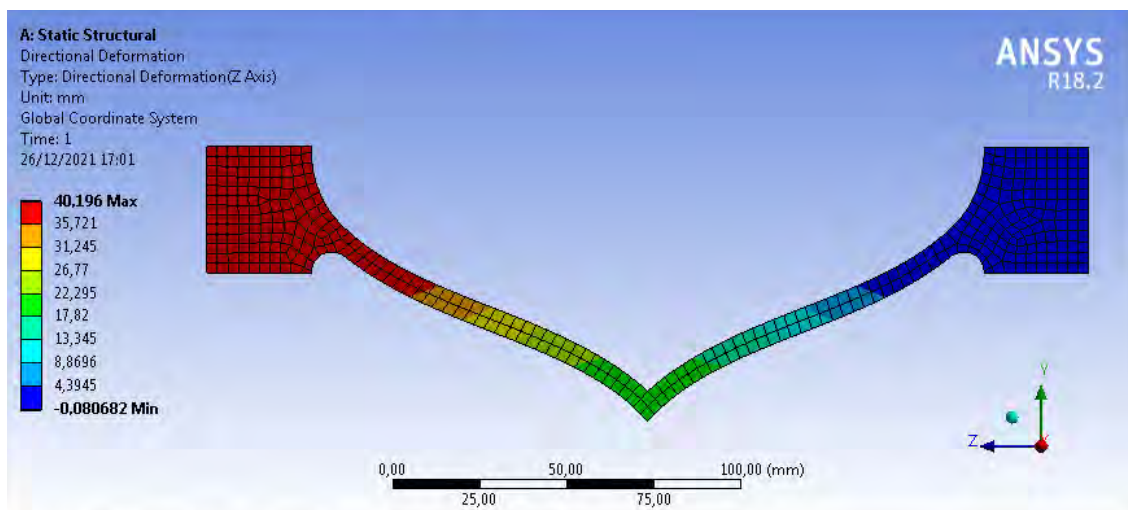


Figura 71: Simulación ANSYS pieza acodada

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se han estudiado las propiedades mecánicas del PPS impreso utilizando la tecnología FDM con el fin de determinar aquellos parámetros que mejor se ajusten a las propiedades mecánicas buscadas en la pieza impresa. Se han estudiado los parámetros óptimos de impresión relacionados con la temperatura, el porcentaje de relleno, el patrón y la altura de la capa y se ha propuesto una matriz isotrópica transversal para aproximar el comportamiento ortotrópico del material PPS fabricado por FDM.

Dichos resultados permitirán establecer una guía que permitirá a los diseñadores seleccionar el valor adecuado de los parámetros de fabricación y realizar simulaciones numéricas mediante software comercial de elementos finitos para el cálculo de tensiones y deformaciones en piezas fabricadas mediante dicho material teniendo en cuenta el comportamiento no isótropo de las piezas impresas.

En el estudio se concluye que tanto para el patrón rectilíneo como el octogonal, e independientemente del porcentaje de relleno, la configuración en la que el crecimiento de las capas es perpendicular al ensayo, denominada L en este estudio, es la peor. Además, en esta dirección hay menor disipación de calor, por lo que la unión de las capas es mayor y hay menor deformación elástica. Los valores de tensión en las configuraciones "flat" y "edge" son similares y significativamente más altos que los obtenidos en la configuración L. A pesar de que la configuración final es la misma tanto en configuraciones "flat" como "edge", los valores son, en general, más altos en la configuración "edge" debido a dos factores: difusión de calor y capa de contorno.

La difusión de calor está relacionada con la velocidad y el tiempo. La velocidad de impresión ha sido la misma en todas las configuraciones. Por lo tanto, en el caso de la configuración "edge", como la sección de fabricación es más pequeña, la máquina deposita una capa sobre otra en menos tiempo. Así, la difusión de calor en esta configuración ha sido mayor, lo que favorece la unión

4. CONCLUSIONES

entre capas, siendo en consecuencia E_T^{edge} y E_L muy similares, ya que la sección es pequeña en ambas configuraciones. En la configuración flat, que lleva más tiempo, el material se enfría y eso debilita la unión. En cuanto a la capa de contorno, cuantas más capas de contorno, más fuerte será la configuración de la pieza impresa.

Para la mayoría de las impresiones, se recomienda usar la configuración con altura de capa de 0,2 mm por tener un buen equilibrio entre propiedades y tiempo de impresión. De los análisis SEM realizados se concluye que la diferencia en la resistencia es resultado de la forma de construcción. En el caso de configuración T^{flat} o T^{edge} el patrón rectilíneo deja más huecos que el octogonal y, por lo tanto, la unión es más débil.

Sin embargo, la impresión es menos estable y fiable en cuanto a acabado y propiedades. Se ha demostrado que el proceso de impresión para piezas acodadas y con geometrías complejas con patrón octagonal comparando con el rectilíneo es más lento, utiliza más material y es menos estable.

Asimismo, se ha demostrado que el espesor de piel de la pieza influye significativamente en el tiempo de impresión, en el acabado superficial y en el peso final de la pieza, llegando incluso a influir más que el porcentaje de relleno cuando este es un porcentaje bajo. Así como que, a menor altura de capa, mejores propiedades de resistencia, ya que se generan menos huecos y por tanto la unión entre capas es más fuerte. Pero el tiempo de impresión es mayor, por lo que el diseñador deberá, en cada caso, decidir en función de los requerimientos qué altura de capa seleccionar.

En el diseño de las piezas impresas con tecnología FDM, las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional y el acabado superficial dependen fundamentalmente del porcentaje de relleno y tipo de patrón, del espesor de piel, de la altura de capa y de la orientación de impresión.

Analizando dimensiones de las probetas, resulta que para todas las configuraciones la mayor dispersión en las dimensiones, siendo estas superiores y más alejadas del valor nominal, se producen en la dirección de crecimiento L. Siendo esta, por tanto, la dirección que no se recomienda dado que, es la que peores propiedades mecánicas tiene, además de ser la impresión más inestable, y que presenta mayores desviaciones en el proceso y en las dimensiones de las piezas obtenidas.

Se recomienda buscar el balance entre las prestaciones mecánicas, la estabilidad dimensional, el acabado superficial y el tiempo de impresión para cada diseño específico. Por ejemplo: aumentar el porcentaje de relleno, el espesor de pared y piel y reducir la altura de capa, mejora el comportamiento mecánico, sin embargo, aumenta el tiempo de impresión, lo que puede afectar negativamente a la estabilidad dimensional, el alabeo o "warping".

La caracterización del material se ha realizado determinando los coeficientes elásticos de la matriz ortótropa, simplificando y validando experimentalmente su comportamiento mecánico como material transversalmente isotrópico. Las cinco constantes elásticas independientes necesarias para caracterizar el material (E_T , E_L , T_T , n_{TL} , G_L) donde T representa la dirección transversal (plano de la capa del material) y L representa la dirección longitudinal (perpendicular al plano de la capa del material) se han obtenido experimentalmente, imprimiendo y ensayando cinco probetas por cada dirección de crecimiento en las mismas condiciones: 50 % de relleno y patrón rectilíneo.

Aplicado la condición de simetría de las relaciones de Poisson a los valores obtenidos, la desviación porcentual resultante es del 1 %, por lo tanto, dicha aproximación se puede considerar aceptable. La Tabla 20 muestra la matriz ortotrópica obtenida.

4. CONCLUSIONES

Dado que los resultados son diferentes en las tres direcciones, una aproximación isotrópica para tener valores únicos para E, ν y G, nos llevaría a errores de cálculo importantes.

Se ha realizado la validación de la matriz obtenida mediante la comparativa entre; los resultados obtenidos al realizar el ensayo de flexión UNE-EN-ISO 178-2011 sobre cinco muestras impresas con patrón rectilíneo al 50 % de porcentaje de relleno, y los resultados obtenidos al realizar la simulación por elementos finitos con la matriz caracterizada en ANSYS. De dicha validación se extraen dos conclusiones:

1°. El proceso es estable con los parámetros definidos, ya que los resultados de deformación bajo la misma fuerza son similares y con una desviación estándar inferior al 2 %.

2°. La matriz caracterizada es correcta, dado que el análisis realizado en la simulación ANSYS se ajusta a los valores obtenidos por ensayos experimentales. Se realiza una última validación sobre el diseño de una pieza acodada, dando como resultado un error entre el teórico y el real es de 2,58 %, lo que se considera aceptable.

La matriz caracterizada en el estudio podrá ser utilizada para alimentar los datos de material necesarios cuando se desee realizar la simulación numérica de una pieza mediante un software de análisis por elementos finitos, por ejemplo, el ANSYS.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Wohler Associates. *Wohlers Report 2021*. South Africa : Jenny van Rensburg, 2021.
2. SmartTech Analysis. <https://www.smartechanalysis.com/>. [En línea] Octubre de 2022. <https://www.smartechanalysis.com/news/smartech-publishes-q2-2022-3d-printing-market-data-additive-manufacturing-markets-totaled-3b-for-second-consecutive-quarter-27-growth-year-over-year/>.
3. *3D Printer Market Survey Reveals Enterprise Demand Drivers for Technology Printer and Vendor Decision Making*. Pete Basilier, Zalak Shah. Noviembre de 2014, Gartner).
4. Redacción interempresas. interempresas.net. [En línea] 05 de noviembre de 2020. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/318089-fabricacion-aditiva-permite-industrias-reducir-hasta-90-por-ciento-tiempo-produccion.html>.
5. Gartner. 3d-printer-market. [En línea] 10 de diciembre de 2014. <https://3dprint.com/29700/used-3d-printer-market/>.
6. CSC, Richard McComas. Predicts Impact of 3D on Manufacturing Value Chains. [En línea] 21 de octubre de 2012. <https://www.cellular3d.com/index.php/market-research/32-csc-predicts-impact-of-3d-on-manufacturing-value-chains>.
7. Stratasync. Machine Design. *STRATASYSDIRECT.COM*. [En línea] 2020. <https://www.stratasync.com/en/stratasydirect/resources/infographics/3d-printing-impact-supply-chain/>.
8. Lafuente, Ruben. [tendencias21.levante-emv](http://tendencias21.levante-emv.com). [En línea] 16 de noviembre de 2011. https://tendencias21.levante-emv.com/la-fabricacion-aditiva-conduce-a-una-nueva-revolucion-industrial_a8558.html.
9. nasa.gov. [En línea] 15 de julio de 2014. <https://www.nasa.gov/centers/ames/researchpark/partners/space/made-in-space/>.
10. Igape, Xunta de Galicia e. *Oportunidades Industria 4.0 en Galicia. Estado del Arte de Fabricación Aditiva*. Galicia : <https://www.atiga.es/web/wp-content/uploads/2017/03/Estado-del-Arte-Fabricaci%C3%B3n-Aditiva.pdf>, 2017.

11. Maker Industry. [En línea] 05 de enero de 2022. <https://makerindustry.com/fff-vs-fdm/>.
12. Stratasys. Stratasys.uk. [En línea] 11 de mayo de 2022. <https://www.stratasys.uk/stratasysdirect/resources/resource-guides/how-to-prepare-stl-files/>.
13. *Watching and Safeguarding Your 3D Printer. Online Process Monitoring Against Cyber-Physical Attacks.* Yang Gao, Borui Li, and Wei Wang, Wenyao Xu, Chi Zhou, Zhanpeng Jin. 3, s.l. : Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol, 2018, ACM Journals., Vol. 2, págs. 1-27.
14. *A review on polymeric materials in additive manufacturing.* Jafferson, J.M y Chatterjee, Debduita. 2, s.l. : ISSN 2214-7853, 2021, Materials Today: Proceedings, Vol. 46, págs. 1349-1365.
15. *Additive Manufacturing of High Performance Semicrystalline Thermoplastics and Their Composites.* Kishore, Vidya, y otros. Austin, Texas : s.n., 2016.
16. *Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* Fitzharris, Emily, y otros. Marzo de 2018, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology., Vol. 95, págs. 1-12.
17. *Experimental investigation and optimization of printing parameters of 3D printed polyphenylene sulfide through response surface methodology.* El Magri, Anouar, y otros. Julio de 2020, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 138.
18. *Additive Manufacturing of PLA-Based Composites.Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture.* Miguel Ángel Caminero, Jesús Miguel Chacón, Eustaquio García-Plaza, Pedro José Núñez. s.l. : Polymers, 04 de mayo de 2019, Polymers, Vol. 11, pág. 799.
19. *Characterization and dynamic mechanical analysis of PC-ABS material processed by fused deposition modelling: An investigation through I-optimal response surface methodology.* Mohamed, Omar Ahmed, Masood, Syed Hasan y Bhowmik, Jahar Lal. s.l. : ISSN 0263-2241, septiembre de 2017, Vol. 107, págs. 128-141.

20. Martí Rodríguez, Bernat and Travieso Rodríguez, Juan Antonio. *Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM*. 2017.
21. *Effect of "infill" Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing*. Fernandez-Vicente, Miguel y otros. 3, s.l. : 3D printing and additive manufacturing, 2016, Vol. 3.
22. *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling*. Ziemian, Constance, Sharma, Mala and Ziemian, Sophia. DOI: 10.5772/34233, 2012, Mechanical Engineering.
23. *Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling*. Riddick, Jaret C, Haile, Mulugeta A y Von Wahld, Ray. s.l. : Additive Manufacturing, 2016, Vol. 11, págs. 49-59.
24. *Effect of layer thickness, deposition angle and "infill" on maximum flexural force in fdm built specimens*. Luzanin, Ognjan and Movrin, Dejan. 1, 2014, Journal for Technology of Plasticity, Vol. 39.
25. *Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM*. Velasco, Marco, Suárez, J y Ardila, D. 2016.
26. Cantrell, Jason, et al. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D- Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*. 2016, Vol. 3, pp. 89-105.
27. *Influences of layer thickness and raster angle on mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS*. Wu, Wenzeng, et al. doi:10.3390/ma8095271, 2015, Materials Science, Vol. 8, pp. 5834-5846.
28. *Experimental Analysis of High Temperature PEEK Materials on 3D Printing*. Xiaoyong, Sun. 2017. 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA).
29. *Mechanical Properties of additively manufactured peek components using fused deposition filament fabrication*. Moshir Rahman, Kazi, Reese, Riley and Letcher, Todd. Houston : s.n., 2015. ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.

30. *Engineering Thermoplastics for Additive Manufacturing: A Critical Perspective with Experimental Evidence to Support Functional Applications*. Cicala, Gianluca, y otros. 1, s.l. : J Appl Biomater Funct Mater, enero de 2017, Vol. 15, págs. 10-18.
31. *Effect of Thermal Processing and Heat Treatment Condition on 3D Printing PPS Properties*. Geng, Pen, y otros. 8, s.l. : Polymers, agosto de 2018, Vol. 10, pág. 875.
32. Stratasys. [stratasys.com](https://support.stratasys.com/es/materials/fdm). [En línea] <https://support.stratasys.com/es/materials/fdm>.
33. *Role of anisotropic properties on topology optimization of additive manufactured load bearing structures*. Zahng, Pu, Liu, Jikai y To, Albert C. 2017, Scripta Materialia, Vol. 135, págs. 148-152.
34. *Fabricación de diseños de vigas obtenidos por optimización topológica en una impresora 3D aplicando FDM*. Leon-Medina, Jersson Xavier, y otros. Mayo de 2015, Investigación interdisciplinaria.
35. *Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing*. Krishna, L. Siva Rama and Mahesh, Natrajan. 2017, Materials Today, Vol. vol. 4, pp. 1414-1422.
36. *Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling*. Gautam, Rinoj, Idapalapati, Sridhar y Feih, Stefanie. [ed.] ISSN 0264-1275. s.l. : Materials & Design, 2018, Vol. 137, págs. 266-275.
37. *Clausen, Anders & Aage, Niels & Sigmund, Ole. Exploiting Additive Manufacturing "infill" in Topology Optimization for Improved Buckling Load*. Anders, Clausen, Aage, Niel y Ole, Sigmund. Junio de 2016, Engineering, Vol. 2, págs. 250-257.
38. *Cemil yigit, Experimental investigation of different cellular lattice structures manufactured by fused deposition modeling, January 2013*. Iyibilign, Osman y Yigit, Cemil. Turquía : Research Gate Article, Enero de 2013, Vols. 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013, págs. 895-907.
39. *Dynamic compressive response of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities*. Bates, Simon R. G., Farrow, Ian R. Farrow y Trask, Richard S. s.l. : Materials Science, 2017, Materials Science.

40. *Three-dimensional finite element analysis simulations of the fused deposition modelling process*. Zhang, Y y Chou, Y K. Alabama : SAGE Publications, Junio de 2006, J. Engineering Manufacture, Vol. 220, págs. 1577-1761.
41. *Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a Design-for-Manufacturing Approach*. Alafaghani, Ala'aldin, y otros. s.l. : Elsevier, diciembre de 2017, Procedia Manufacturing, Vol. 10, págs. 791-803.
42. *A parametric study of part distortion in FDM using 3D FEA*. Yizhuo, Zhang y Y. Kevin, Chou. 10, octubre de 2006, 17th Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2006, Vol. 220, págs. 1663-1671.
43. *A comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer*. Sayre, Robert y Gutierrez, Ernesto. 2014.
44. *A Comparative Finite Element Stress Analysis Of Isotropic Matrix And 3D Printed PLA Material*. Ozsoy, Koray. Isparta : s.n., 2020.
45. *Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts*. Domingo, Miquel, y otros. s.l. : Elsevier, 15 de octubre de 2015, Materials & design, Vol. 83, págs. 670-677.
46. Bhate, Dhruv. www.padtinc.com/blog/the-focus/constitutive-modeling-of-3d-printed-fdm-parts-part-2-approaches. PADT. [En línea] 06 de enero de 2016.
47. *An Analysis Of Tensile Test Results to Assess the Innovation Risk for an Additive Manufacturing Technology*. Adamczak, Stanisław, Bochnia, Jerzy y Kaczmarska, Bożena. 0860-8229, s.l. : Polska Akademia Nauk, marzo de 2015, Metrology and Measurement Systems, Vol. 22, págs. 127-138.
48. Rodríguez, Jhonatan y Restrepo, Deivi. *Elaboración y caracterización de componentes plásticos porosos, mediante impresión 3D para aplicaciones de regeneración ósea*. 2015.
49. *Mechanical impact behavior of polyether-ether-ketone (PEEK)*. Garcia-Gonzalez, D, Rusinek, A y Jankowiak, T. [ed.] Elsevier. 0263-8223, junio de 2015, Composite Structures, Vol. 124, págs. 88-99.
50. *Worldwide 3D printing Industry Forecast*. Associates, Wohler.

51. *Novel Mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses.* Yuansong, Yu Zhao y Zhou, Chen Yongjun. 2019, *Materials&Design*, Vol. 181.
52. Wong, Kenneth. *Report on 3D Printing Industry Points to Softened Growth.* s.l. : Wohlers Report 2017, 2017. págs. 344-.
53. *Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM.* Velasco Peña, Marco Antonio, Rodríguez Suárez, J y Restrepo Ardilla, D. Enero 2017. XXI Congreso nacional de Ingeniería Mecánica.
54. Stratasys. *FDM Design Handbook.* 2010.
55. *Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modelling.* Riddick, Jaret C, et al. 2016, *Additive Manufacturing.*, Vol. 11, pp. 49-59.
56. L. Siva Rama Krishna, Natrajan Mahesh, N. Sateesh. *Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing.* Krishna, L. Siva Rama y et al. 2017, *Materials Today*, Vol. 4, págs. 1414-1422.
57. *Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation.* Koch, Carsten, Van Hulle, Luke and Rudolph, Natali. 2017, *Additive manufacturing*, Vol. 16, pp. 138-145.
58. *Determination of anisotropic material properties of carbon-fiber-reinforced FDM structures for numerical simulations.* Kibling, Alexander, Beneke, Frank and Seul, Thomas. Anaheim : s.n., 2017. SPE ANTEC.
59. *Optimization of process planning for reducing material consumption in additive manufacturing.* Jin, Yuan, Du, Jianke y He, Yong. 2017, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 44, págs. 65-78.
60. *Effect of Build Orientation on FDM Parts. A case study for validation.* Haryati Hambali, Ruzy, et al. Malaysia Melaka : s.n., 2010. iDECON 2010 - International Conference on Design and Concurrent Engineering.
61. Hanser, H and et al. *Plastics for engineers. Materials, properties, applications.* s.l. : ISBN 3 - 446-15723.

62. *Effect of Build Orientation on FDM Parts. A case study for validation of deformation behaviour.* Hambali, Ruzy y et al. 2010. International Conference on Design and Concurrent Engineering (iDECEN).
63. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems.* Friedrich, B. 72, 2018, Science Direct, págs. 1214-1219.
64. *Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts.* Fitzharris, Emily R., et al. 2018, Additive Manufacturing Technology, Vol. 95, pp. 2059-2070.
65. *Effect of "infill" Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D printing and additive manufacturing.* Fernandez-Vicent, M, et al. 3, 2016, 3D Printing and Additive Manufacturing, Vol. 3.
66. *Materials Testing of 3D printed and PLA samples to guide Mechanical Design.* Farbman, Daniel and McCoy, Chris D. 2016. ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference.
67. *Effects of Build Orientations on Tensile Properties of PLA Material Processes by FDM.* F. Afrose, et al. 2014, Advance Materials Research, Vols. 1044-1045, pp. 31-34.
68. Domininghaus, Hans. *Plastics for engineers. Materials properties applications.* s.l. : Hanser, 1992.
69. *Finite Element Simulation of Fused Deposition Modelling Process.* Courter, Blake, et al. 2017. Research Gate publication 313819691.
70. *Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition.* Bertoldi, M, et al. University of Illinois at Chicago: s.n., 1998. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/646>.
71. *Characterization and dynamic mechanical analysis on PC-ABS material processed by fused deposition modelling: And investigation through I-optimal response surface methodology.* Ahmed Mohamed, Omar, Hasan Masood, Syed and Lal Bhowmikb, Jahar. 2017, Science Direct, Vol. 107, pp. 128-141.



Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

Departamento de Ingeniería
Mecánica / Ingeniaritza
Mekanikoa Saila