



TESI DOCTORAL

Títol	Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la tecnología <i>Fused Deposition Modeling</i>
Realitzada per	Miquel Domingo Espín
en el Centre	IQS School of Engineering
i en el Departament	Engineria Industrial
Dirigida per	Dr. Guillermo Reyes Pozo Dr. Salvador Borrós Gómez

Agraïments

A la meua família, per el seu il·limitat suport en tot moment en tots els aspectes de la meua vida.

Al Dr. Guillermo Reyes, per oferir-me la possibilitat de realitzar aquesta tesi i haver-me ajudat en tot moment quan ha fet falta.

Al Dr. Salvador Borrós per la seva ajuda sobretot a la referent a la comprensió del comportament dels materials.

Al Dr. Josep Maria Puigoriol i al Dr. Andrés García junt amb tota la gent que forma part del Grup d'Enginyeria de Productes Industrials (GEPI) del qual formo part i que sempre han estat a la meua disposició quan els he necessitat.

A la Dra. Núria Agulló del Grup d'Enginyeria de Materials (GEMAT) per la seva ajuda en les àrees que menys dominava.

Al Dr. Jordi Llumà y la gent de la Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona (EUETIB) per la seva ajuda desinteressada durant els assajos realitzats en les seves instal·lacions.

Al Dr. JJ Molins i al Dr. Eduard Barberà i a tota la gent del departament de Biotecnologia per deixar-me un espai tranquil on treballa durant tota a etapa doctoral i, sobretot, per la seva ajuda sempre que la he necessitat.

A César Alquézar per la seva ajuda sempre que he necessitat de alguna eina o la fabricació de qualsevol cosa.

A tots els meus companys al IQS: Cate, Pol, Miguel, Patri i Mire (i a molts altres que em deixo).

0.1. Índice

0.1. Índice	V
0.2. Lista de abreviaturas	IX
0.2.1. Abreviaturas generales	IX
0.2.2. Abreviaturas de las constantes mecánicas	IX
0.2.3. Abreviaturas de la metodología	IX
0.3. Listado de figuras y tablas	XI
0.3.1. Lista de figuras	XI
0.3.2. Lista de tablas	XV
0.4. Resumen	XIX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura y contenido de la tesis	4
1.4. Aportaciones	5
1.5. Difusión de los resultados de la tesis	6
2. Estado del arte	7
2.1. Técnicas de fabricación tradicionales: moldeo por inyección	7
2.2. Introducción a las tecnologías de Additive Manufacturing (AM)	8
2.2.1. Tipos de tecnologías Additive Manufacturing (AM)	10
2.3. Fused deposition modeling Fused Deposition Modeling (FDM)	12
2.3.1. Parámetros de impresión comunes de las tecnologías Additive Manufacturing (AM)	13
2.3.2. Parámetros de impresión de la tecnología Fused Deposition Modeling (FDM)	15
2.4. Comparación entre el moldeo por inyección y las tecnologías Additive Manufacturing (AM)	17
2.5. Comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)	18
2.6. Aplicaciones de las tecnologías Additive Manufacturing (AM)	18
3. Comportamiento mecánico de las piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)	23
3.1. Comportamiento mecánico de piezas de plástico fabricadas por moldeo por inyección	23
3.2. Comportamiento mecánico de piezas fabricadas por Additive Manufacturing (AM)	26
3.2.1. Comportamiento mecánico de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)	27
3.2.2. Simulación por elementos finitos de piezas fabricadas mediante Additive Manufacturing (AM)	32
3.3. Experimentos realizados en el presente trabajo	33
3.3.1. Caracterización de piezas fabricadas mediante Fused deposition modeling (FDM) y correlación con resultados experimentales	33

3.3.2. Estudio de propiedades bajo cargas mecánicas dinámicas de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)	51
4. Acabado superficial y coste de piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)	63
4.1. Acabado superficial	63
4.1.1. Acabado superficial de piezas fabricadas por moldeo por inyección .	63
4.1.2. Acabado superficial en tecnologías Additive Manufacturing (AM).....	66
4.2. Coste	69
4.2.1. Coste de producción de piezas de plástico moldeo por inyección	69
4.2.2. Coste de producción de piezas de plástico por tecnologías Additive Manufacturing (AM)	71
4.2.3. Estudio comparativo	71
5. Metodología para la determinación de la mejor orientación para la fabricación de piezas finales mediante Fused Deposition Modeling (FDM).....	73
5.1. Metodologías de selección de parámetros de fabricación para procesos de fabricación	73
5.1.1. Modelos empíricos en Fused Deposition Modeling (FDM)	74
5.2. Metodología.....	74
5.2.1. Especificaciones del usuario	75
5.2.2. Determinación de las posibles orientaciones	76
5.2.3. Función objetivo acabado superficial	77
Tipos de superficie.....	79
Superficies con soporte.....	81
5.2.4. Función objetivo coste.....	83
5.2.5. Función objetivo para el comportamiento mecánico	84
5.2.6. Determinación de la mejor orientación	86
6. Verificación de la metodología	89
6.1. Archivo CAD	89
6.2. Especificaciones del usuario.....	91
6.2.1. Pesos definidos por el usuario.....	91
6.2.2. Cargas y sujeciones	91
6.3. Determinación de las posibles orientaciones	92
6.3.1. Fabricación de la pieza ejemplo.....	94
6.4. Función acabado superficial	94
6.4.1. Resultados de aplicación de metodología.....	94
6.4.2. Verificación resultados.....	97
6.5. Función coste.....	102
6.5.1. Resultados de aplicación de metodología.....	102
6.5.2. Verificación resultados.....	104
6.6. Función comportamiento mecánico	105
6.6.1. Resultados de aplicación de metodología.....	105
6.6.2. Verificación resultados.....	111
6.7. Determinación de la mejor orientación.....	114
6.7.1. Resultados de la metodología	114
6.7.2. Verificación de los resultados	115

7.	Conclusiones y trabajos futuros	117
7.1.	Conclusiones	117
7.1.1.	Conclusiones sobre el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)	117
7.1.2.	Conclusiones sobre la metodología para la determinación de la mejor orientación para la fabricación de piezas finales mediante Fused Deposition Modeling (FDM).....	118
7.2.	Trabajos futuros	118
8.	Bibliografía.....	121
9.	Anexo.....	137
9.1.	Resultados de la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM).....	137
9.1.1.	Datos experimentales para caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM).....	137
9.1.2.	Programas de MATLAB® para la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)	143
9.1.3.	Resultados de los ensayos físicos sobre las piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM).....	165
9.1.4.	Programa de MATLAB® para la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)	168
9.2.	Resultados del análisis de varianza de el estudio de las propiedades dinámicas-mecánicas de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM).....	175
9.3.	Programa de MATLAB® para la verificación de los resultados de la función del acabado superficial	177

0.2. Lista de abreviaturas

0.2.1. Abreviaturas generales

AM: Additive Manufacturing
ANN: Artificial Neural Network
ASTM: American Society for Testing and Materials
CAD: Computer Aided Design
DMA: Dynamic Mechanical Analysis
DOE: Design of Experiments
FDM: Fused Deposition Modeling
FEA: Finite Element Analysis
LOM: Laminated Object Manufacturing
PC: Policarbonato
SLA: Stereolithography, tecnología AM
SLS: Selevtive Láser Sintering
STL: Stereolithography, archivo de datos
TAC: Tomografía axial computarizada

0.2.2. Abreviaturas de las constantes mecánicas

E_i : módulo de Young en la dirección i .
 ν_{ij} : coeficiente de Poisson en el plano ij .
 G_{ij} : módulo cortante en el plano ij .
 ε_i : elongación en la dirección i .
 γ_{ij} : deformación cortante en el plano ij .
 σ_i : tensión normal en la dirección i .
 τ_{ij} : tensión cortante en el plano ij .

0.2.3. Abreviaturas de la metodología

η_S : peso del acabado superficial.
 η_C : peso del coste.
 η_M : peso del comportamiento mecánico.
 O_i : valor final de la orientación i .

FS_i : valor final de la función objetivo acabado superficial para la orientación i .
 S_i : valor parcial de la función objetivo acabado superficial de la orientación i .
 ξ_j : peso del tipo de superficie j .
 N_{ij} : numero relativo de la superficie j en la orientación i .
 ξ_{1j} : peso del *staircase effect* de la superficie j
 ξ_{2j} : peso relacionado con el tipo de soporte utilizado de la superficie j
 ξ_{hi} : peso relacionado con el espesor de capa del espesor i .

FC_i : valor final de la función objetivo coste para la orientación i .
 C_i : valor parcial de la función coste para la orientación i .

Mat_i : cantidad de material utilizado para fabricar la pieza en la orientación i .
 Sup_i : cantidad de material de soporte utilizado para fabricar la pieza en la orientación i .

T_i : tiempo necesario fabricar la pieza en la orientación i .

FM_i : valor final de la función objetivo del comportamiento mecánico para la orientación i .

M_i : valor parcial de la función objetivo comportamiento mecánico para la orientación i .

L_{1ij} : longitud total de hilos en la dirección 1 de la superficie j en la orientación i .

σ_{1ij} : tensión máxima a tracción en la dirección 1 de la superficie j en la orientación i .

L_{2ij} : longitud total de hilos en la dirección 2 de la superficie j en la orientación i .

σ_{2ij} : tensión máxima a tracción en la dirección 2 de la superficie j en la orientación i .

0.3. Listado de figuras y tablas

0.3.1. Lista de figuras

Figura 1.1: Modelo en 3D del molde de extrusión-soplado de botellas.....	1
Figura 1.2: tres posibles orientaciones para una de las dos partes del molde de extrusión-soplado de botella.	3
Figura 2.1: Ciclo de moldeo por inyección: 1) molde cerrado, 2) se inyecta fluido a la cavidad, 3) se mueve hacia atrás el tornillo, el polímero fluye hacia delante y se enfría la pieza 4) se abre el molde, y la pieza se expulsa ¹	8
Figura 2.2: Pasos de un proceso cualquiera de fabricación por AM, desde el archive CAD hasta la utilización de la pieza ²	9
Figura 2.3: Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología SLA ⁴	10
Figura 2.4: Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología SLS ⁵	11
Figura 2.5: Esquema y partes básicas de una máquina por tecnología LOM ⁶	12
Figura 2.6: Esquema del proceso FDM ⁷	13
Figura 2.7: Tres posibles orientaciones para una misma pieza.....	13
Figura 2.8: Trayectorias que siguen en cada capa las boquillas para distintos <i>build styles</i> para la impresora de Stratasys® Fortus 400 mc®: a) <i>Solid</i> , b) <i>Sparse</i> y c) <i>Double Sparse</i>	14
Figura 2.9: Ejemplo de las trayectorias que siguen las boquillas para una misma pieza y capa de los distintos tipos de soportes que permite utilizar el <i>software Insight®</i> de Stratasys®. A) <i>Basic</i> , B) <i>Sparse</i> , C) <i>SMART</i> , D) <i>Surround</i> y E) <i>Break-Away</i>	15
Figura 2.10: Esquema de los parámetros de las trayectorias de contorno y <i>raster</i> en el plano XY de la máquina.	16
Figura 2.11: Modelo fabricado con SLA de hueso y estructuras vasculares la unión vertical de gemelos craneópagos. El hueco en la parte superior se hizo a propósito para mostrar la zona dónde las venas estaban unidas ⁶⁴	19
Figura 2.12: Accesorios, guías y plantillas para la sustitución completa de caderas. a) guías y modelo para el pre-operatorio. b) plantilla con agujero pasador central determinando la dirección y profundidad de la perforación. c) posicionamiento del implante de cadera en la plantilla de cadera ^{65,66}	20
Figura 2.13: Diagrama de flujo y muestras de piezas fabricadas tradicionalmente (izquierda) y mediante tecnologías AM (derecha) ⁶⁷	20
Figura 2.14: Primer objeto impreso con tecnología AM en el espacio ⁷⁰	21
Figura 3.1: Esquema de la zona de moldeo para un polímero y un molde determinados ⁷¹	24
Figura 3.2: Orientación de las cadenas poliméricas. (a) polímero relajado, (b) polímero orientado mediante el flujo, y (c) direcciones fuertes y débiles en el flujo de un polímero ⁷²	25
Figura 3.3: Ejemplo de la formación de una línea de soldadura debido a la separación del flujo de plástico ⁷²	26
Figura 3.4: Esquema de las probetas de tensión mostrando la dirección de escaneado (<i>scan direction</i>) o el <i>hatch pattern</i> y la dirección de carga ¹⁸	27
Figura 3.5: Disposición de las capas e hilos extruidos para una misma geometría fabricada con dos orientaciones distintas. (a) dirección de fabricación paralela a la fuerza y (b) dirección de fabricación perpendicular a la fuerza.	28

Figura 3.6: Proceso de formación de la unión entre dos hilos: (1) contacto entre superficies; (2) crecimiento del “cuello”, y (3) difusión molecular ⁵⁹	29
Figura 3.7: Esquema de la aplicación de la carga en probetas de compresión y fotos de las grietas ²⁸	29
Figura 3.8: Resultados de tensión a tracción para probetas fabricadas variando el <i>raster angle</i> con tecnología FDM comparadas con probetas fabricadas por moldeo por inyección ⁵⁶	31
Figura 3.9: Resistencia a la tracción de probetas fabricadas con distinta orientación y un ángulo <i>raster</i> de 45°/-45° con probetas fabricadas por moldeo por inyección ⁵⁶	31
Figura 3.10: Orientaciones para las probetas ensayadas a tracción/elongación. ...	36
Figura 3.11: Esquema de la sección elíptica de un hilo extruido.	36
Figura 3.12: Dimensiones de la probeta para los ensayos de tracción/elongación según la norma ASTM D638.....	37
Figura 3.13: Probetas de tensión/elongación fabricadas en las orientaciones 3, 5 y 6 (Figura 3.10).....	37
Figura 3.14: Montaje experimental para los ensayos de tensión/elongación.	38
Figura 3.15: Gráficos de tensión/elongación para las muestras 1, 2 y 3 (Figura 3.10).	39
Figura 3.16: Valores medios y variabilidad de el modulo de Young y la tensión máxima para las muestras 1, 2 y 3 (Figura 3.10).....	40
Figura 3.17: Plano de la pieza para realizar los ensayos con las seis posibles orientaciones indicadas numéricamente.....	41
Figura 3.18: Distintas orientaciones impresas para la experimentación física.....	42
Figura 3.19: Probeta fabricada mediante FDM.....	42
Figura 3.20: Montaje de sujeción de las piezas para la experimentación física, con la posición de aplicación de la fuerza marcada.	43
Figura 3.21: Montaje para los ensayos físicos.	43
Figura 3.22: Resultados gráficos de el desplazamiento con la fuerza para cada una de las orientaciones.....	44
Figura 3.23: Resultados gráficos de el desplazamiento con la fuerza para cada una de las bases de fabricación.	45
Figura 3.24: Esquema de las cargas de las piezas fabricadas: en rojo tracción, en verde compresión y en azul torsión.....	46
Figura 3.25: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 2.	46
Figura 3.26: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 5.	47
Figura 3.27: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 1.	47
Figura 3.28: Modelo utilizado para la simulación con FEM. Se observan los elementos, nodos y condiciones de contorno.	48
Figura 3.29: Esquema de los parámetros de las trayectorias de contorno y <i>raster</i> en el plano XY de la impresora.....	53
Figura 3.30: Grafo lineal de la matriz ortogonal L ₂₇	54
Figura 3.31: Esquema del funcionamiento de la mordaza de doble biga (<i>Dual Cantilever</i>) ⁹⁷	55

Figura 3.32: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del <i>storage modulus</i> .	58
Figura 3.33: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del <i>loss modulus</i> .	59
Figura 3.34: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del <i>damping factor</i> .	59
Figura 3.35: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido de la rigidez.	60
Figura 4.1: Ejemplo de la formación de líneas de soldadura y marcas de flujo ⁹⁹ .	64
Figura 4.2: Efectos de la temperatura del molde sobre partes de Nylon 6/6 ⁹⁹ .	65
Figura 4.3: Efecto de la diferencia de temperaturas en distintas secciones del molde. Se produce <i>Warpage</i> y que el plástico no solidifique en el centro ¹⁰⁰ .	65
Figura 4.4: Efecto del grosor de capa en el <i>staircase effect</i> . A la izquierda un espesor de capa grande reduce el acabado superficial y el tiempo de fabricación. A la derecha un espesor de capa pequeño mejora el acabado superficial i aumenta el tiempo de fabricación ³⁵ .	66
Figura 4.5: Esquema del <i>staircase effect</i> en los procesos AM.	67
Figura 4.6: Efecto de la dirección de fabricación en el <i>staircase effect</i> . a) La dirección de fabricación es vertical y se usa un espesor de capa t_1 . b) La dirección de fabricación es horizontal y se usa un espesor de capa t_2 . El espesor t_1 es menor que el t_2 ¹⁰⁷ .	67
Figura 4.7: Ejemplo del <i>adaptive slicing</i> . a) <i>Slicing</i> uniforme. b) <i>adaptive slicing</i> ¹¹⁰ .	68
Figura 4.8: Esquema del acabado superficial de la superficie superior de piezas fabricadas con FDM. Se observa el efecto de hundimiento de la distancia entre hilos extruidos del interior de la pieza en el acabado de las caras superiores de la pieza.	68
Figura 4.9: El ciclo de inyección de plástico con las distintas etapas señaladas ⁷¹ .	70
Figura 4.10: Comparación de costes para diferentes tecnologías de fabricación AM y moldeo por inyección para la producción de la misma pieza ⁵³ .	72
Figura 5.1: Esquema de la metodología desarrollada con cada uno de los pasos indicados por una letra.	75
Figura 5.2: Ejemplo de la envolvente convexa de una nube de puntos en dos dimensiones ¹⁵³ .	77
Figura 5.3: Tipos de superficie ¹¹⁵ .	79
Figura 5.4: Clasificación de superficies curvadas ¹¹⁵ .	80
Figura 5.5: Algoritmo para la determinación de si una superficie necesita soporte.	81
Figura 5.6: Efecto de el ángulo que forman la dirección de fabricación y la normal a la envolvente de la superficie. A) entre 45° y 90°, B) 45° y C) entre 0° y 45°.	82
Figura 6.1: Esquema de la metodología desarrollada con cada uno de los pasos indicados por una letra.	89
Figura 6.2: Geometría de la pieza.	90
Figura 6.3: Croquis de la probeta utilizada para la verificación de la metodología.	90
Figura 6.4: Esquema de cargas (rojo) y restricciones (verde) que actúan sobre la pieza.	92
Figura 6.5: Envolvente convexa de la pieza ejemplo.	92
Figura 6.6: Las seis posibles bases de fabricación numeradas.	93

Figura 6.7: Las seis orientaciones completamente determinadas tal y como se ven en el programa Insight®.....	93
Figura 6.8: Esquema de numerado de las superficies exteriores de la pieza ejemplo.	95
Figura 6.9: Acabado superficial de las superficies 10 y 7 de la pieza ejemplo impresa con la orientación 1.....	98
Figura 6.10: Detalle del acabado superficial de la superficie 13 de la pieza ejemplo fabricada en la orientación 1.	98
Figura 6.11: Detalle del acabado superficial de la superficie 11 de la pieza ejemplo fabricada con la orientación 1.	99
Figura 6.12: Detalle del acabado superficial de la superficie 8 de la pieza ejemplo para la orientación 2.	99
Figura 6.13: Detalle del acabado superficial de las superficies 13 (izquierda) y 14 (derecha) de la pieza ejemplo para la orientación 2.	100
Figura 6.14: Detalle del acabado superficial de las superficies 18 (izquierda) y 17 (derecha) de la pieza ejemplo para la orientación 2.	100
Figura 6.15: Detalle del acabado superficial de las superficies 7, 8, 9 y 10 en la orientación 5.	100
Figura 6.16: Detalle del acabado superficial de las superficies 13 (izquierda) y 14 (derecha) en la orientación 5.....	101
Figura 6.17: Detalle del acabado superficial de las superficies 16 (izquierda) y 15 (derecha) de la orientación 5.....	101
Figura 6.18: Orientaciones 1 (izquierda) y 3 (derecha) procesadas con el programa Insight®.	103
Figura 6.19: Orientaciones 1 (arriba) y 6 (abajo) procesadas con el programa Axon 2®.....	104
Figura 6.20: Pieza fabricada en la orientación 1 tal y como se saca de la impresora.	104
Figura 6.21: Piezas fabricadas en las orientaciones 2 (arriba) y 5 (abajo) tal y como se sacan de la impresora.....	105
Figura 6.22: Mapa de tensiones en la dirección X.	106
Figura 6.23: Mapa de tensiones en la dirección Y.	106
Figura 6.24: Mapa de tensiones en la dirección Z.	107
Figura 6.25: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 1.	108
Figura 6.26: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 2.	109
Figura 6.27: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 5.	110
Figura 6.28: Montaje para la comprobación de la función objetivo comportamiento mecánico.....	112
Figura 6.29: Probeta 5.02 rota después del ensayo.....	112
Figura 6.30: Resultados de los ensayos para cada una de las tres orientaciones..	113
Figura 6.31: Resultados de fuerza frente desplazamiento para cada orientación.	113
Figura 9.1: Datos de elongación tensión para la probeta en la dirección 1.....	137
Figura 9.2: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 1.....	138

Figura 9.3: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 2.....	138
Figura 9.4: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 2.....	139
Figura 9.5: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 3.....	139
Figura 9.6: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 3.....	140
Figura 9.7: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 4.....	140
Figura 9.8: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 4.....	141
Figura 9.9: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 5.....	141
Figura 9.10: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 5.....	142
Figura 9.11: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 6.....	142
Figura 9.12: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 6.....	143
Figura 9.13: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 1.01.....	165
Figura 9.14: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 1.02.....	166
Figura 9.15: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 2-4.01.....	166
Figura 9.16: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 2-4.02.....	167
Figura 9.17: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 5.01.....	167
Figura 9.18: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 5.02.....	168

0.3.2. Lista de tablas

Tabla 2.1: Ventajas e inconvenientes del moldeo por inyección y la fabricación mediante tecnologías AM ^{2,53,54}	17
Tabla 2.2: Principales defectos del moldeo por inyección y la fabricación mediante tecnologías FDM en el comportamiento mecánico y el acabado superficial, explicados más detenidamente en el capítulo indicado.....	17
Tabla 2.3: Principales parámetros de fabricación para el moldeo por inyección y las tecnologías AM.....	18
Tabla 3.1: Módulo elástico, tensión máxima y su elongación y la tensión y elongación de rotura medios para cada orientación (Figura 3.10).....	39
Tabla 3.2: Valores de módulos de Young, coeficiente de Poisson y módulos cortantes obtenidos de la caracterización mecánica.....	40

Tabla 3.3: Coeficiente de rigidez medio (F/d), desviación estándar (std) y variación estándar en % (%std) para cada una de las orientaciones.....	44
Tabla 3.4: Coeficiente de rigidez medio (F/d) , desviación estándar (std) y variación estándar en % (%std) para cada una de las bases de construcción.....	45
Tabla 3.5: Constantes mecánicas usadas según la dirección de fabricación en las simulaciones.....	49
Tabla 3.6: Coeficiente de rigidez (F/d) para cada una de las orientaciones simuladas.....	50
Tabla 3.7: Coeficiente de rigidez (F/d) para cada una de las bases de fabricación simuladas.....	50
Tabla 3.8: Comparación entre los ensayos físicos y los simulados para cada orientación.....	50
Tabla 3.9: Factores fijos y variables y sus niveles de experimentación	53
Tabla 3.10: Matriz experimental.....	55
Tabla 3.11: Resultados de la señal y el ruido para cada una de las propiedades estudiadas: <i>storage modulus</i> , <i>loss modulus</i> , <i>damping factor</i> y rigidez para cada una de las experiencias.	57
Tabla 3.12: Nivel del factor para una respuesta optima y factores significativos en orden de importancia.	57
Tabla 5.1: Resultado del producto entre los dos vectores para superficies planas.....	80
Tabla 5.2: Tipo de cilindro según el ángulo θ	80
Tabla 5.3: Tipos de superficie y su peso correspondiente. ✓ significa que están afectadas y ✗ significa que no.	82
Tabla 6.1: Valores de los pesos para cada uno de los tres objetivos.....	91
Tabla 6.2: Relación entre el tipo de soporte que permite Insight® y su peso.	94
Tabla 6.3: Número de superficie con su área en mm ² y su numero relativo asociado.	95
Tabla 6.4: Tipo de superficie (siguiendo la numeración de la Tabla 5.3) según la orientación y el cálculo de su peso junto al valor parcial de la función objetivo S_i y el valor final de la función objetivo FS_i	96
Tabla 6.5: Ordenamiento de las orientaciones según el valor de la función objetivo.	96
Tabla 6.6: Peso según el espesor de capa utilizado.	97
Tabla 6.7: Valor final de la función objetivo acabado superficial aplicando el peso del espesor de capa.....	97
Tabla 6.8: Resultados de la función objetivo para cada una de las orientaciones y el ranking utilizando el programa Insight® de Stratasys® para la máquina Fortus 400mc®.....	102
Tabla 6.9: Resultados de la función objetivo coste para cada una de las orientaciones y el ranking utilizando el programa Axon 2® de para la máquina BitsFromBytes®.	102
Tabla 6.10: Tensiones a tracción en las tres direcciones para cada una de las superficies (Figura 6.8).....	107
Tabla 6.11: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 1.....	108
Tabla 6.12: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 2.....	109

Tabla 6.13: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 5.....	110
Tabla 6.14: Direcciones 1 y 2 para la ecuación 5.16 según la orientación.	111
Tabla 6.15: Resultados de la función objetivo para cada orientación con el resultado parcial y el final.....	111
Tabla 6.16: Valor de la función objetivo comportamiento mecánico para todas las orientaciones.....	111
Tabla 6.17: Resultados del factor de rigidez para cada orientación y su residual.	114
Tabla 6.18: Resultados de las funciones objetivo para cada orientación y el ranquin para cada una de ellas.....	114
Tabla 6.19: Resultado de la metodología para cada una de las opciones planteadas por el usuario (Tabla 6.1) y el ranquin para cada uno de ellas.	114
Tabla 9.1: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para el <i>Storage Modulus</i>	176
Tabla 9.2: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para el <i>Loss Modulus</i>	176
Tabla 9.3: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para la <i>Tan Delta</i>	176
Tabla 9.4: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para la rigidez.	177

0.4. Resumen

En el presente trabajo se ha abordado la tecnología de fabricación aditiva (AM, *Additive Manufacturing*) de piezas finales. En la actualidad la fabricación aditiva no se limita sólo a prototipos y maquetas sino que también permite la fabricación de productos finales que trabajen en condiciones equivalentes a los fabricados por las tecnologías tradicionales. La falta de información sobre tecnologías de AM y la poca experiencia acumulada dificulta el proceso del diseño. El conocimiento de la influencia de los distintos parámetros de fabricación en el comportamiento mecánico de las piezas materializadas con tecnologías AM es escaso y disperso, mientras que la simulación de las piezas en condiciones de funcionamiento no es tan fiable como en el caso de las tecnologías tradicionales.

La orientación de la pieza es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en cualquier tecnología AM ya que afecta al acabado superficial, al coste y al comportamiento mecánico de las piezas. Para la realización de este trabajo se ha utilizado la tecnología *Fused Deposition Modeling* (FDM), una de las más complejas por la cantidad de parámetros que se deben tener en cuenta.

Se ha estudiado el efecto de distintos parámetros de fabricación en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM sometidas a cargas estáticas y dinámicas. A partir de la experimentación realizada y de los resultados descritos en la bibliografía se ha desarrollado una metodología para determinar la mejor orientación para la fabricación de piezas finales teniendo en cuenta su acabado superficial, coste y comportamiento mecánico

Se ha evaluado el comportamiento mecánico mediante experimentos sobre piezas fabricadas con FDM. Como resultado se ha obtenido la matriz de rigidez que describe el modelo constitutivo del material. Dicha matriz se ha utilizado para simular el comportamiento mecánico de piezas fabricadas por FDM y ha sido validado mediante experimentación. Los experimentos mecánicos-dinámicos realizados permiten predecir el comportamiento dinámico de las piezas para los distintos parámetros de fabricación.

En el present treball s'ha abordat les tecnologies per fabricació additiva (AM, *Additive Manufacturing*) de peces finals. En la actualitat la fabricació additiva no es limita només a prototips i maquetes sinó que també permet la fabricació de productes finals que treballen en condicions equivalents als fabricats mitjançant tecnologies tradicionals. La manca de informació sobre tecnologies AM i la poca experiència acumulada dificulta el procés de disseny. El coneixement de la influència de els diversos paràmetres de fabricació en el comportament mecànic de les peces manufacturades amb tecnologies AM és escàs y dispers, mentre que la simulació de les peces en condicions de funcionament no és tan fiable com en el cas de les tecnologies tradicionals.

La orientació de la peça és un dels factors més important a tenir en compte en qualsevol tecnologia AM ja que afecta al acabat superficial, al cost i al comportament mecànic de les peces. Per al desenvolupament d'aquest treball s'ha utilitzat la tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), una de les més complexes per la quantitat de paràmetres que s'han de tenir en compte.

S'ha estudiat el efecte de diferents paràmetres de fabricació en el comportament mecànic de les peces fabricades mitjançant FDM sotmeses a carregues estàtiques i dinàmiques. A partir de la experimentació realitzada y els resultats descrits a la bibliografia s'ha desenvolupat una metodologia per determinar la millor orientació per a la fabricació de peces finals considerant el seu acabat superficial, cost i comportament mecànic

S'ha avaluat el comportament mecànic mitjançant experiments realitzats amb peces fabricades amb FDM. Com a resultat s'ha obtingut la matriu de rigidesa que descriu el model constitutiu del material. Aquesta matriu s'ha utilitzat per la simulació de el comportament mecànic de peces fabricades per FDM i ha estat validat mitjançant experimentació. Els experiments mecànics-dinàmics realitzats permeten preveure el comportament dinàmic de les peces per els diferents paràmetres de fabricació.

In the presented work the Additive Manufacturing (AM) technologies of end use parts has been addressed. Today AM is not only limited to prototypes and models, it also allows to manufacture end use products that work at equivalent conditions as the manufactured using traditional techniques. The lack of information about AM technologies and the little accumulated experience difficult the design process. Knowledge of the influence of different manufacturing parameters on the mechanical behavior of parts materialized with AM technology is limited and dispersed, while the simulation of parts in working conditions is not as reliable as in the case of traditional technologies.

The orientation of the parts is one of the most important factors to consider in any AM technology as it affects the surface finish, the cost, and the mechanical behavior of parts. Fused Deposition Modeling (FDM), one of the most complex technologies due to the amount of parameters to consider, has been used to carry out this work.

The effect of different manufacturing parameters on the mechanical behavior of the parts manufactured by FDM under static and dynamic loads has been studied. Also a methodology to determine the best orientation to build end use parts considering their surface finish, cost and mechanical behavior has been developed using the experimentation and the results described in the literature.

The mechanical behavior of FDM parts has been evaluated. As a result the stiffness matrix that describes the constitutive model of the material has been determined. This matrix has been used to simulate the mechanical behavior of FDM parts and it has been validated through experimentation. The dynamic-mechanical experiments predict the dynamic behavior of parts for the different parameters of manufacture.

1. Introducción

En este capítulo se explica la motivación que ha llevado al desarrollo de este trabajo de investigación. Se presentan los objetivos a lograr y se introduce el contenido de cada capítulo. Finalmente se numeran los trabajos realizadas para la difusión los resultados obtenidos.

1.1. Motivación

La fabricación aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) es una de las tecnologías de fabricación que ha despertado gran interés por parte de todo tipo de industria y la sociedad en general. Este interés viene dado por las ventajas que presenta frente a los métodos de fabricación tradicionales: mayor libertad de diseño e innovación, menor impacto medioambiental, rapidez desde el diseño a la fabricación y capacidad de fabricación de piezas únicas o pequeños lotes a precios razonables.

Sin embargo, y aunque presenta todas las ventajas mencionadas anteriormente, las tecnologías de AM aún no son aplicables a la gran mayoría de industrias. La fabricación de piezas y objetos para uso final utilizando esta tecnología no es una tarea evidente ya que no se sabe con certeza la influencia de los distintos parámetros de fabricación en el acabado superficial, las propiedades mecánicas, el coste, y, menos aun, a la combinación de los tres.

Hace algún tiempo el Grup d'Enginyeria de Productes Industrials (GEPI) del departamento de Ingeniería Industrial en el IQS *School of Engineering* recibió el encargo de fabricar un molde para la extrusión-soplado de botellas (Figura 1.1) con tecnología AM *Fused Deposition Modeling* (FDM) utilizando la impresora de Stratasys® Fortus 400 mc®, disponible en las instalaciones del centro.

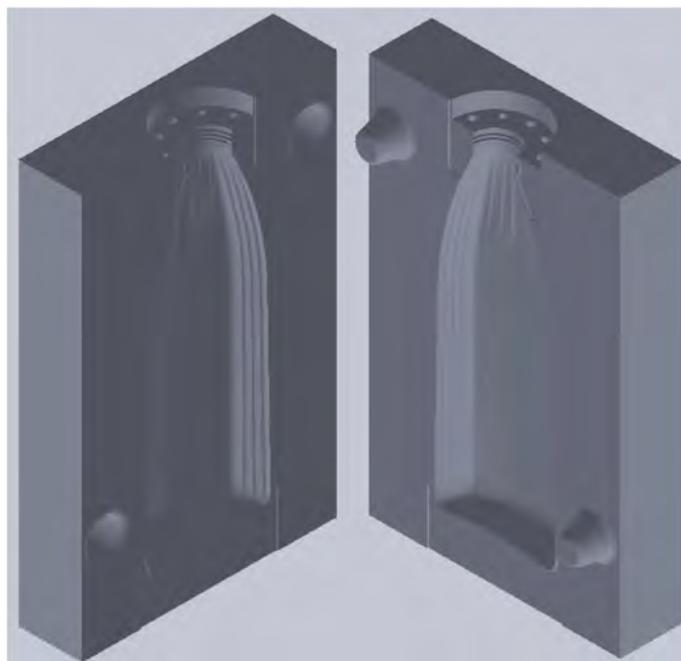


Figura 1.1: Modelo en 3D del molde de extrusión-soplado de botellas.

El molde debía soportar los requerimientos mecánicos y térmicos a los que es sometido un molde metálico convencional durante su funcionamiento, cumplir con las especificaciones de tolerancia y acabado superficial de la botella y ser fabricado con el coste más bajo posible.

Se recibió el modelo virtual del molde en tres dimensiones. Este modelo fue procesado por el *software* encargado de gestionar la información del archivo y generar las órdenes para su fabricación. Estos *softwares* incluyen módulos que determinan la mejor orientación según algún criterio. Algunos de los criterios que se pueden escoger son: minimización del uso de soportes, maximizar el área horizontal (hacen disminuir el coste) y mejorar el acabado superficial. No existía la posibilidad de escoger una orientación mediante criterios de comportamiento mecánico y mucho menos de un conjunto de los tres objetivos.

Debido a esta incertidumbre no se sabía cuales eran los parámetros de fabricación adecuados para fabricar el molde para que éste cumpliera con las especificaciones descritas por el cliente. El primer parámetro a decidir fue la orientación de las dos partes del molde en la cámara de fabricación. Existían tres orientaciones claras, utilizando las caras planas del molde (Figura 1.2), cada una de ellas causaba distintos efectos en el acabado superficial y el coste:

- La primera orientación (Figura 1.2.a) es la que tiene un coste menor ya que no necesita del uso de soportes para su fabricación (estructuras necesarias para la fabricación de zonas que pueden derrumbarse al ser fabricadas) y su altura es la mínima de las tres. Esto significa menos tiempo de fabricación. Sin embargo la superficie curva de la botella presentaría un acabado superficial muy pobre debido al escalonamiento (estratificación) que se produce al fabricar superficies curvas o inclinadas por capas.
- La segunda orientación (Figura 1.2.b) presenta un coste superior que la primera debido a la altura total y al uso de material de soporte, necesario para fabricar las secciones que se encuentran en voladizo sin que estas colapsen. Sin embargo presenta un mejor acabado superficial en la superficie curva de la botella. El ángulo de curvatura de la superficie respecto a la dirección de fabricación (dirección vertical o eje Z) es inferior que en la primera orientación.
- La tercera orientación (Figura 1.2.c) es la que presenta el mejor acabado superficial, la superficie más rugosa sería la del fondo de la botella la cual no es importante para su apariencia. A pesar de ser la mejor para el acabado superficial, es la más costosa ya que su longitud en la dirección vertical es la mayor. Además no es posible de fabricar ya que por sus dimensiones no cabe en la cámara de fabricación.

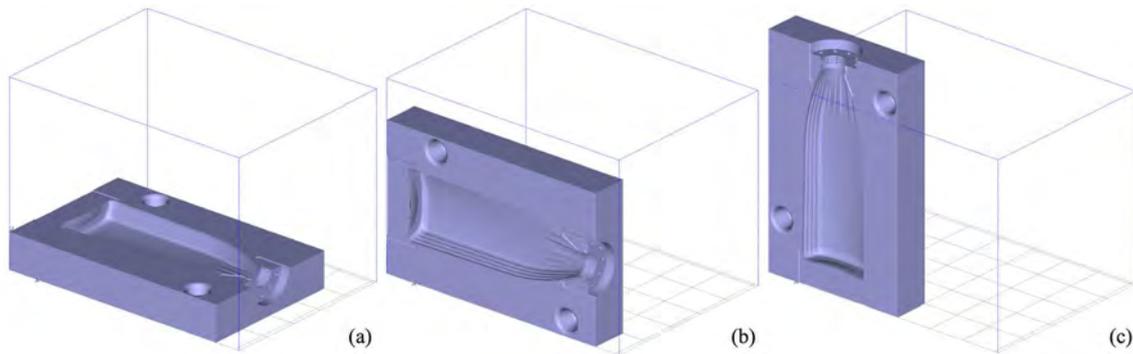


Figura 1.2: tres posibles orientaciones para una de las dos partes del molde de extrusión-soplado de botella.

Respecto al comportamiento mecánico se sabían pocas cosas: la unión entre capas es fuerte pero presenta una fractura frágil y, teóricamente, la resistencia en el plano de impresión debería ser igual en las dos direcciones. Pero esta información no era útil al intentar, tanto cualitativamente como cuantitativamente, escoger la mejor orientación. Ya que los esfuerzos mecánicos presentes en un molde se deben a cargas combinadas en múltiples direcciones

Este proyecto evidenció la necesidad que había de estudiar el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante FDM y, de esta manera, poder desarrollar un método que permitiera escoger la mejor orientación para imprimir piezas finales de acuerdo con criterios de acabado superficial, resistencia mecánica y coste.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es el estudio de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante FDM. De esta manera se pretende conocer la forma más eficaz y eficiente de fabricación de piezas para uso final usando la máquina de AM por tecnología FDM Stratasys® Fortus 400mc® utilizando Policarbonato (PC) como material. Este objetivo presenta distintos objetivos específicos, presentados a continuación:

- Hallar modelos constitutivos mecánicos que sean los más adecuados para representar el comportamiento elástico de piezas fabricadas en FDM.
- Experimentalmente determinar las constantes mecánicas que permitan construir el modelo constitutivo elástico lineal.
- Verificar experimentalmente la bondad del modelo constitutivo con ensayos reales y simulaciones hechas con ordenador.
- Determinar los factores de fabricación que más afectan al comportamiento mecánico bajo cargas dinámicas de las piezas fabricadas en FDM dentro de la zona elástica.

Como segundo objetivo se desea desarrollar una metodología que permite determinar cual es la mejor orientación para fabricar una pieza mediante FDM teniendo en cuenta el comportamiento mecánico, el acabado superficial y el coste. Sus objetivos específicos se enumeran a continuación:

- Estudiar el efecto de las distintas geometrías posibles de una pieza y su orientación en el acabado superficial.

- Analizar los factores que afectan más al coste de una pieza.
- Desarrollar índice numéricos que permitan ordenar las distintas orientaciones según su efecto en las distintas propiedades.
- Verificación de la metodología.

1.3. Estructura y contenido de la tesis

Capítulo 2: Estado del arte

El capítulo empieza con una breve explicación del moldeo por inyección, la técnica de fabricación tradicional de piezas de plástico más extendida y comparable a las técnicas AM. Se introducen las tecnologías más extendidas en AM para así explicar, después, la utilizada en esta tesis que es la tecnología FDM. Seguidamente se enumeran los parámetros de impresión comunes entre todas ellas y se introducen los específicos de FDM. A continuación se hace una comparativa entre el moldeo por inyección y las técnicas AM para ver sus principales diferencias. Sigue un breve resumen de las distintas investigaciones realizadas sobre el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM y finalmente se ilustran algunas de las aplicaciones para estas tecnologías.

Capítulo 3: Comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante Fused deposition modeling (FDM)

El capítulo empieza con una recopilación exhaustiva de los trabajos realizados sobre el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante AM y especialmente FDM. El análisis de la bibliografía demuestra que los estudios realizados referentes al comportamiento mecánico no son suficientes para poder establecer los parámetros de fabricación necesarios para poder fabricar piezas finales. Posteriormente se presentan los estudios realizados en esta tesis. Primero la determinación de un modelo constitutivo para piezas de PC fabricadas con FDM y su implementación para realizar simulaciones mediante elementos finitos. También se presenta la correlación entre resultados físicos y simulados realizado. Finalmente el análisis de los parámetros de fabricación más influyentes en el comportamiento mecánico de piezas fabricadas con tecnología FDM bajo cargas dinámicas.

Capítulo 4: Acabado superficial y coste de piezas fabricadas mediante Fused deposition modeling (FDM)

En este capítulo se presentan los estudios realizados sobre cómo los distintos parámetros de fabricación afectan al acabado superficial y el coste de piezas fabricadas con tecnologías AM. Primero se explica cómo influyen los parámetros comunes de todas ellas y posteriormente los parámetros específicos de FDM.

Capítulo 5: Metodología para la determinación de la mejor orientación para la fabricación de piezas finales mediante Fused deposition modeling (FDM)

Se explica el funcionamiento de la metodología desarrollada para seleccionar la mejor orientación de fabricación de piezas finales utilizando la tecnología FDM. La determinación se realiza cuantitativamente teniendo en cuenta el acabado superficial, el coste y el comportamiento mecánico marcados por la geometría y su uso.

Capítulo 6: Verificación de la metodología

La metodología desarrollada en el capítulo anterior se aplica a una pieza para la determinación de la mejor orientación de fabricación. Su verificación se realiza mediante ensayos físicos realizados en piezas fabricadas utilizando diferentes orientaciones y observando su comportamiento mecánico, acabado superficial y coste.

Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se exponen las conclusiones de este trabajo así como también se proponen temas para futuras investigaciones.

Capítulo 8: Bibliografía

Se lista toda la bibliografía utilizada para la realización de este trabajo.

Capítulo 9: Anexo

En el anexo se incluyen los resultados de los experimentos realizados y los programas de MATLAB® desarrollados para su procesado.

1.4. Aportaciones

Las aportaciones más relevantes en este trabajo son:

- Desarrollo de un método para determinar modelos constitutivos bien definidos para piezas fabricadas mediante tecnologías AM.
- Comprobación de que el modelo isotrópico lineal es preferible para calcular el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM dentro de la zona lineal elástica.
- Establecimiento de una relación entre la disposición de los hilos y las capas de las piezas fabricadas por FDM con su comportamiento mecánico.
- Comprobación de que las propiedades mecánicas-dinámicas de las piezas fabricadas mediante FDM pueden ser controladas por los parámetros de fabricación.
- Planteamiento de las funciones objetivo, acabado superficial y coste, que pueden ser aplicadas a cualquier tecnología AM.
- Desarrollo y validación de una metodología que ayuda a determinar la mejor orientación de fabricación de piezas finales con tecnología FDM cuantitativamente.

1.5. Difusión de los resultados de la tesis

Los resultados obtenidos durante la realización de esta tesis han permitido publicar dos artículos científicos y una ponencia en un congreso internacional. Estas tres aportaciones se listan a continuación:

Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts

Miquel Domingo-Espín, Salvador Borrós, Núria Agulló, Andrés-Amador Garcia-Granada and Guillermo Reyes. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2014, 1(2), 70–77.

A methodology to choose the best building direction for Fused Deposition Modeling end-use parts

Miquel Domingo-Espín, Salvador Borrós, Josep Maria Puigoriol-Forcada and Guillermo Reyes. *Proceedings of 5th International Conference on Additive Technologies*, 2014:1,89–193.

Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts

Miquel Domingo-Espín, Josep Maria Puigoriol-Forcada, Andrés-Amador Garcia-Granada, Jordi Llumà, Salvador Borrós and Guillermo Reyes. *Materials & Design*. 2015; 83, 670–677.

2. Estado del arte

En el presente capítulo se explica brevemente el moldeo por inyección para poder hacer una comparación entre éste y las tecnologías AM con especial énfasis en la FDM. Se hace así para evidenciar las diferencias entre los parámetros de fabricación de interés para cada tecnología. También se hace una introducción general a la fabricación aditiva explicando las tecnologías más utilizadas y se explica detalladamente la tecnología FDM utilizada en el presente trabajo junto a sus parámetros de fabricación más importantes. Esto permite introducir brevemente los distintos estudios realizados sobre el comportamiento mecánico de piezas fabricadas con FDM. Finalmente se enumeran algunas de las aplicaciones en las que se utiliza esta tecnología.

2.1. Técnicas de fabricación tradicionales: moldeo por inyección

La técnica de fabricación tradicional comparable a las de AM es la del moldeo por inyección ya que es la que permite reproducir geometrías más complejas por lo que la hace la más parecida a las técnicas de AM. Este proceso se caracteriza por que el polímero es deformado con la ayuda de presión y temperatura, igual que la tecnología FDM, utilizada en este trabajo.

En el proceso de moldeo por inyección se calienta un polímero hasta que alcanza un estado plástico y se le fuerza a fluir a alta presión hacia la cavidad de un molde. El fluido rellena dichas cavidades y se solidifica reproduciendo la forma del molde. Una vez el fluido está completamente solidificado se retira la pieza del molde.

El ciclo del moldeo por inyección de un polímero termoplástico suele ser el siguiente (Figura 2.1):

1. El molde se cierra.
2. Se inyecta plástico en las condiciones de temperatura y viscosidad adecuadas mediante calor y trabajo mecánico hacia la cavidad del molde. El plástico se enfría y comienza a solidificarse cuando se encuentra con la superficie fría del molde.
3. El tornillo gira y se mueve hacia atrás para permitir que polímero nuevo fluya hacia la parte delantera del tornillo. Mientras, el polímero en el molde se ha solidificado por completo.
4. El molde se abre, y la pieza se expulsa.

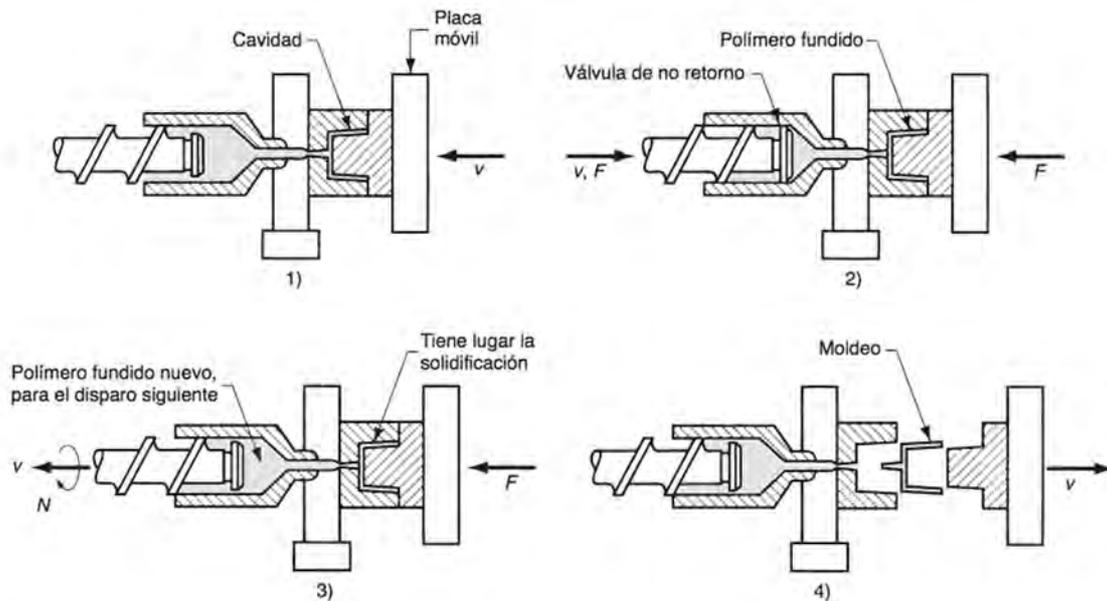


Figura 2.1: Ciclo de moldeo por inyección: 1) molde cerrado, 2) se inyecta fluido a la cavidad, 3) se mueve hacia atrás el tornillo, el polímero fluye hacia delante y se enfría la pieza 4) se abre el molde, y la pieza se expulsa¹.

En los capítulos posteriores se explicará la influencia de los distintos parámetros de fabricación del moldeo por inyección en el comportamiento mecánico (capítulo 3), en el acabado superficial y en el coste (capítulo 4).

2.2. Introducción a las tecnologías de Additive Manufacturing (AM)

AM se define como a un proceso de unión de materiales para la fabricación de objetos a partir de un modelo en 3D, en general, capa a capa, a diferencia de los métodos de fabricación sustractivos (ASTM F2792-12a). Cualquiera de las tecnologías AM sigue el mismo proceso de fabricación (Figura 2.2):

1. Modelo virtual elaborado por *computed aided design* (CAD): Para fabricar cualquier pieza mediante AM se parte de un modelo CAD que describe completamente la geometría. Su diseño se puede realizar mediante cualquier software de diseño de CAD.
2. Conversión a formato *stereolithography* (STL): Prácticamente todas las máquinas AM aceptan el formato de archivo STL, que se ha convertido en un estándar, y casi todos los sistemas CAD pueden exportar la geometría de las piezas en este formato. Este archivo describe las superficies externas cerradas del modelo CAD original y constituye la base para el cálculo de las capas.
3. Transferencia de la geometría a la máquina AM y al *software* de manipulación de STL: El archivo STL debe ser transferido a la máquina AM. Aquí, puede haber alguna manipulación general del archivo para que sea del tamaño correcto y la orientación adecuada para su fabricación.
4. Configuración de la máquina: La máquina AM debe estar correctamente configurada antes de iniciar proceso de construcción. Ajustes como los parámetros de fabricación y materiales. En este paso se realiza la operación de "cortado" (*slicing*) en el que la geometría se divide en cada una de las capas horizontales que se van a fabricar una encima de la otra.

5. Fabricación: La fabricación de la pieza es principalmente un proceso automatizado y la máquina la puede realizar en gran medida de sin supervisión.
6. Extracción: Una vez que la máquina de AM ha completado la fabricación, las piezas deben ser extraídas.
7. Post procesado: Una vez retiradas de la máquina, las piezas pueden requerir una cantidad de limpieza adicional antes de que estén listas para su uso. Las piezas se deben limpiar y/o eliminar las estructuras de soporte. Esta etapa, requiere tiempo y la manipulación es manual.
8. Uso: Las piezas ya pueden ser utilizadas. Sin embargo, también pueden requerir tratamiento adicional antes de que sean aceptables para su uso.

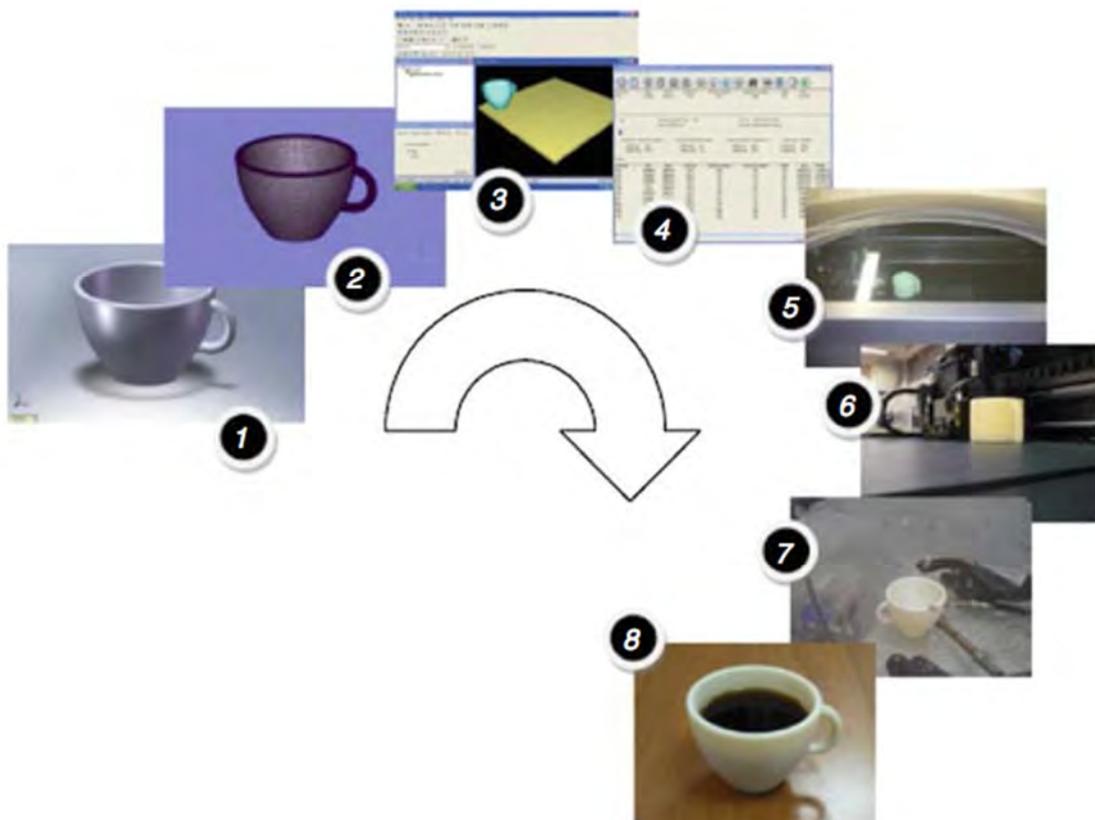


Figura 2.2: Pasos de un proceso cualquiera de fabricación por AM, desde el archivo CAD hasta la utilización de la pieza².

El proceso de fabricación (Figura 2.2 paso 5) se realiza apilando capas. Primero se fabrica una capa encima de la superficie de fabricación de la máquina, la capa inferior de la pieza. Cuando ésta ya se ha fabricado la superficie se desplaza verticalmente una distancia determinada (normalmente la misma que el grosor de capa) y se fabrica la siguiente capa encima de la anterior. Este proceso de repite hasta que se ha formado la geometría final. La manera como cada capa es fabricada y adherida es diferente dependiendo de la tecnología utilizada.

2.2.1. Tipos de tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Las tecnologías de AM se pueden dividir en tres categorías dependiendo del material base utilizado en el proceso³. Estas son: base líquida, base polvo y base sólida. Seguidamente se exponen estas categorías y se explica, brevemente, las tecnologías mas usadas en cada una de ellas.

Tecnologías de base líquida

En los procesos con base líquida la formación de la capa se realiza mediante la solidificación de líquidos. La stereolitografía (SLA) es la tecnología AM más popular de esta categoría. La formación de la capa se realiza curado resinas poliméricas. Los principales componentes de una impresora SLA son: el láser, el espejo móvil, la plataforma de fabricación, la cubeta donde se encuentra la resina foto curable y la paleta (Figura 2.3). Para formar una pieza el láser ilumina zonas determinadas de la plataforma de fabricación gracias al movimiento del espejo móvil. Las zonas iluminadas por el láser curan y solidifican la resina. Una vez fabricada la capa la plataforma baja una distancia determinada y la paleta pasa por encima de la plataforma para poner la resina foto curable necesaria para fabricar otra capa. Este proceso se repite sucesivamente hasta que se ha impreso toda la pieza.

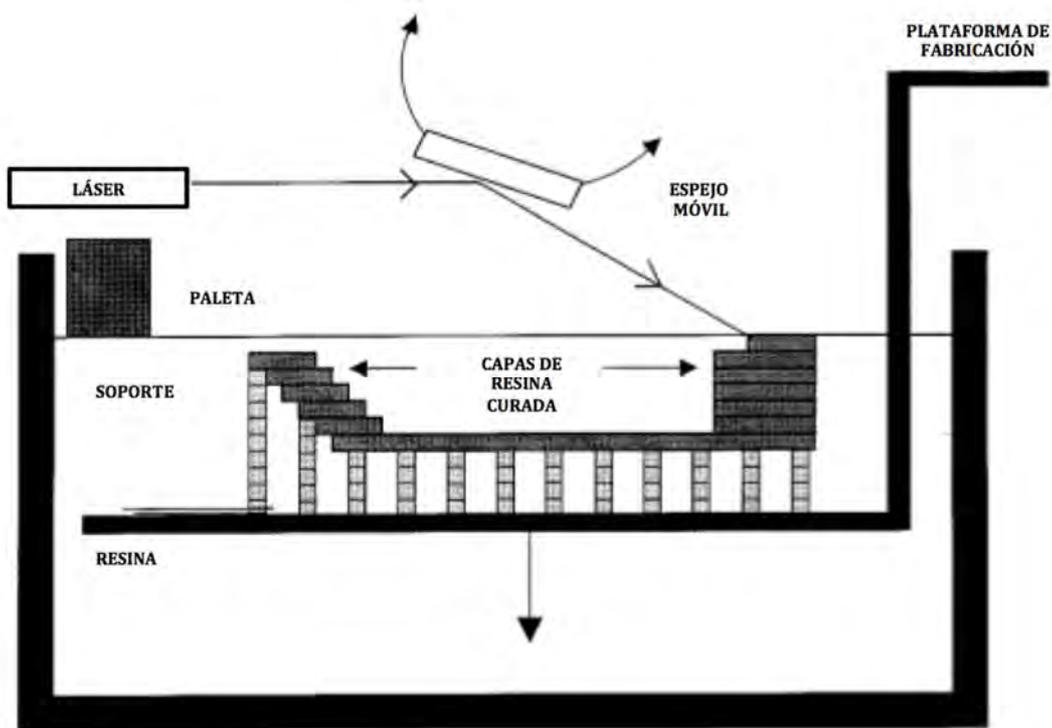


Figura 2.3: Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología SLA⁴.

Tecnologías de base polvo

Estas tecnologías crean las capas uniendo polvo. Hay distintas maneras de unir el polvo siendo las más extendidas por fusión o por adhesión utilizando aglomerante. Estas técnicas tienen un funcionamiento muy parecido a las de la SLA. Uno de los

métodos más utilizadas es el *selective laser sintering* (SLS) aplicable tanto a polímeros, cerámicos y metales. Los componentes típicos de una impresora de SLS son: un láser, un espejo móvil, una plataforma de fabricación, la cubeta donde se encuentra el polvo y la paleta (Figura 2.4). En esa técnica el polvo se sinteriza o funde mediante un láser que escanea selectivamente la superficie de un lecho de polvo para crear una forma sólida de dos dimensiones. El lecho de polvo es precalentado, normalmente por rayos infrarrojos unos grados por debajo de la temperatura de sinterizado. Con esto se evitan gradientes de temperatura entre distintas zonas de polvo que tiene que ser sinterizado, además de reducir la potencia que necesita el láser. Una vez fundido y unido el polvo la plataforma de fabricación desciende una distancia determinada y la paleta rellena de una capa de material sin sinterizar la plataforma de fabricación para fabricar una nueva capa encima de la anterior. Esta nueva capa de material se vuelve a precalentar para que el láser dibuje la capa correspondiente. Este proceso se repite hasta la última capa y así se forma el objeto.

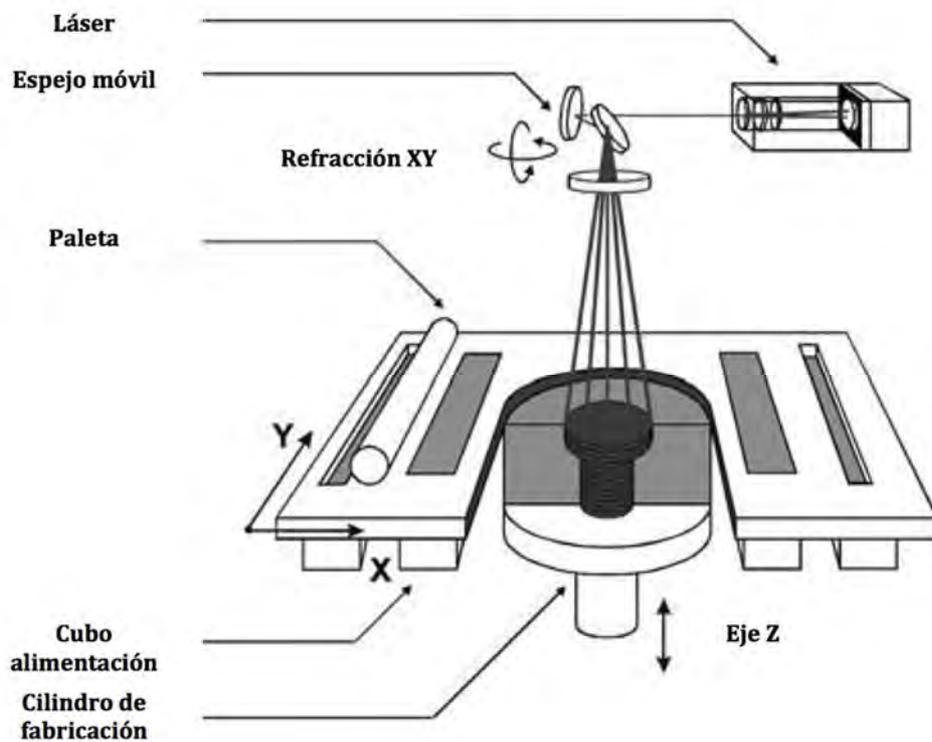


Figura 2.4: Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología SLS⁵.

Tecnologías de base sólida

Este tipo de tecnologías utilizan material base en forma sólida no polvoriento. La tecnología predominante es la de FDM, utilizada en este trabajo y explicada, en el siguiente apartado con más detalle. Otra tecnología muy utilizada, debido a su simplicidad, es la llamada *laminare object manufacturing* (LOM). Los principales componentes de la máquina LOM son: un láser, un espejo móvil, una plataforma de fabricación, un mecanismo de alimentación y un rodillo calefactor (Figura 2.5). El mecanismo de alimentación hace avanzar una hoja con adhesivo en la parte superior que se calienta en el rodillo calefactor. El láser corta el contorno de la

capa, la plataforma baja y una hoja nueva se carga encima de las capas ya depositadas. La plataforma entonces se eleva ligeramente, el rodillo calefactor aplica presión para unir la nueva capa y el láser corta el nuevo contorno. Este proceso se repite hasta que el modelo en 3D se ha completado.

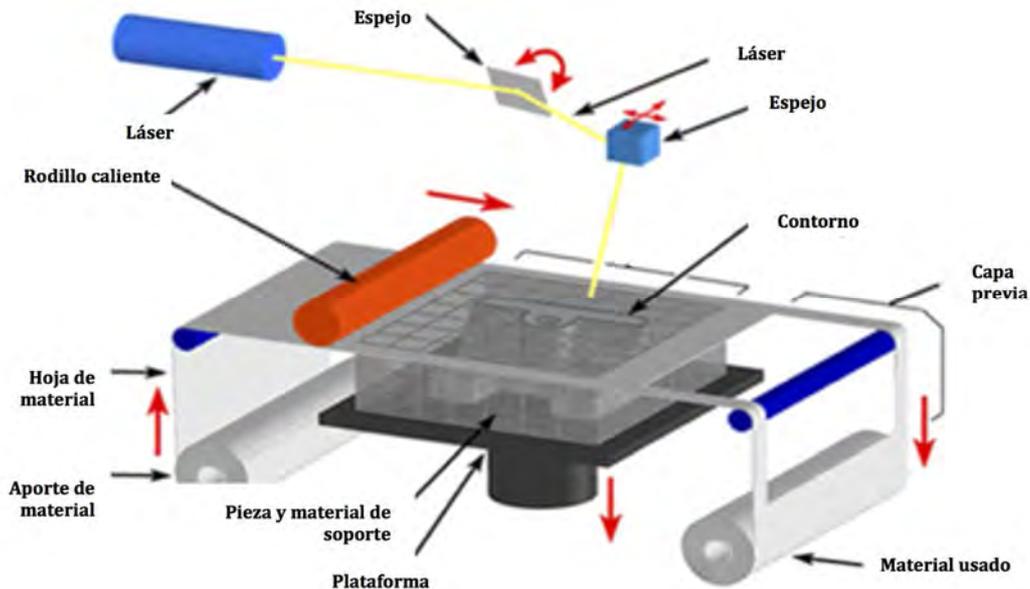


Figura 2.5: Esquema y partes básicas de una máquina por tecnología LOM⁶.

2.3. Fused deposition modeling *Fused Deposition Modeling (FDM)*

En este trabajo la tecnología de AM utilizada es la llamada FDM desarrollada por Stratasys® el año 1991. Esta técnica crea piezas extruyendo material, normalmente un polímero termoplástico, a través de una boquilla que se mueve en el plano XY de la cámara de fabricación para crear cada una de las capas. Esta tecnología utiliza, normalmente, dos boquillas, una para generar la pieza y otra para generar los soportes necesarios, cada una con un material distinto. Según la geometría de la pieza el uso de soportes es imprescindible ya que permite que la pieza no colapse mientras se está fabricando. La eliminación de este soporte es normalmente manual o, cuando se utilizan soportes solubles, se disuelven en la solución adecuada. Esta segunda opción es la mas apropiada para la fabricación de geometrías complejas o mecanismos auto ensamblados. En la Figura 2.6 se presenta un esquema del proceso FDM. La máquina consta de las siguientes partes: una boquilla para el material del que se va a fabricar la pieza, una boquilla para generar los soportes, unas guías que mueven las boquillas y una plataforma de fabricación. La generación de una pieza se realiza con los siguientes pasos: las boquillas dibujan una capa encima de la plataforma de fabricación, la plataforma baja una distancia determinada y se dibuja la siguiente capa. El proceso se repite hasta que se ha completado la geometría. La simplicidad del proceso permite que sea una tecnología adecuada para el desarrollo de una gran variedad de polímeros termoplásticos y, también, al desarrollo de máquinas³.

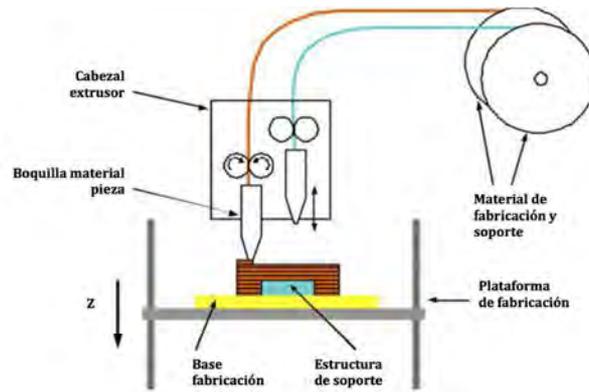


Figura 2.6: Esquema del proceso FDM⁷.

2.3.1. Parámetros de impresión comunes de las tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Todas las tecnologías de fabricación por AM siguen el mismo método para crear piezas: apilar capas. Por esta razón existen parámetros de fabricación comunes entre todas ellas. En esta sección se presentan los parámetros de fabricación que comparten las distintas tecnologías.

Aunque no sea un parámetro de fabricación estrictamente hablando la orientación de la pieza juega un rol muy importante en cualquier pieza fabricada mediante tecnologías AM. La colocación de la pieza para su fabricación afecta al comportamiento mecánico⁸⁻³², al acabado superficial^{27,33-38} y al coste^{27,39-43}.

Cuando se habla de orientación de la pieza se refiere a la colocación de ésta respecto al sistema de coordenadas de la máquina. Las capas que se crean durante el *slicing* se encuentran en el plano XY y, éstas, se van apilando en orden una encima de las otras en dirección el eje Z, por lo que a veces a la orientación también se le llama dirección de fabricación, ya que son equivalentes. En la Figura 2.7 se puede ver un ejemplo de distintas orientaciones para una misma pieza.

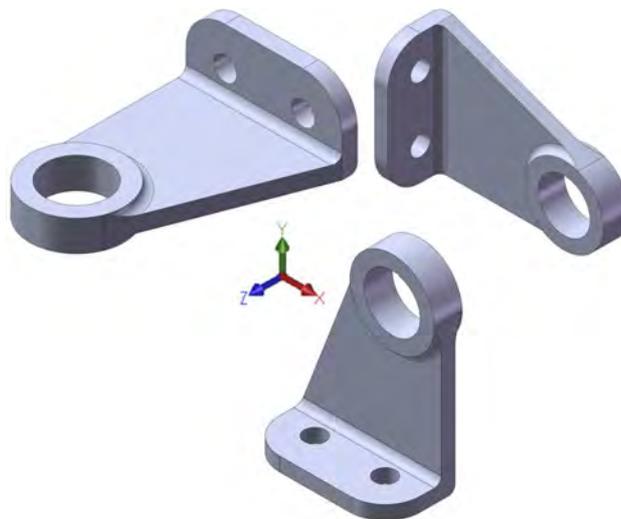


Figura 2.7: Tres posibles orientaciones para una misma pieza.

Otro parámetro común e importante es el espesor de capa. Éste determina la altura de cada una de las capas a fabricar y afecta también al comportamiento mecánico^{12,17,18,44-47}, al acabado superficial^{38,48,49} y al coste^{27,39-42} de las piezas. En las tecnologías SLA y SLS viene determinados por la cantidad de material en la que el láser puede incidir y curar la resina o fundir el polvo respectivamente. En LOM viene determinado por el grosor de las hojas y en FDM por el diámetro de las boquillas.

Otro factor común entre las tecnologías AM es el llamado *build style*. Éste parámetro define el tipo de trayectorias que sigue el láser, en el caso de SLA y SLS, o la boquilla en FDM para fabricar cada capa. Dependiendo de la máquina y/o del *software* que la controle hay distintos tipos. En la Figura 2.8 se pueden ver los distintos *build styles* para la impresora de Stratasys® Fortus 400 mc®, utilizando el *software* Insight®. Este parámetro influye notablemente en el comportamiento mecánico^{10,16,43,47,50,51}, en el acabado superficial^{7,49} y por supuesto en el coste⁴³ ya que controla la cantidad de material por capa de las piezas.

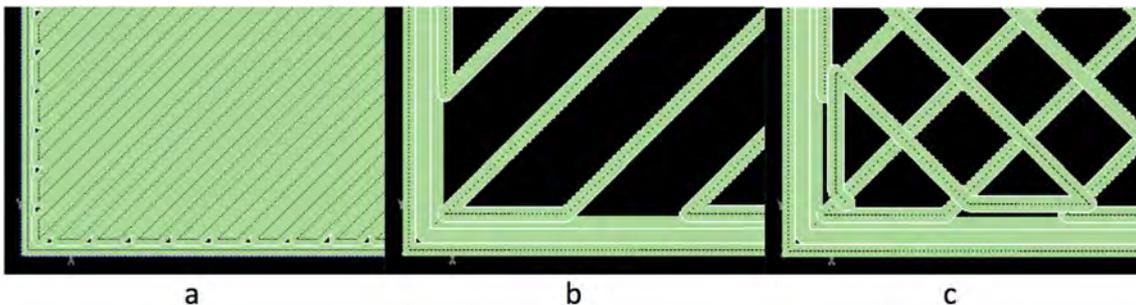


Figura 2.8: Trayectorias que siguen en cada capa las boquillas para distintos *build styles* para la impresora de Stratasys® Fortus 400 mc®: a) *Solid*, b) *Sparse* y c) *Double Sparse*.

Dependiendo de la geometría de las piezas a fabricar el uso de soportes es necesario en todas las tecnologías AM. Los soportes permiten fabricar partes de las piezas de un modelo que se extienden hacia el exterior, interior o son huecas y pueden necesitar soportes para evitar que se hundan o colapsen mientras se está fabricando. Al igual que con el *build style* la estructura de soportes depende del *software* utilizado. El uso de soportes afecta al coste^{27,39-42} y al acabado superficial⁵².

Utilizando el *software* Insight® de la compañía Stratasys® se puede escoger entre cinco tipos de estructuras de soporte (Figura 2.9):

1. *Basic*: crea soportes en todas las partes de la pieza que se encuentren en voladizo o inclinadas hacia abajo. La capa superior del soporte, la que soporta la pieza, estará más rellena que las demás (Figura 2.9.A).
2. *Sparse*: este tipo de soporte usa menos material que el *basic* realizando unas trayectorias más espaciadas entre ellas. De la misma manera que el *Basic* la capa superior del soporte es más sólida que las demás pero a medida que se va bajando la distancia entre trayectorias aumenta, cosa que hace que se utilice menos material (Figura 2.9.B).
3. *SMART*: este tipo de soportes minimiza la cantidad de material y tiempo además de mejorar su eliminación. Es similar al *sparse* pero la principal

diferencia es que cambian de forma hacia geometrías más simples (Figura 2.9.C).

4. *Surround*: este soporte rodea geometrías de la pieza pequeñas que requieren de pequeños soportes pero que no pueden soportar su posición durante la construcción de la pieza. Construyen una capa muy fina de soporte rodeando toda la pieza. Este tipo de soporte aumenta la cantidad de material y el tiempo de construcción (Figura 2.9.D).
5. *Break-away*: muy parecidos al *sparse* pero utilizando un tipo de trayectorias diferentes para así facilitar su eliminación (Figura 2.9.E).

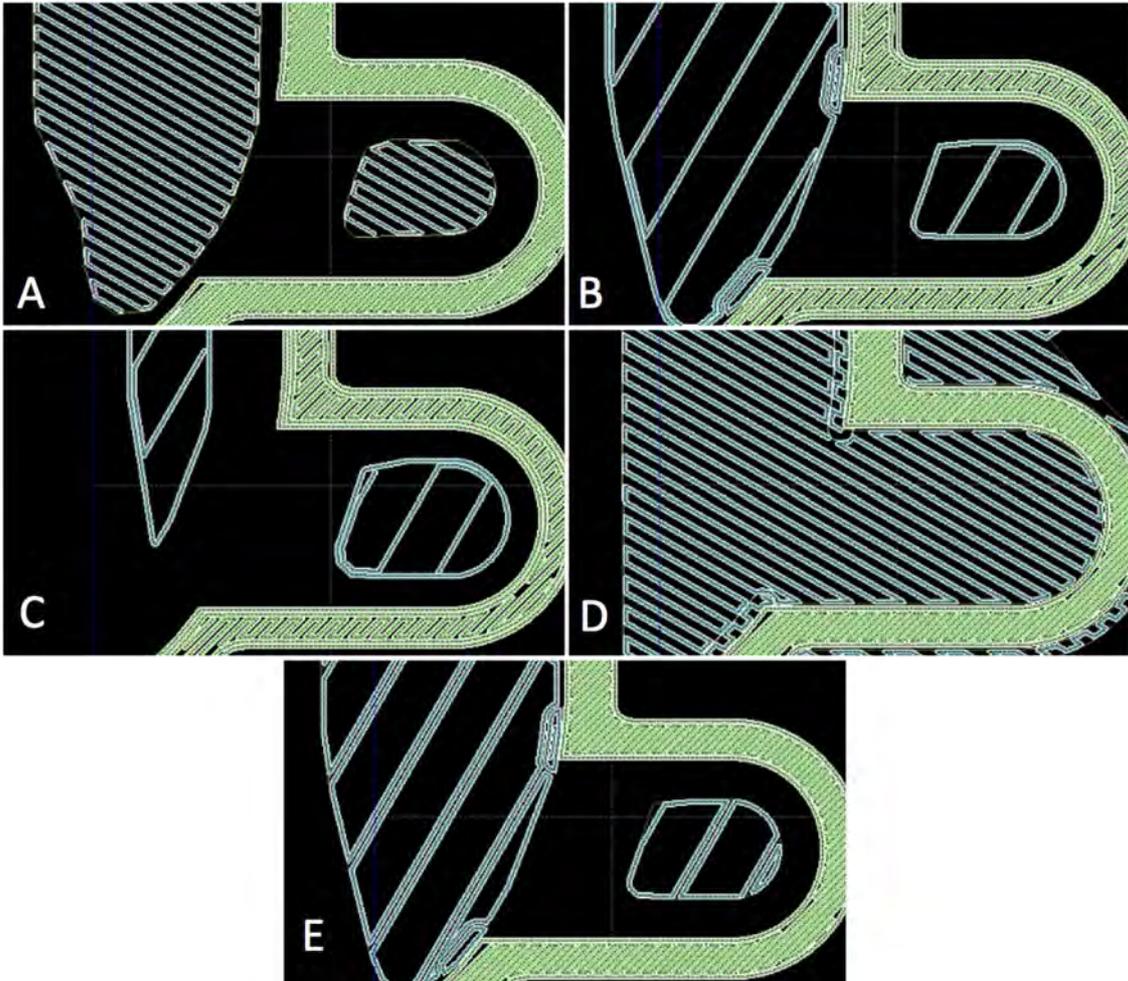


Figura 2.9: Ejemplo de las trayectorias que siguen las boquillas para una misma pieza y capa de los distintos tipos de soportes que permite utilizar el *software* Insight® de Stratasys®. A) *Basic*, B) *Sparse*, C) *SMART*, D) *Surround* y E) *Break-Away*.

2.3.2. Parámetros de impresión de la tecnología *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Los parámetros principales de la tecnología FDM son los que determinan como se fabrica cada capa, es decir, las trayectorias que sigue la boquilla en cada una de ellas. Estas trayectorias son controladas, normalmente, por el mismo programa que realiza la operación de *slicing* del modelo en 3D. Hay que diferenciar entre dos tipos de trayectorias dentro de cada capa: el contorno y el *raster* que forman el llamado *build style*, presentado antes:

- Contorno: es la trayectoria o trayectorias que delimitan las superficies exteriores e interiores de las cavidades en cada capa.
- *Raster*: es la trayectoria o trayectorias que recorre la boquilla para rellenar la sección interior, delimitada por contornos.

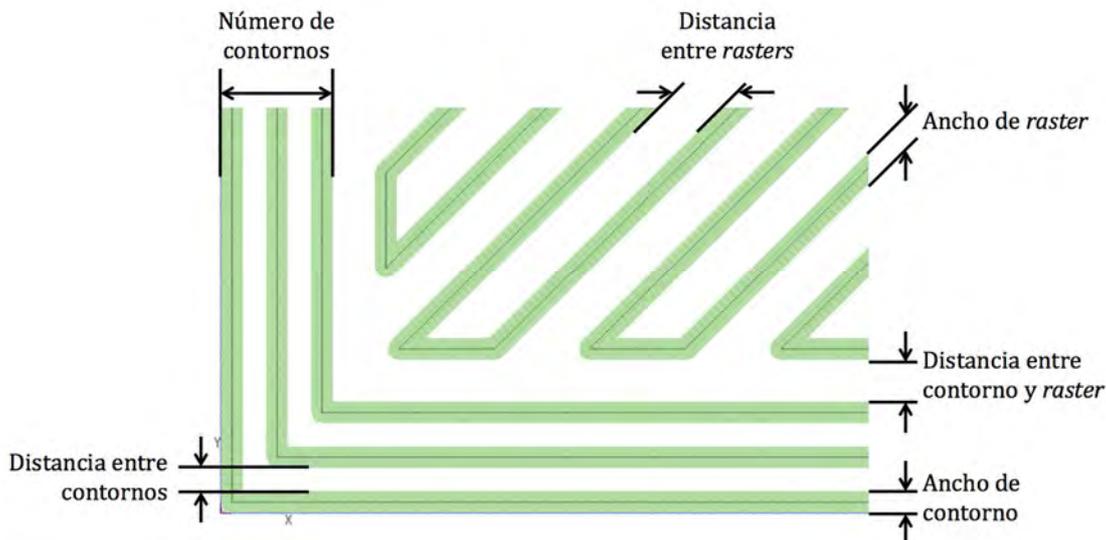


Figura 2.10: Esquema de los parámetros de las trayectorias de contorno y *raster* en el plano XY de la máquina.

Cada una de las dos trayectorias, contorno y *raster*, tiene sus propios parámetros, que determinan el recorrido de las boquillas. Para los contornos son los siguientes (Figura 2.10):

- Ancho de contorno (*contour width*): diámetro del hilo extruido.
- Número de contornos (*number of contours*): número de contornos que se extruyen alrededor de las paredes, tanto interiores como exteriores, de la pieza.
- Distancia entre contornos (*contour to contour air gap*): distancia entre los contornos cuando hay más de uno.

Y para el *raster* (Figura 2.10):

- Ancho de *raster* (*part raster width*): diámetro del hilo extruido.
- Ángulo de *raster* (*raster angle*): el ángulo de las trayectorias de *raster* medido desde el eje X de la impresora.
- Distancia entre contorno y *raster* (*contour to raster air gap*): distancia entre los contornos y el *raster*.
- Distancia entre *rasters* (*raster to raster air gap*): distancia entre trayectorias de *raster*.
- Uso de rasters paralelos (*use paralelo offset part rasters*): normalmente los hilos extruidos de *raster* se rotan 90° en las capas adyacentes, esta opción permite que en todas las capas los *rasters* tengan el mismo ángulo.

Como se puede ver, existen muchos parámetros de fabricación y todos ellos afectan a las propiedades y a la calidad de las piezas fabricadas. Decidir los parámetros más adecuados a utilizar dada una pieza con una aplicación concreta no es una tarea fácil y queda en manos del operario que con su experiencia determina los mejores. Debido a la falta de información al respecto los usuarios de

estas tecnologías fabrican con los parámetros por defecto proporcionados por los fabricantes. Los parámetros por defecto no tienen en cuenta las cargas mecánicas a la que la pieza estará sujeta en funcionamiento, el acabado superficial final ni el coste. Por esta razón en este trabajo se ha estudiado la relación que hay entre los parámetros de fabricación y las propiedades mecánicas, acabado superficial y coste.

2.4. Comparación entre el moldeo por inyección y las tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Tanto el moldeo por inyección como las tecnologías de fabricación AM tienen ventajas e inconvenientes entre ellas. En la Tabla 2.1 se presentan resumidas.

Tabla 2.1: Ventajas e inconvenientes del moldeo por inyección y la fabricación mediante tecnologías AM^{2,53,54}.

	Moldeo por inyección	Tecnologías AM
Ventajas	Sector maduro	Tecnología en auge
	Gran conocimiento de la tecnología	Flexibilidad para lotes pequeños
	Propiedades mecánicas controladas	Personalización de piezas
	Especificaciones técnicas de las piezas controladas	Posibilidad de fabricar conjuntos auto ensamblables
	Repetitividad	Fabricación de geometrías complejas
	Rapidez para fabricar grandes lotes	Flexibilidad variar geometría
	Gran cantidad de materiales	Plazos de entrega cortos (pequeños lotes)
	Permite el uso de simulaciones mediante elementos finitos	Fabricación localizada próxima al consumo
		Reducción uso de material
Inconvenientes	Piezas poco personalizables	Poco conocimiento de la tecnología
	Coste inicial elevado	Poco conocimiento de las propiedades mecánicas
	Cambio en geometría pieza muy costoso	Pocos materiales (en comparación con tecnologías tradicionales)
	Fabricación localizada (normalmente) lejos de consumo	Softwares CAD/CAE no suficientemente desarrollados
	Espesores mínimos	Acualmente lento y caro

Los principales defectos que se pueden dar debido a una mala elección de los parámetros de fabricación de cada una de los dos tipos de tecnologías se pueden ver en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Principales defectos del moldeo por inyección y la fabricación mediante tecnologías FDM en el comportamiento mecánico y el acabado superficial, explicados más detenidamente en el capítulo indicado.

	Moldeo por inyección	Fabricación AM
Comportamiento mecánico (capítulo 3)	Problemas de llenado	Anisotropía
	Línea de soldadura	Unión entre capas
	<i>Air gaps</i>	Unión dentro de la capa
Acabado superficial (capítulo 4)	Rebabas	<i>Staircase effect</i>
	Conductos alimentación	
	Línea de soldadura	
	Marcas de flujo	
	Marcas de hundimiento	
	<i>Shrinkage</i>	
<i>Warpage</i>		

Los defectos mencionados en la Tabla 2.2 son producidos por un mal ajuste de los parámetros de fabricación listados en la Tabla 2.3. Indicar que el *build style* esta compuesto de muchos más parámetros explicados en la sección 2.3.2.

Tabla 2.3: Principales parámetros de fabricación para el moldeo por inyección y las tecnologías AM.

Moldeo por inyección	Fabricación AM
Geometría del molde	Orientación
Temperatura del molde	Alto de capa
Temperatura del flujo	<i>Build Style</i>
Presión de inyección	Material
Viscosidad del polímero	Soportes
Tiempo de inyección	
Tiempo del enfriamiento	

2.5. Comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)

Se han realizado varios estudios para averiguar cómo los distintos parámetros de fabricación afectan al comportamiento mecánico de las piezas fabricadas con FDM. Uno de los más estudiados es la orientación²¹⁻²⁹ y, todos, corroboran que estas piezas presentan anisotropía. Esto es debido la disposición y unión de las capas e hilos extruidos con la dirección del esfuerzo aplicado^{25,26,28,29,43}. Por la misma razón los parámetros que determinan las trayectorias de las boquillas en cada capa también afectan al comportamiento mecánico^{21,22,25-27,43,55-58}. Otro factor muy importante es el espesor de capa, muy influyente en la unión de capas e hilos^{22,25-27,43,57,59,60}. Como influyen todos estos parámetros en el comportamiento mecánico de las piezas FDM se explica más extensamente en el capítulo 3 (sección 3.2.1). Todos estos estudios determinan como afectan estos factores pero ninguno da respuestas prácticas para aplicarlos en la fabricación para piezas finales. Se ha intentado caracterizar materiales FDM para su posterior simulación mediante elementos finitos⁶¹⁻⁶³ pero la correlación no ha sido realizada sobre piezas reales o el modelo constitutivo utilizado no es completo.

2.6. Aplicaciones de las tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Las principales apli

Las principales aplicaciones de la tecnología AM aprovechan las ventajas que este tipo de fabricación presenta (Tabla 2.1). Principalmente son las de producir geometrías complejas y la rapidez con la que se puede obtener el objeto deseado. Una de las industrias que está apostando más en AM es la médica. Debido a la facilidad y rapidez de obtener piezas es muy útil para fabricar utensilios para cirugía como: guías quirúrgicas, plantillas, modelos reales de la zona para la simulación antes de la operación e implantes para los pacientes. Otra aplicación es la fabricación de modelos exactos en los que los cirujanos pueden planificar y practicar la operación. Todo esto hace que, tanto el tiempo de operación como del post-operatorio se reduzca.

Utilizando la técnica de tomografía computada (TAC) se extrajo el modelo en 3D de hueso, piel, cerebro, arterias y venas de la unión vertical de gemelos

craneópagos⁶⁴. Se fabricaron dos modelos distintos utilizando tecnologías AM. El primero con apariencia de piel para así poder crear implantes para la remodelación del cráneo, un modelo a tamaño real para ensayos pre-operatorios y, el segundo, del cráneo con las estructuras vasculares subyacentes (Figura 2.11). Éste último fue de gran ayuda a la hora de facilitar la comprensión de la compleja anatomía vascular de los gemelos y planificar exactamente donde las venas se debían dividir y el flujo sanguíneo desviado. La cirugía se llevó a cabo con éxito y los dos gemelos fueron separados.



Figura 2.11: Modelo fabricado con SLA de hueso y estructuras vasculares la unión vertical de gemelos craneópagos. El hueco en la parte superior se hizo a propósito para mostrar la zona dónde las venas estaban unidas⁶⁴.

El principal problema que presenta la planificación virtual de cirugías es la de llevar a cabo exactamente todas las operaciones planificadas. Este problema se puede solucionar utilizando plantillas, accesorios y guías fabricadas mediante tecnología AM. De esta manera la plantilla o guía se ajusta a la parte del cuerpo deseada en la posición correcta indicando así los ángulos anatómicos, donde se debe perforar y cortar definidos en la simulación (Figura 2.12). Esto permite no solo perforar o cortar en la dirección adecuada sino también para delimitar la profundidad correcta. Un ejemplo del uso de este método es la sustitución completa de prótesis de cadera^{65,66}. En este caso las guías, plantillas y accesorios fueron fabricados con SLS. Las principales ventajas de utilizar este método es que la dificultad y las horas de operación se reducen drásticamente al igual que el post-operatorio y la recuperación del paciente.

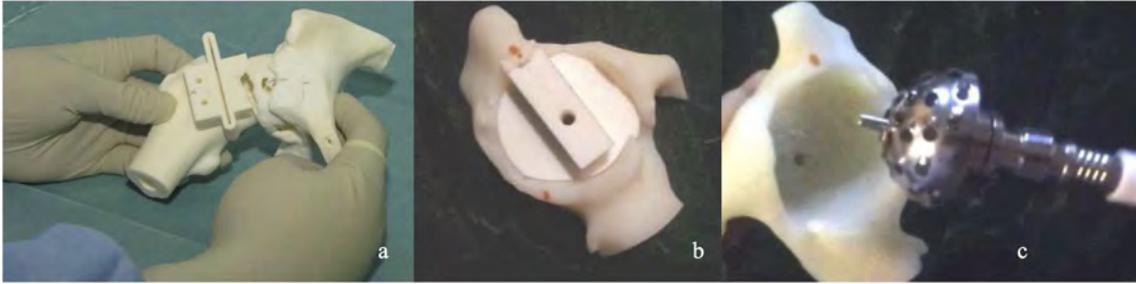


Figura 2.12: Accesorios, guías y plantillas para la sustitución completa de caderas. a) guías y modelo para el pre-operatorio. b) plantilla con agujero pasador central determinando la dirección y profundidad de la perforación. c) posicionamiento del implante de cadera en la plantilla de cadera^{65,66}.

La tecnología AM también se ha extendido a otras industrias como la automovilística. La mayor ventaja para esta industria es la posibilidad de fabricar piezas sin limitación al diseño y la rapidez que hay desde el diseño de una pieza hasta su fabricación y uso. En la fórmula 1 esta tecnología es ampliamente usada en la producción de componentes hidráulicos⁶⁷. Debido a la posibilidad de crear geometrías complejas esta tecnología permite mejorar el rendimiento no solo reduciendo peso sino también la funcionalidad y el flujo de fluido. Las piezas han sido probadas en condiciones de carrera y han demostrado su correcto funcionamiento. (Figura 2.13).

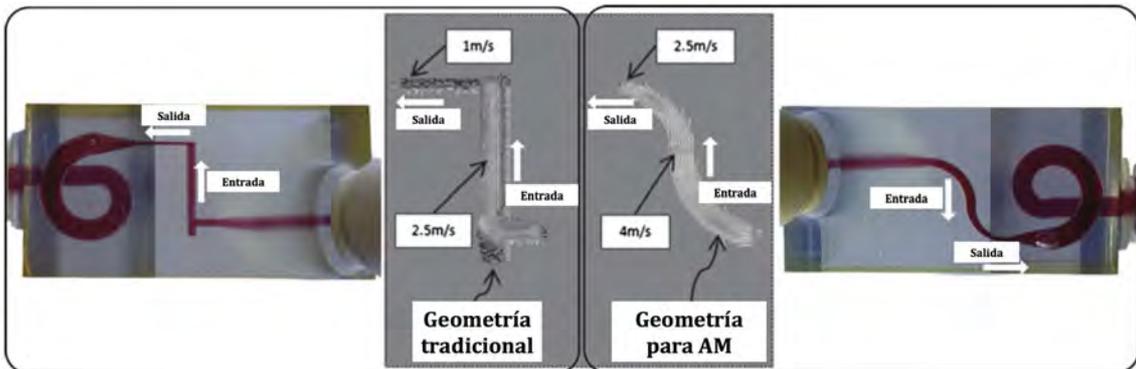


Figura 2.13: Diagrama de flujo y muestras de piezas fabricadas tradicionalmente (izquierda) y mediante tecnologías AM (derecha)⁶⁷.

Gracias a las ventajas que presenta la tecnología se han enviado máquinas de fabricación por tecnologías AM al espacio⁶⁸. La NASA ha enviado una máquina de fabricación 3D de tecnología FDM a la estación espacial internacional⁶⁹ que ya ha impreso su primer objeto⁷⁰ (Figura 2.14). Es una tecnología muy útil en el espacio ya que permite fabricar piezas que se rompan sin tener que llevar recambios que ocupan espacio.



Figura 2.14: Primer objeto impreso con tecnología AM en el espacio⁷⁰.

3. Comportamiento mecánico de las piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

Este capítulo trata del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante la tecnología FDM. Es la característica de las piezas cuya comprensión es más difícil y es de especial importancia si se quieren fabricar piezas finales sometidas a cargas estáticas y dinámicas. La cantidad de parámetros que intervienen es extensa como se ha visto en la sección 2.3.1. Las referencias bibliográficas hasta la fecha sobre resistencia mecánica de piezas fabricadas por AM no daban soluciones a este problema. El trabajo experimental desarrollado aporta información sustancial para la comprensión de la influencia en el comportamiento mecánico de los distintos parámetros de fabricación por FDM. El desarrollo de un modelo constitutivo completo y la correlación de resultados físicos y virtuales permiten decidir la orientación de la pieza para que tenga mas resistencia mecánica.

Primero se explica el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas por moldeo por inyección y los parámetros que más lo influyen. Luego se hace una revisión bibliográfica de los parámetros de fabricación de las tecnologías AM y FDM que más afectan y como lo hacen al comportamiento mecánico. También se exponen los distintos trabajos realizados simulando el comportamiento mecánico de piezas fabricadas mediante AM con simulación de elementos finitos (FEA, *finite element analysis*). Finalmente se expone la investigación realizada en esta tesis referente al comportamiento mecánico de piezas de PC fabricadas mediante tecnología FDM.

3.1. Comportamiento mecánico de piezas de plástico fabricadas por moldeo por inyección

Dos piezas de dimensiones idénticas y del mismo material pero fabricadas en diferentes condiciones por moldeo por inyección se comportaran de manera distinta. Por lo tanto, la forma en que el plástico fluye y se enfría en el molde determinan la resistencia mecánica de la pieza.

La temperatura del polímero y la presión de inyección determinan, en gran medida el flujo dentro del molde. La Figura 3.1 ilustra gráficamente una zona de moldeo, determinada empíricamente, en un gráfico de presión de inyección con la temperatura del flujo polimérico. El área está delimitada por cuatro curvas. Por debajo de la curva inferior, el polímero es un sólido o no fluye. Por encima de la curva superior, el polímero se degrada térmicamente. A la izquierda de la curva el molde puede que no se llene completamente y a la derecha de la curva el flujo de polímero fundido se escapa por la ranura que une las dos cavidades del molde. El área delimitada por las cuatro curvas determina las condiciones adecuadas de presión y temperatura para inyectar piezas de plástico.

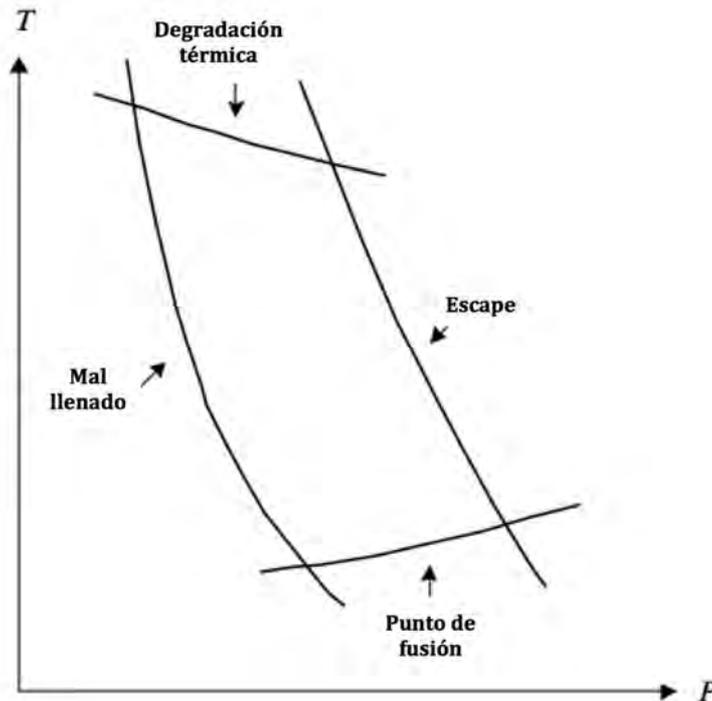


Figura 3.1: Esquema de la zona de moldeo para un polímero y un molde determinados⁷¹.

La dirección del flujo del plástico o la manera que éste entra y rellena las cavidades del molde determina las propiedades mecánicas de la pieza fabricada. Por esta razón es importante conocer las direcciones de flujo (las líneas imaginarias que van desde donde se inyecta el plástico en el molde hasta el final de este).

El plástico fluye dentro de la cavidad del molde debido al gradiente de presión aplicado. A medida que el material llega a las partes más remotas de la cavidad, el gradiente se reduce debido a que el material se va enfriando y se vuelve más viscoso. Es de vital importancia conocer las condiciones fluidodinámicas del plástico fundido, determinadas por la presión, la temperatura y la geometría del molde⁷¹⁻⁷³.

El flujo de plástico determina la ordenación de las cadenas poliméricas al entrar y enfriarse en el molde. Las cadenas poliméricas tienen un estado de relajación preferido. Si no se encuentran a baja temperatura que impida su movimiento, se mueven y forman "bolas" de cadenas enredadas (Figura 3.2.a). Cuando el polímero fundido es empujado a través de la boquilla, conductos o cavidades de un molde, estas "bolas" se deforman debido a las fuerzas de cizallamiento y estiramiento en el flujo. Este cambio de forma provoca un alineamiento de las cadenas (Figura 3.2.b). Esta alineación paralela crea direcciones donde la resistencia mecánica es mejor que en otras, o lo que es lo mismo, anisotropía (Figura 3.2.c).

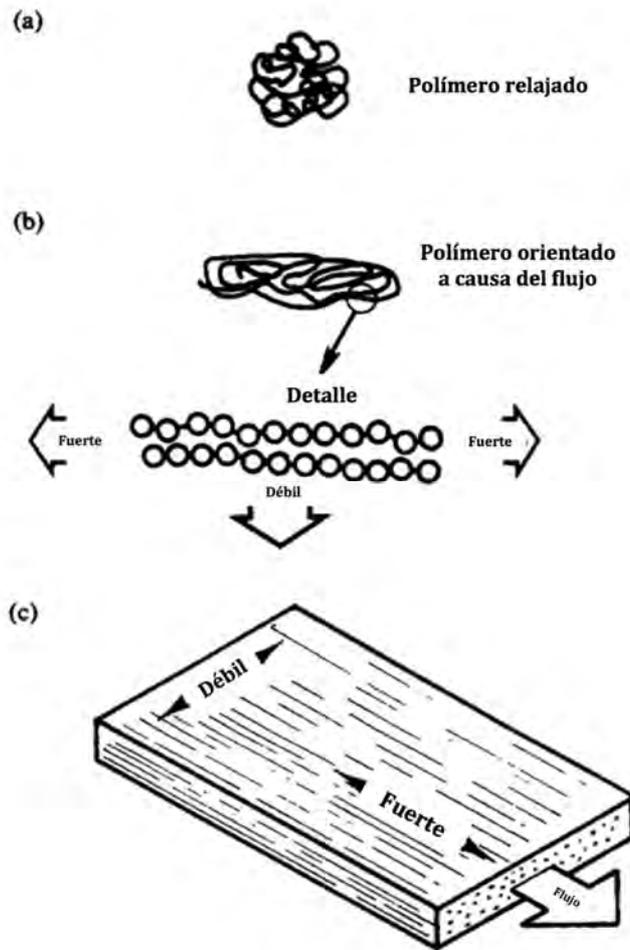


Figura 3.2: Orientación de las cadenas poliméricas. (a) polímero relajado, (b) polímero orientado mediante el flujo, y (c) direcciones fuertes y débiles en el flujo de un polímero⁷².

El grado de orientación del flujo varía considerablemente debido a la geometría del molde, desde las paredes del flujo hasta el centro del flujo y desde la entrada hasta el final. También influyen las condiciones de inyección: temperatura y presión en cada punto del molde⁷¹.

El diseño del molde es de gran importancia en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas. Dependiendo de la geometría de la pieza la elección de parámetros como: temperatura del flujo, temperatura del molde, velocidad de inyección, presión de inyección y tiempo de inyección y refrigeración es muy importante. Para distintas geometrías sus valores óptimos varían de manera considerable⁷³.

Si, a causa del diseño del molde, se produce una separación de los flujos de plástico fundido y luego se vuelven a encontrar se genera un defecto llamado línea de soldadura (Figura 3.3). Normalmente es debido a una temperatura baja del polímero. Este defecto afecta al comportamiento mecánico⁷¹⁻⁷³ ya que se crea una zona donde se han unido dos flujos de polímero a distinta temperatura, y su unión no es uniforme.

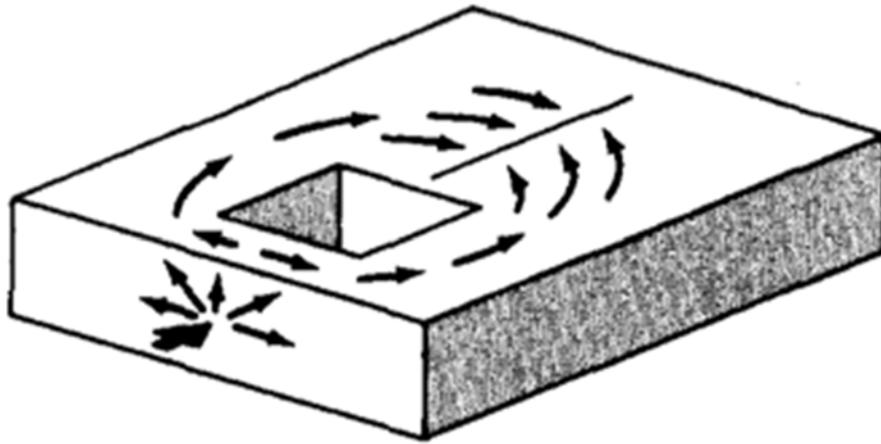


Figura 3.3: Ejemplo de la formación de una línea de soldadura debido a la separación del flujo de plástico⁷².

El comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante moldeo por inyección no es isotrópico. Sin embargo esta ampliamente considerado que si lo es y en el diseño y simulación de piezas se usan modelos isotrópicos.

3.2. Comportamiento mecánico de piezas fabricadas por Additive Manufacturing (AM)

Debido a que la fabricación de piezas mediante tecnologías AM se realiza por apilamiento de capas su comportamiento mecánico no es isotrópico. Estudios realizados utilizando SLA⁸⁻¹², SLS¹³⁻²⁰, FDM²¹⁻²⁹ y otras tecnologías³⁰⁻³² corroboran que la dirección de fabricación es el parámetro más importante a tener en cuenta. Este comportamiento viene dado por la diferencia que hay entre las fuerzas de unión del material entre capas o en la misma capa.

Se conoce que el espesor de capa es un parámetro de gran importancia y común en todas las tecnologías AM (SLA^{12,44}, SLS^{18,45-47} y FDM^{22,25,26,57,74}). Es un parámetro clave ya que influencia el grosor de cada una de las capas apiladas y, por lo tanto, la unión entre ellas.

La elección de un espesor de capa para obtener una mejor resistencia mecánica para piezas fabricadas con SLA es una tarea complicada. En algunos casos se ha comprobado que un espesor pequeño provoca una resistencia mecánica superior. Esto es debido a que al fotopolimerizar se forman espacios vacíos en el seno de la pieza (reduciendo la fuerza de unión entre moléculas y la densidad de la pieza) resultando en una menor resistencia mecánica. Con un espesor menor de capa se generan menos espacios vacíos y de menor tamaño, y al contrario a mayor espesor mas espacios vacíos y de mayor tamaño¹². Sin embargo también se ha encontrado que dependiendo de otros parámetros de fabricación (potencia y velocidad del láser), el espesor óptimo para una resistencia mecánica mayor varía. Un espesor de capa mayor aumenta la absorción de energía por lo que el módulo elástico también aumenta⁴⁴. Investigaciones utilizando tecnología SLS obtienen conclusiones muy similares (debido a que el proceso es muy parecido)^{17,45}. Dependiendo de la combinación con parámetros como la potencia del láser, el *match spacing* (equivalente a la distancia ente *rasters* para SLA y SLS) el material (debido al

tamaño del grano de éste¹⁷) la resistencia mecánica aumenta⁴⁵. Estudios comparando distintas impresoras de SLS concluyen que el espesor de capa es más influyente en el comportamiento mecánico que la potencia del láser. Es preferible un espesor de capa pequeño debido a que provoca una mejor compactación y uniformidad de las capas^{18,46,47}.

Como se ha explicado en la sección 2.3.1, muchas tecnologías tienen parámetros de fabricación equivalentes entre sí aunque fabriquen mediante técnicas distintas. En SLA el tiempo de post-curado⁴⁴, la potencia y la velocidad del láser son parámetros importantes¹¹ al igual que en SLS^{15,19,45,46,75-77}.

Las trayectorias que recorre el láser en cada capa o el *hatch pattern* en SLA¹⁰ y el *scan direction* y SLS^{18,47,51} (equivalentes al *build style* en FDM) también afectan al comportamiento mecánico de las piezas. El ángulo (respecto al eje X) de las trayectorias que sigue el láser para fabricar cada capa determina las direcciones preferentes de carga de las piezas. En la Figura 3.4 se puede ver dos probetas fabricadas con dos ángulos distintos.

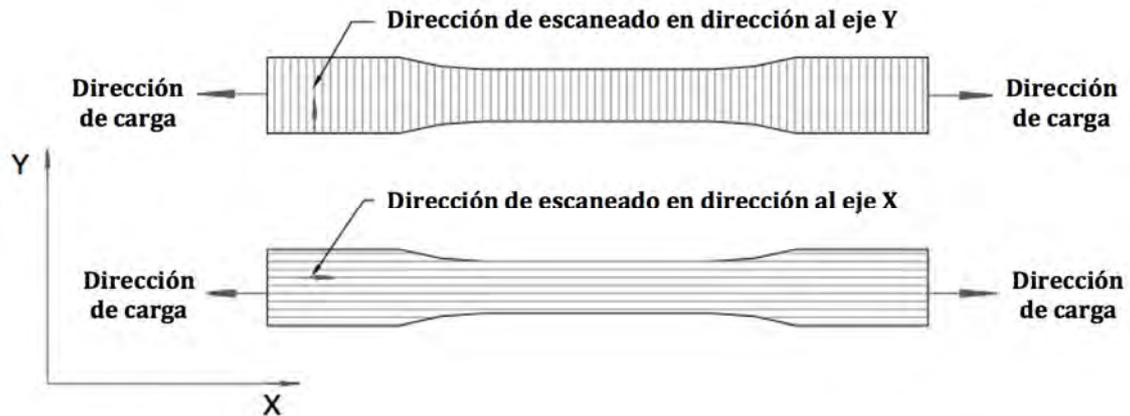


Figura 3.4: Esquema de las probetas de tensión mostrando la dirección de escaneo (*scan direction*) o el *hatch pattern* y la dirección de carga¹⁸.

Si las trayectorias que recorre el láser son paralelas a la dirección de la carga (Figura 3.4 abajo), la resistencia a la tracción es mucho mayor que si son perpendiculares¹⁸ (aproximadamente un 10% mayor). Resultados parecidos se han encontrado utilizando otras tecnologías AM^{29,78}.

3.2.1. Comportamiento mecánico de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

La fabricación mediante FDM es mucho más compleja que mediante moldeo por inyección. Para fabricar cada capa primero se “dibuja” el contorno de la sección correspondiente con un hilo de plástico fundido sobre la superficie de fabricación. Luego se rellena el espacio entre contornos con trayectorias de hilo extruido, normalmente zigzagueantes. El *software* automatiza el proceso de división en capas, el patrón de relleno utilizado en cada capa y la creación de soportes. Aunque el *software* permite la modificación de todos estos parámetros y más, el efecto de esta variación sobre las propiedades mecánicas no se conoce y no se dan ningunas

indicaciones al respecto. El software utilizado en este trabajo, Insight®, únicamente tiene automatizada la orientación de la pieza. Permite escogerla para maximizar área horizontal, minimizar soportes o mejorar el acabado superficial.

La orientación de las piezas fabricadas por FDM afecta a sus propiedades mecánicas²¹⁻²⁸ por lo que que presentan anisotropía. En la Figura 3.5 se puede ver un ejemplo de la misma geometría fabricada con los mismos parámetros variando únicamente la orientación y, por lo tanto, la disposición de las capas.

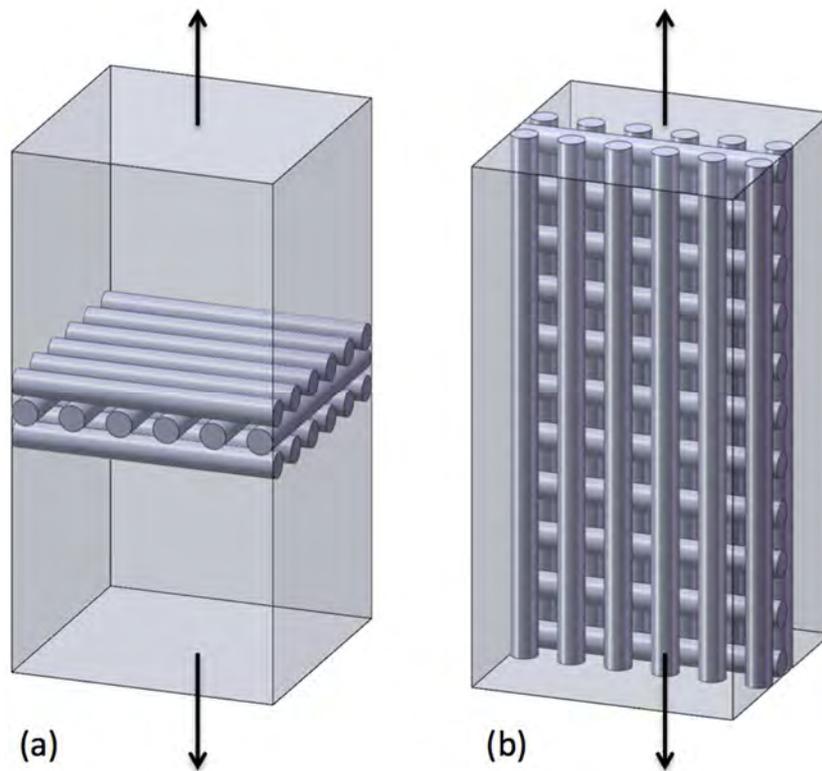


Figura 3.5: Disposición de las capas e hilos extruidos para una misma geometría fabricada con dos orientaciones distintas. (a) dirección de fabricación paralela a la fuerza y (b) dirección de fabricación perpendicular a la fuerza.

La dirección de fabricación determina como se apilan las capas, en que dirección se extruyen los hilos y, por lo tanto, como se realiza su unión. Los estudios realizados muestran que las propiedades mecánicas de las piezas producidas con FDM están influenciadas por la fuerza de unión entre hilos, siendo la unión entre capas en la dirección de fabricación la unión más débil^{59,79-82}. La formación de las uniones entre filamentos en las piezas fabricadas mediante FDM esta determinada por la energía térmica del material extruido. La fuerza de unión depende de el crecimiento del “cuello” que se forma entre dos hilos adyacentes y en la difusión de las cadenas poliméricas a través de ellos (Figura 3.6).

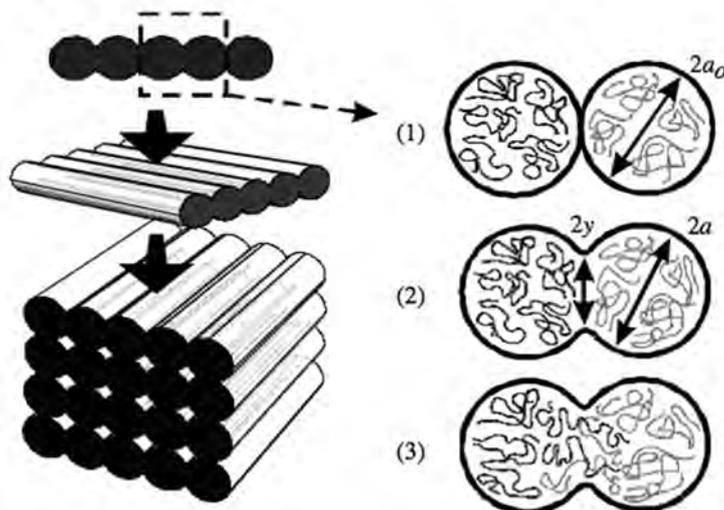


Figura 3.6: Proceso de formación de la unión entre dos hilos: (1) contacto entre superficies; (2) crecimiento del ‘cuello’, y (3) difusión molecular⁵⁹.

El mismo proceso se da entre los hilos depositados en distintas capas. La diferencia de temperaturas entre los hilos que se están extruyendo y los hilos de la capa anterior causa que el ‘cuello’ no crezca de la misma manera y que la difusión molecular no sea tan grande.

El comportamiento mecánico se ve afectado por la dirección en la que están dispuestos los hilos en cada. Como se ha explicado antes, al extruir plástico las cadenas poliméricas se ordenan y se generan direcciones preferentes donde la resistencia mecánica es mayor (Figura 3.2). Para una misma geometría fabricada con orientaciones distintas y con un esquema de cargas igual (Figura 3.5) el comportamiento mecánico podrá ser muy distinto. Si la fuerza está alineada con los hilos extruidos la pieza resistirá mucho más (Figura 3.5(b)) que si esta alineada con la dirección de fabricación (Figura 3.5(a)). Por lo que, si los hilos están alineados con la fuerza, actúan como fibras de refuerzo aumentando la resistencia mecánica^{26,29,43}.

En compresión pasa lo contrario. En las piezas fabricadas con una dirección de fabricación paralela a la fuerza (Figura 3.7 izquierda) el pandeo que se produce en cada capa hace que sean menos resistentes. En cambio las fabricadas en la dirección perpendicular (Figura 3.7 derecha) a medida que la carga presiona las distintas capas se deslizan hacia los lados hasta que se produce la rotura^{25,28}.



Figura 3.7: Esquema de la aplicación de la carga en probetas de compresión y fotos de las grietas²⁸.

El espesor de capa también influye en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas con tecnología FDM^{22,25,26,57,59,60,74}. La unión entre capas es débil debido

a la distorsión que se produce a causa de la gran diferencia de temperaturas entre las capas que se están fabricando y las que ya fueron fabricadas. A medida que el espesor de capa aumenta se necesitan menos capas para fabricar la pieza. Entonces se minimiza la distorsión y la resistencia a la tracción aumenta^{26,59,60}.

El tamaño del hilo extruido influye el comportamiento mecánico^{21,22,26,55-57}. Su tamaño se ve afectado por hinchamiento (*swelling*), un fenómeno observado en flujos de polímero fundido que, cuando se extruye, salen de la boquilla con dimensiones de sección transversal sensiblemente más grandes que las del conducto de flujo^{71,72,83}. El diámetro del hilo extruido se puede controlar con la velocidad de traslación de la boquilla y el flujo de polímero^{56,59,84}. El tamaño del hilo extruido, combinado con la orientación de la pieza, tiene un gran efecto en la resistencia mecánica a tracción. Los hilos de mayor tamaño actúan como fibras de refuerzo^{21,22,26,43}. Los hilos gruesos provocan, también, una acumulación de tensión a lo largo del ancho de la pieza que resulta en una alta temperatura en las zonas de unión entre hilos. Esto mejora la difusión y, por lo tanto, resultan en una unión más fuerte^{22,26}. Por el otro lado se ha observado que, dependiendo de la orientación de la pieza y el tamaño del hilo extruido, las piezas pueden resistir valores de tensión máximas y rotura parecidos^{21,22,25-28,56,57,74,85,86}.

Los distintos parámetros que determinan las trayectorias de los hilos en cada capa también afectan al comportamiento mecánico de las piezas. Los más estudiados son el *raster angle* (ángulo de *raster*)^{22,26,27,56-58,85} y el *raster to raster air gap* (distancia entre *rasters*)^{21,22,25,26,55,56} (Figura 2.10). El *raster angle* influye por la misma razón que la orientación. Si el hilo extruido tiene la trayectoria alineada con la fuerza de tracción mejora la resistencia a la tracción ya que actúa como fibras de refuerzo^{22,26,27}. Una de las estrategias más usadas para minimizar la anisotropía de las piezas fabricadas con FDM es la de cambiar las trayectorias del *raster*, o su ángulo, en capas consecutivas. De esta manera los hilos tienen la misma longitud en ambas direcciones del plano (dependiendo de la geometría) y la fuerza se reparte en ellos por igual en ambas direcciones^{56,58,85}. En la Figura 3.8 se pueden ver los resultados de la resistencia a tracción para probetas fabricadas con distintos ángulos de *raster*. Se puede ver que las probetas con un ángulo de 0° (hilos extruidos en la misma dirección de aplicación de la fuerza) son las más resistentes. Las que menos, son las que su ángulo es completamente perpendicular a la aplicación de la fuerza (90°). Y que las probetas fabricadas con ángulos decalados 90° en capas sucesivas se comportan de manera muy parecida (45°/-45° y 0°/90°). Sería de esperar que distancias pequeñas y negativas (que producen un solapamiento de trayectorias de *raster*) ayudaran a crear uniones fuertes entre hilos, al crear capas más densas y/o continuas, y, por lo tanto, mejorar la resistencia mecánica. Sin embargo se ha comprobado que las distancias negativas mejoran muy poco la resistencia a la tracción⁵⁶.

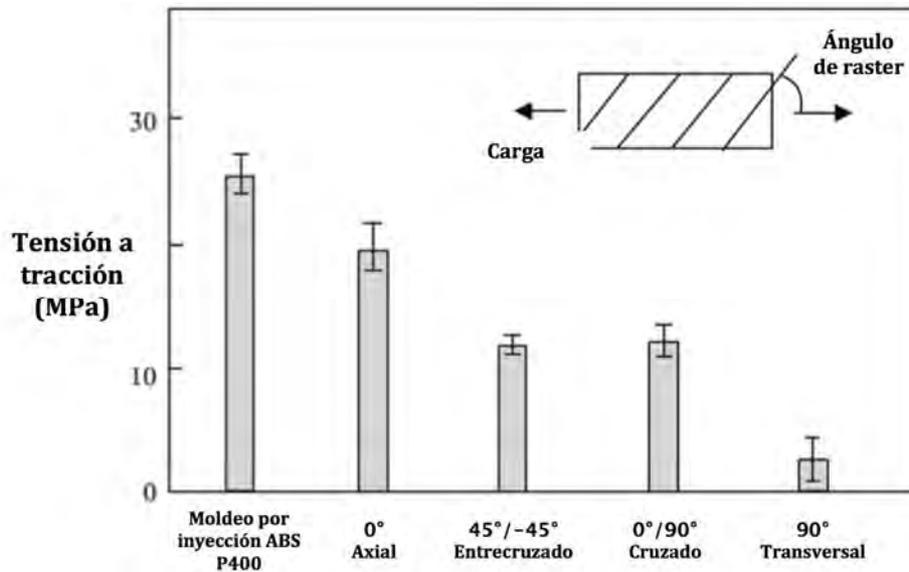


Figura 3.8: Resultados de tensión a tracción para probetas fabricadas variando el *raster angle* con tecnología FDM comparadas con probetas fabricadas por moldeo por inyección⁵⁶.

Variar el ángulo en capas sucesivas hace que las piezas a compresión se comporten de manera distinta a lo visto en la Figura 3.7. Un ángulo de *raster* decalado 90° en capas sucesivas permite que los hilos extruidos repartan la fuerza en las direcciones perpendiculares a la fuerza. Cosa que permite unas resistencias superiores según la orientación tal y como se puede ver en la Figura 3.9⁵⁶.

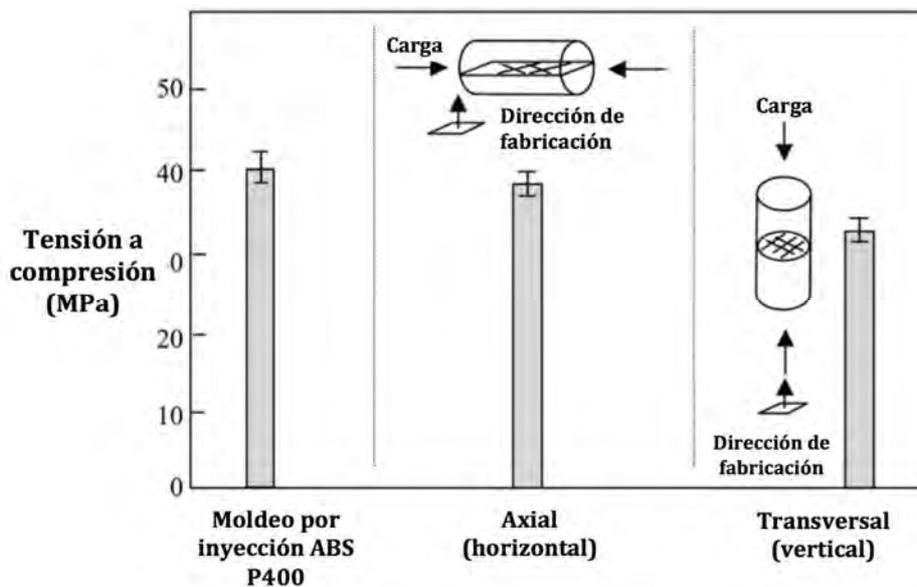


Figura 3.9: Resistencia a la tracción de probetas fabricadas con distinta orientación y un ángulo *raster* de 45°/-45° con probetas fabricadas por moldeo por inyección⁵⁶.

Pocos trabajos se han realizado estudiando el comportamiento mecánico dinámico de las piezas fabricadas mediante FDM. Se ha estudiado la influencia del *build style*, el *raster width* y el *raster angle*^{43,50,87,88}. Concluyen que cuanto más sólida es la pieza (los hilos extruidos están más juntos) fabricada ésta se comporta de manera más rígida bajo cargas dinámicas.

Como se puede ver hay infinidad de combinaciones de parámetros de fabricación y su elección dada una pieza para uso final con un esquema de cargas definido no es sencilla. El operario de la máquina debe intuir los parámetros adecuados, pero no dispone de información cuantitativa para poder decidir. Y únicamente se basa en su experiencia.

3.2.2. Simulación por elementos finitos de piezas fabricadas mediante Additive Manufacturing (AM)

Es una práctica común simular el comportamiento de piezas utilizando modelos numéricos de análisis por elementos finitos (*Finite Element Analysis, FEA*). La simulación virtual permite predecir el comportamiento de manera fiable y mucho más rápida que con modelos físicos. De esta manera se pueden calcular las tensiones y desplazamientos que tendrá la pieza durante su funcionamiento. Permitted rediseñar las partes de la pieza que más sufren. Es una técnica que se ha intentado aplicar a piezas fabricadas mediante tecnologías AM^{29,61-63,89}.

Los modelos numéricos por FEA utilizan bases de datos de materiales caracterizados a partir de ensayos de probetas. Estas bases de datos están hechas considerando que las piezas están fabricadas por métodos tradicionales como el moldeo por inyección y, por eso, considerados isotrópicos. No es posible realizar cálculos fiables mediante estas técnicas para piezas fabricadas con tecnologías AM ya que no consideran el efecto de las capas ni la orientación de los hilos en la simulación. No existen modelos de materiales que tengan una correlación aceptable entre el comportamiento real de las piezas y su simulación. Por esta razón esta tesis pretende encontrar los parámetros de impresión más importantes en el comportamiento mecánico para así poder determinar un modelo constitutivo que permita, mediante simulaciones FEA, prever el comportamiento real de la pieza.

Los resultados experimentales y las simulaciones en FEA de piezas de Nylon-12, fabricadas con SLS, a compresión aplicando pequeños desplazamientos son parecidos donde la respuesta se considera lineal. Sin embargo el modelo falla al superar el límite de fluencia y, por lo tanto, también el de rotura. Esto es debido a la porosidad de las piezas fabricadas mediante SLS. Su tamaño, forma y distribución son parámetros críticos a conocer para asegurar una simulación precisa a compresión⁸⁹.

Con FDM se han seguido distintos métodos para caracterizar el material para poder realizar simulaciones FEA. La más sencilla consiste en imprimir probetas en tres orientaciones distintas (misma cara de la pieza en el plano XY, XZ e YZ) y medir, mediante ensayos de tracción el módulo elástico y el coeficiente de Poisson en las tres direcciones/planos⁶². Otra metodología es fabricar además de las tres direcciones dichas anteriormente tres más pero variando el *angle raster* (0°, 45° y 90°) para así medir también los módulos cortantes y determinar completamente la matriz de rigidez para materiales isotrópicos⁶¹. Una opción distinta para obtener los módulos cortantes es la de fabricar probetas (también en los planos XY, YZ y XZ) pero giradas 45 grados⁶³. Todos los modelos muestran una buena correlación

entre resultados experimentales y simulados en la zona lineal de deformación pero son realizados sobre las probetas no en piezas finales.

3.3. Experimentos realizados en el presente trabajo

Para el estudio el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM se han realizado diversas investigaciones agrupadas en dos bloques. El primer bloque tiene dos propósitos: encontrar un buen método para caracterizar piezas fabricadas mediante FDM y correlacionar los resultados experimentales con simulaciones realizadas mediante FEA. El segundo bloque pretende estudiar el efecto de distintos parámetros de fabricación en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM sometidas a cargas dinámicas.

3.3.1. Caracterización de piezas fabricadas mediante Fused deposition modeling (FDM) y correlación con resultados experimentales

En la bibliografía revisada no aparece ninguna caracterización con un modelo constitutivo adecuado con una correlación realizada sobre piezas reales. Por esta razón ha sido necesario realizar una caracterización y validarla con resultados experimentales. De esta manera se ha desarrollado una metodología capaz de caracterizar materiales impresos por AM. Se ha realizado la caracterización mecánica y la simulación de piezas fabricadas con FDM utilizando el modelo constitutivo ortotrópico resultante de dicha caracterización.

La caracterización mecánica se ha realizado mediante ensayos de tensión-elongación de probetas fabricadas de PC. Esto sirve para realizar simulaciones mediante FEA y ver su correlación con ensayos físicos realizados sobre las piezas fabricadas mediante FDM.

Entorno teórico

Para poder realizar simulaciones mediante FEA y predecir el comportamiento de piezas fabricadas mediante FDM es necesario seleccionar un modelo constitutivo que rija su comportamiento. Como ya se ha comentado anteriormente las piezas fabricadas mediante tecnologías AM presentan anisotropía. Dependiendo de su dirección de fabricación las piezas tienen un comportamiento mecánico distinto debido a como las distintas capas están dispuestas en relación al esfuerzo aplicado. Entonces el modelo constitutivo más adecuado es el ortotrópico bajo deformaciones lineales elásticas.

La elasticidad lineal se describe mediante la ley de Hooke, que establece que la relación entre esfuerzo y desplazamiento es lineal. Para materiales ortotrópicos, definidos como aquellos con tres planos de simetría perpendiculares entre sí, la matriz de elasticidad contiene nueve parámetros desconocidos (ecuación 3.1)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Donde:

- ε_i es la elongación en la dirección i .
- γ_{ij} es la deformación cortante en el plano ij .
- σ_i es tensión normal en la dirección i .
- τ_{ij} es la tensión cortante en el plano ij .

La ecuación 3.1 se puede escribir con los términos convencionales de las constantes de ingeniería, módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo cortante, en las tres direcciones tal y como se observa en la ecuación 3.2.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{yz} & 0 & 0 \\ & sym & & & 1/G_{xz} & 0 \\ & & & & & 1/G_{xy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Dónde:

- E_i es el módulo de Young en la dirección i .
- ν_{ij} es el coeficiente de Poisson en el plano ij .
- G_{ij} es el módulo cortante en el plano ij .

La ecuación usada más habitualmente en ingeniería es el producto entre la matriz de rigidez y el tensor de deformaciones (ecuaciones 3.3 y 3.4)

$$\bar{\sigma} = \bar{C} \cdot \bar{\varepsilon} \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Donde:

$$C_{11} = \frac{S_{22} \cdot S_{33} - S_{23}^2}{S}$$

$$\begin{aligned}
C_{22} &= \frac{S_{11} \cdot S_{33} - S_{13}^2}{S} \\
C_{33} &= \frac{S_{22} \cdot S_{11} - S_{12}^2}{S} \\
C_{12} &= \frac{S_{23} \cdot S_{13} - S_{12} \cdot S_{33}}{S} \\
C_{13} &= \frac{S_{12} \cdot S_{23} - S_{22} \cdot S_{13}}{S} \\
C_{23} &= \frac{S_{12} \cdot S_{13} - S_{11} \cdot S_{23}}{S} \\
C_{44} &= \frac{1}{S_{44}} \\
C_{55} &= \frac{1}{S_{55}} \\
C_{66} &= \frac{1}{S_{66}}
\end{aligned}$$

$$S = S_{11} \cdot S_{22} \cdot S_{33} + 2 \cdot S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{13} - S_{13}^2 \cdot S_{22} - S_{23}^2 \cdot S_{11} - S_{12}^2 \cdot S_{33} \quad (3.5)$$

Para determinar completamente la matriz de rigidez se deben calcular nueve constantes: tres módulos de Young, tres coeficientes de Poisson y tres módulos cortantes según las tres direcciones X, Y y Z. Para calcular las 9 constantes es necesario realizar ensayos de tracción/elongación de probetas fabricadas en 6 direcciones distintas según la Figura 3.10.

De acuerdo con la ley de Hooke, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson se pueden obtener mediante un ensayo de tensión/elongación con la ecuación 3.6 y 3.7.

$$E_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} \quad (3.6)$$

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.7)$$

Donde la dirección 1 es la dirección de aplicación de la fuerza o desplazamiento y 2 la perpendicular a esta. Los módulos cortantes se pueden obtener del ensayo de tracción/elongación de las muestras orientadas a 45° en cada uno de los planos utilizando la ecuación 3.8.

$$G_{12} = \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu_{12})} \quad (3.8)$$

Donde 1 es, también, la dirección de aplicación de la carga y 2 la perpendicular.

Caracterización mecánica

Para obtener las nueve constantes que componen la matriz de rigidez de un material ortotrópico se fabricaron y ensayaron un total de treinta probetas de PC fabricadas en seis direcciones distintas, cinco en cada una de ellas, tal y como se muestra en la Figura 3.10. Como no existe ninguna norma establecida para piezas

fabricadas mediante tecnologías AM las probetas fueron fabricadas y ensayadas utilizando la norma ASTM D638: *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, utilizada para medir las propiedades mecánicas de los plásticos y utilizada en la gran mayoría de publicaciones y los fabricantes de impresoras^{18,56,58,62,90-95}. Las dimensiones de la probeta, según la norma, se pueden ver en la Figura 3.12.

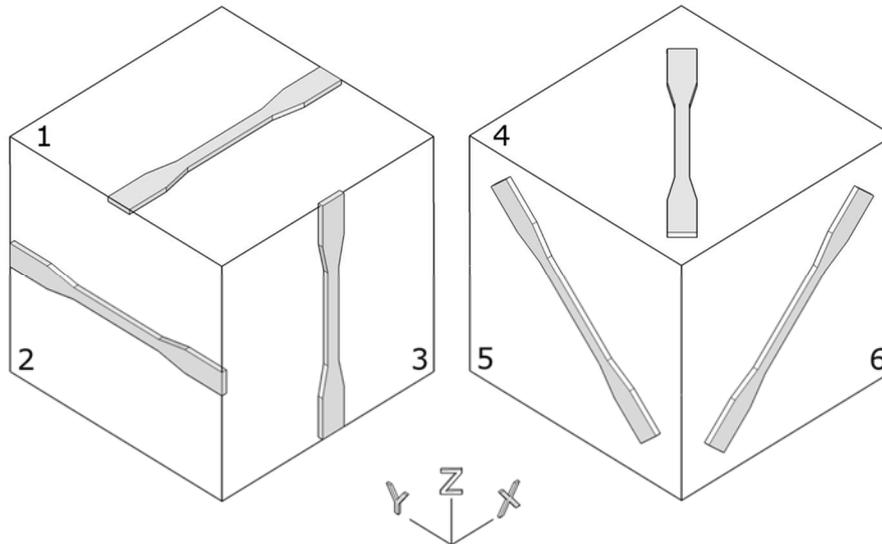


Figura 3.10: Orientaciones para las probetas ensayadas a tracción/elongación.

Los otros parámetros de fabricación utilizados fueron los siguientes:

- Boquilla: se utilizó un diámetro de 0.254 mm, ya que estudios previos demostraron que es la que da mejores resultados en acabado superficial, exactitud dimensional y comportamiento mecánico^{22,26,43,93,96}. La sección de el hilo extruido no es cilíndrica, sino que es elíptica (Figura 3.11). Esto es debido al *swelling*, que hace que el ancho sea el mayor, y a que la capa superior se fabrica a la distancia del ancho de boquilla. La dimensión horizontal puede ser controlada con la velocidad de la boquilla y la velocidad del flujo de plástico a través de ella^{56,59,84}. El ancho utilizado fue de 0.508 mm.

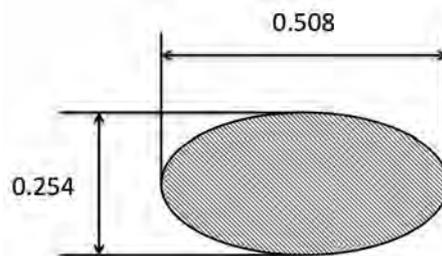


Figura 3.11: Esquema de la sección elíptica de un hilo extruido.

- *Part interior style* (estilo del interior de la pieza): se utilizó la opción *solid-normal*. Este tipo de estilo llena el interior de las piezas completamente. El ángulo de los hilos extruidos en el plano XY es de 45°/-45° alternándose en cada capa ya que se ha visto que es la mejor configuración para aguantar cargas combinadas^{22,26,43,85}.

- *Visible surface style* (estilo de la superficie visible): este parámetro modifica los parámetros de las capas mas cercanas a las superficies exteriores para mejorar la rugosidad superficial y la apariencia. Lo hace disminuyendo el tamaño de los hilos extruidos.
- *Support style* (tipo de soporte): se utilizó como soporte el *Breakaway* ya que es el que se elimina más fácilmente y el más usado con geometrías complejas (sólo fue necesario su uso en las probetas 5 y 6 que se encuentran inclinadas respecto a la superficie de fabricación, como es puede observar en la Figura 3.13).

El resto de parámetros de fabricación se escogieron emulando lo que un usuario escogería al fabricar una pieza cualquiera. ya que son los que vienen por defecto en el *software* utilizado, Insight®.

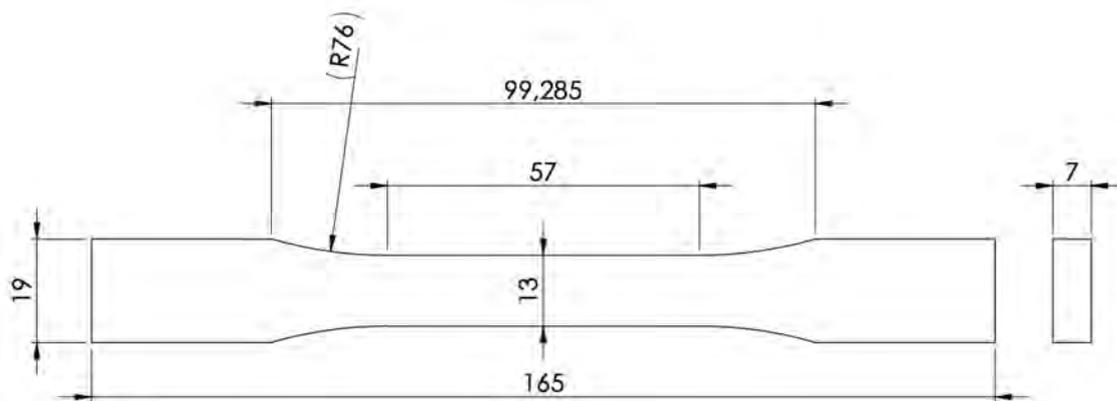


Figura 3.12: Dimensiones de la probeta para los ensayos de tracción/elongación según la norma ASTM D638.

Las probetas fueron diseñadas utilizando SolidWorks®, luego exportadas a formato STL para así poder ser fabricadas con la máquina de Stratasys® Fortus 400mc® utilizando el *software* Insight®. En la Figura 3.13 se pueden ver las probetas de PC fabricadas correspondientes a las orientaciones 3, 5 y 6 (Figura 3.10).

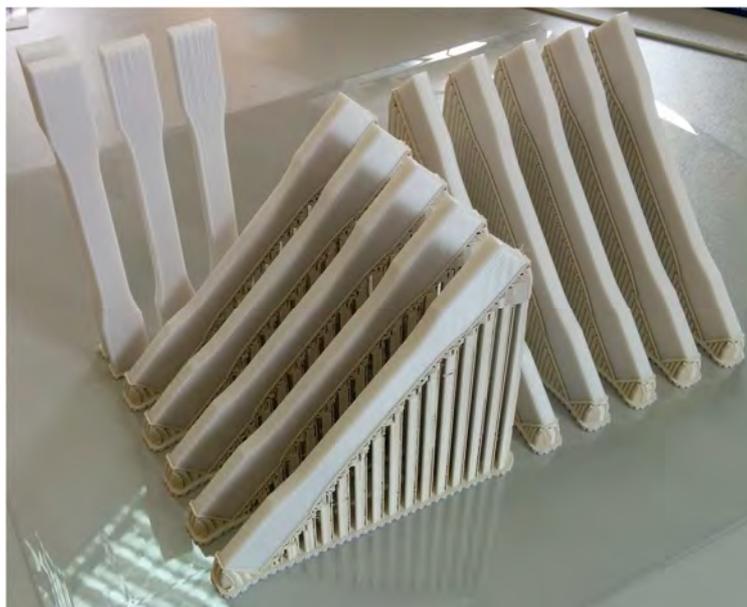


Figura 3.13: Probetas de tensión/elongación fabricadas en las orientaciones 3, 5 y 6 (Figura 3.10).

Para medir la elongación longitudinal y transversal se utilizó un extensómetro óptico bidimensional (Figura 3.14). Los ensayos de tensión/elongación se llevaron a cabo con la máquina de ensayos universales Microtest EM2/20 equipada con los siguientes componentes (Figura 3.14):

- Una célula de carga con capacidad de 500N.
- Un sistema de adquisición de datos Spider y Microtest.
- Dos mordazas neumáticas S1.
- Software de control Microtest, Catman 4.5 y EX-F1.



Figura 3.14: Montaje experimental para los ensayos de tensión/elongación.

Los datos de tensión y elongación longitudinal y axial se obtuvieron a una velocidad de 1mm/min. Para cada una de las seis orientaciones se obtuvieron 5 curvas (una por cada repetición). Los resultados se pueden ver en la sección 9.1.1. Para la obtención de módulo elástico, tensión máxima y su elongación y la tensión y elongación de rotura se desarrolló un programa con MATLAB® (sección 9.1.2). El cálculo de el módulo elástico se realizó considerando que el comportamiento lineal se daba hasta un 15% de desplazamiento antes de llegar a la plastificación (*yield point*) en las probetas que presentaran este comportamiento. Para las probetas que no presentaron plastificación se utilizó toda la curva. Los resultados se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Módulo elástico, tensión máxima y su elongación y la tensión y elongación de rotura medios para cada orientación (Figura 3.10).

Muestra	Plano de fabricación	Orientación	Módulo elástico (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Elongación a tensión máxima (mm/mm)	Tensión de rotura (MPa)	Elongación de rotura (mm/mm)
1	xy	x	1461.92	45.88	0.044	44.83	0.104
2	yz	y	1684.34	54.58	0.042	49.41	0.118
3	xz	z	1587.80	45.61	0.029	45.61	0.029
4	xy	x + 45°	1279.57	45.52	0.036	45.52	0.036
5	yz	y + 45°	1602.73	53.32	0.034	53.32	0.034
6	xz	z + 45°	1768.12	35.97	0.020	35.97	0.020

En los resultados se puede ver que las muestras 1 y 3 presentan tensiones máximas similares pero la rotura en la última es frágil ya que no hay demasiada deformación plástica, tal y como se puede ver en la Figura 3.15. Las muestras 1 y 2 presentan comportamiento plástico ya que los hilos están dispuestos en la misma dirección en la que la muestra es tensionada. De esta manera los contornos están tensionados longitudinalmente. La muestra 3 tiene un comportamiento frágil (la tensión máxima y la de rotura son la misma) debido a que está tensionada perpendicularmente a las capas. La muestra 2 tiene el mayor valor tanto de módulo elástico como de tensión máxima ya que hay más capas tensionadas longitudinalmente, con lo que hay más contornos que actúan como fibras de refuerzo⁴³.

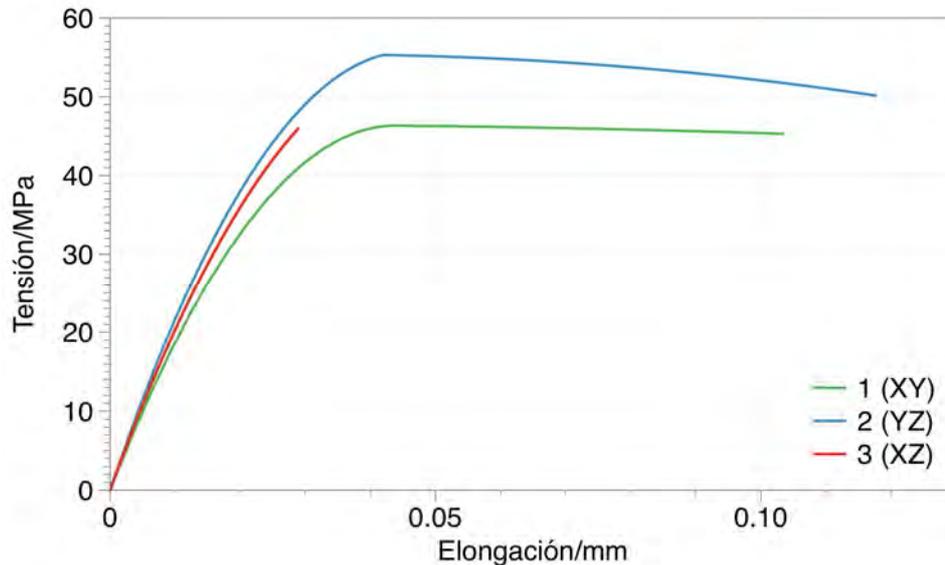


Figura 3.15: Gráficos de tensión/elongación par las muestras 1, 2 y 3 (Figura 3.10).

Hay que mencionar que la muestra 3 presenta una variabilidad mucho mayor debido a su comportamiento frágil, como se puede ver en la Figura 3.16.

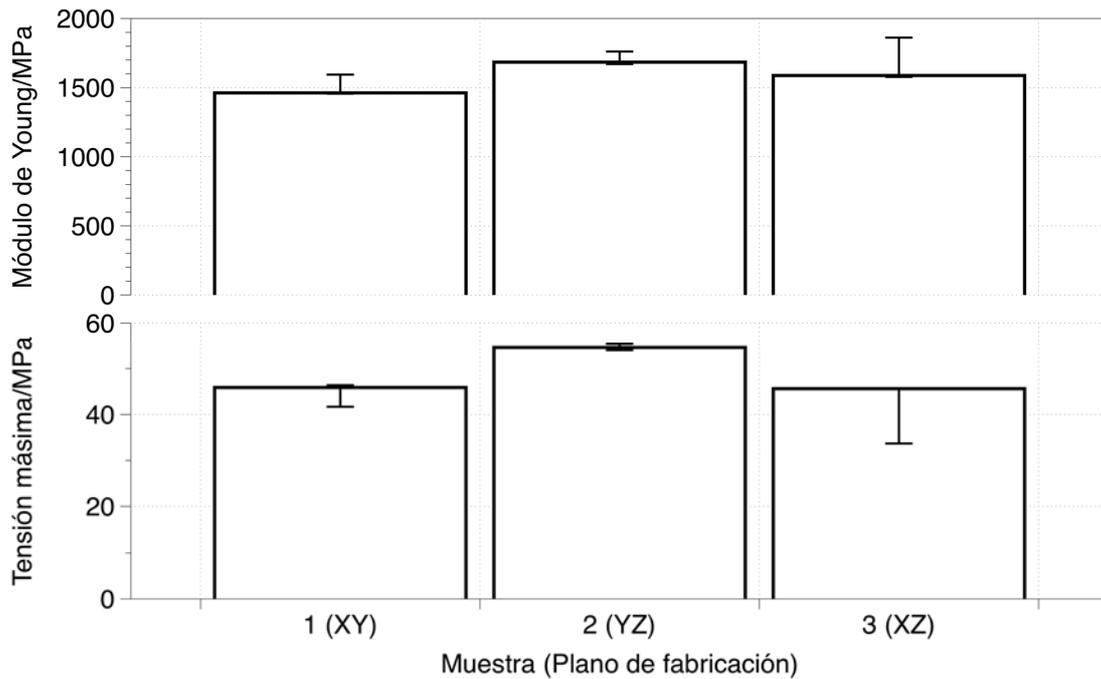


Figura 3.16: Valores medios y variabilidad de el modulo de Young y la tensión máxima par alas muestras 1, 2 y 3 (Figura 3.10).

Los módulos de Young, los coeficiente de Poisson y los módulos de corte (ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8) fueron calculados utilizando la parte lineal. Sus valores se pueden ver en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Valores de módulos de Young, coeficiente de Poisson y módulos cortantes obtenidos de la caracterización mecánica.

E_x	1.46E+03	MPa	ν_{xy}	3.90E-01	G_{xy}	5.06E+02	Mpa
E_y	1.68E+03	Mpa	ν_{yz}	3.84E-01	G_{yz}	5.91E+02	Mpa
E_z	1.59E+03	Mpa	ν_{xz}	3.72E-01	G_{xz}	6.33E+02	Mpa

Con las nueve constantes calculadas de la Tabla 3.2 y utilizando las ecuaciones 3.5 se puede determinar completamente la matriz de rigidez (ecuación 3.9):

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 3.04 \cdot 10^3 & 2.13 \cdot 10^3 & 2.00 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ & 3.45 \cdot 10^3 & 2.11 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ & & 3.16 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 5.91 \cdot 10^2 & 0 & 0 \\ & sym & & & 6.33 \cdot 10^2 & 0 \\ & & & & & 5.06 \cdot 10^2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Ensayos físicos

Para realizar las pruebas sobre piezas fabricadas mediante FDM se diseñó una pieza que fuera geoméricamente simple y que al aplicarle un esfuerzo tuviera un esquema de tensiones complejo (flexión y torsión). En publicaciones previas se había visto que taladrar la pieza, para su fijación, resulta en una zona de acumulación de tensiones que pueden falsear los resultados de la simulación⁶². Por esta razón la sujeción que se realizó fue sin tener que modificar la pieza de estudio

(Figura 3.20). Además esta solución hace la simulación en FEA mucho mas simple. El plano de la pieza fabricada se puede ver en la Figura 3.17.

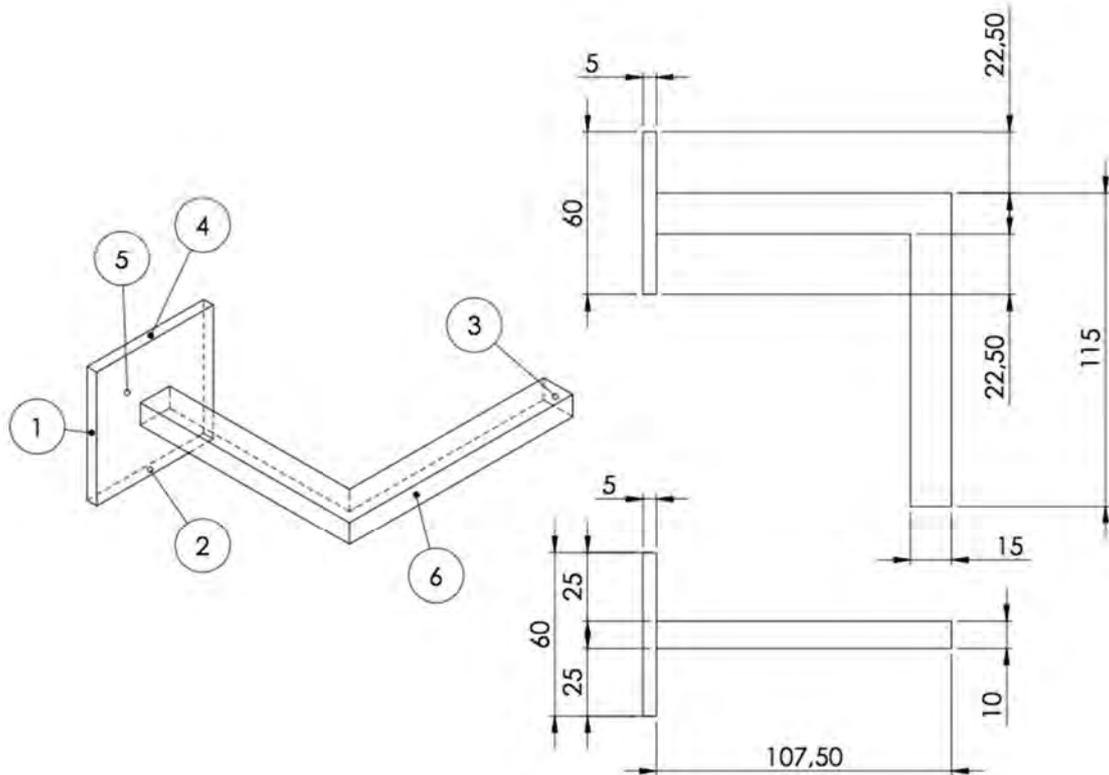


Figura 3.17: Plano de la pieza para realizar los ensayos con las seis posibles orientaciones indicadas numéricamente.

La pieza diseñada (Figura 3.17) tiene seis posibles orientaciones de fabricación, ya que existen seis superficies exteriores susceptibles de ser usadas como base de fabricación. Las orientaciones 1 y 3, 2 y 4 y 5 y 6 son mecánicamente equivalentes ya que el proceso de *slicing* produce las mismas capas, su fabricación y disposición es la misma. Por esta razón solo se consideraron tres orientaciones para su fabricación: la 1, la 2 y la 5.

El sistema de coordenadas de la máquina determina el sistema de coordenadas de la pieza y del material (considerado ortotrópico, según la caracterización realizada). Como los módulos elásticos en X e Y son distintos, se decidió fabricar dos orientaciones distintas para cada una de las bases consideradas: una con el voladizo alineado con el eje X y la otra con la Y (Figura 3.18). Se fabricaron un total de 18 piezas, tres para cada posible orientación.

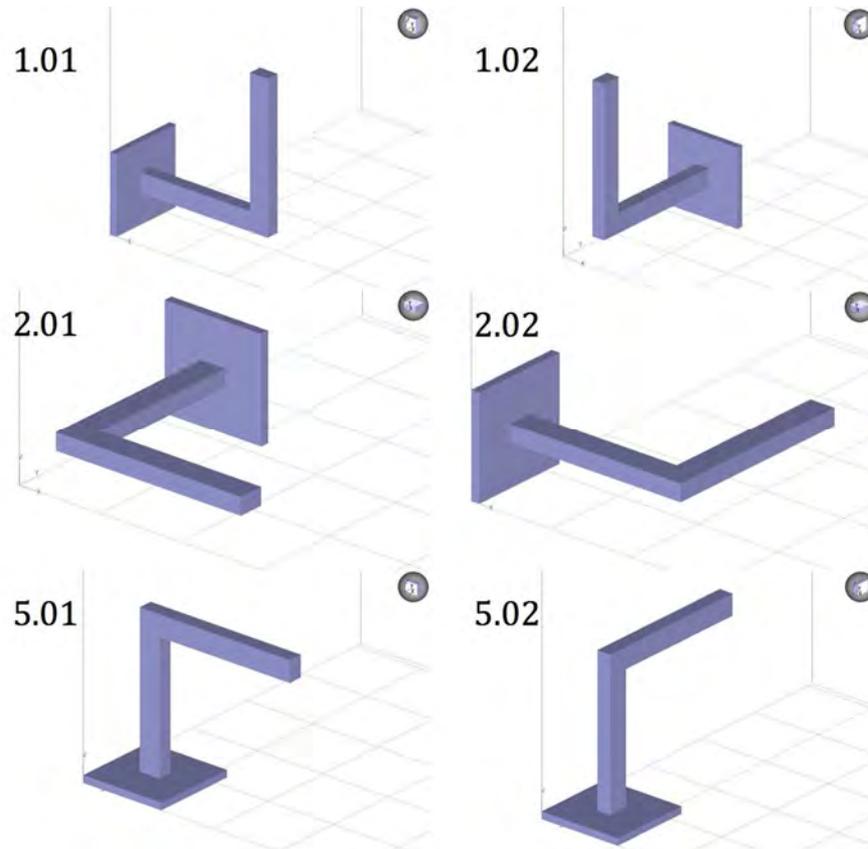


Figura 3.18: Distintas orientaciones impresas para la experimentación física.

Las piezas se fabricaron con los mismos parámetros de fabricación que las probetas de los ensayos tensión/elongación ya que es el material caracterizado (Figura 3.19)



Figura 3.19: Probetas fabricada mediante FDM.

En los ensayos mecánicos las piezas fueron sujetadas como se puede ver en la Figura 3.20. Todas las piezas fueron ensayadas en las mismas condiciones, un desplazamiento de 35 mm a una velocidad de 1mm/min (igual que los ensayos de tensión/elongación) aplicado a 15 mm del borde de la biga en voladizo.



Figura 3.20: Montaje de sujeción de las piezas para la experimentación física, con la posición de aplicación de la fuerza marcada.

Los experimentos fueron realizadas utilizando el siguiente equipo (Figura 3.21):

- MTS Insight.
- Célula de carga 10kN.
- Mordazas de flexión a tres puntos.



Figura 3.21: Montaje para los ensayos físicos.

Las piezas fueron inspeccionadas, después del ensayo, y se comprobó que ninguna de ellas había sufrido plastificación. Cumpliendo, de esta manera, una de las premisas del modelo constitutivo presentado, que es el comportamiento elástico.

Los resultados (sección 9.1.3) mostraron que existe una dependencia lineal entre la fuerza aplicada y el desplazamiento. Se realizó un ajuste por mínimos cuadrados mediante MATLAB® (sección 9.1.4), como se puede observar en Figura 3.22, para obtener tal relación, el coeficiente de rigidez. Los resultados se presentan en la Tabla 3.3

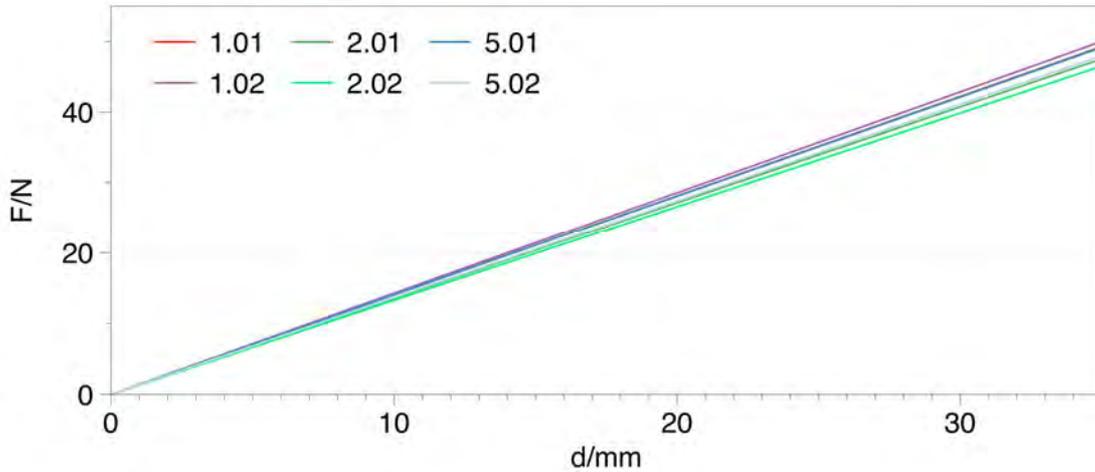


Figura 3.22: Resultados gráficos de el desplazamiento con la fuerza para cada una de las orientaciones.

Tabla 3.3: Coeficiente de rigidez medio (F/d), desviación estándar (std) y variación estándar en % (%std) para cada una de las orientaciones.

Orientación	F/d	std	%std
1.01	1.41	0.036	2.55%
1.02	1.43	0.019	1.35%
2.01	1.36	0.014	1.03%
2.02	1.33	0.039	2.96%
5.01	1.41	0.011	0.75%
5.02	1.37	0.015	1.07%

Las piezas manufacturadas mediante FDM muestran un comportamiento mecánico diferente dependiendo de la orientación de fabricación. Aún así no es posible distinguir el comportamiento mecánico entre las piezas fabricadas utilizando la misma base ya que el error experimental es más grande que la diferencia entre ellos. Por esta razón se consideró que las piezas fabricadas usando la misma base eran mecánicamente iguales. Por esta razón se consideró que sólo había tres orientaciones mecánicamente diferentes: la 1, la 2 y la 5.

La misma función de MATLAB® (sección 9.1.4) se utilizó para calcular el coeficiente de rigidez para cada una de las tres orientaciones. Los resultados se pueden ver en la Tabla 3.4 y la Figura 3.23. Los resultados muestran que utilizando diferentes bases de construcción la respuesta mecánica es distinta. Entre las

orientaciones 1 y 2 hay una diferencia de comportamiento de un 5.77% y entre la 1 y la 5 del 2.15%.

Tabla 3.4: Coeficiente de rigidez medio (F/d), desviación estándar (std) y variación estándar en % (%std) para cada una de las bases de construcción.

Orientación	F/d	std	%std
1	1.42	0.028	1.99%
2	1.34	0.027	2.03%
5	1.39	0.022	1.58%

Se observa que la orientación mecánicamente más resistente es la 1, seguida de la 5 y la 2, de mayor a menor el coeficiente de rigidez (Tabla 3.4). La orientación 1 es la más resistente ya que a igualdad de fuerza aplicada el desplazamiento es menor. Esto también se puede observar en la Figura 3.23

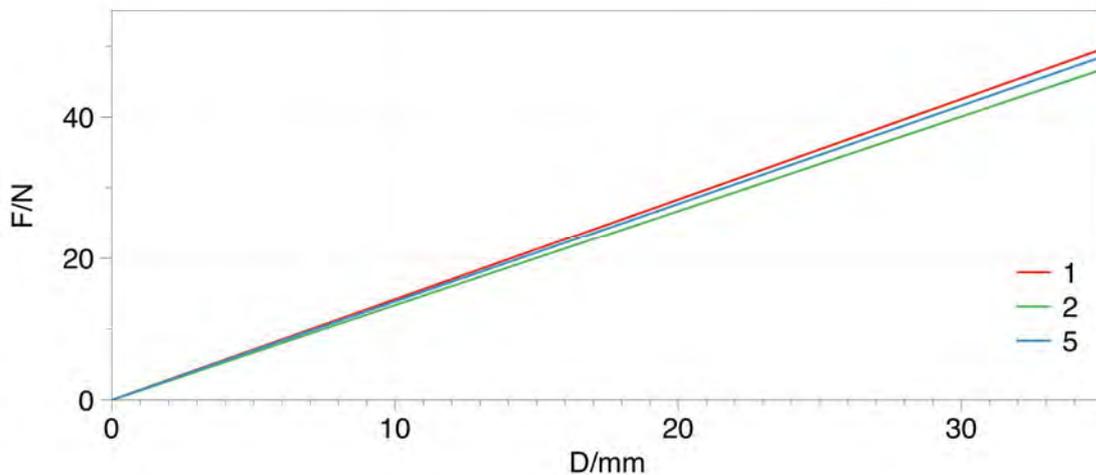


Figura 3.23: Resultados gráficos de el desplazamiento con la fuerza para cada una de las bases de fabricación.

Las diferencias del comportamiento mecánico entre las distintas orientaciones se puede explicar por la disposición de hilos y capas respecto a los esfuerzos mecánicos.

El voladizo es la parte de la pieza más solicitada mecánicamente. Éste se puede dividir en dos partes: desde el empotramiento hasta el codo y de éste a la parte final. La primera es la sección más solicitada por lo que es la que tiene más influencia en el comportamiento mecánico. Debido al desplazamiento aplicado a la parte final y a las dimensiones del voladizo, la parte superior está solicitada a tracción, la inferior a compresión y toda ella a torsión. En la parte final del voladizo la parte superior se encuentra a tracción y la inferior a compresión. El esquema de cargas se puede ver en la Figura 3.24.

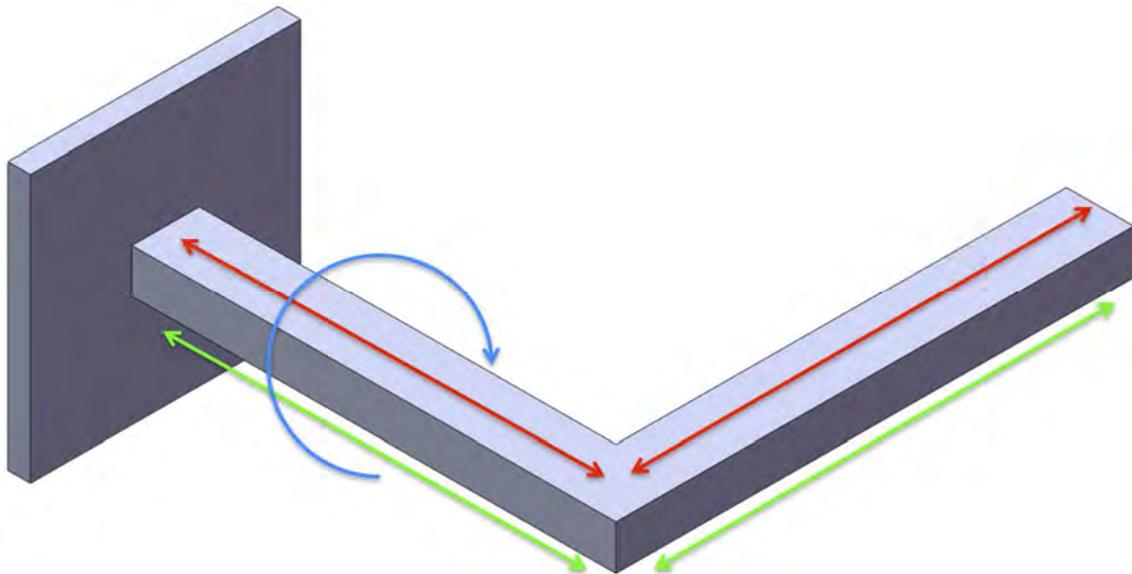


Figura 3.24: Esquema de las cargas de las piezas fabricadas: en rojo tracción, en verde compresión y en azul torsión.

De la misma manera que ha pasado con las probetas a tracción, dependiendo de la orientación en la que se han fabricado, la disposición de las capas y contornos respecto a los esfuerzos es distinta y, por lo tanto, su comportamiento mecánico también.

La orientación número 2 es la más débil ya que los contornos no están situados de manera que puedan actuar como fibras de refuerzo ni a tracción (parte superior), compresión (parte inferior) o torsión (primera sección del voladizo) en ninguna de las dos partes del voladizo como se puede ver en el esquema de la Figura 3.25.



Figura 3.25: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 2.

La disposición de los contornos en la orientación 5 favorecen su resistencia mecánica. La parte final del voladizo está compuesta solo de contornos (Figura 3.26) y en este caso sí que actúan como fibras de refuerzo. La parte empotrada está compuesta por capas puestas transversalmente a la tracción y compresión y en el plano de la torsión. La torsión intenta girar las capas una encima de las otras, separándolas y, como se ha visto en los experimentos de caracterización del material (Figura 3.15 y Figura 3.16, dirección XZ), la unión entre capas presenta un

módulo elástico superior. En esta orientación las dos partes del voladizo hacen aumentar la resistencia mecánica.

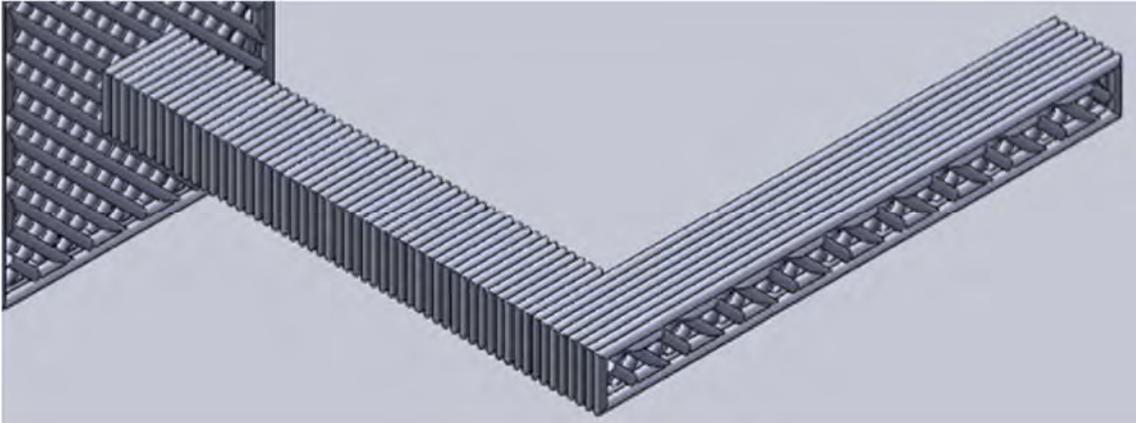


Figura 3.26: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 5.

La manera que los contornos y las capas están dispuestos en la orientación 1 (Figura 3.27) es justo lo contrario que en la orientación 5 (Figura 3.26). En la parte empotrada del voladizo los contornos actúan como fibras, ayudando a resistir el esfuerzo de tracción. En la parte final la unión entre capas es la que resiste la tracción.

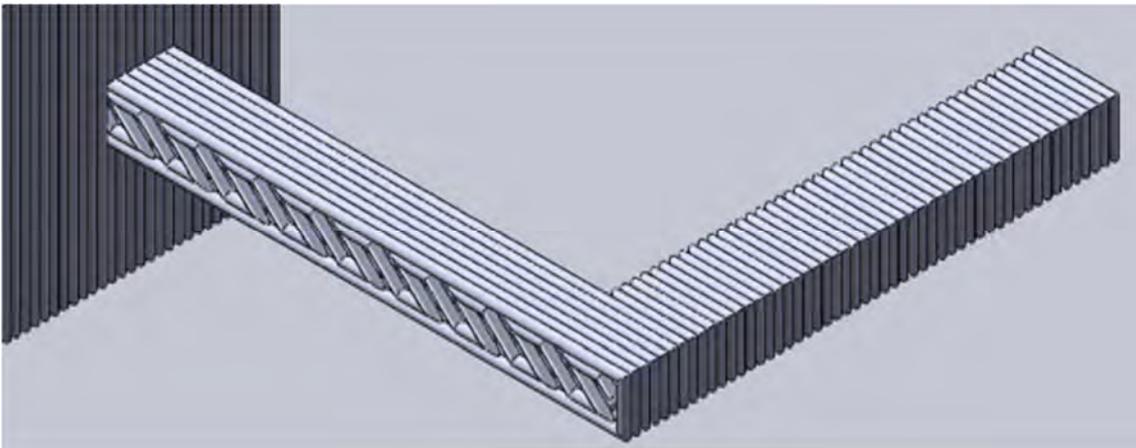


Figura 3.27: Esquema de la disposición de las capas y contornos para la orientación 1.

La disposición de los hilos y las capas con respecto a los esfuerzos permite explicar la razón de que una orientación sea mecánicamente más resistente que las otras. Sin embargo hay que decir que sólo se puede asegurar esto si la pieza no supera el límite elástico ya que dependiendo de la disposición de las capas puede que se produzca un fallo por fractura frágil.

Simulación mediante elementos finitos

La matriz de rigidez obtenida con la caracterización mecánica (ecuación 3.9) se utilizó para simular el comportamiento mecánico de las mismas piezas que fueron físicamente ensayadas mediante FEA. Se realizaron un total de siete simulaciones, una para cada orientación y otra considerando el material isotrópico. Las

constantes mecánicas de este último se obtuvieron calculando la media de módulos de Young, coeficientes de Poisson y módulos cortantes de las direcciones 1, 2 y 3 (Tabla 3.1).

Para las simulaciones en FEA se utilizó el programa ANSYS® Mechanical 15.0. Las condiciones de contorno se establecieron de acuerdo con los ensayos físicos (Figura 3.20). La misma malla, del tipo hexagonal (elemento tipo solid 185), fue la utilizada en todas las simulaciones. Se utilizaron un total de 10476 elementos y 14008 nodos (Figura 3.28).

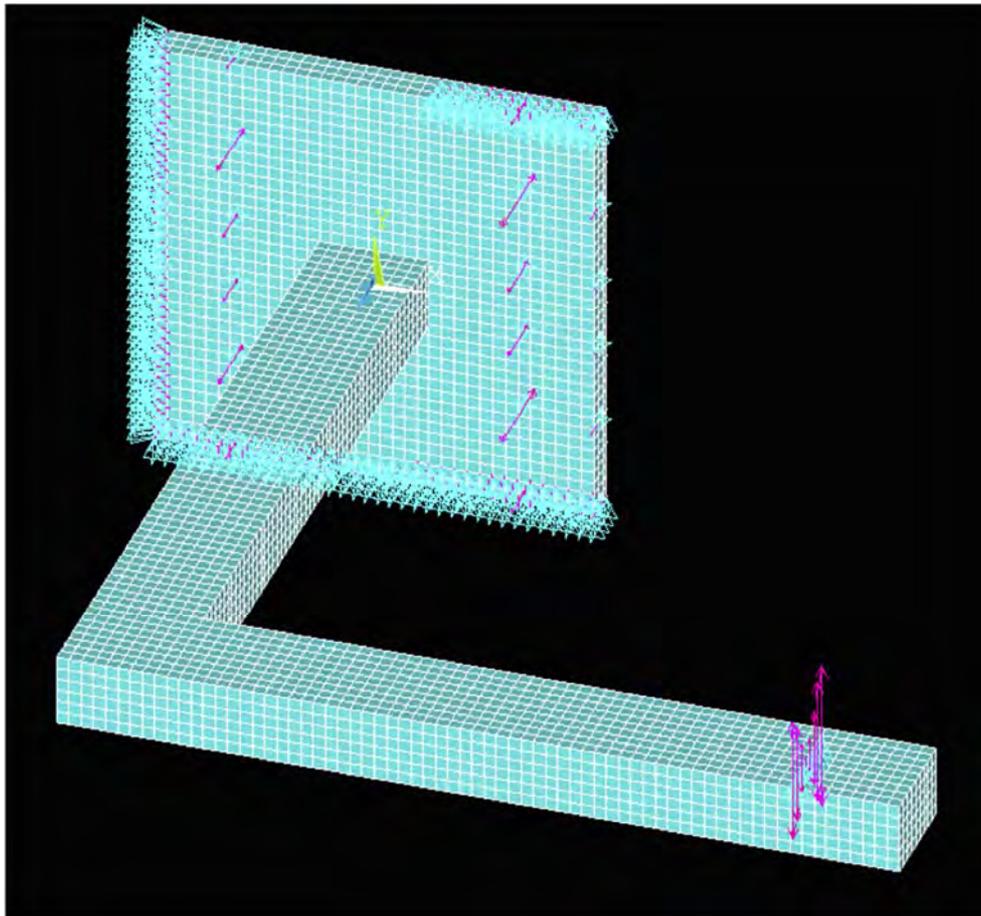


Figura 3.28: Modelo utilizado para la simulación con FEM. Se observan los elementos, nodos y condiciones de contorno.

Las constantes mecánicas utilizadas en cada simulación fueron establecidas según el sistema de coordenadas de la máquina, presentadas en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Constantes mecánicas usadas según la dirección de fabricación en las simulaciones.

Constantes Mecánicas		Ortotrópico						Isotrópico Medio
		1.01	1.02	2.01	2.02	5.01	5.02	
X		Z	Z	X	Y	X	Y	-
Y		Y	X	Z	Z	Y	X	-
Z		X	Y	Y	X	Z	Z	-
XY		YZ	XZ	XZ	YZ	XY	XY	-
YZ		XY	XY	YZ	XZ	YZ	XZ	-
XZ		XZ	YZ	XY	XY	XZ	YZ	-
E _x	1.46E+03	1.59E+03	1.59E+03	1.46E+03	1.68E+03	1.46E+03	1.68E+03	1.58E+03
E _y	1.68E+03	1.68E+03	1.46E+03	1.59E+03	1.59E+03	1.68E+03	1.46E+03	
E _z	1.59E+03	1.46E+03	1.68E+03	1.68E+03	1.46E+03	1.59E+03	1.59E+03	
v _{xy}	0.39	0.384	0.372	0.372	0.384	0.39	0.39	0.382
v _{yz}	0.384	0.39	0.39	0.384	0.372	0.384	0.372	
v _{xz}	0.372	0.372	0.384	0.39	0.39	0.372	0.384	
G _{xy}	5.06E+02	5.91E+02	6.33E+02	6.33E+02	5.91E+02	5.06E+02	5.06E+02	5.77E+02
G _{yz}	5.91E+02	5.06E+02	5.06E+02	5.91E+02	6.33E+02	5.91E+02	6.33E+02	
G _{xz}	6.33E+02	6.33E+02	5.91E+02	5.06E+02	5.06E+02	6.33E+02	5.91E+02	

Los resultados de tensiones mostraron que en ninguno de los casos la pieza plastificaba ya que las tensiones máximas en la simulación fueron de alrededor lo 25 MPa.

Se calculó el mismo coeficiente de rigidez (F/d) con los resultados de las simulaciones. Los resultados de la Tabla 3.6 muestran que según el modelo

utilizado, diferente orientación o el isotrópico medio, el comportamiento mecánico es diferente.

Tabla 3.6: Coeficiente de rigidez (F/d) para cada una de las orientaciones simuladas.

Orientación	F/d
1.01	1.35
1.02	1.32
2.01	1.26
2.02	1.29
5.01	1.38
5.02	1.39
Isotrópico medio	1.33

La diferencia del coeficiente de rigidez de las simulaciones utilizando la misma superficie de base de fabricación es pequeña, siendo el máximo de 2.1% entre las orientaciones utilizando la base número 2. Esto corrobora que no hay diferencias importantes entre las orientaciones utilizando la misma base de fabricación, igual que en los ensayos físicos, por esta misma razón también se consideraron solo tres orientaciones. Los resultados de juntar los pares de orientaciones se pueden ver en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Coeficiente de rigidez (F/d) para cada una de las bases de fabricación simuladas.

Orientación	F/d
1	1.33
2	1.27
3	1.38
Isotrópico medio	1.33

Correlación resultados físicos y simulados

Los resultados de las simulaciones y los ensayos físicos fueron comparados como se puede ver en la Tabla 3.8. Si se comparan los resultados con el modelo ortotrópico se ve que dependiendo de la orientación su semejanza varía, siendo la más semejante la 1. Con el modelo isotrópico medio sucede lo mismo, la más semejante es la 1.

Tabla 3.8: Comparación entre los ensayos físicos y los simulados para cada orientación.

Modelo	Diferencia entre simulación y ensayo físico			Diferencia media
	1	2	5	
Ortotrópico	4.22%	6.61%	11.1%	7.30%
Isotrópico medio	4.22%	10.61%	6.52%	7.12%

Esta diferencia de resultados es debido a que el modelo utilizado en las simulaciones es un modelo simplificado que considera las piezas completamente sólidas cuando en realidad están hechas de hilos de plástico unidos. Además dichas uniones son muy diferentes entre hilos de una misma capa y entre las capas. Se considera que una diferencia media de 7.30% para el modelo ortotrópico y 7.12% para el isotrópico medio es un buen resultado.

El modelo isotrópico medio es más fácil de utilizar en las simulaciones por FEA ya que no es necesario tener en cuenta la orientación de fabricación de la pieza para establecer el sistema de coordenadas para el material. Por esta razón es aconsejable usar este modelo para piezas fabricadas mediante FDM sometido a cargas que provoquen deformaciones elásticas lineales. Sin embargo si la pieza supera el límite elástico es aconsejable utilizar el modelo ortotrópico, mucho más realista ya que la pieza podría fallar por rotura frágil o plastificar.

Después de analizar los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de las piezas fabricadas mediante tecnología FDM se debería considerar anisotrópico cuando superan el límite elástico en las simulaciones mediante FEA. Sin embargo, si el material actúa dentro de la zona elástica se puede considerar isotrópico utilizando como propiedades mecánicas la media de cada una de las tres direcciones ya que los resultados son equivalentes. Además el modelo isotrópico es mucho más fácil de utilizar ya que no es necesario modificar el modelo constitutivo en el *software* de FEA determinado las direcciones de fabricación.
- Cuando el límite elástico se supera es importante escoger una buena dirección de fabricación. Para incrementar la resistencia de las piezas éstas deberían ser orientadas de tal manera que las tensiones a tracción mayores estuvieran alineadas con los contornos más largos. También para evitar la rotura frágil estas tensiones máximas no debería ser paralelas a la dirección de fabricación.
- Además de la dirección de fabricación la anisotropía de las piezas fabricadas con tecnología FDM depende de otros factores de fabricación como: espesor de capa, ancho de hilos extruidos y distancia entre ellos, etc. Por esta razón las constantes mecánicas determinadas en este trabajo deben ser usadas con cautela en simulaciones y/o cálculos.

3.3.2. *Estudio de propiedades bajo cargas mecánicas dinámicas de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)*

Este estudio se realizó con el objetivo averiguar la influencia de distintos parámetros de fabricación en el comportamiento de probetas de PC fabricadas con tecnología FDM sometidas a cargas dinámicas. Se eligieron distintos parámetros de fabricación y de experimentación para llevar a cabo este objetivo mediante un diseño de experiencias (DOE, *design of experiments*).

Entorno teórico

El análisis dinámico–mecánico (DMA, *dynamic mechanical analysis*) es un análisis fundamental en la caracterización de materiales poliméricos que permite describir aspectos de su estructura interna (macromoléculas) con una serie de ensayos mecánicos. También es importante para conocer propiedades de piezas sometidas a cargas dinámicas como su frecuencia de resonancia y capacidad de amortiguamiento.

El DMA permite medir la respuesta elástica (*storage modulus*) y la viscosa (*loss modulus*) de una muestra bajo una carga oscilante. El *storage modulus* (G') está asociado a la máxima energía que es capaz de almacenar el material durante un ciclo de oscilación y está relacionado con su rigidez. El *loss modulus* (G'') está relacionado con la cantidad de energía que disipa el material o pieza en un ciclo de carga. La proporción entre el *loss modulus* y el *storage modulus* se conoce como el *damping factor* o $\tan(\delta)$ en donde δ es el ángulo de fase entre el esfuerzo aplicado y la respuesta de la muestra. El *damping factor* está relacionado con el grado de movilidad molecular de un polímero que tiene una influencia directa en la resistencia al impacto del material⁹⁷.

Elección de factores y DOE

El primer paso fue la selección de los parámetros de fabricación a estudiar. Esto se realizó consultando publicaciones previas, realizadas por otros autores^{50,87,88}, y por experimentaciones previas realizadas en el *IQS School of Engineering*. Se tuvieron en cuenta factores que afectaban el comportamiento mecánico, acabado superficial y coste.

Los parámetros de fabricación estudiados fueron:

- Diámetro de la boquilla: este parámetro establece el espesor de capa. El tamaño del hilo extruido (tanto de los contornos como del *raster*) viene determinado, en parte, por este factor debido al *swelling* que experimentan los polímeros al pasar por una boquilla (como ya se ha explicado en la sección 3.2.1). En este caso se dejó el valor por defecto que coincide con el doble del diámetro de la boquilla.
- Número de contornos: se trata del número de trayectorias que se fabrican en el perímetro de cada capa, tanto exteriores como interiores.
- *Raster to raster air gap*: la distancia entre los hilos que rellenan la parte interior de cada capa.

Estos parámetros están explicados en la sección 2.3.2 y se pueden ver ilustrados en la Figura 3.29.

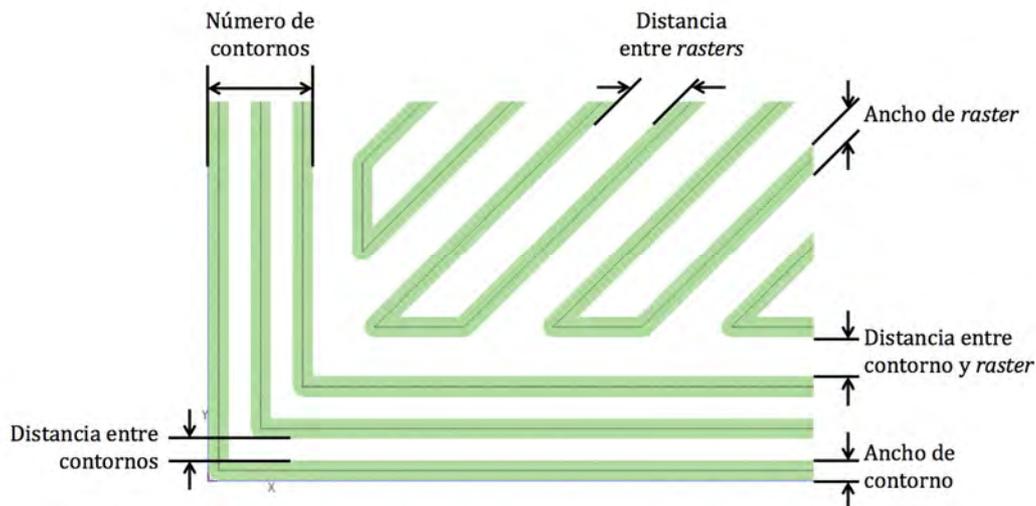


Figura 3.29: Esquema de los parámetros de las trayectorias de contorno y raster en el plano XY de la impresora.

Se decidió realizar el DOE utilizando tres niveles para cada factor, de esta manera se puede ver más claramente la influencia de los factores. La amplitud, la temperatura y la frecuencia se añadieron como factores al diseño de experiencias asumiendo que también influenciarían al comportamiento dinámico mecánico de las piezas. Primero se realizaron diversos barridos en frecuencia a temperatura constante para establecer el rango en el que las piezas tienen un comportamiento visco elástico lineal. Los valores de frecuencia establecidos para el DOE han sido elegidos para cubrir los rangos en aplicaciones en la industria, 40Hz y 100Hz. Esas son las frecuencias utilizadas mas habitualmente en los test de piezas para las industrias automovilísticas y aeronáuticas respectivamente. Se escogió un gran rango de temperaturas por dos razones: primero para cubrir rangos utilizados en la industria y para demostrar que es un factor importante a tener en cuenta para aplicaciones específicas. Como las piezas diseñadas para la industria automovilística se prueban a 60°C y la temperatura normal de trabajo es de 30°C se decidió que serían el nivel medio y bajo respectivamente. En la Tabla 3.9 se pueden ver los factores y sus niveles de experimentación utilizados en el DOE.

Tabla 3.9: Factores fijos y variables y sus niveles de experimentación

Factor	Símbolo	Nivel			Unidad
		-1	0	1	
Boquilla		T12	T16	T20	-
Espesor de capa	A	0.1778	0.254	0.3302	mm
Ancho de contornos		0.3556	0.508	0.6604	mm
Ancho de raster		0.3556	0.508	0.6604	mm
Número de contornos	B	1	5	10	-
Raster to raster air gap	C	0	0.25	0.5	mm
Amplitud	D	20	40	60	dm
Temperatura	E	30	60	100	°C
Frecuencia	F	1	40	100	Hz

Un DOE clásico de seis factores a tres niveles implica 729 (3⁶) experimentos. Por esta razón se decidió utilizar el método de Taguchi ya que reduce la cantidad de ensayos experimentales y permite una comprensión en profundidad de los efectos

de los parámetros del proceso y sus interacciones. Este método propone un DOE utilizando una matriz ortogonal dando una combinación específica de parámetros para cada experimento.

Al querer estudiar cada uno de los factores por separado y las interacciones entre los factores A y B, B y C y A y C (los tres factores de fabricación) el número de grados de libertad resultante es 24, entonces la matriz ortogonal más adecuada para el DOE es la L_{27} . La asignación de los factores e interacciones se realizó utilizando el grafo lineal correspondiente a la matriz ortogonal (Figura 3.30) para evitar una posible confusión entre factores e interacciones. Cada uno de los puntos en el grafo representa un factor y las líneas las interacciones entre ellos. El número en cada uno de ellos representa la columna a la que se asigna. Como se quería investigar, principalmente, el efecto de los parámetros de fabricación y sus interacciones los factores A, B y C fueron asignados a los nodos/columnas 1, 2 y 5 respectivamente. Los factores experimentales a las 9, 10 y 12. Finalmente la columna 13 se le asignó el error experimental.

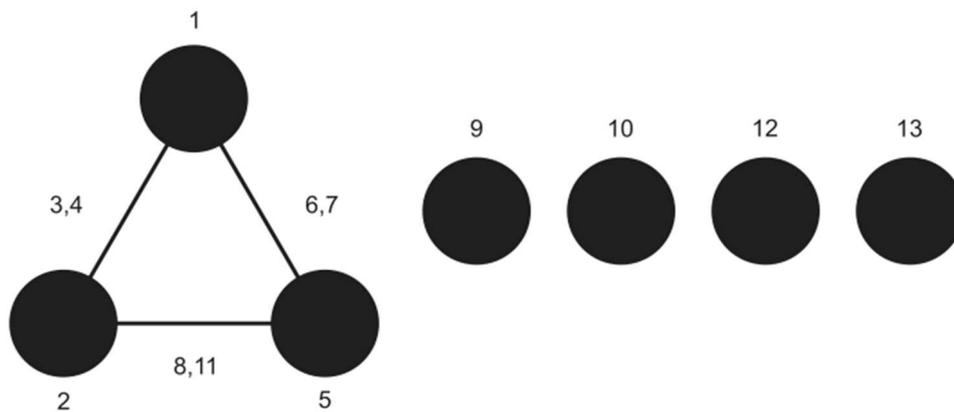


Figura 3.30: Grafo lineal de la matriz ortogonal L_{27} .

Esta configuración permite que todos los factores de fabricación estén colocados en la matriz ortogonal de la misma manera que lo estarían en un estudio factorial completo (están presentes todas las posibles combinaciones). La configuración final de la matriz de experimentos según el método de Taguchi se puede ver en la Tabla 3.10, dónde un -1 significa nivel bajo, 0 medio y 1 alto.

Tabla 3.10: Matriz experimental.

Exp #	Factor					
	A	B	C	D	E	F
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0	0	0	0
3	-1	-1	1	1	1	1
4	-1	0	-1	0	0	1
5	-1	0	0	1	1	-1
6	-1	0	1	-1	-1	0
7	-1	1	-1	1	1	0
8	-1	1	0	-1	-1	1
9	-1	1	1	0	0	-1
10	0	-1	-1	0	1	0
11	0	-1	0	1	-1	1
12	0	-1	1	-1	0	-1
13	0	0	-1	1	-1	-1
14	0	0	0	-1	0	0
15	0	0	1	0	1	1
16	0	1	-1	-1	0	1
17	0	1	0	0	1	-1
18	0	1	1	1	-1	0
19	1	-1	-1	1	0	1
20	1	-1	0	-1	1	-1
21	1	-1	1	0	-1	0
22	1	0	-1	-1	1	0
23	1	0	0	0	-1	1
24	1	0	1	1	0	-1
25	1	1	-1	0	-1	-1
26	1	1	0	1	0	0
27	1	1	1	-1	1	1

Las probetas se diseñaron de acuerdo con las especificaciones de la máquina de ensayos para materiales plásticos utilizando la mordaza de doble biga (*dual cantilever*, Figura 3.31). Las probetas de geometría cuadrada con unas dimensiones de 60x15x3mm fueron diseñadas con Solidworks® y los parámetros de fabricación fueron asignados con Insight®. Finalmente las probetas fueron fabricadas con PC mediante la impresora de Stratasys® Fortus 400mc®.

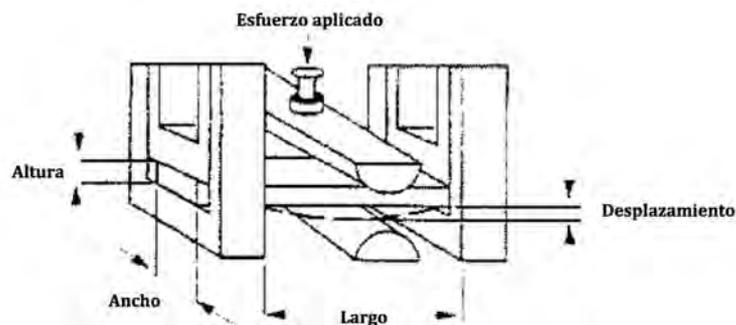


Figura 3.31: Esquema del funcionamiento de la mordaza de doble biga (*Dual Cantilever*)⁹⁷.

Procedimiento experimental

Se realizaron tres repeticiones de cada uno de los experimentos mostrados en la Tabla 3.10. Los experimentos se llevaron a cabo de acuerdo con los parámetros experimentales utilizando la máquina de ensayos DMA Q800 TA®. Por cada muestra se tomaron 50 mediciones de *storage modulus*, *loss modulus*, *damping factor* y rigidez, de las cuales se hizo la media.

Análisis estadístico

Para determinar los parámetros más influyentes en el DOE utilizando el método de Taguchi se utilizó la relación señal-ruido (*S/N*, *signal-to-noise*). La señal se refiere al valor de la propiedad deseable y el ruido a su variación. Para cada una de las propiedades, la relación *S/N* se ha calculado mediante la ecuación 3.10. El objetivo del estudio es ver los factores que maximizan las propiedades estudiadas con una variación mínima.

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.10)$$

Dónde:

- η es la relación señal ruido.
- n el número de experimentos realizados en el nivel i .
- y es el valor medido de la propiedad.

Si la relación entre la señal y el ruido es lineal basta con buscar la relación *S/N* máxima para obtener los factores óptimos y sus niveles para cualquier propiedad. Si, por lo contrario, no existe esta relación lineal se deber realizar un enfoque de respuesta dual. Encontrar los factores y sus niveles que maximizan la señal y minimizan el ruido.

Resultados

Se realizó un análisis de varianza utilizando los valores de la señal y ruido para obtener la influencia de cada parámetro. Los parámetros cuya influencia fue inferior al 10% se consideraron no significativos. Se estudió el efecto de los niveles para cada parámetro en la señal y el ruido para así encontrar la influencia de los distintos niveles en cada una de las propiedades estudiadas (sección 9.2).

Los resultados de las señales y el ruido de cada experimento para cada propiedad se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Resultados de la señal y el ruido para cada una de las propiedades estudiadas: *storage modulus*, *loss modulus*, *damping factor* y rigidez para cada una de las experiencias.

Exp #	<i>Storage modulus</i> /MPa		<i>Loss modulus</i> /MPa		<i>Tan Delta</i>		Rigidez/N/m	
	Señal	Ruido	Señal	Ruido	Señal	Ruido	Señal	Ruido
1	4307.55	83.57	50.94	2.34	1.18E-02	7.61E-04	137304.17	3798.89
2	1503.80	27.58	8.22	0.33	5.46E-03	1.19E-04	46145.17	143.78
3	994.47	17.01	9.13	10.53	9.08E-03	1.04E-02	30946.01	262.39
4	4642.97	92.64	48.64	4.54	1.05E-02	1.01E-03	145505.78	1952.42
5	2389.43	60.07	37.10	3.99	1.55E-02	1.28E-03	72350.14	822.65
6	2349.01	70.51	16.30	2.41	6.94E-03	1.03E-03	72573.96	1531.46
7	4812.50	57.53	87.20	7.01	1.81E-02	1.58E-03	145707.88	2778.07
8	4049.65	50.32	57.87	13.93	1.43E-02	3.40E-03	121029.42	838.09
9	3414.81	63.70	55.70	3.06	1.63E-02	1.07E-03	105219.32	1254.42
10	4146.94	214.03	36.29	3.97	8.74E-03	6.64E-04	135939.13	1828.31
11	2100.89	74.69	35.81	14.2	1.69E-02	6.05E-03	70925.54	1957.24
12	1472.19	23.89	11.17	0.90	7.60E-03	7.30E-04	50575.76	828.78
13	4810.25	135.09	83.71	5.71	1.74E-02	7.52E-04	169298.30	741.11
14	3349.01	63.42	23.51	11.63	7.03E-03	3.52E-03	111889.32	557.69
15	2601.91	25.72	29.35	10.82	1.13E-02	4.07E-03	86691.02	463.23
16	5499.38	235.36	53.03	10.00	9.64E-03	1.81E-03	184319.68	5961.83
17	4119.98	254.23	67.37	4.09	1.64E-02	1.38E-03	140974.13	4304.66
18	4844.85	169.81	134.26	2.43	2.77E-02	6.49E-04	155951.75	2992.16
19	4687.27	93.84	62.05	8.12	1.33E-02	1.86E-03	206276.92	3479.37
20	2068.57	41.09	18.51	0.63	8.95E-03	3.36E-04	87157.38	2379.04
21	1898.95	34.33	20.37	3.30	1.07E-02	1.61E-03	78919.83	2037.76
22	4801.88	86.22	28.23	1.12	5.88E-03	2.70E-04	203678.65	1049.33
23	3808.77	71.73	56.12	19.95	1.48E-02	5.54E-03	160916.13	1067.33
24	3398.84	47.86	63.08	7.45	1.86E-02	2.38E-03	136557.13	558.07
25	5252.58	142.59	75.70	7.93	1.44E-02	1.84E-03	226104.70	6657.85
26	5350.96	104.12	107.71	4.80	2.01E-02	1.25E-03	216505.57	2079.09
27	5162.55	27.61	36.92	3.54	7.15E-03	6.51E-04	205212.97	1508.72

Los resultados muestran que el comportamiento elástico, representado por el *storage modulus* y la rigidez, de las muestras no está influenciado por los factores experimentales mientras que el comportamiento viscoso, representado por el *loss modulus* y el *damping factor* o *tan delta*, sí. En la Tabla 3.12 se presentan los factores más significantes, en orden, y los niveles en los que la señal es mayor y el ruido menor. Estos factores son los que se tuvieron en cuenta al analizar los resultados.

Tabla 3.12: Nivel del factor para una respuesta optima y factores significativos en orden de importancia.

Factor	<i>Storage modulus</i>		<i>Loss modulus</i>		<i>Damping factor</i>		Rigidez	
	Señal	Ruido	Señal	Ruido	Señal	Ruido	Señal	Ruido
A	3	1	2	1	2	3	3	1
B	3	1	3	1	3	3	3	2
C	1	3	1	3	2	1	1	3
D	3	1	3	1	3	1	3	3
E	1	2	1	3	1	2	2	3
F	3	3	1	1	1	1	3	2
Significantes	B, C	A, C, B	B, D	F, C	D, B, E	F, C, D	C, B, A	B, C

En la Figura 3.32 se puede ver el efecto de los distintos parámetros y sus niveles en el *storage modulus*. El número de contornos seguido de el *raster air gap* son los dos factores más influyentes en la señal (Tabla 3.12). Su máximo se obtiene cuando el número de contornos es máximo y la distancia entre *rasters* es mínima (cero en este caso). La menor variación se produce cuando se utiliza la boquilla de menor diámetro, el mínimo número de contornos y la máxima distancia entre *rasters*. Se puede ver que hay una contradicción entre aumentar la señal y minimizar el ruido causada por el número de contornos y el *raster to raster air gap* por lo que se debe realizar un análisis de la respuesta dual.

El número de contornos influye más en la señal que en el ruido. Entonces para maximizar el *storage modulus* con la menor variabilidad es aconsejable que esté en el nivel máximo. El segundo factor que presenta la contradicción es el *raster to raster air gap*, para obtener la mejor señal se observó mediante los resultados de las experiencias 7 y 9 (Tabla 3.11) que la distancia debería ser cero.

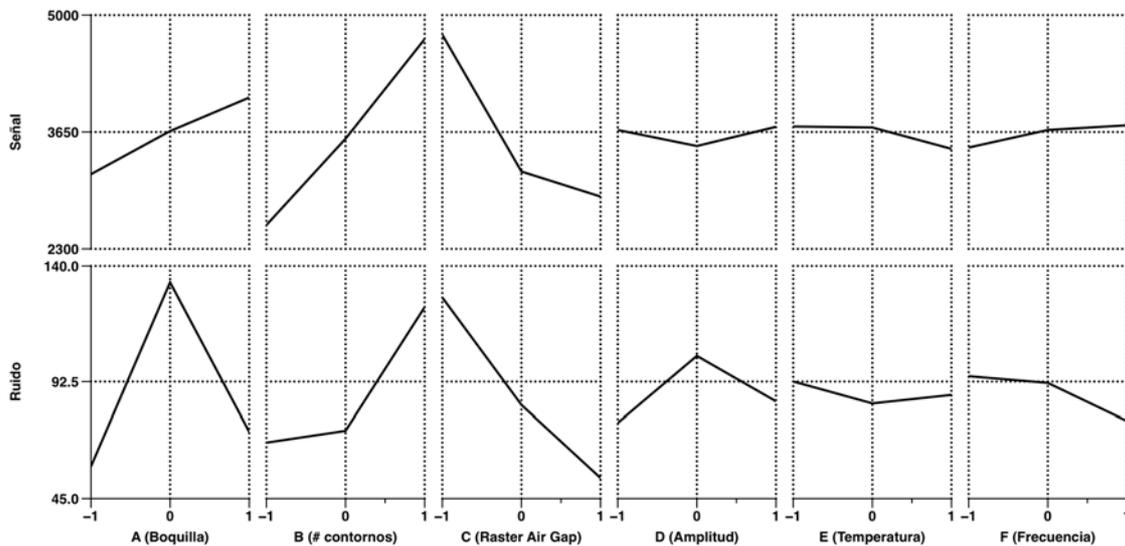


Figura 3.32: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del *storage modulus*.

El efecto de los parámetros estudiados y sus niveles en el *loss modulus* se puede observar en la Figura 3.33. Esta propiedad se ve afectada tanto por factores de fabricación como experimentales. La señal más grande se obtiene cuando son mayores la amplitud y la cantidad de contornos. Por el otro lado si el *raster to raster air gap* es el máximo y la frecuencia mínima o intermedia la variabilidad es mínima. En este caso no existe ninguna contradicción entre los factores y niveles que maximizan la señal y minimizan el ruido por lo que la elección de los niveles de los factores se realiza directamente.

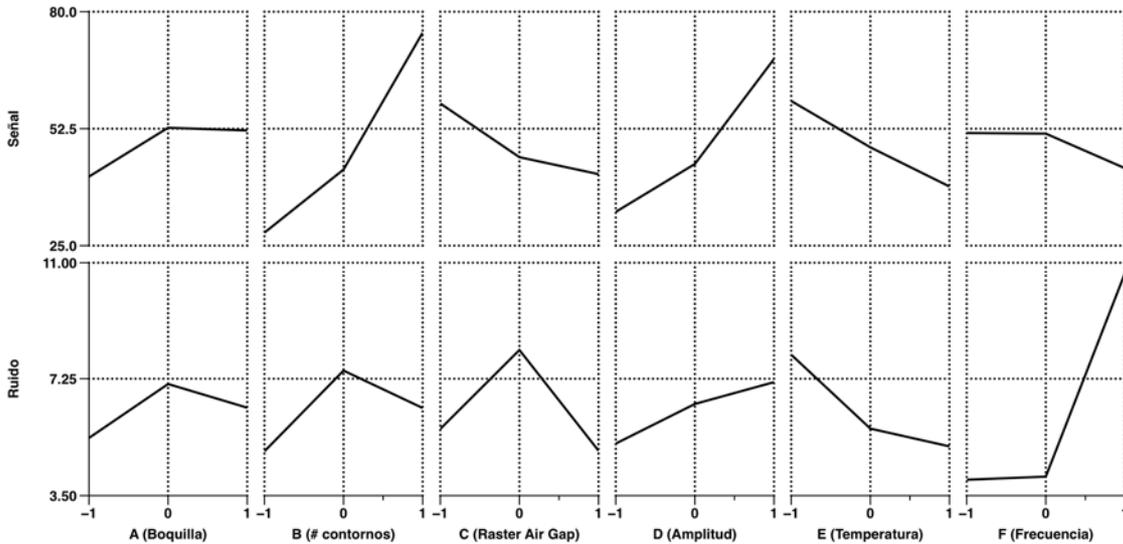


Figura 3.33: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del *loss modulus*.

Los efectos de los parámetros y sus niveles en el *damping factor* se puede ver en la Figura 3.34. Al igual que el *loss modulus* esta influenciado tanto por factores de fabricación como experimentales. Para conseguir una señal máxima la amplitud y el número de contornos tienen que ser máximos y la temperatura mínima. Para minimizar su variabilidad la frecuencia, el *raster to raster air gap* y la amplitud tienen que actuar en sus niveles mínimos. En el caso de esta propiedad aparece una contradicción con la amplitud: si está en el máximo nivel da la respuesta mayor pero también la variación mas grande. Si actúa en el nivel mínimo pasa lo contrario por lo que, otra vez, es necesario un análisis de la respuesta dual. Observando la tabla de resultados (Tabla 3.11) se observa que la mejor combinación se obtiene el máximo número de contornos y la mínima distancia entre *rasters* (experiencia 7).

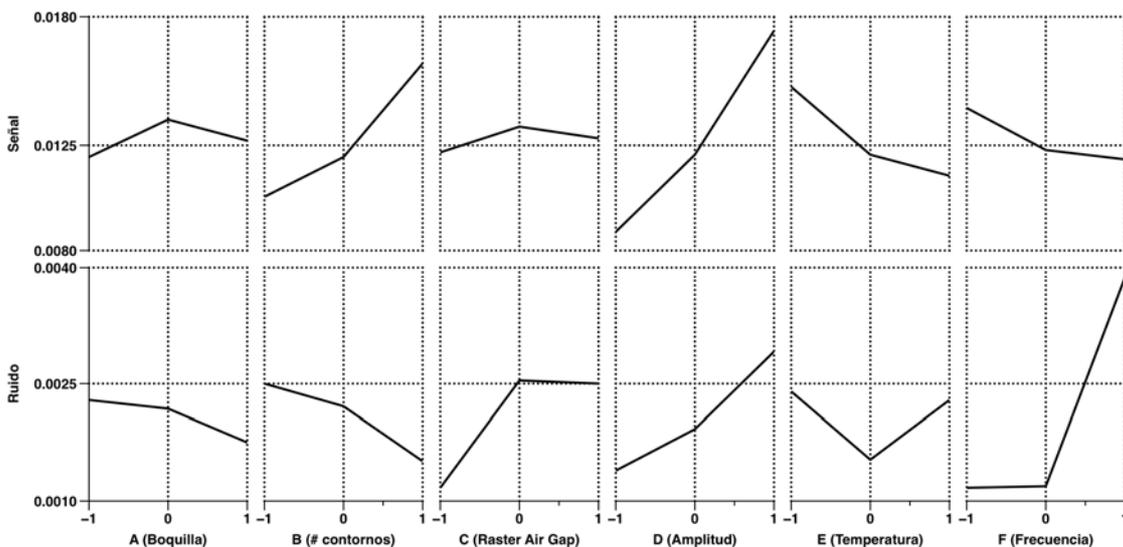


Figura 3.34: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido del *damping factor*.

La Figura 3.35 presenta los efectos de los distintos parámetros y sus niveles en la rigidez de las piezas. Para tener una rigidez máxima la distancia entre hilos

extruidos en el interior de la pieza debe ser cero y el número de contornos y tamaño de boquilla máximo. Por otro lado, para minimizar su variación el número de contornos debe estar en su nivel intermedio y la distancia entre hilos debe ser máxima. Esta propiedad también presenta una contradicción para maximizar su señal y minimizar su variabilidad debido al número de contornos y al *raster to raster air gap*.

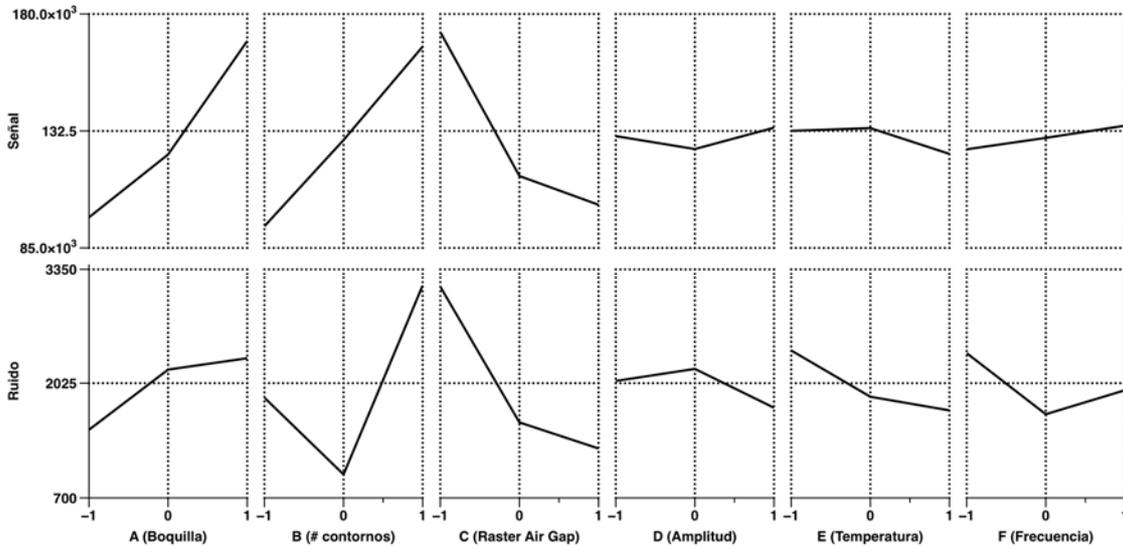


Figura 3.35: Efecto de los distintos parámetros y sus niveles en la señal y el ruido de la rigidez.

Como el tamaño de la boquilla no afecta la variabilidad para obtener una máxima rigidez se debe utilizar la mayor ya que es el nivel que maximiza la señal. Los otros dos parámetros de fabricación afectan la señal y el ruido a la vez y en niveles contradictorios. Los experimentos 22, 24, 25 y 26 (Tabla 3.11) representan todas las posibles combinaciones de estos dos factores manteniendo la boquilla al nivel máximo. El experimento 24 presenta la señal y el ruido más bajo, el 25 presenta la situación opuesta por lo que estas combinaciones se descartan. Los experimentos 22 y 26 presentan la mejor relación señal ruido. El 26 tiene una señal superior que el 22 pero su variabilidad también es mayor, entonces para obtener la mayor señal con la menor variabilidad los niveles se deben establecer como en la experiencia 22; es decir un número de contornos intermedio y la mínima distancia entre *rasters*.

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran que los únicos factores que afectan a la respuesta elástica son los de fabricación. En cambio tanto los factores de fabricación como los experimentales afectan al comportamiento viscoso.

El *storage modulus* representa la parte elástica del comportamiento mecánico de los materiales visco-elásticos. Utilizar un tamaño pequeño de boquilla significa que el espesor de capa es pequeño y, en nuestro caso, que el ancho de los hilos extruidos también. El espesor de capa afecta a la unión entre capas mientras que el ancho de los hilos a la unión entre ellos en una misma capa. La cantidad de capas fabricadas en una pieza determina la diferencia de temperaturas entre las capas

inferiores de la pieza con las que se fabrican encima, a más capas, más diferencia. Entonces para obtener un mejor comportamiento elástico la boquilla debería ser la mas grande. Una unión débil entre capas implica una resistencia mecánica baja ya que la distorsión sucede debido a una gran diferencia de temperatura en las capas inferiores de las piezas. A medida que el espesor de capa aumenta son necesarias menos capas por lo que este efecto se minimiza y la resistencia mecánica aumenta²⁶. En cambio, si el tamaño del hilo extruido es pequeño, el gradiente de temperatura entre el exterior del hilo y su interior es menor cosa que hace que la calidad de la unión entre hilos en una misma capa sea mejor, esto resulta en un *storage modulus* mayor. Esta contradicción muestra por que el tamaño de la boquilla no tiene significancia en esta propiedad ya que si es grande mejora la unión entre capas y si es pequeño mejora la unión entre hilos en una misma capa.

Los contornos actúan como fibras de refuerzo debido a su orientación en la pieza con respecto a la deformación aplicada a la muestra. Entonces tiene sentido que a más contornos la muestra sea más elástica. De la misma manera, una distancia entre *rasters* mínima (o cero) hace el interior de la pieza más continuo (menos vacíos) y, por lo tanto, la muestra es capaz de regresar más fácilmente a su estado normal después de la deformación.

El *loss modulus* de las piezas estudiadas no está únicamente afectado por parámetros de fabricación. Aun así se puede decir que el número de contornos tiene un efecto significativo en la *loss modulus*: un gran número de contornos y una distancia entre *rasters* grande incrementan su valor y reducen su variabilidad. Como se ha dicho antes los contornos actúan como fibras de refuerzo y la distancia entre *rasters* positivas convierte las piezas en más flexibles y, por consiguiente, aumenta su habilidad para absorber impactos.

La misma situación se presenta con el *damping factor* ya que lo afectan tanto factores de fabricación como experimentales. La amplitud, frecuencia y temperatura juegan un papel importante en el mecanismo de disipación de energía de las cadenas poliméricas. El número de contornos, como ya se esperaba, tiene el mismo efecto que en el *storage* y *loss modulus*. Cuando no existe distancia entre *rasters* el *damping factor* es menos variable, igual que con el *loss modulus*.

La rigidez, al igual que el *storage modulus*, solo se ve afectada por factores de fabricación. La diferencia es que el diámetro de la boquilla sí que influencia. A mayor diámetro mejor rigidez. Como era de esperar la fuerza de unión entre capas e hilos de la misma capa afecta a la rigidez y al *storage modulus* de la misma manera. La razón por la que la máxima rigidez se produce cuando el número de contornos está en el nivel medio es debido a la combinación de los demás factores.

Un tamaño de boquilla (o espesor de capa) grande con un gran número de contornos ocupa prácticamente todo el espacio interior de la probeta y por consiguiente está compuesta básicamente por contornos. Esta es más sólida y la rigidez aumenta.

Después del estudio del comportamiento dinámico se llega a las siguientes conclusiones:

- Las propiedades dinámicas de las piezas de PC fabricadas mediante FDM están afectadas por los parámetros de fabricación y de experimentación.
- Los parámetros de fabricación permiten controlar el comportamiento elástico ya que los parámetros experimentales no afectan este comportamiento. Por el contrario los factores experimentales si que mostraron un gran impacto en el comportamiento viscoso de las probetas.
- El número de contornos es el parámetro mas influyente de todos ya que afectó a todas las propiedades estudiadas, tanto elásticas como viscosas. El valor de todas ellas es mayor cuando hay mas contornos. Esto es debido a que los contornos fortalecen las partes incrementando su comportamiento elástico.
- Para fabricar piezas más elásticas y rígidas es necesario hacerlas lo más sólidas o continuas posibles y, además, orientar los hilos extruidos en la dirección adecuada para hacerlos actuar como fibras de refuerzo.
- Aunque es probable que las magnitudes de las propiedades varíen al utilizar otros materiales con la tecnología FDM, el efecto de los distintos factores no lo hará. Por tanto el resultado de este estudio puede ser extendido al uso de otros materiales para fabricar con tecnología FDM.

4. Acabado superficial y coste de piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)

En este capítulo se presentan los estudios realizados sobre el acabado superficial y coste de piezas fabricadas con tecnologías AM prestando especial atención a la tecnología FDM. Estas dos cualidades de las piezas son de una gran importancia si se quieren fabricar piezas para cualquier uso. Este capítulo permitirá desarrollar la metodología para escoger cuantitativamente la mejor orientación de una pieza final fabricada con FDM teniendo en cuenta el comportamiento mecánico, el acabado superficial y su coste.

El capítulo está dividido en dos bloques, el acabado superficial y el coste, los dos con la misma estructura. Primero se explica, en cada uno de ellos, como afectan los distintos parámetros de fabricación del moldeo por inyección a cada una de ellas para ver las similitudes y diferencias a las tecnologías AM. Finalmente se explicarán como afectan los distintos parámetros de fabricación por tecnologías AM y, en especial, FDM a cada una de las dos propiedades.

4.1. Acabado superficial

Cualquiera que sea el proceso de fabricación, no es posible obtener una superficie absolutamente lisa y plana. Los elementos o partes de máquinas tienen irregularidades superficiales debido a su fabricación. Estas irregularidades son responsables en gran medida de la apariencia de la superficie y de su idoneidad a ser utilizadas para su correspondiente aplicación final. Para según que aplicaciones una rugosidad alta es buena (intercambiadores de calor) y para otras lo es baja (piezas que deben ajustar)⁹⁸.

4.1.1. Acabado superficial de piezas fabricadas por moldeo por inyección

El acabado superficial de las piezas producidas mediante moldeo por inyección está básicamente condicionado por el acabado superficial del molde. Aún así los parámetros de proceso también juegan un gran papel en el acabado superficial siendo los más importantes la temperatura del polímero inyectado, la temperatura del molde y la presión de inyección.

Los principales defectos superficiales debidos al diseño del molde son los siguientes:

- **Rebasas:** este defecto viene dado por una mala unión entre las dos partes del molde y una presión de inyección grande. Cuando el polímero fundido llega a la cavidad y la llena se escapa por la línea de separación que existe entre las dos partes.
- **Mala separación de los conductos de alimentación:** un mal diseño de los conductos que transportan el polímero fundido desde la boquilla a la cavidad del molde puede generar una marca donde la pieza se separa del material que hay en el conducto, generando un mal acabado superficial.
- **Línea de soldadura:** es el plano donde dos frentes de flujo de plástico fríos se encuentran (Figura 4.1). Este defecto se produce si la inyección de una

pieza se realiza por dos puntos distintos o si la geometría del molde provoca una separación del flujo. Cuando los dos flujos convergen en la pieza dejan una marca parecida a la de una soldadura. Normalmente es debido a una temperatura baja del polímero.

- **Marcas de flujo:** marcas concéntricas que aparecen siguiendo el flujo del polímero dentro del molde (Figura 4.1). Están causados básicamente por una diferencia de temperatura grande entre el polímero y el molde. El polímero se enfría en las superficies en contacto con el molde, su viscosidad aumenta y una vez empieza a solidificar es empujado por el polímero fundido que se sigue inyectando.
- **Marcas de hundimiento:** La superficie del producto moldeado se derrumba ya que al entrar el polímero fundido en el molde el material en contacto con las paredes se enfrían más rápido que el interior, provocando que éstas se derrumben por falta de soporte. Es causado por presiones bajas, tiempos de enfriamientos cortos y secciones de piezas gruesas.

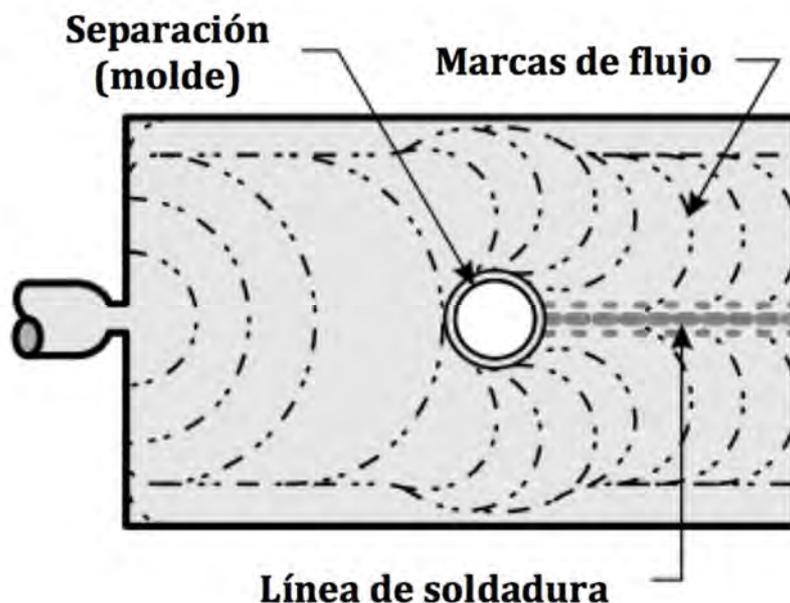


Figura 4.1: Ejemplo de la formación de líneas de soldadura y marcas de flujo⁹⁹.

Uno de los factores más importantes en el acabado superficial de las piezas es el ciclo de enfriamiento del molde determinado por el tiempo de enfriamiento y la diferencia de temperaturas entre el molde y el polímero inyectado. Estos dos factores están influenciados por el diseño y el número de canales de refrigeración, la presión de inyección, la temperatura del polímero, la temperatura del fluido refrigerante (normalmente agua)⁹⁹ y, sobretodo, las características termodinámicas del polímero inyectado. En la Figura 4.2 se puede ver el efecto de la temperatura del molde en piezas de Nylon 6/6. Las temperaturas bajas causan paredes más gruesas y amorfas mientras que temperaturas más altas proporcionan paredes mas definidas i delgadas.

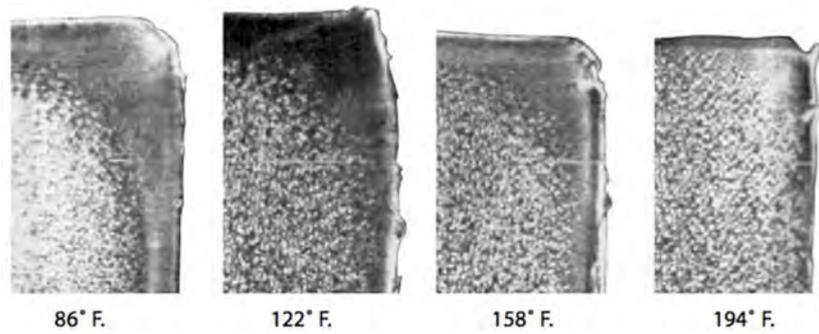


Figura 4.2: Efectos de la temperatura del molde sobre partes de Nylon 6/6⁹⁹.

Los dos defectos principales en el acabado superficial en las piezas fabricadas por inyección debidos al ciclo de refrigeración son el encogimiento (*Shrinkage*) y la deformación (*Warpage*).

El *Shrinkage* es la reducción de volumen asociada al enfriamiento del polímero desde su estado fundido a temperatura ambiente. La mayor parte de la reducción del volumen (95%)¹⁰⁰ se da en el molde. Por esa razón la cavidad del molde se sobredimensiona para conseguir que la pieza final tenga las dimensiones requeridas. Una alta diferencia de temperatura entre el polímero y el molde implica un *Shrinkage* superior, al igual que una presión y un tiempo de enfriamiento superior reduce el fenómeno¹⁰¹.

El *Warpage* es la deformación de las piezas causadas por el efecto del enfriamiento irregular de la pieza. Puede estar causado por diferentes factores como, por ejemplo, un *Shrinkage* no uniforme en la pieza. Esto se produce debido a que las distintas partes del molde no se encuentran a la misma temperatura que generan tensiones internas que deforman la pieza (Figura 4.3). La manera más habitual de evitar el *Warpage* es la de diseñar el molde en el que el enfriamiento se dé en todas las secciones de la pieza por igual, tarea difícil para piezas de geometría compleja.

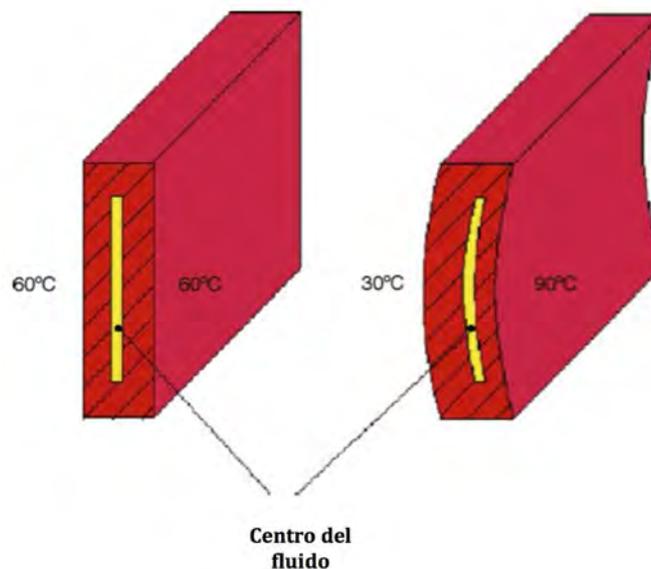


Figura 4.3: Efecto de la diferencia de temperaturas en distintas secciones del molde. Se produce *Warpage* y que el plástico no solidifique en el centro¹⁰⁰.

Las piezas fabricadas con tecnología AM también sufren de *Shrinkage* y *Warpage* pero que afecta más a la exactitud dimensional que al acabado superficial^{93,102-105} aunque dependiendo de la geometría se podría considerar ambas. Sin embargo el acabado superficial de las piezas fabricadas mediante tecnología AM está afectada por otros factores tal y como se explica en el apartado siguiente.

4.1.2. Acabado superficial en tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Cuando se habla de acabado superficial en tecnologías AM se debe hacer la distinción entre acabado superficial y precisión dimensional. El acabado superficial se refiere a que una superficie tenga las características adecuadas para una aplicación particular. En algunos casos el proceso de acabado superficial puede tener la finalidad adicional de lograr que el producto entre en especificaciones dimensionales. En este trabajo se entiende que el acabado superficial viene dado por la rugosidad de una pieza y la precisión dimensional por el cumplimiento con las especificaciones de tolerancias. Esta distinción se hace ya que en diversas publicaciones se estudian ambos o se confunde cual de las dos se ha estudiando.

El acabado superficial de las distintas tecnologías AM ha sido estudiado extensamente. Está influenciado por el material con el que se fabrica y por los parámetros de fabricación, tanto comunes como propios, de cada tecnología por lo que depende de la habilidad del operario seleccionar los adecuados¹⁰⁶.

La principal causa del buen o mal acabado superficial de piezas fabricadas mediante AM es el llamado efecto escalera (*staircase effect*) introducido por P. Pandey en 2003³³. Este efecto es causado por la propia técnica de fabricación ya que la pieza se fabrica apilando capas, la geometría en el plano vertical no es exacta y esto resulta una superficie rugosa. El *staircase effect* depende principalmente del espesor de capa y la forma de la superficie envolvente y siempre está presente en cualquier pieza fabricada mediante tecnologías aditivas³⁴. Es obvio que si el grosor de capa es pequeño el *staircase effect* disminuye y, por lo tanto, el acabado superficial mejora como se puede ver en la Figura 4.4.

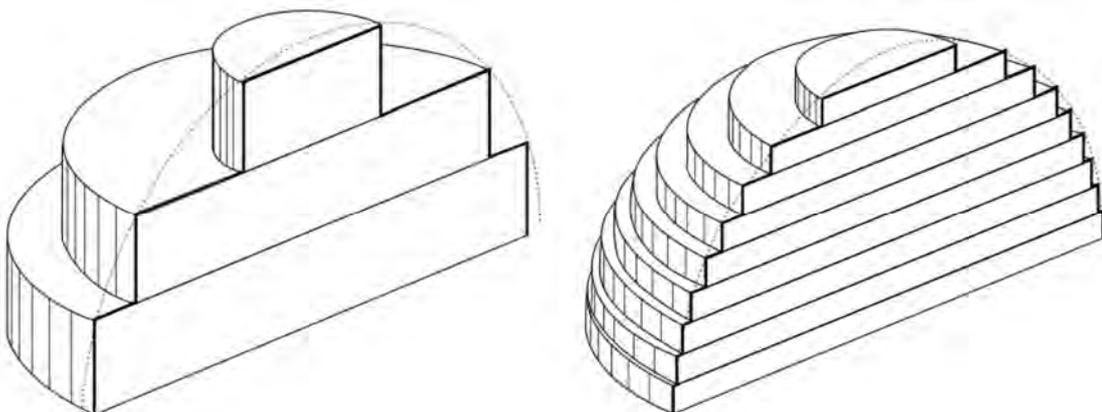


Figura 4.4: Efecto del grosor de capa en el *staircase effect*. A la izquierda un espesor de capa grande reduce el acabado superficial y el tiempo de fabricación. A la derecha un espesor de capa pequeño mejora el acabado superficial i aumenta el tiempo de fabricación³⁵.

Dependiendo del ángulo que forman la dirección de fabricación y la normal a la superficie envolvente el *staircase effect* es mas o menos pronunciado como se puede ver en la Figura 4.5.

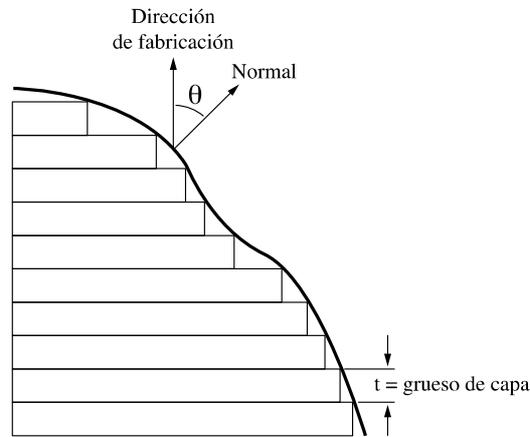


Figura 4.5: Esquema del *staircase effect* en los procesos AM.

Para minimizar el *staircase effect* existen distintas estrategias. Una de ellas es orientar la pieza de manera que la dirección de fabricación (dirección en la que se apilan las capas) haga que la forma de la superficie envolvente provoque la estratificación mínima^{27,36-38}. En la Figura 4.6 se puede ver que para una misma geometría escoger una dirección de fabricación u otra mejora o empeora el *staircase effect*. En la Figura 4.6.a el ángulo entre la dirección de fabricación, vertical, y la normal a la superficie envolvente es pequeño y la estratificación es mayor, en cambio en la Figura 4.6.b el ángulo es mayor (la dirección de fabricación es horizontal) y el acabado superficial es mejor.

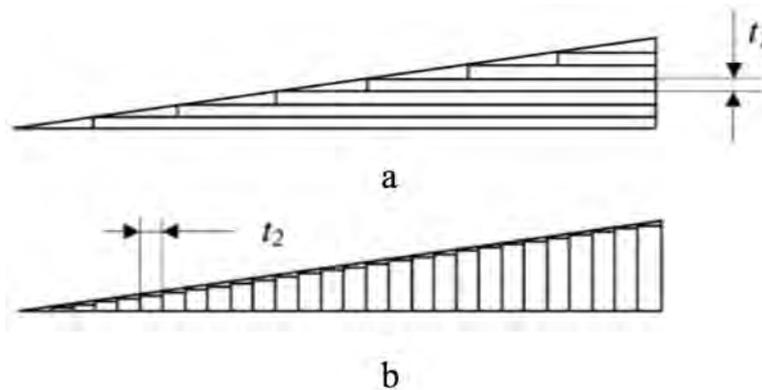


Figura 4.6: Efecto de la dirección de fabricación en el *staircase effect*. a) La dirección de fabricación es vertical y se usa un espesor de capa t_1 . b) La dirección de fabricación es horizontal y se usa un espesor de capa t_2 . El espesor t_1 es menor que el t_2 ¹⁰⁷.

La Figura 4.6 muestra que no siempre el espesor de capa menor disminuye el *staircase effect* sino que hay que tener en cuenta la orientación la pieza. Dependiendo del ángulo que formen la normal a la superficie y la dirección de fabricación la elección de un espesor de capa afecta mucho al acabado superficial^{38,48,49}. En la Figura 4.6.a la dirección de fabricación es vertical y el espesor de capa utilizado t_1 , mientras que en la Figura 4.6.b la dirección es horizontal y el espesor t_2 . Si se compararan las dos se puede ver que el resultado

utilizando el espesor t_1 , siendo menor que t_2 , es peor debido a la orientación de la pieza.

Otra opción para mejorar el *staircase effect* es el llamado *adaptive slicing*. En este método un algoritmo analiza la geometría de la superficie envolvente del modelo en 3D y determina automáticamente el valor óptimo de grosor a lo largo de la dirección de fabricación. Así donde la curvatura de la superficie provocaría un aumento de rugosidad se disminuye el ancho de capa y, viceversa, donde no lo provocaría se aumenta para disminuir el tiempo de fabricación (Figura 4.7). Esta técnica presenta una limitación importante: la altura de capa no puede tener un valor cualquiera ya que viene limitado por la tecnología AM que se utilice. Es una técnica especialmente útil para SLA y SLS donde el ancho de capa se puede modificar mediante la intensidad de la luz o la potencia del láser pero no para FDM donde viene dada por el diámetro de la boquilla aunque se han realizado varios intentos para poder variar el espesor de capa^{108,109}.

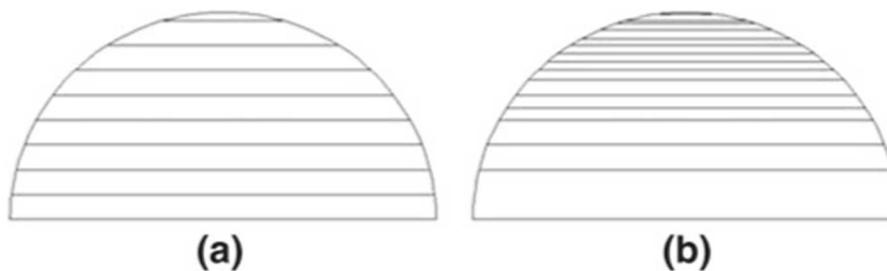


Figura 4.7: Ejemplo del *adaptive slicing*. a) *Slicing* uniforme. b) *adaptive slicing*¹¹⁰.

Otro parámetro de fabricación que influyen pero en menor modo al acabado superficial de las piezas fabricadas con tecnología FDM son los estilos de fabricación (*build style*) que, como ya se ha explicado en la sección 2.3.2, incluye el *raster to raster air gap* y el *contour to raster air gap*^{7,49}. La manera como los hilos del interior de la pieza están dispuestos hacen de estructura a los de las capas superiores. Si están muy separados los hilos de las capas superiores se hunden y provocan irregularidades en las caras superiores (Figura 4.8).

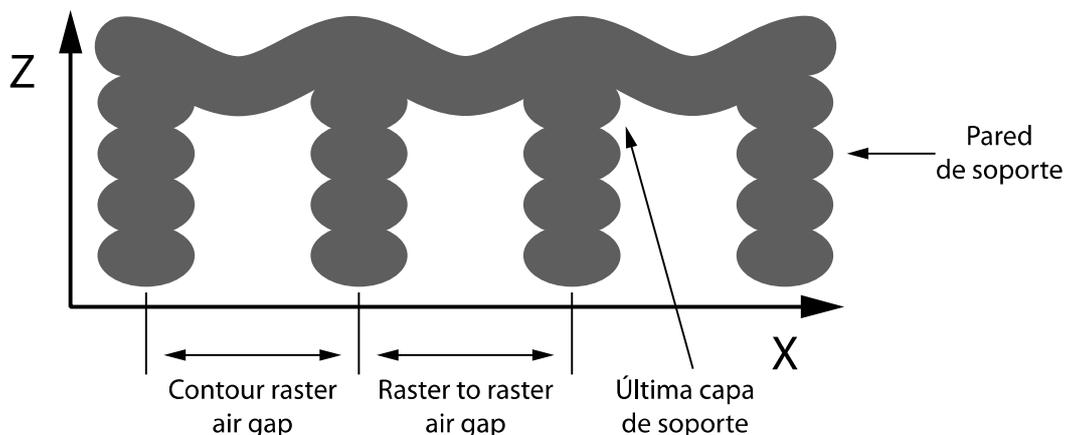


Figura 4.8: Esquema del acabado superficial de la superficie superior de piezas fabricadas con FDM. Se observa el efecto de hundimiento de la distancia entre hilos extruidos del interior de la pieza en el acabado de las caras superiores de la pieza.

Otro factor importante que afecta al acabado superficial de las piezas es el uso de soporte. Las estructuras de soporte son esenciales para algunas secciones de las capas que no tienen ningún apoyo material por debajo de ellas y, por lo tanto, se derrumbarían al ser fabricadas. La eliminación de estas estructuras puede dejar rebabas o dañar la superficie de la pieza al arrancar material por lo que depende del tipo de soporte utilizado y de la pericia del usuario al eliminarlo. Este problema se minimiza con la utilización de soportes solubles que no requieren de la manipulación manual para ser eliminados⁵².

La precisión dimensional de las piezas fabricadas mediante FDM está afectada por la precisión de la máquina. En el plano XY (el de fabricación) la pieza será más o menos exacta dependiendo de la máquina con la que se fabrique. En cambio en la dirección Z, o dirección de fabricación, la exactitud viene dada por el espesor de capa ya que para que la altura sea la deseada debería ser múltiplo del espesor de capa⁹³. También influyen otros parámetros como la temperatura de la cámara de fabricación¹¹¹ (los cambios de temperatura bruscos comportan cambios debido a la contracción del material), la anchura del hilo de contorno y el número de contornos utilizados¹¹².

4.2. Coste

Se debe aclarar que en este trabajo se trata el tema del coste o economía de producción de bienes directos; no la economía del sistema de producción por AM. Otra puntualización que es necesaria es que en esta sección el coste se entiende como el coste de fabricación de una pieza, es decir, sin tener en cuenta el coste de la maquinaria, instalaciones, uso de energía, etc. Ya que tanto para las técnicas de fabricación tradicional como para las tecnologías AM estos costes se pueden considerar equivalentes y/o iguales y, además, tienen una contribución pequeña al coste total¹¹³.

4.2.1. Coste de producción de piezas de plástico moldeo por inyección

El coste de producir piezas mediante moldeo por inyección, dada una geometría, viene dado por: el coste de fabricación del molde, la cantidad de material por pieza y el tiempo de fabricación por unidad. Una vez diseñada la pieza a fabricar, el coste del molde y de material por pieza queda determinado y no varía a lo largo de la fabricación. Por lo que la única manera de abaratar el precio de una pieza mediante la reducción del tiempo unitario de fabricación.

El tiempo unitario de fabricación en el moldeo por inyección viene dado por el ciclo productivo en el cual se produce una o más piezas dependiendo de si el molde tiene más de una cavidad o no. Cuantas mas piezas se produzcan por ciclo mas económica será cada pieza. Este tiempo está comprendido desde que se expulsa una pieza hasta que se expulsa la siguiente.

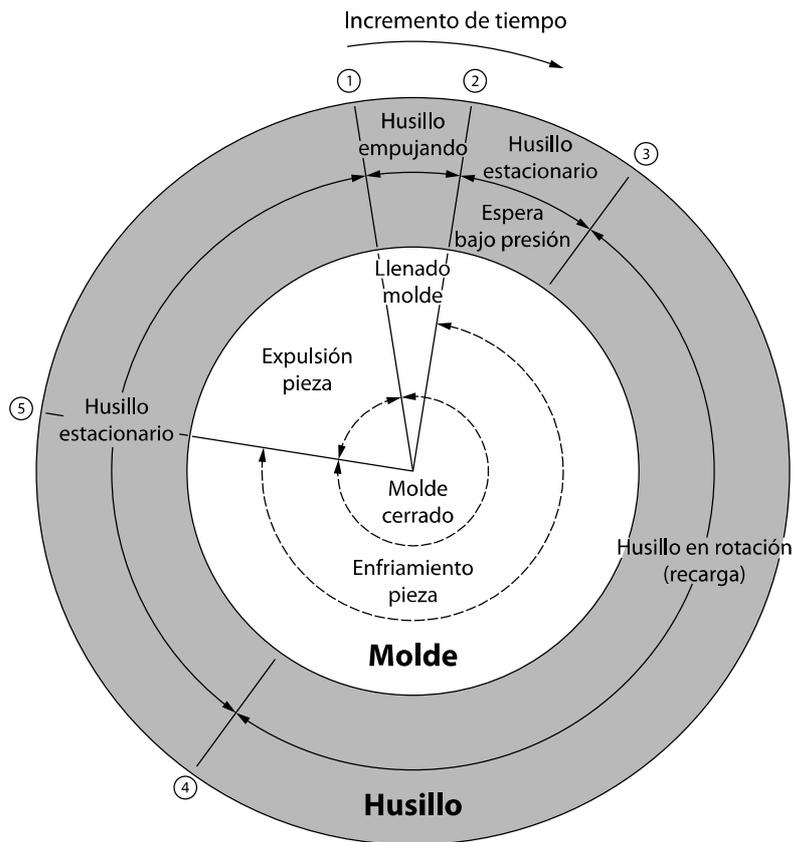


Figura 4.9: El ciclo de inyección de plástico con las distintas etapas señaladas⁷¹.

Las tres etapas de un ciclo productivo del moldeo por inyección son la etapa de inyección (Figura 4.9.1-2), la de enfriamiento (Figura 4.9.2-5) y la de expulsión (Figura 4.9.5-1). El control preciso de estas etapas afecta a la calidad y a la rentabilidad de las piezas fabricadas. El precio de cada parte está basado en el tiempo total necesario para fabricarla por lo que para disminuir el coste es necesario determinar los parámetros correctos de funcionamiento para que garanticen la calidad de las piezas en el menor tiempo posible¹¹⁴.

La etapa de inyección (Figura 4.9.1-2), consta de dos partes: la primera en la que se llena el molde de plástico fundido y, la segunda, en mantener la presión hasta que la entrada se sella ya que no puede entrar más material. En esta etapa el control la viscosidad del polímero es esencial ya que determina el flujo de este (la velocidad con la que se puede inyectar) y si este llegará a todos los rincones de la cavidad del molde. El control de la viscosidad se realiza mediante la temperatura y presión de inyección, dependiendo del material las condiciones son muy distintas^{71,72,114}.

La duración de la etapa de enfriamiento (Figura 4.9.2-5) está comprendida desde el final de la etapa de inyección y el principio de la de expulsión y sirve para que la pieza se solidifique completamente y no se deteriore al ser expulsada del molde. Es, normalmente, la etapa que consume más tiempo. Su duración está condicionada por la geometría de la pieza (las secciones estrechas se enfrían mas

rápidamente que las anchas), la cantidad de material a enfriar, el material, el molde y su sistema de refrigeración, etc^{71,72,114}.

Por último en la etapa de expulsión (Figura 4.9.5-1) es en la que la pieza o piezas se expulsan del molde una vez solidificadas. Es la etapa con una duración más corta y su tiempo viene determinado básicamente por la geometría de la pieza y el molde.

4.2.2. Coste de producción de piezas de plástico por tecnologías Additive Manufacturing (AM)

Los factores de fabricación que influyen en el coste de producir piezas mediante tecnologías AM dada una geometría y, teniendo en cuenta la misma suposición que en los procesos tradicionales, depende solo del material utilizado y del tiempo unitario de fabricación. Téngase en cuenta que en estas tecnologías no es necesario el uso de molde.

El factor mas influyente en el coste de una pieza fabricada mediante tecnología AM es la orientación. De ella depende el uso o no de soportes (mas material) y la altura total a fabricar que es la dimensión que más ralentiza el proceso ya que hay que fabricar más capas¹¹⁵. El otro parámetro cuyo efecto es importante es el espesor de capa ya que con espesores de capa grandes hay menos secciones o capas a fabricar por lo que el tiempo se reduce drásticamente^{27,39-42}.

El principal factor que afecta al coste de las piezas fabricadas mediante FDM, aparte de los mencionados anteriormente, es el *build style*. Rellenar una capa con menos hilos extruidos (principalmente variando el grosor y la distancia entre hilos extruidos) significa menos tiempo y menos material⁴³.

4.2.3. Estudio comparativo

Se han realizado varios estudios comparando el coste económico de fabricación de piezas mediante tecnologías AM y moldeo por inyección. En la mayoría de los casos la comparación se ha realizado suponiendo que las piezas fabricadas mediante AM y las fabricadas mediante inyección tienen las mismas propiedades (mecánicas y acabado superficial), suposición hecha sólo para una comparación puramente basada en el coste aplicable^{53,116,117}.

Los diferentes estudios muestran que existe un volumen de producción a partir del cual fabricar mediante tecnologías AM es más caro que por inyección. Dependiendo de la geometría y de la tecnología utilizada este volumen varía tal y como se puede ver en la Figura 4.10. En este ejemplo no se consideran costes energéticos o de instalaciones ya que tienen una contribución muy pequeña en el coste total (menor del 1%⁵³).

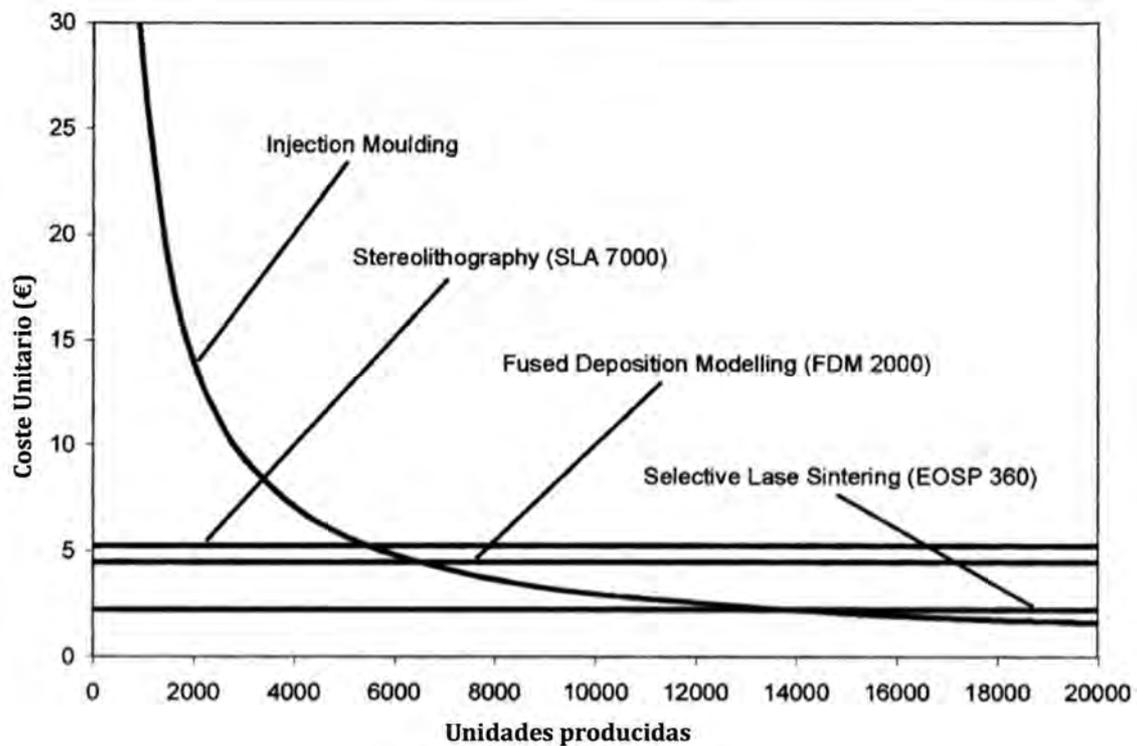


Figura 4.10: Comparación de costes para diferentes tecnologías de fabricación AM y moldeo por inyección para la producción de la misma pieza⁵³.

Como se podía esperar los costes del moldeo por inyección son muy altos para un volumen de producción bajo ya que la inversión inicial en el molde es grande y se va reduciendo a medida que el coste del molde es amortizado para volúmenes de producción mayores.

De la misma manera que en el moldeo por inyección se pueden fabricar más de una pieza a la vez, teniendo más de una cavidad en el mismo molde, con las tecnologías AM se puede hacer algo equivalente. En una misma sesión de fabricación se pueden fabricar más de una piezas, iguales o diferentes. Incluso con SLS se pueden fabricar una encima de las otras, cosa que abarata el precio de cada una de ellas.

Los puntos de corte que se observan en la Figura 4.10 se encuentran en la zona de producción de lotes donde, normalmente, sería más probable que fuera más económica la producción mediante moldeo por inyección. Esto pone en relieve que la metodología a escoger no es siempre evidente, dependiendo de la pieza a fabricar. Además no se tienen en cuenta las ventajas que presentan las tecnologías AM como la de fabricar piezas multicomponente en una sola pieza, ahorro de material sin afectar la funcionalidad, la posibilidad de fabricar distintas piezas en un solo ciclo de fabricación, etc. Fabricar mediante tecnologías AM puede suponer un mejor coste que por técnicas moldeo por inyección dependiendo de la pieza que se quiera fabricar, cantidad, material, rapidez de fabricación.

5. Metodología para la determinación de la mejor orientación para la fabricación de piezas finales mediante Fused Deposition Modeling (FDM)

En este capítulo se explica el funcionamiento general de la metodología desarrollada. Ésta determina de manera cuantitativa la mejor orientación para fabricar una pieza dada su geometría, sus condiciones de trabajo y teniendo en cuenta la importancia que le da el usuario al comportamiento mecánico, al acabado superficial y al coste de la pieza. Se ejemplificará su uso en un ejemplo en el capítulo 6.

Previo a la presentación de la metodología desarrollada se explican brevemente las metodologías utilizadas en los distintos procesos de producción para escoger los parámetros de fabricación óptimos. Posteriormente se presentan las diferentes metodologías publicadas para las tecnologías FDM y, finalmente se presenta la metodología desarrollada.

5.1. Metodologías de selección de parámetros de fabricación para procesos de fabricación

En los capítulos anteriores se ha evidenciado la dificultad en la elección de los parámetros adecuados para la fabricación de una pieza. Para ello se han desarrollado distintas metodologías siendo las de más aplicación las llamadas *artificial neural network* (ANN) y las de análisis por regresión. Los modelos formulados con estas técnicas pueden predecir las características de una pieza tales como: el acabado superficial, la exactitud dimensional, el comportamiento mecánico y el coste de fabricación.

Las ANN son una familia de modelos de aprendizaje estadísticos inspirados en las redes neuronales biológicas (el cerebro) y se utilizan para estimar o aproximar funciones que pueden depender de un gran número de parámetros de entrada. Facilitan el análisis de grandes bases de datos científicos o tecnológicos. Se usan cuando las relaciones entre los parámetros de entrada y salida no es conocida o no se tiene un profundo conocimiento del proceso de fabricación. Las ANN se presentan generalmente como sistemas de "neuronas" interconectadas que envían mensajes entre sí. Las conexiones tienen pesos numéricos que se pueden sintonizar en base a la experiencia, por lo que son adaptativas y capaces de aprender. Es un proceso ampliamente usado en los procesos tradicionales de producción de objetos de plástico¹¹⁸⁻¹²⁷.

El análisis de regresión lineal utiliza funciones en las que los parámetros de entrada son las variables y la salida la respuesta que se quiere controlar. Entonces el problema radica en encontrar los coeficientes de la función. Existen básicamente dos tipos de técnicas de regresión: regresión lineal y no lineal. En la regresión lineal se supone que la función del modelo varía linealmente con respecto a los parámetros de entrada. En cambio en la no lineal varían en funciones cuadráticas o de orden superior. La elección de la estructura de la función a ajustar se hace basándose en el conocimiento de el proceso de fabricación por lo que es el paso

mas difícil. Los coeficientes de la función se calculan, ya sea mediante regresión lineales o mediante mínimos cuadrados^{125,126,128-133}.

Debido a la gran cantidad de parámetros existentes en cualquier técnica de fabricación es necesario conocer cuales son los más influyentes. Para hacerlo se suele realizar un análisis de varianza (ANOVA) realizando varios experimentos mediante un diseño de experiencias (DOE) y un análisis estadístico de los resultados.

5.1.1. Modelos empíricos en Fused Deposition Modeling (FDM)

La correcta elección de los parámetros de fabricación para fabricar piezas con tecnología FDM es una tarea complicada ya que afectan al acabado superficial, exactitud dimensional, tiempo de fabricación, resistencia mecánica, coste, etc¹³⁴⁻¹³⁶. Varios investigadores han intentado mejorar la calidad de las piezas fabricadas mediante esta técnica formulando modelos teóricos para después optimizarlos^{112,137-140}. También se han desarrollado distintos modelos empíricos, tanto ANN como de regresión, para mejorar el acabado superficial^{33,141-144}, exactitud dimensional^{93,145,146}, comportamiento mecánico^{22,55,142,143,147} y coste^{40,144}. Se han realizado estudios utilizando modelos mediante ANOVA^{43,57,112,148} y algunas aplicaciones relacionadas con el enfoque de lógica difusa¹⁴⁶.

Todas estas metodologías tienen como propósito optimizar el acabado superficial o el comportamiento mecánico y como segundo propósito el coste. Ninguno de ellos aborda el estudio de la combinación de parámetros y el posicionamiento del objeto a fabricar para conseguir un equilibrio entre los tres.

Además no existe tanta información respecto a los procesos AM. En FDM no se conoce con profundidad aspectos que afectan al comportamiento mecánico de sus piezas como la fuerza de unión entre hilos, tensiones residuales producidas por el proceso de fabricación, durabilidad del producto bajo cargas y condiciones ambientales, etc. Hasta este trabajo aquí presentado no se habían correlacionado completamente las propiedades mecánicas con la orientación y, por lo tanto, disposición de los hilos extruidos y las capas.

5.2. Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo permite obtener de manera cuantitativa la mejor orientación para fabricar una pieza con tecnología FDM, uno de los factores más importantes para cualquier tecnología AM^{8-32,38,109,115,149-151}. Considera además parámetros fundamentales del proceso y su relación con los resultados deseados en el producto fabricado.

No se trata de una metodología de optimización, ANN o modelo empírico. La metodología desarrollada busca la mejor orientación para una pieza con la geometría y condiciones de trabajo establecidas y dadas unas especificaciones.

La estructura de la metodología se puede ver en la Figura 5.1. Se parte de un archivo CAD que contiene la geometría final de la pieza. En el primer paso el

usuario indica los pesos o la importancia que tiene cada característica de la pieza respecto a las demás y, si se conocen, las cargas mecánicas que sufre la pieza en funcionamiento. Luego se determinan todas las posibles orientaciones en las que se puede fabricar la pieza. Seguidamente se aplican las tres funciones objetivo por separado: una para el acabado superficial, una para el coste y otra para el comportamiento mecánico. Cada una de ellas califica del cero al uno las orientaciones. Finalmente, y considerando las especificaciones del usuario, se encuentra la mejor orientación.

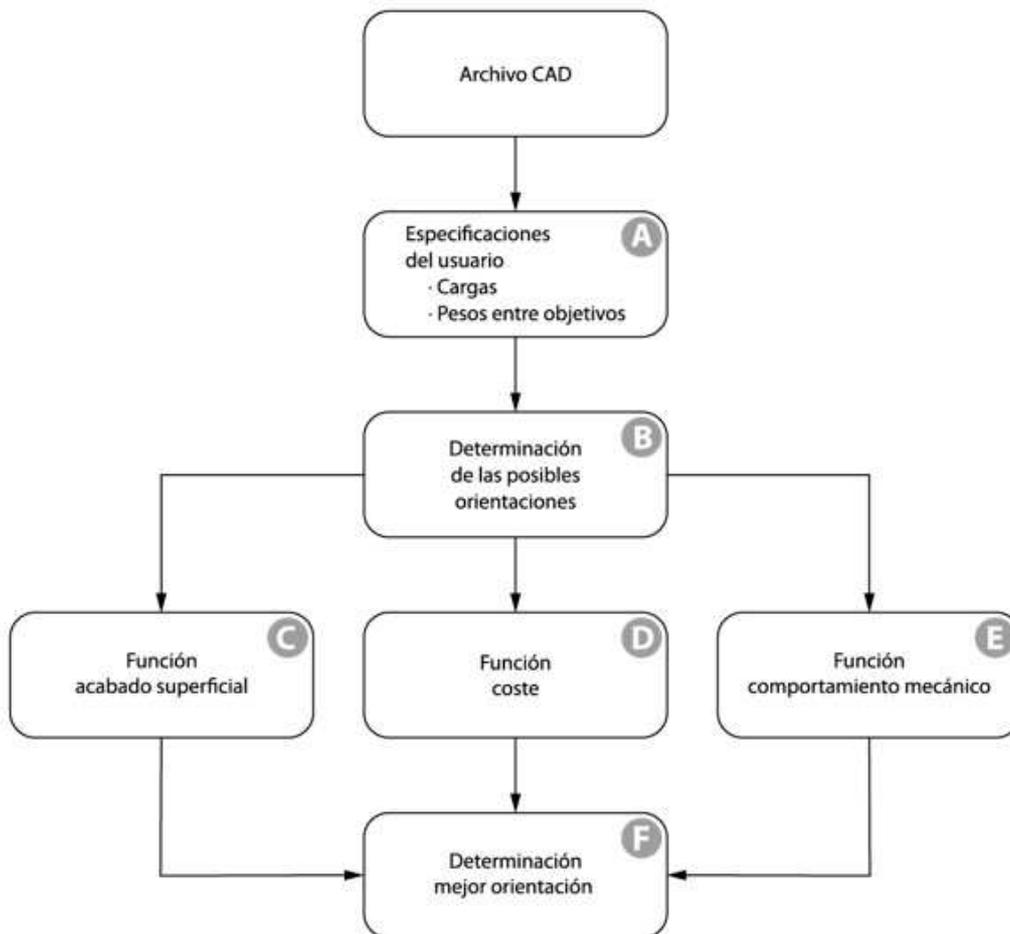


Figura 5.1: Esquema de la metodología desarrollada con cada uno de los pasos indicados por una letra.

5.2.1. Especificaciones del usuario

Las especificaciones que debe dar el usuario (Figura 5.1.A) son: los pesos o importancia que se le da a cada una de las tres cualidades de la pieza (acabado superficial, coste y comportamiento mecánico) y, si se conocen, las cargas que actúan sobre la pieza cuando se usa (cargas y tipo de sujeción).

Hay que tener en cuenta que una cantidad importante de productos fabricados por AM son modelos físicos, maqueta y prototipos no funcionales. En tales casos el usuario suele primar el acabado superficial y el bajo coste. Sin embargo la evolución de las tecnologías AM facilita cada vez más la fabricación de piezas finales capaces de soportar cargas mecánicas en condiciones de uso reales. La

mayoría de fabricantes de tecnologías AM no lo tienen en cuenta. Por esta razón los programas que controlan las máquinas de fabricación tampoco lo tienen en cuenta. Toca al usuario decidir la mejor combinación de parámetros sin tener argumentos cuantitativos para hacerlo.

Los pesos son los porcentajes que representan la importancia que le da el usuario a cada una de las características de la pieza a fabricar. Las únicas condiciones que tienen son:

- Deben estar comprendidos entre 1 y 100 (ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3).
- entre los tres deben sumar 100 (ecuación 5.4).

$$0 \leq \eta_S \leq 100 \quad (5.1)$$

$$0 \leq \eta_C \leq 100 \quad (5.2)$$

$$0 \leq \eta_M \leq 100 \quad (5.3)$$

$$\eta_S + \eta_C + \eta_M = 100 \quad (5.4)$$

Donde,

- η_S es el peso de el acabado superficial.
- η_C es el peso de el coste.
- η_M es el peso de el comportamiento mecánico.

Por ejemplo, si la pieza a fabricar es un prototipo cuya única finalidad es ver la apariencia que tiene el producto, el peso del acabado superficial debería ser mucho mayor que los otros dos, e incluso, el peso de la función del comportamiento mecánico debería ser cero. Por el contrario si se quiere fabricar una pieza funcional en la que la apariencia o acabado superficial no es importante, pero sí que aguante las cargas, el peso del comportamiento mecánico debería ser mayor que los otros dos.

El otro dato necesario que debe aportar el usuario son las cargas y sujeciones a las que la pieza esta sometida durante su funcionamiento. Cuanto más realistas sean estas, el funcionamiento de la función objetivo de la respuesta mecánica será mejor.

5.2.2. Determinación de las posibles orientaciones

Las orientaciones a las que se aplicará cada función objetivo vienen determinadas por la superficie base o la superficie a partir de la cual se va a empezar a construir la pieza (Figura 5.1.B). Las únicas superficies susceptibles a ser bases son las exteriores de la pieza, o lo que es lo mismo las superficies que forman la envolvente convexa.

Antes de definir la envolvente convexa, hay que definir el significado de convexo. Un conjunto de puntos en el plano es convexo si su intersección con cualquier recta del plano es conexa, o sea que está conectado o guarda una relación con el resto de

puntos. Así, un conjunto de puntos en el plano es convexo si el segmento que une dos cualesquiera de sus puntos está totalmente contenido en el conjunto. La intersección de conjuntos convexos es un conjunto convexo, ya que si dos puntos están en la intersección, están en cada uno de los conjuntos convexos que la forman, por lo que el segmento que los une está totalmente contenido en todos ellos y, por tanto, en la intersección. De lo anterior se deduce que las regiones obtenidas por intersección de semiplanos son conjuntos convexos. Si la intersección de una cantidad finita de semiplanos cerrados es acotada y no vacía, es un polígono convexo o envolvente convexa¹⁵². Un ejemplo de una envolvente convexa de una nube de puntos en dos dimensiones se puede ver en la Figura 5.2.

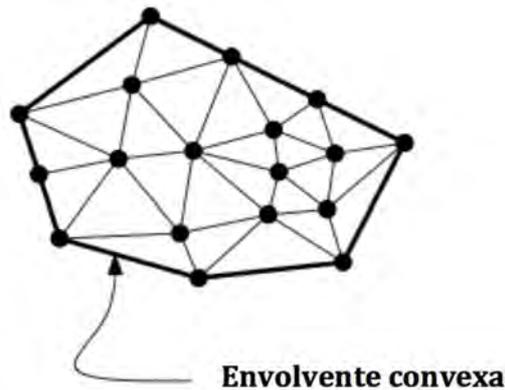


Figura 5.2: Ejemplo de la envolvente convexa de una nube de puntos en dos dimensiones¹⁵³.

Una vez conocida la envolvente convexa se conocen todas las superficies exteriores del objeto de la que solo se tendrán en cuenta las planas. Para que la orientación de la pieza quede completamente determinada la longitud más grande de la base se alinearán con el eje X del sistema de coordenadas de la máquina. El sistema de coordenadas de la gran mayoría de las máquinas de fabricación por AM consiste en que el plano XY es en el que se fabrica cada capa y el eje Z la dirección de fabricación.

5.2.3. Función objetivo acabado superficial

Esta función se utiliza para calificar cada una de las posibles orientaciones según el acabado superficial que tengan (Figura 5.1.C). Como se ha indicado antes la principal causa del mal acabado superficial de las tecnologías AM es el *staircase effect* causado principalmente por las superficies inclinadas, directamente relacionado con la orientación de la pieza, y con el espesor de capa. La función objetivo descrita en este capítulo está basada en la presentada por W. Cheng et al¹¹⁵. Esta función puede ser utilizada para cualquier tecnología AM.

El valor de la función objetivo para cada orientación se puede calcular mediante la ecuación 5.5, con el fin de que la puntuación sea entre cero y uno. El resultado parcial de cada orientación se normaliza dividiéndolo por la puntuación de la orientación con el valor más alto.

$$FS_i = \frac{S_i}{\max(S_i)} \quad (5.5)$$

Donde:

- FS_i es el valor final de la función objetivo acabado superficial para la orientación i .
- S_i es el valor parcial de la función objetivo acabado superficial de la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .

Con el fin de mejorar el acabado superficial de una pieza cualquiera ésta debe orientarse para evitar el *staircase effect*. Para ello la pieza se ha de conseguir:

- Maximizar el número de superficies perpendiculares a la dirección de fabricación.
- Maximizar el número de agujeros con ejes en la dirección de fabricación.
- Minimizar el número de superficies inclinadas.
- Minimizar las superficies que necesiten soporte.

La función objetivo permite asignar una serie de pesos a las entradas de acuerdo con su influencia en las salidas. Teniendo en cuenta las características que se deben maximizar y minimizar. Se puede definir la función objetivo con la ecuación 5.6.

$$S_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} \cdot \xi_j \quad (5.6)$$

Donde:

- S_i es el valor parcial de la función objetivo acabado superficial de la orientación i .
- ξ_j es el peso del tipo de superficie j .
- N_{ij} es el numero relativo de la superficie j en la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .
- j es el subíndice referente a la superficie j .
- n es el número total de posibles superficies en la pieza.

S_i es el sumatorio del producto entre el número relativo de la superficie y su peso para todos los tipos de superficies en la orientación i . El número relativo de la superficie se utiliza para tener en cuenta el número de superficies al igual que su área. Se calcula con la ecuación 5.7. Este número da una idea de lo grande que es el área de la superficie en comparación a las otras, si el área es muy grande y empeora el acabado superficial tiene que tener mas peso que las que son de menor extensión.

$$N_{ij} = \frac{A_j}{\bar{A}} \quad (5.7)$$

Dónde A_j es la área de la superficie de la superficie j y \bar{A} se calcula con la ecuación 5.8.

$$\bar{A} = \frac{A_{total}}{N} \quad (5.8)$$

A_{total} es el área total de la pieza y N el número total de superficies de la pieza. Entonces para cada orientación se puede obtener un valor de la función objetivo FS_i . El valor final de la función objetivo es su valor obtenido dividido por el máximo valor de entre todas las funciones objetivo para que así estén todas comprendidas entre 0 y 1 siendo 1 la que tiene mejor acabado superficial.

Cabe la posibilidad que el valor final de la función objetivo para una orientación sea negativo. A las orientaciones que obtengan esa puntuación final se les asignará cero.

Tipos de superficie

Para determinar la mejor orientación es necesario identificar los diferentes tipos de superficies presentes en la pieza. Existen tres tipos de superficies: las planas, las cilíndricas y las curvadas.

Para las superficies planas se define el vector \vec{n} normal a la superficie y el vector unitario \vec{k} en la dirección de fabricación o normal al plano XY (ecuación 5.9) y el ángulo θ entre estos dos vectores tal y como se muestra en la Figura 5.3.

$$\vec{k} = [0 \ 0 \ 1] \quad (5.9)$$

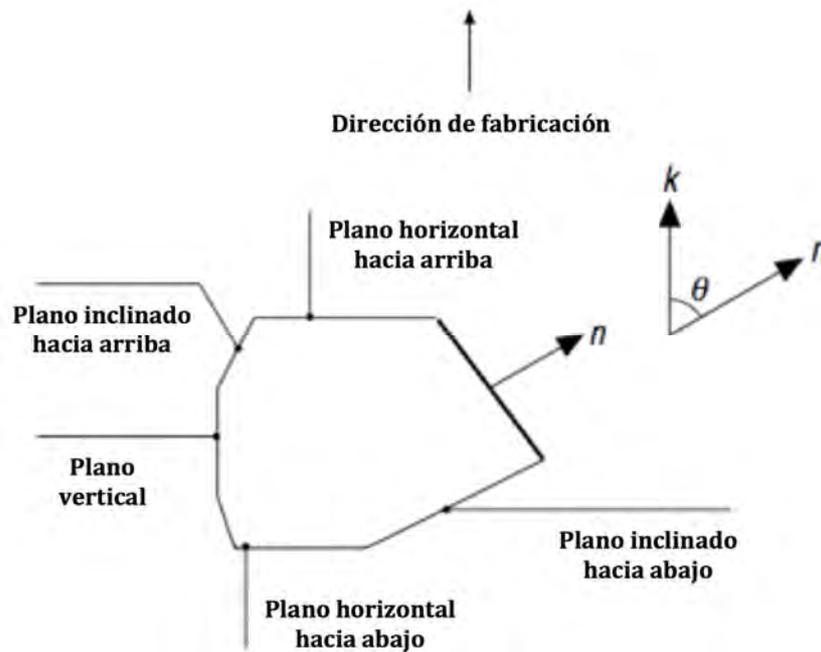


Figura 5.3: Tipos de superficie¹¹⁵.

Entonces el producto entre los dos vectores es (ecuación 5.10):

$$\vec{n} \cdot \vec{k} = |n| \cdot |k| \cdot \cos \theta \quad (5.9)$$

Para los diferentes tipos de superficies el resultado de la ecuación 5.9 se puede ver en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resultado del producto entre los dos vectores para superficies planas.

Tipo de superficie	θ	Resultado
Plano vertical	90°	0
Plano horizontal hacia arriba	0°	1
Plano horizontal hacia abajo	180°	-1
Plano inclinado hacia arriba	$<90^\circ$	0-1
Plano inclinado hacia abajo	$>90^\circ$	-1-0

Para las superficies cilíndricas se define el vector \vec{n} como el vector del eje del cilindro y el \vec{k} como vector unitario en la dirección de fabricación o normal al plano XY (ecuación 5.10) siendo el ángulo θ el formado por estos dos vectores. El tipo de cilindro se puede identificar según el ángulo θ como se puede ver en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Tipo de cilindro según el ángulo θ .

Tipo de superficie	θ
Cilindro vertical	0° o 180°
Cilindro horizontal	0°
Cilindro inclinado	$\neq 90^\circ$

El último tipo de superficies son las curvadas. Éstas se dividen en diferentes superficies planas de menor tamaño definidas por los parámetros u y v tal y como se puede observar en la Figura 5.4.

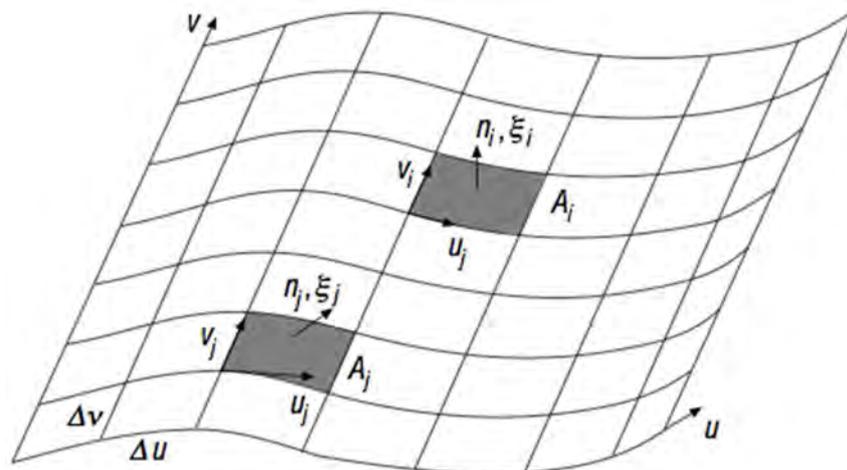


Figura 5.4: Clasificación de superficies curvadas¹¹⁵.

Cada una de estas pequeñas superficies, con normales y tamaños distintos, se contabilizan de forma independiente. Sus pesos (ξ_j) se pueden determinar con la ecuación 5.11.

$$\xi_j = (\sum_{k=1}^n \xi_k) / n = (\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{A} \cdot \xi_k) / n = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{A_f} \cdot \xi_k \quad (5.11)$$

Donde:

- ξ_j es el peso total de la superficie j .
- n es el número total de pequeñas superficies.
- k es el subíndice referente a la superficie pequeña k .
- ξ_k es el peso de la pequeña superficie k .
- A_k es el área de la pequeña superficie k .
- A_f es el área total de la superficie.

La exactitud de los pesos está determinada por el número de superficies que se utilizan, determinadas por el usuario. A más superficies, la influencia total de la superficie curvada es más exacto.

Superficies con soporte

Además de identificar el tipo de superficies y su orientación, es necesario reconocer las superficies que requieren soporte para su fabricación. El acabado superficial de las superficies que necesitan soporte es peor que las que no necesitan. Para identificar el tipo de superficie se aplica el algoritmo representado en la Figura 5.5 a todas las superficies exteriores de la pieza. El ángulo α es el llamado *self-supporting angle*, es el ángulo que forma la horizontal (plano XY) con la inclinación de la cara y representa el mínimo ángulo a partir del cual una superficie se puede fabricar sin soporte. Este ángulo indica cuando se deben utilizar soportes en las caras inclinadas y depende, sobretodo, de la máquina que se utilice.

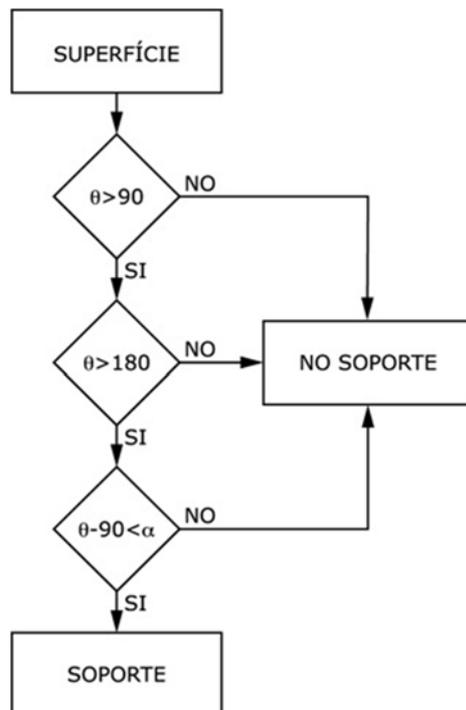


Figura 5.5: Algoritmo para la determinación de si una superficie necesita soporte.

Pesos

Los pesos reflejan el efecto que tiene la superficie en el acabado superficial de la pieza. Se definen dos tipos de pesos: el relacionado con el *staircase effect* (ξ_{1j}) i el relacionado con la utilización de soportes (ξ_{2j}). Sus valores están comprendidos entre 1, para superficies que no tienen ningún efecto y -1 para las que afectan más. El peso total de una superficie es la suma de los dos.

Las superficies inclinadas están afectadas por el *staircase effect* y su peso (ξ_{1j}) será mayor o menor según su inclinación. Por lo que su peso estará basado en el ángulo que forman la dirección de fabricación y la normal a la envolvente de la superficie (como se ha explicado en la sección 4.1.2). Esta función objetivo utiliza un espesor de capa constante por lo que para un ángulo θ entre 0° y 45° el *staircase effect* es peor que para un ángulo entre 45° y 90° (Figura 5.6). El peso vendrá determinado por el coseno del ángulo si la superficie es hacia arriba y por el seno si la superficie es hacia abajo.

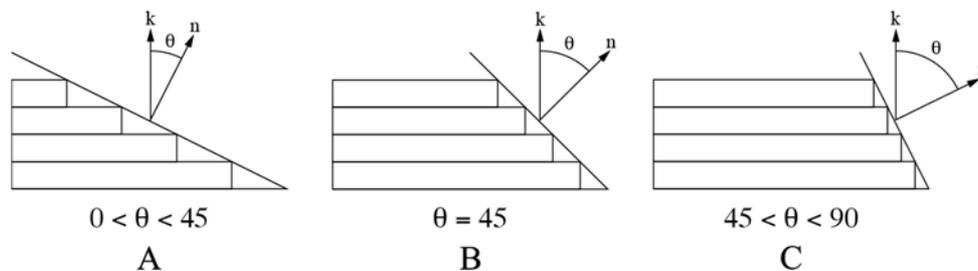


Figura 5.6: Efecto de el ángulo que forman la dirección de fabricación y la normal a la envolvente de la superficie. A) entre 45° y 90° , B) 45° y C) entre 0° y 45° .

Por otro lado un plano perpendicular ($\theta = 90^\circ$) no se ve afectado por el *staircase effect* ni necesita de soporte por lo que su peso es 1. La superficie que actúa como base de fabricación tampoco contribuye al *staircase effect* ni necesita soporte por lo que su peso también es uno. El peso para un tipo concreto de superficie o característica geométrica se puede ver en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Tipos de superficie y su peso correspondiente. ✓ significa que están afectadas y ✗ significa que no.

#	Tipo de superficie	θ	Staircase	Soporte	Peso
1	Horizontal plana hacia arriba	0°	✗	✗	1
2	Horizontal plana hacia arriba con soporte	0°	✗	✓	$1+\xi$
3	Horizontal plana hacia abajo con soporte	180°	✗	✓	$1+\xi$
4	Superficie base	0°	✗	✗	$1+\xi$
5	Perpendicular sin soporte	90°	✗	✗	1
6	Perpendicular con soporte	90°	✗	✗	$1+\xi$
7	Inclinada hacia arriba	$0^\circ-90^\circ$	✓	✗	$-\cos(\theta)$
8	Inclinada hacia arriba con soporte	$0^\circ-90^\circ$	✓	✗	$-\cos(\theta)+\xi$
9	Inclinada hacia abajo sin soporte	$90^\circ-180^\circ$	✓	✗	$\cos(\theta)$
10	Inclinada hacia abajo con soporte	$90^\circ-180^\circ$	✓	✓	$\cos(\theta)+\xi$
11	Cilindro/agujero vertical	0°	✗	✗	1
12	Cilindro/agujero horizontal sin soporte	90°	✓	✓	-1
13	Cilindro/agujero horizontal con soporte	90°	✓	✓	$-1+\xi$
14	Cilindro/agujero inclinado sin soporte	$(0^\circ-90^\circ)$	✓	✓	$-\sin(\theta)$
15	Cilindro/agujero inclinado con soporte	$(0^\circ-90^\circ)$	✓	✗	$-\sin(\theta)+\xi$

Una vez conocidos los pesos, las características geométricas y superficies de una pieza se puede calcular el valor de la función objetivo para cada orientación.

El peso ξ_{2j} viene determinado por el tipo de soporte utilizado, de la máquina/software utilizado, del material de fabricación de la pieza y del material de soporte. Por esta razón el valor numérico de este peso lo debe asignar el operario que con su experiencia conoce como afectan al acabado superficial. Los valores de estos pesos son negativos, cuanto más afecten al acabado superficial más grandes en magnitud serán, si no afectan su valor es cero.

Como se presentó en la sección 4.1.2 a menor espesor de capa menor *staircase effect*. El valor del espesor de capa depende de la máquina a utilizar por lo que se debe generar un peso dependiendo de esos valores. El valor del peso depende del número de espesores que se puedan utilizar, siendo el más pequeño el del peso más alto (ya que disminuye la rugosidad) y el espesor más grande el de peso más pequeño. Para eso se ordenan los espesores de mayor a menor y luego el peso se puede calcular con la ecuación 5.12.

$$\xi_{hi} = \frac{N_i}{N_t} \quad (5.12)$$

Donde:

- ξ_{hi} es el peso del espesor i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .
- N_i es la posición en el ranking del espesor i .
- N_t es el número total de espesores disponibles en la máquina.

El valor del peso para el menor espesor es 1 ya que es el que dará mejor acabado superficial y el espesor mayor tendrá el peso más pequeño. Este peso se aplica una vez calculado el valor final de la función objetivo para cada orientación.

5.2.4. Función objetivo coste

El objetivo de esta función es la de adjudicar una puntuación de cero a uno a cada una de las posibles orientaciones según su coste (Figura 5.1.D). Como se ha explicado anteriormente los principales factores que afectan al coste son el tiempo de fabricación y la cantidad de material. Estos dos factores ya tienen en cuenta la orientación de la pieza, el espesor de capa y todos los otros factores influyentes. Esta función puede ser utilizada para cualquier tecnología AM.

Para asignar un valor entre cero y uno a cada una de las orientaciones el valor final de la función objetivo coste para cada orientación se calcula según la ecuación 5.13.

$$FC_i = \frac{C_i}{\max(C_i)} \quad (5.13)$$

Donde

- FC_i es el valor final de la función objetivo coste para la orientación i .
- C_i es el valor relativo de la función coste para la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .

Para conocer el tiempo y la cantidad de material necesarios para fabricar una pieza se utilizan los programas que controlan las impresoras de AM. Estos programas realizan primero el *slicing* y luego determinan las trayectorias en cada capa. Esto permite conocer la cantidad de material necesario, tanto para la pieza como para los soportes, y el tiempo total de fabricación una vez orientada la pieza. Conociendo tanto la cantidad de material necesaria como el tiempo se puede asignar un valor numérico a cada orientación según la ecuación 5.14.

$$C_i = \left(1 - \frac{Mat_i}{\max(Mat_i)}\right) + \left(1 - \frac{Sup_i}{\max(Sup_i)}\right) + \left(1 - \frac{T_i}{\max(T_i)}\right) \quad (5.14)$$

Donde:

- C_i es el valor parcial del coste para la orientación i .
- Mat_i es la cantidad de material utilizado para fabricar la pieza en la orientación i .
- Sup_i es la cantidad de material de soporte utilizado para fabricar la pieza en la orientación i .
- T_i es el tiempo necesario fabricar la pieza en la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .

Como en la ecuación 5.14 se están mezclando unidades (cantidad de material y tiempo) y las magnitudes pueden ser muy distintas lo que se hace es normalizar cada una de los tres parámetros. El parámetro normalizado se resta a uno porque a mayor tiempo y consumo de material mayor es el coste.

5.2.5. Función objetivo para el comportamiento mecánico

La función objetivo para el comportamiento mecánico tiene como finalidad, al igual que las otras, dar una calificación a cada una de las posibles orientaciones dependiendo de la resistencia mecánica a la carga especificada por el usuario (Figura 5.1.E). Hay que aclarar que, a diferencia de las otras dos funciones objetivos, esta sólo es aplicable a la tecnología FDM.

Como se ha observado durante los experimentos realizados en este trabajo (sección 3.3), la resistencia mecánica de las piezas fabricadas con tecnología FDM depende de la disposición de los hilos extruidos y del apilamiento de las capas en relación los esfuerzos aplicados. La función objetivo se basará en las conclusiones encontradas en la investigación realizada.

El valor de la función objetivo para cada orientación, al igual que las demás, está comprendido entre 0 y 1 y se puede calcular con la ecuación 5.15.

$$FM_i = \frac{M_i}{\max(M_i)} \quad (5.15)$$

Donde:

- FM_i es el valor final de la función objetivo comportamiento mecánico para la orientación i .
- M_i es el valor parcial de la función objetivo comportamiento mecánico para la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .

Para calcular el valor parcial de la función objetivo es necesario realizar dos pasos por separado:

1. Realizar una simulación mediante FEA utilizando el modelo isotrópico medio y anotar las tensiones máximas a tracción en las tres direcciones del sistema de coordenadas X, Y y Z en cada una de las superficies exteriores de la pieza.
2. Contabilizar la longitud total de hilos en cada una de las superficies exteriores de la pieza en las direcciones del plano de fabricación para cada orientación.

Sólo se tienen en cuenta en las superficies exteriores, tanto tensiones a tracción como longitudes de hilos, ya que es donde se encuentran los contornos. Tal y como se ha visto en la sección 3.3 la dirección de los contornos y la de las tensiones y/o esfuerzos permite determinar las orientaciones más resistentes mecánicamente.

Con estos dos pasos ya es posible calcular el valor parcial de la función objetivo para cada una de las orientaciones según la ecuación 5.16.

$$M_i = \sum_{j=1}^n L_{1ij} \cdot \sigma_{1ij} + \sum_{j=1}^n L_{2ij} \cdot \sigma_{2ij} \quad (5.16)$$

Donde:

- M_i es el valor parcial de la función objetivo comportamiento mecánico de la orientación i .
- L_{1ij} es la longitud total de hilos en la dirección 1 de la superficie j en la orientación i .
- σ_{1ij} es la tensión máxima a tracción en la dirección 1 de la superficie j en la orientación i .
- L_{2ij} es la longitud total de hilos en la dirección 2 de la superficie j en la orientación i .
- σ_{2ij} es la tensión máxima a tracción en la dirección 2 de la superficie j en la orientación i .
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .
- j es el subíndice referente a la superficie j .
- n es el número total de superficies de la pieza.

Las direcciones 1 y 2 se refieren a las dos direcciones perpendiculares del plano de fabricación. El valor de la función objetivo debe ser mayor cuanto mayor sea la cantidad de hilos alineados en la dirección donde haya más tensión a tracción y solo existen hilos en las superficies de la pieza ya que es donde se encuentran los

contornos. Se puede observar que no se contabilizan ni las tensiones ni los hilos en la dirección 3, que sería la dirección de fabricación. Esto es debido a que, tal y como se ha visto en la parte experimental (sección 3.3.1), es la dirección donde sucede la rotura frágil. Por esta razón, y como el modelo constitutivo utilizado se ha validado sólo en la zona lineal y, además, se utiliza el modelo isotrópico medio, se ha decidido no tener en cuenta ni tensiones ni longitud de hilos en esa dirección.

Simulaciones con Finite Element Analysis (FEA)

Para conocer las tensiones en las tres direcciones es necesario realizar una simulación por FEA. Para ello se necesitan conocer las cargas y sujeciones a la que la pieza está sometida durante su funcionamiento (datos proporcionados por el usuario, Figura 5.1.A). El modelo del material utilizado es el caracterizado en la experimentación (sección 3.3.1). Según los resultados obtenidos, y debido a su fácil uso el modelo, recomendado es el isotrópico medio. Como el comportamiento mecánico del modelo isotrópico no depende de la orientación de la pieza con una sola simulación es suficiente. Una vez realizada la simulación hay que anotar las tensiones a tracción de cada una de las superficies exteriores en las tres direcciones del sistema de coordenadas.

Cálculo de la longitud de hilo

Según la orientación de fabricación de cualquier pieza la disposición de las capas y los hilos es distinta. Para cada superficie exterior de la pieza hay que contar la longitud total de hilos en cada una de las tres direcciones del sistema de coordenadas en las que se ha fabricado.

5.2.6. Determinación de la mejor orientación

La solución final (Figura 5.1.F) se obtiene a partir de las puntuaciones que cada función objetivo da a cada orientación y los pesos que ha asignado el usuario a cada propiedad. La orientación que presente el máximo valor es la que mejor responde a las especificaciones del usuario (ecuación 5.17).

$$O_i = FS_i \cdot \eta_S + FC_i \cdot \eta_C + FM_i \cdot \eta_M \quad (5.17)$$

Donde,

- O_i es el valor final de la orientación i .
- FS_i es el valor de la función objetivo acabado superficial de la orientación i .
- FC_i es el valor de la función objetivo coste de la orientación i .
- FM_i es el valor de la función objetivo comportamiento mecánico de la orientación i .
- η_S es el peso de el acabado superficial.
- η_C es el peso de el coste.
- η_M es el peso de el comportamiento mecánico.
- i es el subíndice que hace referencia a la orientación i .

El resultado final consiste en el ordenamiento de las orientaciones considerando cada una de las funciones objetivo. De esta manera el usuario puede ver si existe más de una orientación con resultados similares; siempre con criterios basados en los resultados cuantitativos de las funciones objetivo.

6. Verificación de la metodología

En este capítulo se verificará el funcionamiento la metodología desarrollada sobre una pieza ejemplo. La metodología sigue el esquema de la Figura 6.1 presentada en el capítulo anterior. Cada uno de los pasos de la metodología tendrá una sección en este capítulo. En los apartados referentes a la aplicación de las funciones objetivo primero se aplicará y luego se comprobarán sus resultados con probetas impresas.

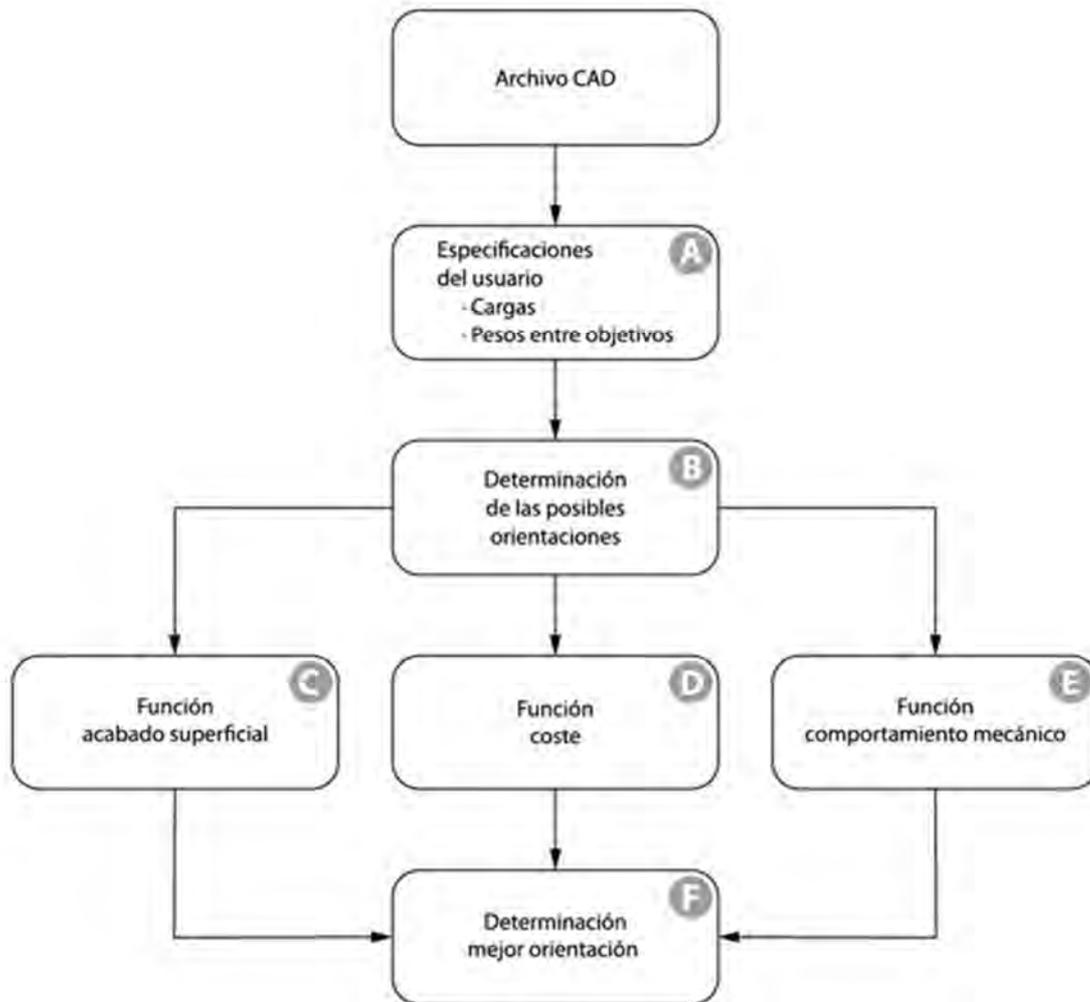


Figura 6.1: Esquema de la metodología desarrollada con cada uno de los pasos indicados por una letra.

6.1. Archivo CAD

El primer paso de la metodología es tener el archivo CAD con la geometría de la pieza (Figura 6.1). La pieza (Figura 6.2) fue diseñada con distintas características geométricas como redondeos y chaflanes para que la elección de la mejor orientación no fuera evidente ya que presentarían *staircase effect* y, además, reducen la acumulación de tensiones en el empotrado y codo del voladizo. Las posibles orientaciones también provocan que la función coste presente resultados distintos para cada una de ellas.

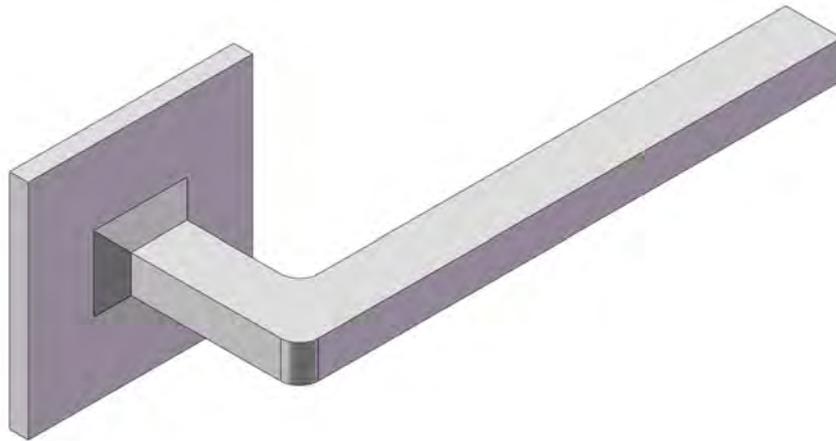


Figura 6.2: Geometría de la pieza.

La pieza, diseñada con SolidWorks®, tiene las dimensiones presentadas en la Figura 6.3. El archivo CAD se exportó en formato STL para poder utilizarlo con el programa Insight® que es el *software* que controla la máquina FDM utilizada (Fortus 400mc® de Stratasys®).

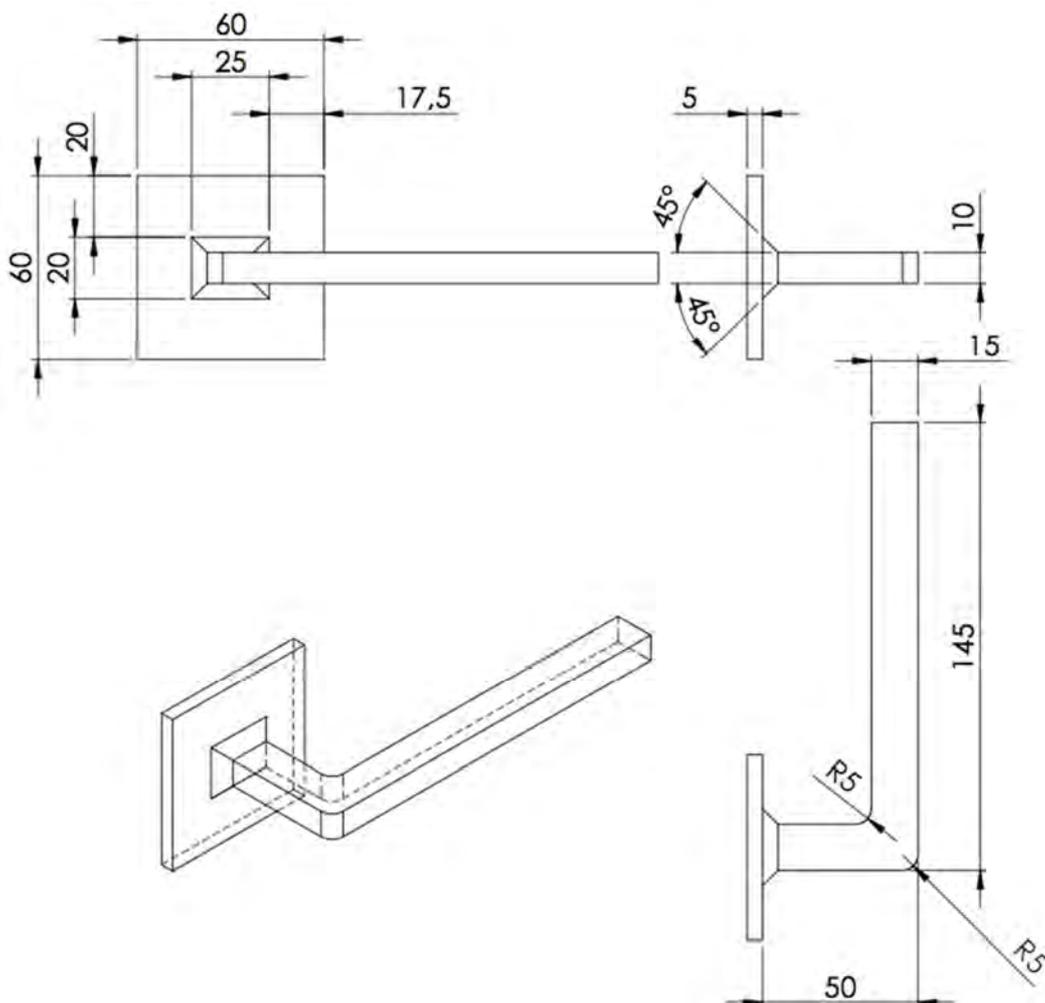


Figura 6.3: Croquis de la probeta utilizada para la verificación de la metodología.

6.2. Especificaciones del usuario

En el segundo paso de la metodología el usuario debe dar dos tipos de especificaciones (Figura 6.1.A):

- Los pesos o importancia que se le da a cada una de las tres cualidades de la pieza (acabado superficial, coste y comportamiento mecánico).
- Las cargas y sujeciones que actúan sobre la pieza cuando se usa (fuerzas y restricciones).

6.2.1. Pesos definidos por el usuario

Se van a proponer tres distintos objetivos para ver como varía la respuesta según las preferencias del usuario:

1. Prototipo: la pieza fabricada sólo tiene como utilidad mostrar su aspecto físico. Por esta razón los pesos a tener en cuenta son el de acabado superficial y coste; siendo el porcentaje del primero muy superior al segundo.
2. Pieza funcional: la pieza fabricada tiene unas cargas y sujeciones definidas y se quiere que las resista mecánicamente. El peso del comportamiento mecánico será el mayor seguido del peso del coste. El acabado superficial no es importante.
3. Pieza final: es necesario que la pieza fabricada tenga un buen aspecto, una buena resistencia mecánica y un coste bajo, por eso los tres pesos van a tener el mismo valor.

En la Tabla 6.1 se pueden ver los porcentajes para cada uno de los objetivos planteados.

Tabla 6.1: Valores de los pesos para cada uno de los tres objetivos.

Objetivo	Mecánico	Superficial	Coste	Suma
1	0.00%	75.00%	25.00%	100.00%
2	75.00%	0.00%	25.00%	100.00%
3	33.33%	33.33%	33.33%	100.00%

Se puede observar que los pesos cumplen las normas presentadas en la sección 5.2.1:

- Cada una de ellas está comprendida entre 0 y 100
- La suma de las tres es 100.

6.2.2. Cargas y sujeciones

Las cargas mecánicas y restricciones a las que está sujeta la pieza, tanto en la simulación como durante su funcionamiento, se pueden ver en la Figura 6.4, habiéndose emulado el montaje en el que trabaja la pieza.

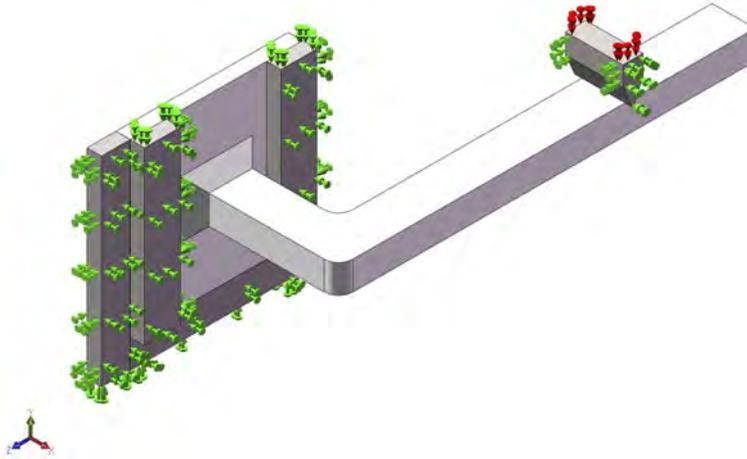


Figura 6.4: Esquema de cargas (rojo) y restricciones (verde) que actúan sobre la pieza.

Las restricciones (Figura 6.4. verde) impiden que la pieza se mueva en la dirección de las flechas, mientras que la carga (Figura 6.4. rojo) impone un desplazamiento en dirección de las flechas (vertical hacia abajo) de 20 mm situado a 45 mm el final del voladizo.

6.3. Determinación de las posibles orientaciones

El tercer y último paso común antes de aplicar a cada una de las orientaciones las tres funciones objetivo es, precisamente, la determinación de éstas (Figura 6.1.B). Para ello, y tal y como se ha explicado en la sección 5.2.2, se debe determinar la envolvente convexa (Figura 6.5).

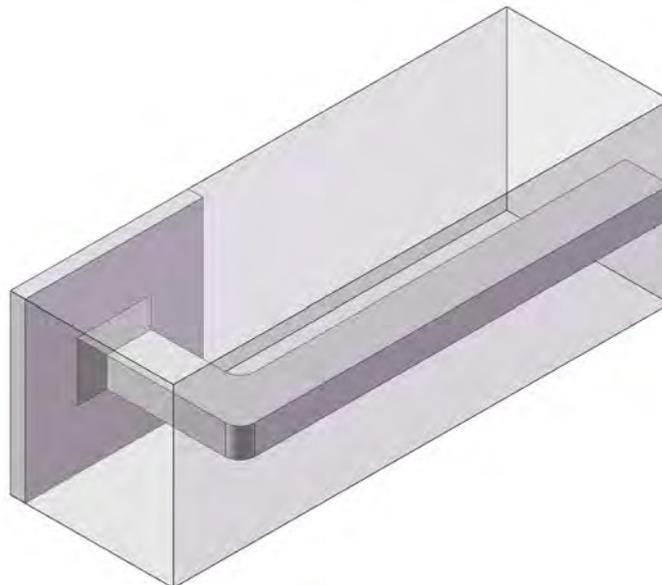


Figura 6.5: Envolvente convexa de la pieza ejemplo.

La envolvente convexa tiene seis caras planas exteriores, todas ellas pueden ser base de fabricación. En la Figura 6.6 se pueden ver las seis bases de fabricación numeradas. Esta numeración se va a seguir durante toda la metodología.

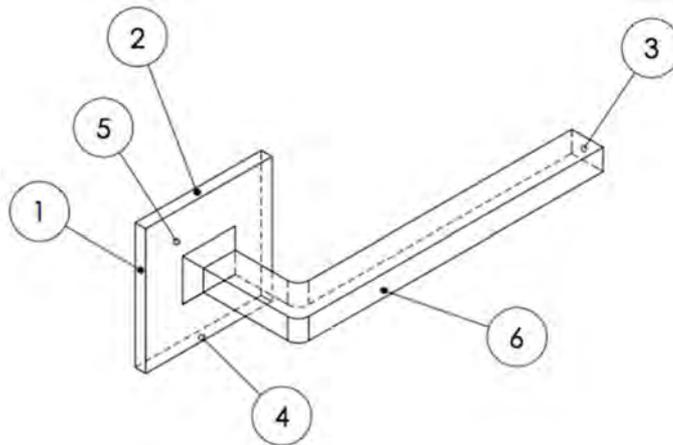


Figura 6.6: Las seis posibles bases de fabricación numeradas.

Para acabar de determinar la orientación de la pieza la longitud mayor de la base se alinear  con el eje X del sistema de coordenadas de la máquina. En la Figura 6.7 se pueden ver las seis orientaciones tal y como se visualizan con el programa Insight®.

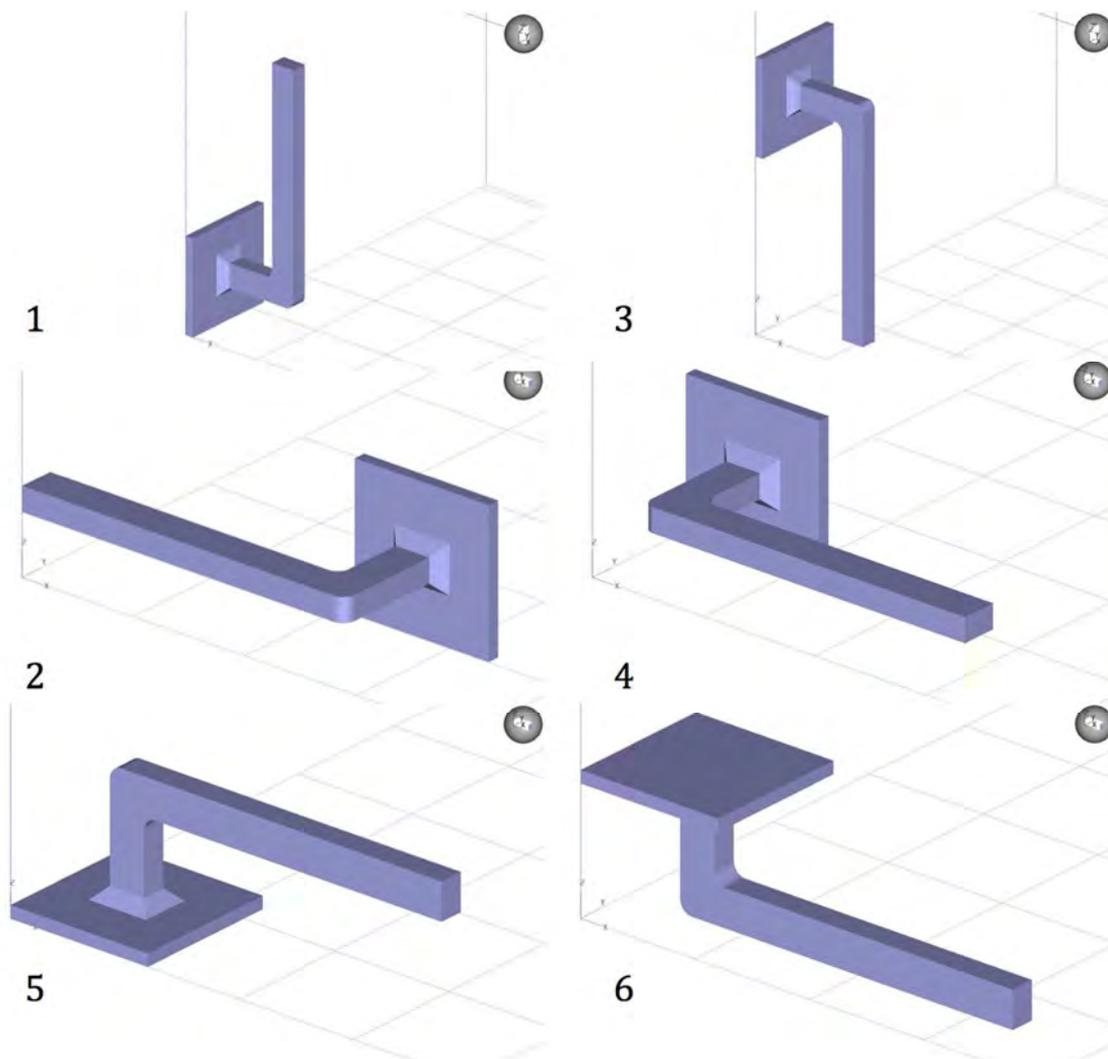


Figura 6.7: Las seis orientaciones completamente determinadas tal y como se ven en el programa Insight®.

6.3.1. Fabricación de la pieza ejemplo

Para la comprobación física de los resultados de la metodología se fabricaron sólo piezas en las orientaciones 1, 2 y 5 (Figura 6.7), tres de cada una. Esta decisión se tomó por dos razones:

- La pieza ejemplo tiene como envolvente convexa un cuadrilátero y las orientaciones presentan pares en los que la disposición de las capas e hilos es la misma, la 1 con la 3, la 2 con la 4 y la 5 con la 6. Esto hace que tanto el comportamiento mecánico como el acabado superficial de los pares sea el mismo.
- El coste económico de fabricar las seis orientaciones y sus repeticiones, para un mejor análisis estadístico de las pruebas mecánicas, es elevado.

Las piezas fueron fabricadas con PC utilizando los mismos parámetros de impresión utilizados para la caracterización del modelo constitutivo (sección 3.3.1) para, de esta manera, poder realizar las simulaciones por FEA utilizando el modelo constitutivo isotrópico medio (sección 6.6).

6.4. Función acabado superficial

6.4.1. Resultados de aplicación de metodología

Para poder aplicar la función acabado superficial es necesario definir el peso del uso de soportes. Según la experiencia adquirida fabricando con la máquina Fortus 400 mc de Stratasys® los pesos para los distintos tipos de soporte se pueden ver en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Relación entre el tipo de soporte que permite Insight® y su peso.

Soporte	Peso
Basic	0
Sparse	0
Smart	0
Surround	-0.3
Break-away	0
Soluble	0

Menos el tipo de soporte *Surround* todos los demás no afectan al acabado superficial ya que su separación de la pieza es fácil y no deja ningún defecto.

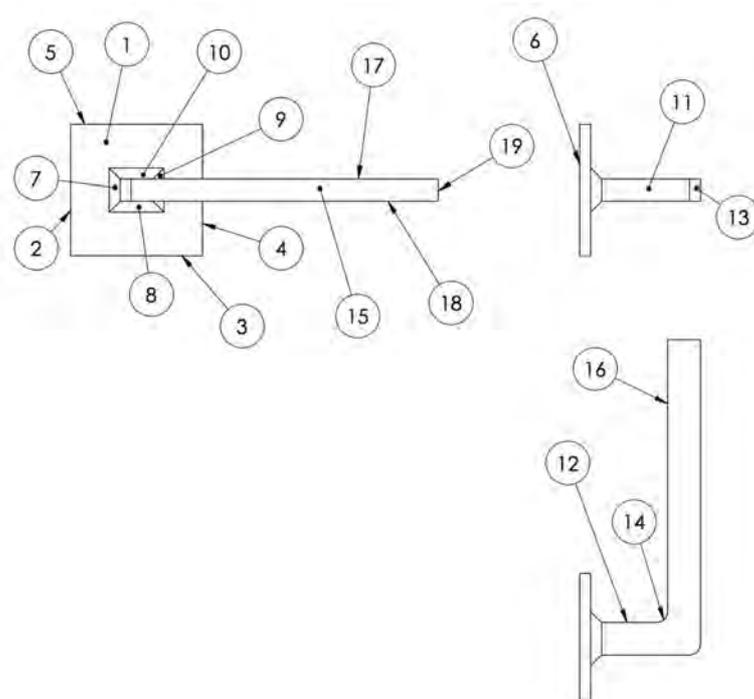


Figura 6.8: Esquema de numerado de las superficies exteriores de la pieza ejemplo.

El primer paso es el cálculo del número relativo de superficie con la ecuación 5.7, el número correspondiente a cada una de las superficies exteriores se puede ver en la Tabla 6.3. La numeración de las superficies exteriores se puede ver en la Figura 6.8.

Tabla 6.3: Número de superficie con su área en mm² y su numero relativo asociado.

Superficie	Área	Numero Relativo
1	3100	3.4141
2	300	0.3304
3	300	0.3304
4	300	0.3304
5	300	0.3304
6	3600	3.9647
7	106.07	0.1168
8	141.42	0.1557
9	106.07	0.1168
10	141.42	0.1557
11	400	0.4405
12	250	0.2753
13	78.54	0.0865
14	78.54	0.0865
15	1400	1.5418
16	1250	1.3766
17	2625	2.8910
18	2625	2.8910
19	150	0.1652
Total	17252.06	

Seguidamente se aplica a cada una de las superficies el algoritmo para determinar si es necesario el uso de soporte para su construcción (Figura 5.5). El siguiente

paso es calcular para cada orientación el valor parcial de la función objetivo (ecuación 5.6) teniendo en cuenta la disposición de cada una de las superficies exteriores, su forma (plana o cilíndrica) y si es necesario el uso de soporte o no. El peso ξ_{2j} , debido al uso de soportes, utilizado para el cálculo es de 0, asignado al soporte *break-away*.

En la Tabla 6.4 se puede ver, según la orientación (Figura 6.7), que tipo peso le corresponde a cada tipo de superficie según la Tabla 5.3. En esta tabla aparecen también el peso de cada una de ellas, el valor parcial de la función objetivo S_i (ecuación 5.6) y el valor final de la función objetivo acabado superficial FS_i (ecuación 5.5).

Tabla 6.4: Tipo de superficie (siguiendo la numeración de la Tabla 5.3) según la orientación y el cálculo de su peso junto al valor parcial de la función objetivo S_i y el valor final de la función objetivo FS_i .

# Sup	Tipo de superficie según orientación						Peso de cada superficie según orientación						
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	5	5	5	5	1	3	3.414	3.414	3.414	3.414	3.414	3.414	
2	4	5	1	5	5	5	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	
3	5	1	5	4	5	5	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	
4	1	5	3	5	5	5	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	
5	5	4	5	1	5	5	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330	
6	5	5	5	5	4	1	3.965	3.965	3.965	3.965	3.965	3.965	
7	9	5	7	5	7	9	-0.083	0.117	-0.083	0.117	-0.083	-0.083	
8	5	7	5	9	7	9	0.156	-0.110	0.156	-0.110	-0.110	-0.110	
9	7	5	9	5	7	9	-0.083	0.117	-0.083	0.117	-0.083	-0.083	
10	5	9	5	7	7	9	0.156	-0.110	0.156	-0.110	-0.110	-0.110	
11	3	5	1	5	5	5	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	
12	1	5	3	5	5	5	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	0.275	
13	13	11	12	11	12	13	-0.086	0.086	-0.086	0.086	-0.086	-0.086	
14	12	11	13	11	13	12	-0.086	0.086	-0.086	0.086	-0.086	-0.086	
15	5	5	5	5	1	4	1.542	1.542	1.542	1.542	1.542	1.542	
16	5	5	5	5	3	1	1.377	1.377	1.377	1.377	1.377	1.377	
17	5	3	5	1	5	5	2.891	2.891	2.891	2.891	2.891	2.891	
18	5	1	5	3	5	5	2.891	2.891	2.891	2.891	2.891	2.891	
19	1	5	4	5	5	5	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	
							S_i	18.255	18.468	18.255	18.468	17.723	17.723
							FS_i	0.988	1.000	0.988	1.000	0.960	0.960

Una vez calculado el resultado de la función objetivo acabado superficial para cada orientación, se pueden ordenar de mejor a peor. El resultado se puede ver en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Ordenamiento de las orientaciones según el valor de la función objetivo.

Orientación	FS_i
2	1.000
4	1.000
1	0.988
3	0.988
5	0.960
6	0.960

El ultimo paso sería aplicar a todas las orientaciones el peso del espesor de capa. El orden no variará sino que para espesores mayores el valor de la función objetivo será menor que para espesores más pequeños. A modo de ejemplo se puede ver en la Tabla 6.6 el peso ξ_{hi} utilizado para la máquina Fortus 400 mc se Stratasys®.

Tabla 6.6: Peso según el espesor de capa utilizado.

Espesor de capa/mm	#	ξ_{hi}
0.1274	4	1
0.1778	3	0.75
0.254	2	0.5
0.3302	1	0.25

Entonces el resultado final de la función acabado superficial aplicando el peso del espesor de capa se observa en la Tabla 6.7. Se puede ver que el orden no varía sino que lo hace la magnitud de FS_i .

Tabla 6.7: Valor final de la función objetivo acabado superficial aplicando el peso del espesor de capa.

Orientación	Espesor de capa			
	0.1274	0.1778	0.254	0.3302
2	1.000	0.750	0.500	0.250
4	1.000	0.750	0.500	0.250
1	0.988	0.741	0.494	0.247
3	0.988	0.741	0.494	0.247
5	0.960	0.720	0.480	0.240
6	0.960	0.720	0.480	0.240

6.4.2. Verificación resultados

Seguidamente se va a analizar el acabado superficial de las piezas ejemplo fabricadas (1 , 2 y 5) y comprobar que la función objetivo funciona. Dependiendo de la orientación las distintas superficies exteriores de la pieza afectan mas o menos el acabado superficial.

Las superficies exteriores que presentan *staircase effect* para la orientación número 1 son: 7, 9, 13 y 14. Las otras no se ven afectadas ya que su normal queda paralela o perpendicular a la dirección de fabricación. Las superficies 8 y 10, también inclinadas, no producen *staircase effect* debido ya que en esta orientación se encuentran perpendiculares a la dirección de fabricación. Las superficies que requieren soporte son la 11 y la 13.

Las superficies 7 y 9 debido a su orientación presentan *staircase effect* en cambio la 8 y la 10 no, tal y como se puede ver en la Figura 6.1.

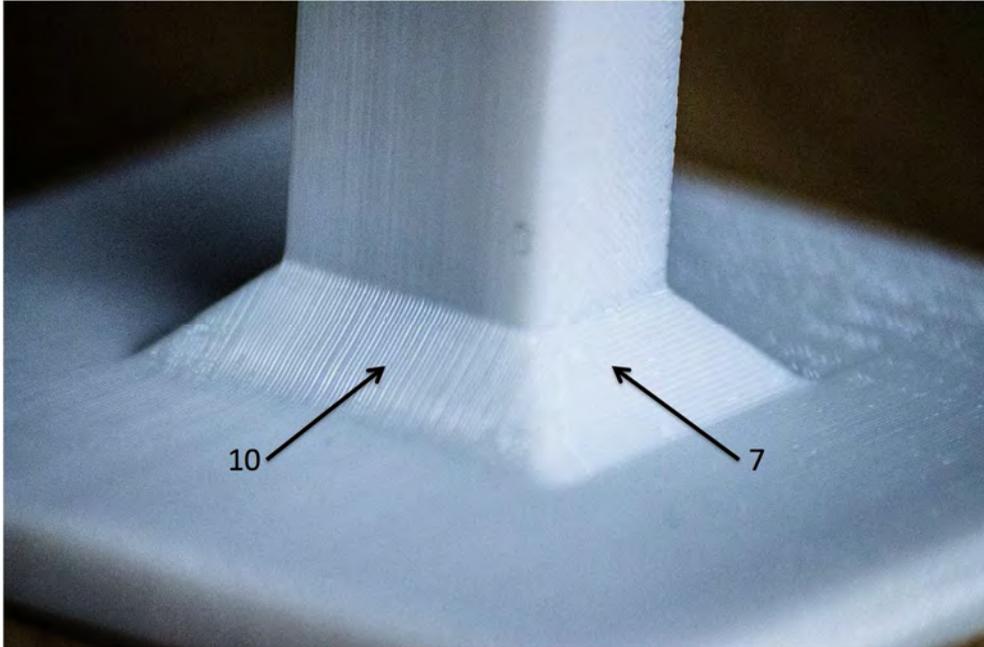


Figura 6.9: Acabado superficial de las superficies 10 y 7 de la pieza ejemplo impresa con la orientación 1.

Las superficies 13 y 14 presentan, también *staircase effect* ya que son curvadas. En la Figura 6.10 se puede ver como va aumentando a medida que el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de fabricación (desde la superficie 15 hasta la superficie 11) el *staircase effect* va disminuyendo, tal y como se había indicado (sección 4.1.2).

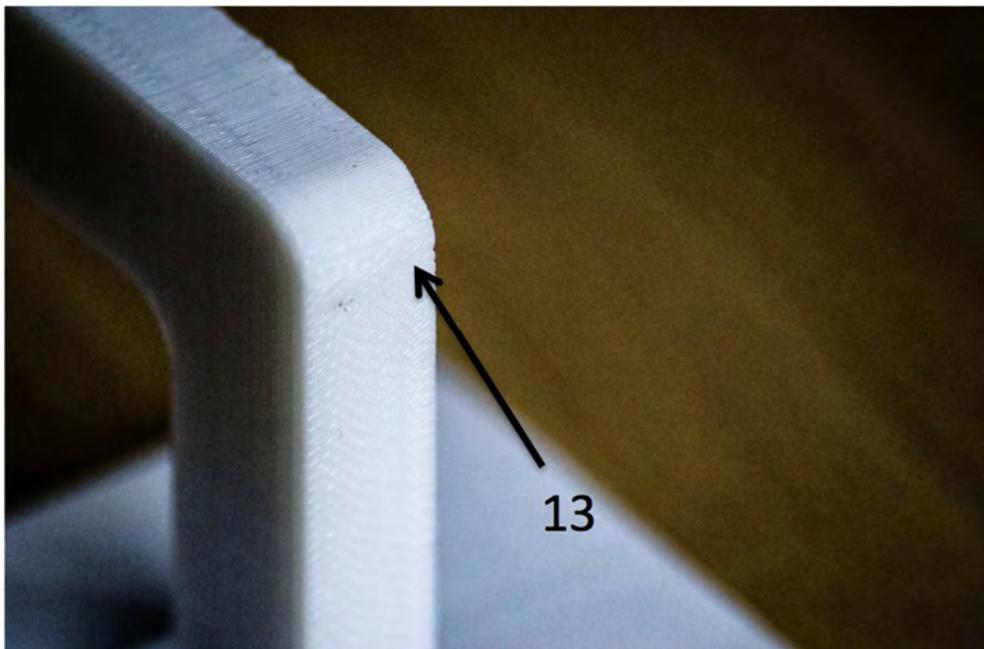


Figura 6.10: Detalle del acabado superficial de la superficie 13 de la pieza ejemplo fabricada en la orientación 1.

La superficie 11 requiere soporte ya que es plana, perpendicular a la dirección de fabricación y se encuentra en voladizo. Su acabado superficial no se ve afectado por el uso de soporte (Figura 6.11).

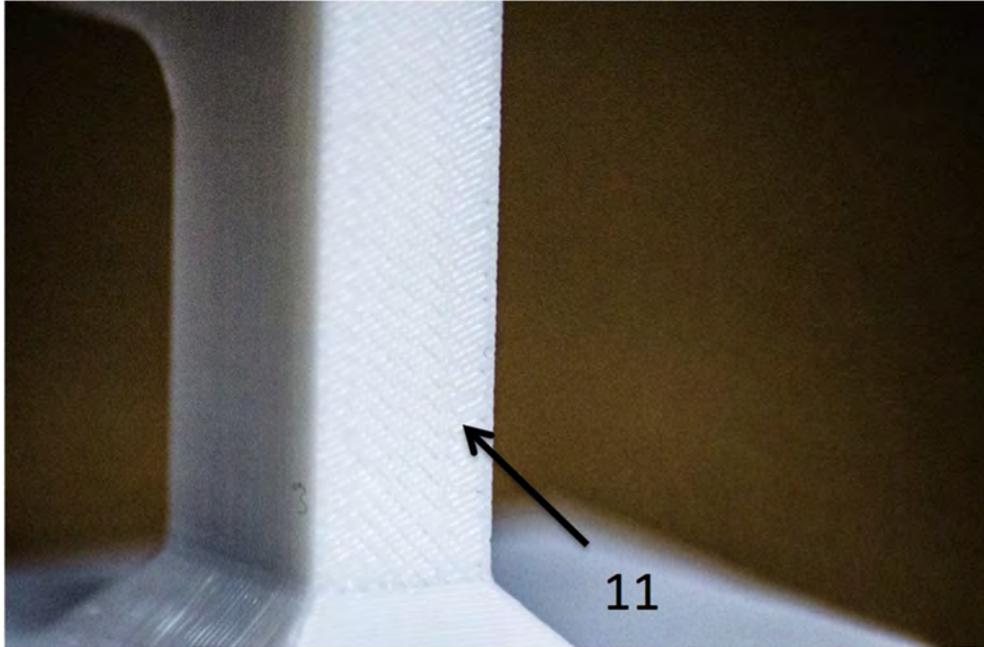


Figura 6.11: Detalle del acabado superficial de la superficie 11 de la pieza ejemplo fabricada con la orientación 1.

Las superficies exteriores que presentan *staircase effect* para la orientación número 2 son la 8 y la 10 ya que están inclinadas respecto a la base de fabricación. Las dos superficies curvadas (13 y 14) al estar, su eje, paralelo a la dirección de fabricación no presentan un mal acabado superficial. La superficie 18 necesita soporte.

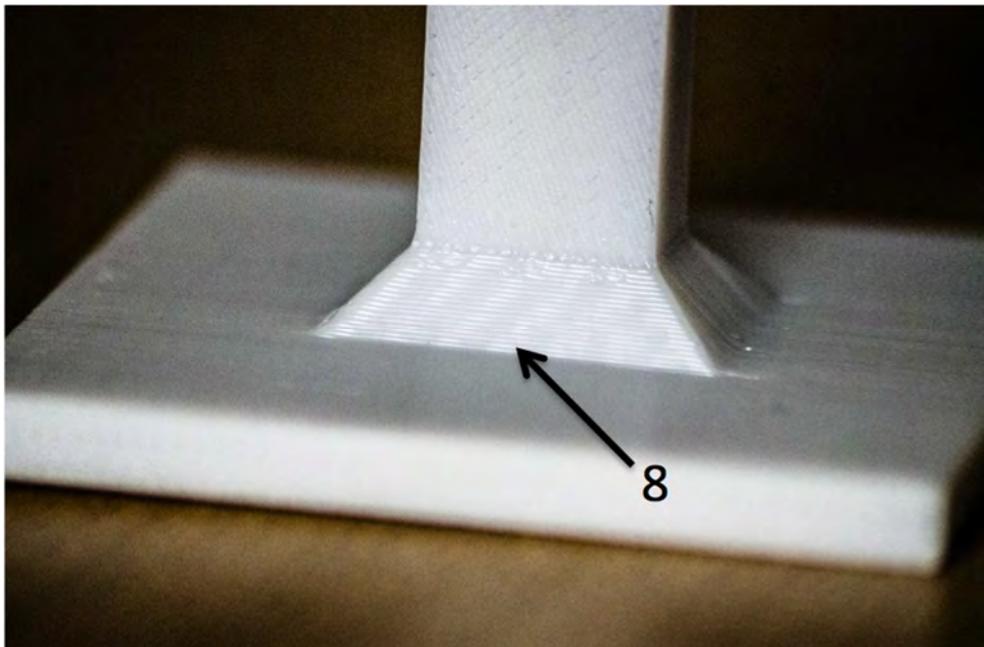


Figura 6.12: Detalle del acabado superficial de la superficie 8 de la pieza ejemplo para la orientación 2.

Las superficies 13 y 14 presentan un buen acabado superficial siendo curvadas debido a su orientación (Figura 6.13).



Figura 6.13: Detalle del acabado superficial de las superficies 13 (izquierda) y 14 (derecha) de la pieza ejemplo para la orientación 2.

La superficie 18 no presenta un peor acabado superficial en comparación a la 17 (la misma pero sin soporte) aún necesitando soporte (Figura 6.14).

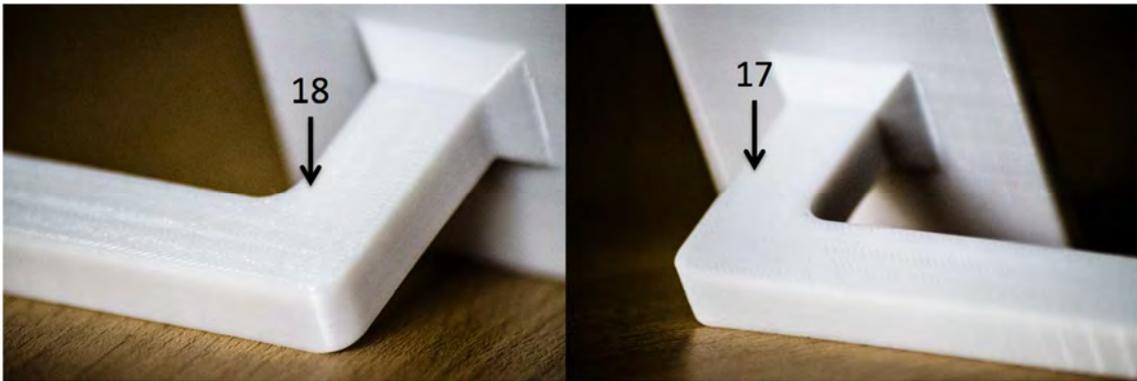


Figura 6.14: Detalle del acabado superficial de las superficies 18 (izquierda) y 17 (derecha) de la pieza ejemplo para la orientación 2.

Las superficies exteriores que presentan *staircase effect* para la orientación número 5 son: la 7, 8, 9, 10, 13 y 14. La superficies 14 y 16 necesitan de soporte y debido a la geometría de la pieza parte de la 1 también.

En esta orientación las 4 superficies inclinadas del inicio del voladizo (7, 8, 9 y 10) presentan *staircase effect* (Figura 6.15).

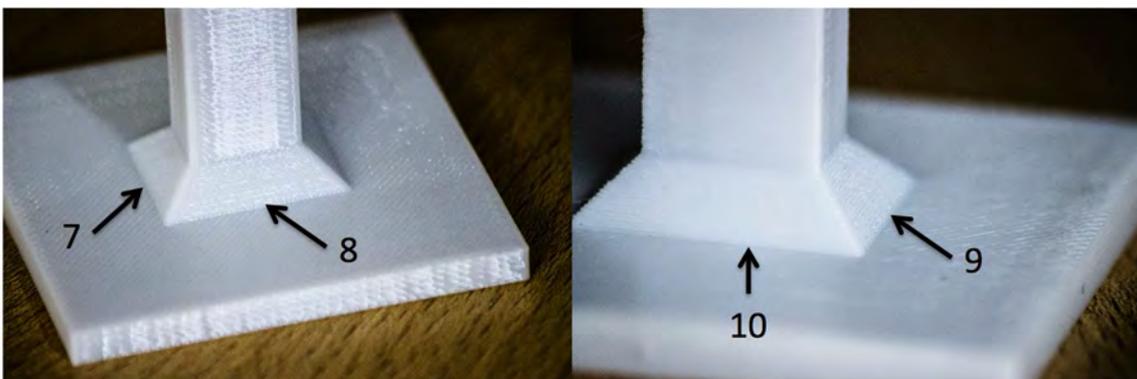


Figura 6.15: Detalle del acabado superficial de las superficies 7, 8, 9 y 10 en la orientación 5.

Las dos superficies curvadas (13 y 14) también presentan rugosidad debido a su orientación respecto la dirección de fabricación (Figura 6.16).

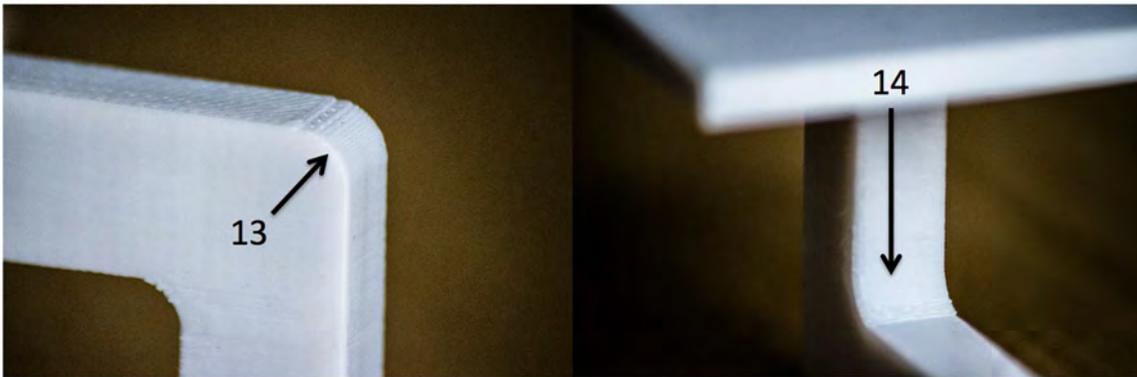


Figura 6.16: Detalle del acabado superficial de las superficies 13 (izquierda) y 14 (derecha) en la orientación 5.

La superficie 16, al necesitar soporte para su fabricación, presenta un peor acabado superficial. La Figura 6.17 presenta la diferencia de acabado superficial entre la superficie 16, a la izquierda, y la 15, a la derecha, paralelas entre si.

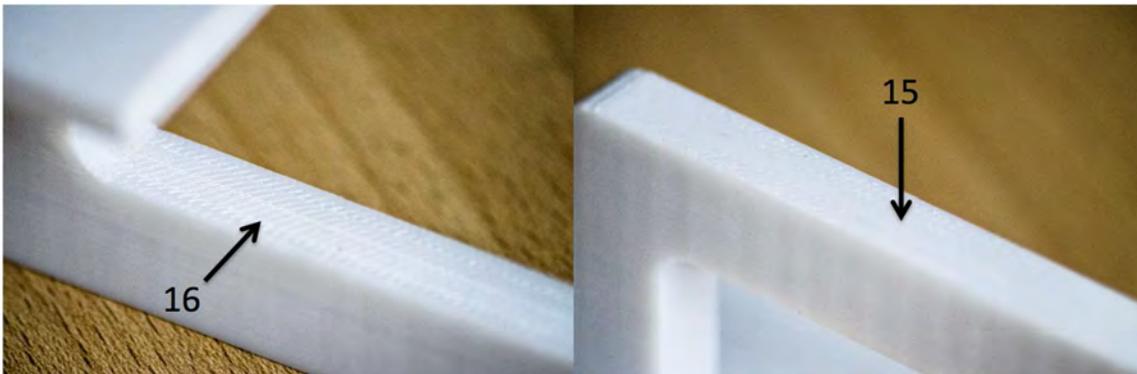


Figura 6.17: Detalle del acabado superficial de las superficies 16 (izquierda) y 15 (derecha) de la orientación 5.

Los resultados de la función objetivo muestran que entre las tres orientaciones fabricadas no existe mucha diferencia en el acabado superficial pero sí que indica que hay algunas orientaciones que son mejores que otras (Tabla 6.5).

La inspección visual también muestra que no existen grandes diferencias entre el acabado superficial de las piezas fabricadas en distintas orientaciones. Sin embargo la que presenta menos *staircase effect* es la orientación 2. Ésta solo presenta dos superficies con este defecto (8 y 10, Figura 6.12) por lo que es la orientación que presenta un mejor acabado superficial.

La orientación 1 presenta cuatro superficies con *staircase effect*, dos planas y dos curvas. El efecto del ángulo de inclinación de la superficie respecto a la dirección de fabricación se ha comprobado con las superficies curvas, en donde, si el ángulo es pequeño el efecto es grande y a medida que este va aumentando, el *staircase effect* va disminuyendo (Figura 6.10 y Figura 6.16). Al presentar mas superficies (tanto en número como en extensión) con defectos que la orientación 2, su acabado superficial es peor.

Finalmente la orientación 5 es la que presenta más superficies afectadas por el *staircase effect*, cuatro inclinadas y dos curvas. Por esta razón es la que presenta peor acabado superficial ya que es la que presenta mas extensión de superficies con defecto.

Los resultados de la función objetivo y la inspección de las piezas fabricadas son coherentes, por esta razón se puede decir que la función objetivo acabado superficial funciona.

6.5. Función coste

6.5.1. Resultados de aplicación de metodología

Se aplicará la metodología utilizando dos *software* distintos para poder ver la diferencia en el gasto de material y tiempo en máquinas distintas: el *software* Insight® y el Axon 2®. Las dos máquinas son de tecnología FDM, la primera de Stratasys® y la segunda es de BitsFromBytes®.

Los parámetros de fabricación utilizados en cada uno de los programas son los que vienen por defecto. En Insight® se han utilizado los mismos parámetros que en las otras metodologías al fabricar las piezas: una boquilla de 0.2504 mm de diámetro y el tipo de soporte *break-away*. En Axon 2® la boquilla utilizada es de 0.25 mm de diámetro y el soporte el que realiza por defecto. Los dos diámetros de boquilla determinan el espesor de capa, igual al diámetro.

El resultado de aplicar la función objetivo a las distintas orientaciones se puede ver en la Tabla 6.8 para el programa Insight® de Stratasys® y en la Tabla 6.9 para la el programa Axon 2® de BitsFromBytes®.

Tabla 6.8: Resultados de la función objetivo para cada una de las orientaciones y el ranking utilizando el programa Insight® de Stratasys® para la máquina Fortus 400mc®.

Orientación	Material Pieza/cm ³	Material Soporte/cm ³	Tiempo/min	C _i	FC _i	#
1	47.262	5.793	214	1.669	1.000	1
2	49.923	18.394	213	1.306	0.783	2
3	61.606	39.177	514	0.000	0.000	6
4	49.941	18.435	212	1.306	0.783	3
5	53.481	18.437	243	1.189	0.712	4
6	55.249	37.099	281	0.610	0.365	5
Máximo	61.606	39.177	514			

Tabla 6.9: Resultados de la función objetivo coste para cada una de las orientaciones y el ranking utilizando el programa Axon 2® de para la máquina BitsFromBytes®.

Orientación	Material Pieza/g	Material Soporte/g	Tiempo/min	C _i	FC _i	#
1	43.1	5.62	464	1.665	1.000	1
2	44.52	33.3	653	1.172	0.704	3
3	42.87	53.55	1331	0.463	0.278	5
4	44.66	34.98	664	1.141	0.685	4
5	46.77	24.09	673	1.215	0.730	2
6	46.47	86.36	1140	0.150	0.090	6
Máximo	46.77	86.36	1331			

Los resultados demuestran que, dependiendo de la máquina, los resultados pueden variar mucho para una misma pieza con las mismas orientaciones.

El material necesario para fabricar el cuerpo de la pieza es muy parecido en todas las orientaciones, excepto para la orientación 3 utilizando la Fortus 400mc®. Esta diferencia es debida a que esta máquina utiliza material de pieza para fabricar parte del soporte.

La cantidad de material de soporte y el tiempo de fabricación varían mucho dependiendo de la orientación y son los factores mas influyentes. Estos dos son los que permiten diferenciar las orientaciones mas económicas para fabricar una pieza.

Utilizando el programa Insight® la mejor orientación es la 1 ya que es la que requiere menos material de soporte. La peor, según su coste, es la 3 ya que utiliza la mayor cantidad de material de soporte y requiere el mayor tiempo. En la Figura 6.18 se pueden ver las dos orientaciones procesadas mediante el programa Insight®. A la izquierda la orientación 1 donde se puede ver que la cantidad de material de soporte (en amarillo) es muy inferior que en la orientación 3, a la derecha.

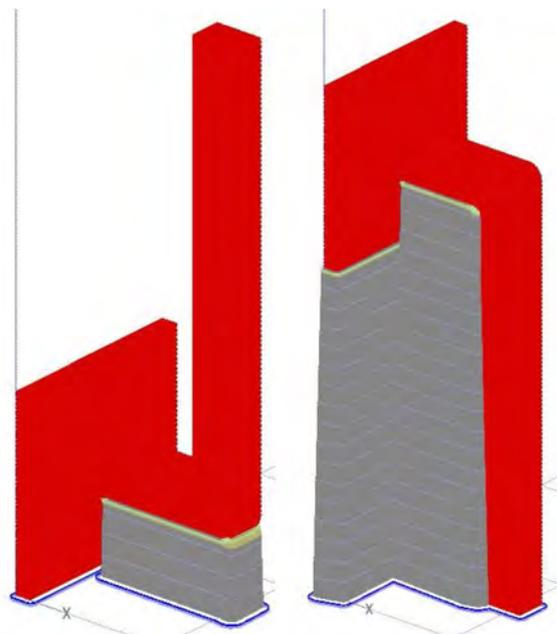


Figura 6.18: Orientaciones 1 (izquierda) y 3 (derecha) procesadas con el programa Insight®.

Con el *software* Axon 2® la mejor orientación es, también, la 1 ya que, también, es la que requiere menos material de soporte. La peor orientación es la 6 ya que utiliza la mayor cantidad de material de soporte y el tiempo requerido es el segundo mayor. En la Figura 6.19 se pueden ver la orientación 1 (arriba) y la 6 (abajo) procesadas con el programa Axon 2®. Se puede ver que la 6 utiliza mucho mas material de soporte que la 1 y, como consecuencia, es la más cara de fabricar.

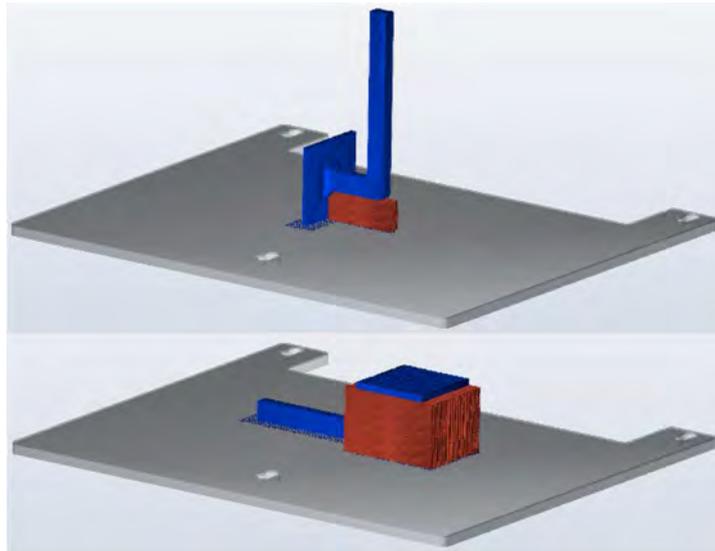


Figura 6.19: Orientaciones 1 (arriba) y 6 (abajo) procesadas con el programa Axon 2®.

6.5.2. Verificación resultados

El coste de la pieza es directamente proporcional al volumen de material y al tiempo empleados para su fabricación. El volumen de material utilizado es muy cercano al que se obtiene con el *software* de control de la máquina. Éste calcula las trayectorias necesarias para que las boquilla depositen hilo de plástico fundido y materialicen la pieza. Los datos de material y tiempo resultan de una simulación del proceso que corresponde con exactitud a la realidad. Por tanto el coste de las piezas fabricadas corresponde con el coste calculado. En la Figura 6.20 y la Figura 6.21 se pueden ver las tres orientaciones impresas tal y como se sacan de la impresora.



Figura 6.20: Pieza fabricada en la orientación 1 tal y como se saca de la impresora.

Se puede observar que la orientación 1 (Figura 6.20) es la que utiliza menos soporte de las tres orientaciones fabricadas. Las orientaciones 2 y la 5 utilizan cantidades muy parecidas de soporte (Figura 6.21).

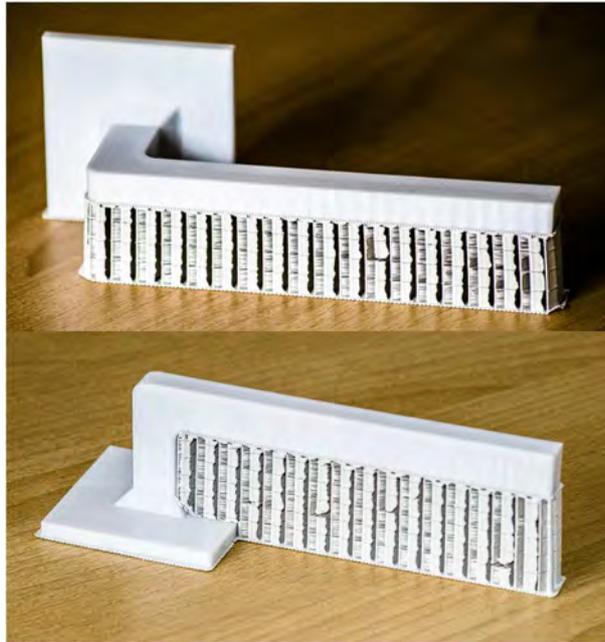


Figura 6.21: Piezas fabricadas en las orientaciones 2 (arriba) y 5 (abajo) tal y como se sacan de la impresora.

El tiempo de fabricación es muy parecido en las tres aunque la orientación 1 es la que debería emplear más tiempo para ser fabricada ya que es la que tiene una altura total mayor. También tiene un tiempo parecido a las otras debido a que el voladizo, que es la parte que le da más altura, es de sección pequeña y por lo que su fabricación capa a capa es relativamente rápida.

Los resultados de la función objetivo coste son coherentes con la observación de las piezas fabricadas. Como ya se indicó al fabricar piezas iguales los factores que más afectan son la cantidad de soporte utilizado y el tiempo de fabricación. En este caso la cantidad de material de soporte es determinante.

6.6. Función comportamiento mecánico

Como ya se ha explicado antes, la pieza presenta pares de orientaciones iguales debido a la disposición de las capas. Por esta razón sólo se ha aplicado la metodología a las orientaciones 1, 2 y 5 (Figura 6.7).

6.6.1. Resultados de aplicación de metodología

Como se ha descrito en la sección 5.2.5 se deben realizar dos pasos por separado para calcular el valor de la función objetivo del comportamiento mecánico: calcular las tensiones a tracción realizando una simulación mediante FEA y calcular la longitud total de hilos en las superficies exteriores.

Primero se realizó la simulación utilizando como modelo de material el isotrópico medio (sección 3.3.1) en las condiciones especificadas por el usuario (sección

6.2.2): un desplazamiento de 20 mm situado a 45 mm del final del voladizo (Figura 6.4).

Las tensiones máximas a tracción en la dirección X se encuentran en la base del voladizo, tal y como era de esperar (Figura 6.22). El resto de la pieza se encuentra en un estado tensionado de tracción (en la dirección X), excepto las partes inferiores del voladizo que están a compresión.

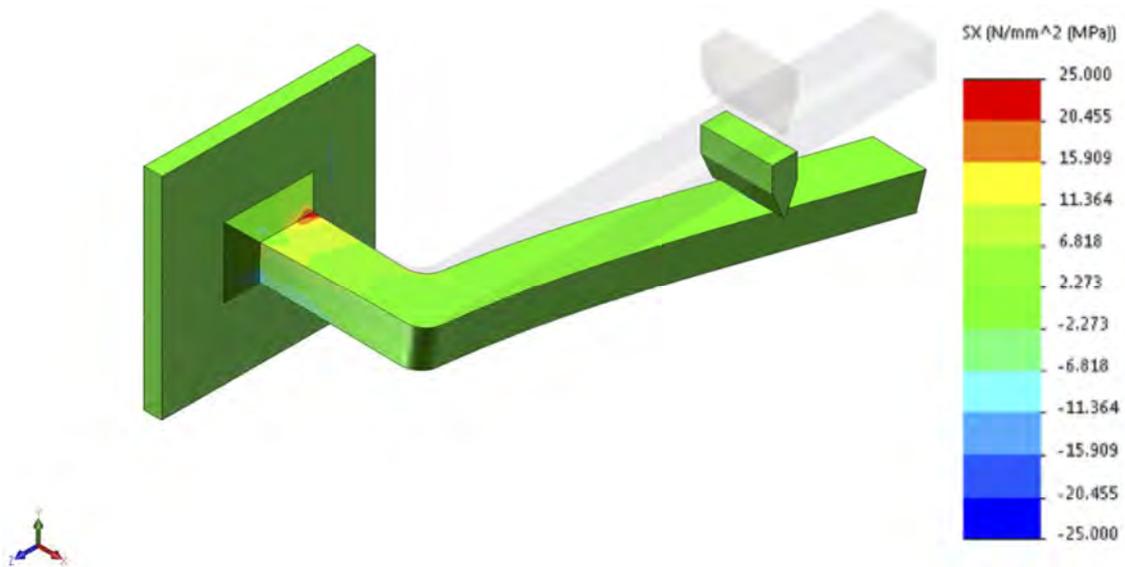


Figura 6.22: Mapa de tensiones en la dirección X.

Al igual que en la dirección X la tracción máxima en la dirección Y se encuentra en la base del voladizo (Figura 6.23). En esta dirección se observa que hay zonas de la base también sometidas a tracción y, aún más importante, la parte final del voladizo también.

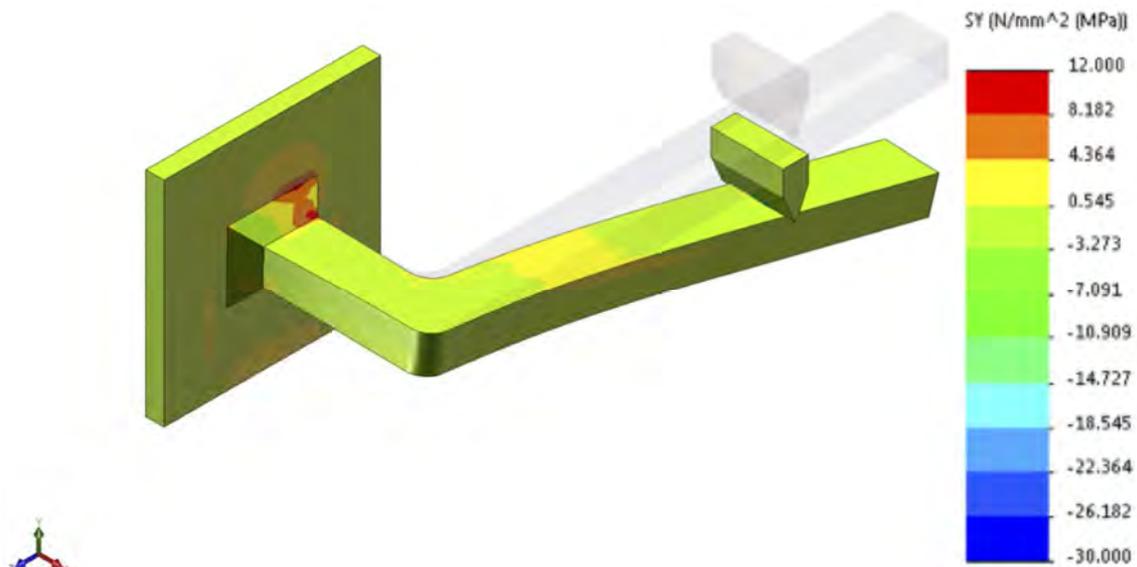


Figura 6.23: Mapa de tensiones en la dirección Y.

Las tensiones a tracción máximas en la dirección Z se acumulan en el codo (Figura 6.24). Lo mismo pasa con las tensiones a compresión.

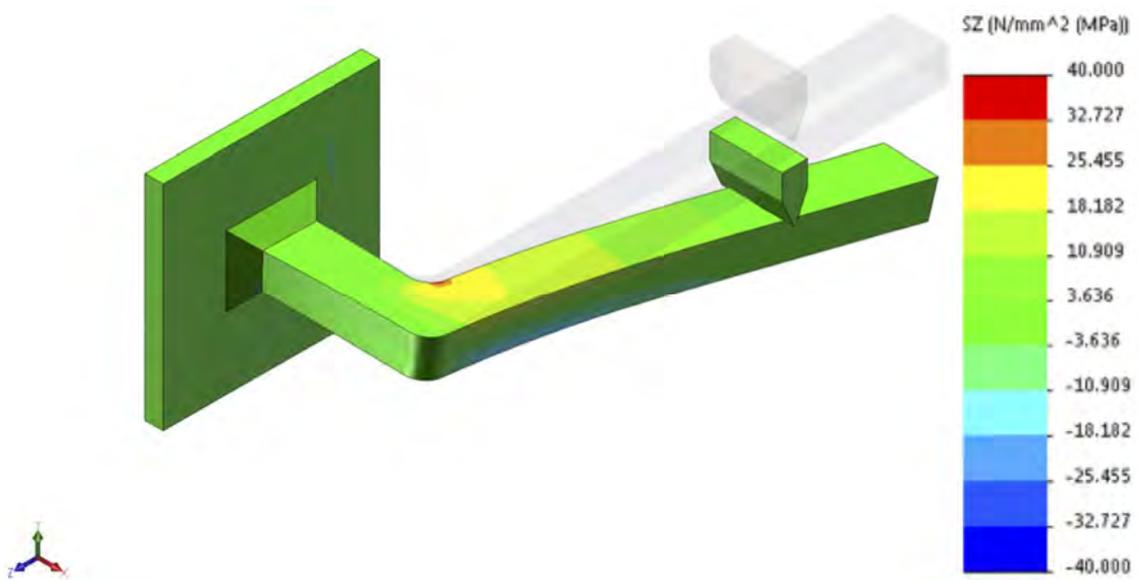


Figura 6.24: Mapa de tensiones en la dirección Z.

Utilizando la misma numeración de superficies que en la función objetivo acabado superficial (Figura 6.8) se anotan las tensiones máximas a tracción en cada una de ellas (Tabla 6.10).

Tabla 6.10: Tensiones a tracción en las tres direcciones para cada una de las superficies (Figura 6.8).

# Sup	Dirección	S/MPa	# Sup	Dirección	S/MPa	# Sup	Dirección	S/MPa
1	x	1.550E+00	8	x	6.620E+00	15	x	1.520E-01
	y	3.878E+00		y	5.209E+00		y	6.340E-01
	z	1.956E+00		z	1.494E+00		z	1.779E+01
2	x	1.000E-03	9	x	2.119E+01	16	x	1.298E+00
	y	5.670E-01		y	9.375E+00		y	2.504E+00
	z	1.057E+00		z	2.886E+00		z	3.005E+01
3	x	1.000E-03	10	x	2.272E+01	17	x	2.362E+01
	y	5.670E-01		y	9.375E+00		y	9.375E+00
	z	7.700E-02		z	4.812E+00		z	3.573E+01
4	x	4.000E-03	11	x	7.462E+00	18	x	5.892E+00
	y	4.000E-03		y	3.969E+00		y	5.209E+00
	z	2.000E-03		z	4.860E+00		z	1.517E+00
5	x	1.100E-02	12	x	2.362E+01	19	x	7.300E-02
	y	5.000E-03		y	9.375E+00		y	7.200E-02
	z	1.064E+00		z	2.886E+00		z	5.500E-02
6	x	2.242E+00	13	x	7.170E-01		x	
	y	9.960E-01		y	3.540E-01		y	
	z	1.064E+00		z	2.913E+00		z	
7	x	7.462E+00	14	x	1.326E+01		x	
	y	3.969E+00		y	5.780E+00		y	
	z	4.860E+00		z	3.573E+01		z	

El siguiente paso es contar la longitud total de hilos en las superficies exteriores de la pieza. Para ello se ha seguido la misma numeración en las superficies que con las

tensiones y la función objetivo acabado superficial. En la Figura 6.25 se puede ver un esquema con la disposición de las capas y los contornos para la orientación 1.

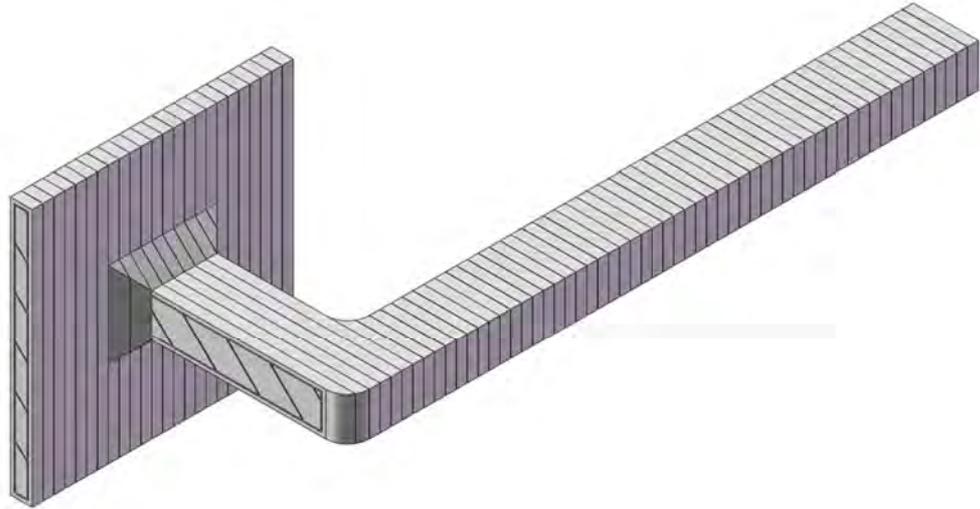


Figura 6.25: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 1.

En la Tabla 6.11 se puede ver el cálculo de la longitud total de hilos para cada superficie de la orientación 1 según el sistema de referencia indicado en la Figura 6.25.

Tabla 6.11: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 1.

# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm
1	x	0.000E+00	8	x	2.793E+02	15	x	0.000E+00
	y	1.240E+04		y	2.793E+02		y	5.600E+03
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	0.000E+00
2	x	1.000E+01	9	x	0.000E+00	16	x	0.000E+00
	y	1.200E+02		y	2.950E+02		y	5.000E+03
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	0.000E+00
3	x	1.440E+03	10	x	2.793E+02	17	x	1.056E+04
	y	0.000E+00		y	2.793E+02		y	0.000E+00
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	0.000E+00
4	x	1.000E+01	11	x	8.000E+01	18	x	1.056E+04
	y	1.200E+02		y	1.000E+01		y	0.000E+00
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	0.000E+00
5	x	1.440E+03	12	x	4.800E+01	19	x	3.000E+01
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	2.000E+01
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	0.000E+00
6	x	0.000E+00	13	x	0.000E+00		x	
	y	1.440E+04		y	2.000E+02		y	
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	
7	x	0.000E+00	14	x	0.000E+00		x	
	y	2.950E+02		y	2.000E+02		y	
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	

En la Figura 6.26 se puede ver la disposición de las capas y contornos para la orientación 2.

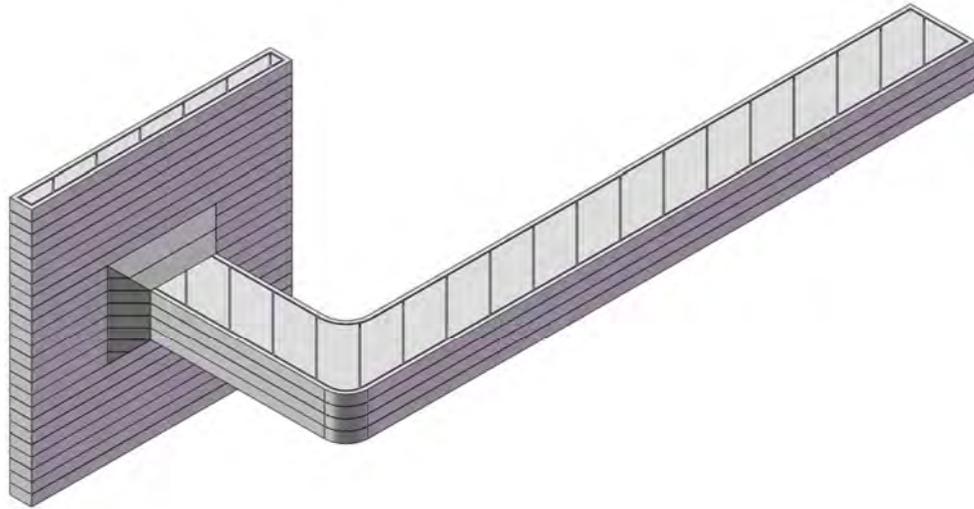


Figura 6.26: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 2.

Las longitudes totales de los hilos en las capas exteriores numeradas acorde a la Figura 6.25 se pueden ver en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 2.

# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm
1	x	0.000E+00	8	x	0.000E+00	15	x	0.000E+00
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	1.280E+04		z	3.950E+02		z	5.600E+03
2	x	1.200E+03	9	x	2.086E+02	16	x	0.000E+00
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	0.000E+00		z	2.086E+02		z	5.000E+03
3	x	1.000E+01	10	x	0.000E+00	17	x	9.000E+01
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	1.200E+02		z	3.950E+02		z	2.750E+02
4	x	1.200E+03	11	x	1.600E+03	18	x	9.000E+01
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	2.750E+02
5	x	1.000E+01	12	x	1.000E+03	19	x	6.000E+02
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	1.020E+02		z	0.000E+00		z	0.000E+00
6	x	0.000E+00	13	x	2.000E+02			
	y	0.000E+00		y	0.000E+00			
	z	1.440E+04		z	2.000E+02			
7	x	2.086E+02	14	x	2.000E+02			
	y	0.000E+00		y	0.000E+00			
	z	2.086E+02		z	2.000E+02			

La Figura 6.27 muestra la disposición de las capas e hilos de contorno para la orientación 5.

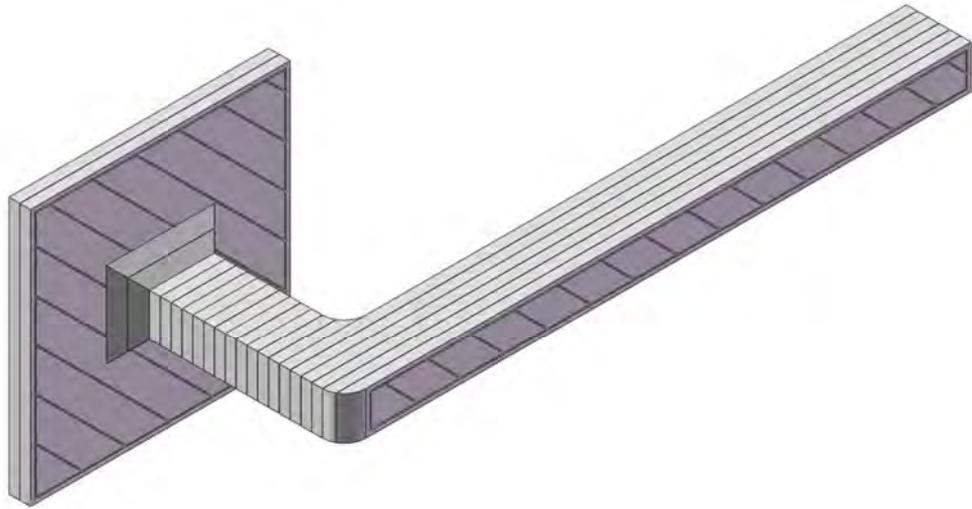


Figura 6.27: Esquema de la disposición de las capas y los contornos en la orientación 5.

La Tabla 6.13 presenta el cálculo de las longitudes totales de hilos en las superficies exteriores numeradas según la Figura 6.25.

Tabla 6.13: Longitudes totales de los hilos en las superficies exteriores según el sistema de coordenadas de la Figura 6.25 de la orientación 5.

# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm	# Sup	Dirección	L/mm
1	x	0.000E+00	8	x	0.000E+00	15	x	0.000E+00
	y	1.200E+02		y	0.000E+00		y	2.000E+01
	z	1.200E+02		z	3.950E+02		z	2.800E+02
2	x	0.000E+00	9	x	0.000E+00	16	x	0.000E+00
	y	1.200E+03		y	2.950E+02		y	2.000E+01
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	1.500E+02
3	x	0.000E+00	10	x	0.000E+00	17	x	0.000E+00
	y	0.000E+00		y	0.000E+00		y	0.000E+00
	z	1.200E+03		z	3.950E+02		z	1.056E+04
4	x	0.000E+00	11	x	0.000E+00	18	x	0.000E+00
	y	1.200E+03		y	1.600E+03		y	0.000E+00
	z	0.000E+00		z	0.000E+00		z	1.056E+04
5	x	0.000E+00	12	x	0.000E+00	19	x	0.000E+00
	y	0.000E+00		y	1.000E+03		y	6.000E+02
	z	1.200E+03		z	0.000E+00		z	0.000E+00
6	x	0.000E+00	13	x	0.000E+00		x	0.000E+00
	y	1.200E+02		y	2.000E+02			
	z	1.200E+02		z	0.000E+00			
7	x	0.000E+00	14	x	0.000E+00		x	0.000E+00
	y	2.950E+02		y	2.000E+02			
	z	0.000E+00		z	0.000E+00			

Dependiendo de la orientación las direcciones 1 y 2 de la ecuación 5.16 varían. En la Tabla 6.14 se puede ver cuales son para cada orientación.

Tabla 6.14: Direcciones 1 y 2 para la ecuación 5.16 según la orientación.

Orientación	Dirección		
	1	2	3
1	x	y	z
2	x	z	y
5	y	z	x

Con el cálculo de las tensiones máximas a tracción y la longitud total de hilos en las superficies exteriores de la pieza podemos calcular, para cada orientación, el valor parcial de la función objetivo con la ecuación 5.16. En la Tabla 6.15 se pueden ver los resultados.

Tabla 6.15: Resultados de la función objetivo para cada orientación con el resultado parcial y el final.

	Orientación		
	1	2	5
Sx*Lx	321622.667	47035.608	0.000
Sy*Ly	87846.346	0.000	22264.720
Sz*Lz	0.000	312401.301	407112.224
M _i	409469.013	359436.910	429376.944
FM _i	0.954	0.837	1.000

Se observa que para cada orientación hay una dirección en el resultado de la multiplicación entre la tensión y la longitud de los hilos es cero. Esto es debido a que la dirección es la de fabricación y, por lo tanto no hay hilos (es la dirección en la que se apilan las capas). Al utilizar el modelo isotrópico medio no es necesario tener en cuenta la orientación de la pieza al realizar las simulaciones, pero sí es necesario tener en cuenta la dirección de los hilos cuando se contabilizan sus longitudes totales.

La función objetivo da como resultado que la orientación mecánicamente más resistente es la 5, seguida de la 1 y la 2. El resultado final de la función objetivo para todas las orientaciones se puede ver en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16: Valor de la función objetivo comportamiento mecánico para todas las orientaciones.

Orientación	FM _i
1	0.954
2	0.837
3	0.954
4	0.837
5	1.000
6	1.000

6.6.2. Verificación resultados

Para comprobar el correcto funcionamiento de la función objetivo del comportamiento mecánico se utilizó el mismo montaje y metodología que la desarrollada para correlacionar los resultados de las simulaciones mediante FEA y

los mecánicos (sección 3.3.1). El montaje del experimento se puede ver en la Figura 6.28.

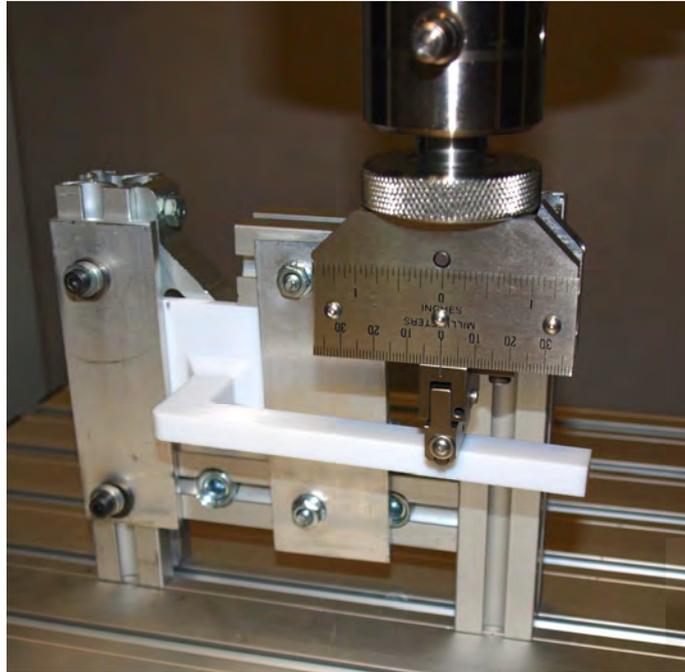


Figura 6.28: Montaje para la comprobación de la función objetivo comportamiento mecánico.

El único cambio respecto a los experimentos realizados para la correlación entre resultados físicos y simulados fue el de subir la estructura de soporte. Este cambio se realizó ya que se pretendía lograr un desplazamiento superior para así sobrepasar el límite elástico del material e incluso llegar a la rotura de la probeta.

Todas las probetas rompieron de la misma manera tal y como se puede ver en la Figura 6.29. Rompieron por dos sitios: la base del voladizo que es la zona que acumula más tensiones y por el codo, zona también muy solicitada mecánicamente.



Figura 6.29: Probeta 5.02 rota después del ensayo.

En la Figura 6.30 se pueden ver, para cada orientación y sus repeticiones (X.01, X.02 y X.03), los resultados de los ensayos. Se observa que en todas las orientaciones la relación entre el desplazamiento y la fuerza se puede considerar lineal hasta los 20 mm de deformación. A partir de ese momento se pierde linealidad. Hay dos razones por la que se puede perder la linealidad:

- Debido a la deformación las uniones entre los hilos entre capas o de una misma capa se debilitan y los hilos se desplazan entre sí.
- La deformación hace que la pieza supere el límite elástico y se entre en la zona plástica del material.

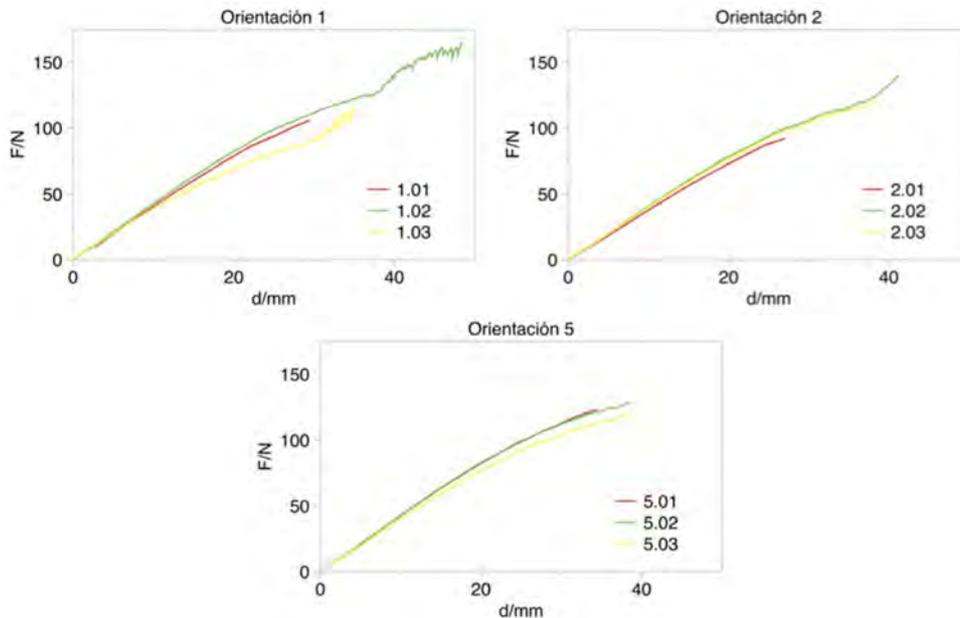


Figura 6.30: Resultados de los ensayos para cada una de las tres orientaciones.

Se ha utilizado un programa desarrollado con MATLAB® (sección 9.3) para obtener el coeficiente de rigidez (F/d). El programa reúne las tres curvas de cada una de las repeticiones (X.01, X.02 y X.03). Con las curvas juntas se interpola linealmente el resultado de la fuerza para distintos valores de desplazamiento y finalmente se ajusta una recta hasta 20 mm de desplazamiento ya que se consideró que es dónde el comportamiento de las rectas dejó de ser lineal. El resultado se puede ver en la Figura 6.31 y la Tabla 6.16.

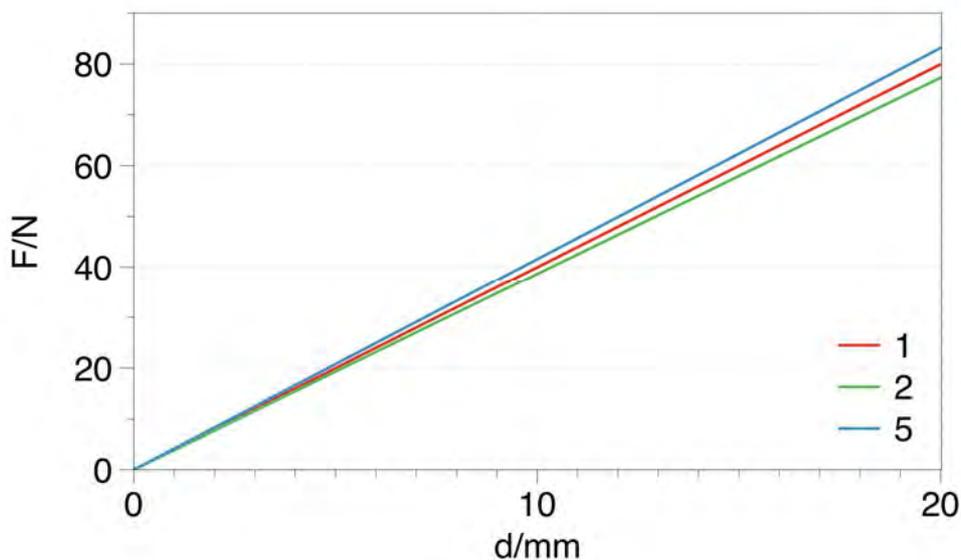


Figura 6.31: Resultados de fuerza frente desplazamiento para cada orientación.

La orientación más resistente mecánicamente será la que de una fuerza de reacción menor para un mismo desplazamiento. Por esta razón la mejor orientación, mecánicamente hablando, es la 5. En la Figura 6.31 se puede observar que para una misma fuerza la orientación 5 es la que ha sufrido menos desplazamiento, seguido de la 1 y, por último, la 2. Esto también se puede observar en la Tabla 6.17 donde el mismo razonamiento se puede utilizar, en este caso la pendiente de la recta. Cuanto mayor sea ésta más resistencia mecánica tendrá la pieza.

Tabla 6.17: Resultados del factor de rigidez para cada orientación y su residual.

F/d	r²
3.997	0.997
3.866	0.999
4.158	0.999

Los resultados muestran que la función objetivo comportamiento mecánico y la experimentación conducen a la misma conclusión: la orientación 5 es la mejor desde el punto de vista mecánico, seguida de la 1 y la 2.

6.7. Determinación de la mejor orientación

6.7.1. Resultados de la metodología

Una vez se han aplicado todas las funciones objetivo a todas las orientaciones es posible determinar la mejor orientación según las especificaciones del usuario (Figura 6.1F). En la Tabla 6.18 se pueden ver los resultados de cada función objetivo para cada orientación.

Tabla 6.18: Resultados de las funciones objetivo para cada orientación y el ranking para cada una de ellas.

Orientación	Acabado superficial	#	Coste	#	Comportamiento mecánico	#
1	0.988	2	1.000	1	0.954	2
2	1.000	1	0.783	2	0.837	3
3	0.988	2	0.000	5	0.954	2
4	1.000	1	0.783	2	0.837	3
5	0.960	3	0.712	3	1.000	1
6	0.960	3	0.365	4	1.000	1

Si se aplican los pesos especificados por el usuario (Tabla 6.1) utilizando la ecuación 5.17 se obtiene el resultado de la metodología (Tabla 6.19).

Tabla 6.19: Resultado de la metodología para cada una de las opciones planteadas por el usuario (Tabla 6.1) y el ranking para cada uno de ellas.

Orientación	Objetivo					
	1		2		3	
	O_i	#	O_i	#	O_i	#
1	0.991	1	0.965	1	0.981	1
2	0.946	3	0.823	5	0.873	4
3	0.741	6	0.715	6	0.647	6
4	0.946	2	0.824	4	0.873	3
5	0.898	4	0.928	2	0.891	2
6	0.811	5	0.841	3	0.775	5

6.7.2. Verificación de los resultados

La primera opción es la que planteaba la fabricación de un prototipo por lo que las funciones objetivo a priorizar eran la de acabado superficial, con un 75%, y la de coste, con el 25% restante. La orientación 1 es la que da un resultado mejor (Tabla 6.19), eso es debido a que es la que presenta el menor coste (Tabla 6.18) y el segundo mejor acabado superficial (Tabla 6.18). Por esta razón es la que mejor se adapta a las necesidades del usuario. Sin embargo hay que tener en cuenta que las orientaciones 2 y 4 son las que presentan el mejor acabado superficial de todas (Tabla 6.18) y su coste es el segundo menor (Tabla 6.18). En esta opción se debe ver si el coste es tan diferente entre la orientación 1 y la 2 o la 4.

La segunda opción pretende fabricar una pieza funcional a bajo coste, por esta razón el peso del comportamiento mecánico es del 75% y el del coste 25%. Para esta opción la mejor orientación vuelve a ser la 1 (Tabla 6.19). Otra vez es debido a que presenta el menor coste (Tabla 6.18). La orientación 1, como se ha visto en la sección 6.6 es la que presenta el segundo mejor comportamiento (Tabla 6.18). Según el comportamiento mecánico la orientación 5 es la mejor, a poca diferencia de la 1, pero como su coste es bastante más elevado debido al uso de estructuras de soporte para su fabricación no es la más adecuada para esta opción.

En la última opción, fabricar una pieza final con buen acabado superficial, bajo coste y buen comportamiento mecánico, la mejor orientación vuelve a ser la 1 (Tabla 6.19). Como ya se ha comentado es la que tiene un coste menor, el segundo mejor acabado superficial y comportamiento mecánico por lo que la hace la mejor opción. La segunda opción es la orientación 5 pero su coste es elevado (Tabla 6.18).

Las peor orientación para todas las opciones planteadas es la 3 (Tabla 6.18). esto sucede básicamente debido a que es la que tiene el coste más elevado y, por lo tanto una puntuación de cero en esta función objetivo. Sin embargo si el coste no fuera un problema como tiene la misma calificación tanto de acabado superficial como de comportamiento mecánico que la 1 podría ser una opción a tener en cuenta.

7. Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones que se han realizado en la elaboración de este trabajo para cumplir los dos objetivos planteados. También se presentan aspectos del trabajo que pueden ser susceptibles a ser futuros trabajos de investigación.

7.1. Conclusiones

Las conclusiones de la tesis se han agrupado en dos bloques. Primero las obtenidas de los estudios del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM. El segundo bloque agrupa las conclusiones de el desarrollo de la metodología para determinar la mejor orientación de fabricación.

7.1.1. Conclusiones sobre el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)

Los experimentos realizados demuestran que los parámetros de fabricación juegan un gran papel en el comportamiento mecánico, tanto estático como dinámico, de las piezas fabricadas mediante FDM. De estos, la orientación, que determina la disposición de las capas y de los hilos extruidos, es la más importante.

Los hilos depositados actúan como fibras de refuerzo y, por lo tanto, si los esfuerzos mecánicos están colocados en su misma dirección, la resistencia mecánica de la pieza aumenta. Cuántos más hilos estén alineados en la dirección del esfuerzo de tracción mejor será su comportamiento.

Para incrementar la resistencia mecánica de las piezas, su orientación debe ser de tal manera que las mayores tensiones a tracción estén alineadas con los contornos más largos. También, para evitar la rotura frágil, estas tensiones máximas no deben ser paralelas a la dirección de fabricación.

La simulación del comportamiento mecánico de piezas fabricadas con FDM es posible mediante métodos de elementos finitos. Se ha visto que el modelo constitutivo isotrópico, determinado mediante ensayos de tracción/elongación, da buenos resultados en las simulaciones realizadas si no se supera el límite elástico del material. En caso contrario es preferible utilizar el ortotrópico ya que tiene en cuenta los límites elásticos en las tres direcciones.

Aumentar la densidad volumétrica de las piezas fabricadas por FDM, mediante el control de los parámetros de fabricación, hace que la elasticidad y rigidez de ellas aumente. La cantidad de contornos que hay en una pieza también influyen su capacidad de absorber impactos, siendo mayor cuantos más contornos haya. Sin embargo, las piezas menos continuas disipan mejor la energía y son capaces de absorber mejor los impactos.

Controlando los parámetros de fabricación de las piezas FDM es posible diseñar y fabricar piezas para aplicaciones muy concretas y con una gran funcionalidad.

7.1.2. Conclusiones sobre la metodología para la determinación de la mejor orientación para la fabricación de piezas finales mediante Fused Deposition Modeling (FDM).

Con las conclusiones alcanzadas en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM, la bibliografía consultada y la experiencia adquirida se ha desarrollado una metodología que permite seleccionar cuantitativamente la mejor orientación para fabricar piezas finales.

Dicha metodología tiene en cuenta los defectos que presentan las piezas en el acabado superficial como el *staircase effect*, el uso de soportes y el espesor de capa buscando la orientación que presenta el mínimo de ellos.

Como el coste está determinado por la cantidad de material utilizada y el tiempo de fabricación, se han considerado estos dos factores para la obtención de la orientación que conduce al mínimo coste.

La metodología permite determinar la orientación mecánicamente más resistente. El desarrollo del modelo constitutivo permite, mediante simulaciones de FEA, conseguir resultados fiables bajo condiciones lineales elásticas. La alineación de los contornos con las tensiones a tracción en las superficies exteriores de la pieza permite ordenar cuantitativamente, de mejor a peor, las orientaciones.

Las funciones de acabado superficial y coste son aplicables a cualquier tecnología AM ya que los factores considerados son comunes para todas ellas. La función del comportamiento mecánico no puede ser aplicada debido a que no se disponen de modelos constitutivos de otros materiales. Sin embargo, como todas las máquinas FDM funcionan extruyendo hilos la filosofía de alinear estos con los esfuerzos de tracción se puede aplicar.

La metodología desarrollada permite seleccionar la mejor orientación para fabricar piezas con tecnología FDM teniendo en cuenta especificaciones de acabado superficial, coste y comportamiento mecánico dados por el usuario.

7.2. Trabajos futuros

Con el propósito de seguir avanzando en el conocimiento del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante tecnologías AM, se enumeran posibles temas a tratar en futuros trabajos de investigación agrupados en dos bloques.

En el ámbito del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas mediante FDM y AM:

- Determinación de más modelos constitutivos variando parámetros de fabricación (*build style*, espesor de capa) y materiales.
- Determinar modelos constitutivos para diferentes tecnologías de fabricación AM.
- Mejorar la correlación entre las simulaciones de los modelos constitutivos y las piezas fabricadas mediante tecnologías AM.

- Estudiar la influencia de otros parámetros en el comportamiento mecánico dinámico de piezas fabricadas mediante cualquier tecnología AM.

En el ámbito de la metodología para fabricar de piezas finales mediante tecnologías FDM y AM:

- Desarrollar un *software* que agrupe toda la metodología desarrollada.
- Ampliar, mediante la determinación de modelos constitutivos para otros materiales y tecnologías, la aplicabilidad de la metodología .

8. Bibliografía

1. Groover MP. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación; 1997.
2. Gibson I, Rosen DW, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*; 2010.
3. Hopkinson N, Dickens P. Emerging Rapid Manufacturing Processes. In: *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*; 2005.
4. Pham DT, Dimov SS, Gault RS. Part orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*. 1999;15:674–682. doi:10.1007/s001700050118.
5. Kruth JP, Mercelis P, Vaerenbergh J Van, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp J*. 2005;11:26–36. doi:10.1108/13552540510573365.
6. Ahn D, Kweon J-H, Choi J, et al. Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing. *J Mater Process Technol*. 2012;212(2):339–346. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013.
7. Volpato N, Foggiatto JA, Schwarz DC. The influence of support base on FDM accuracy in Z. *Rapid Prototyp J*. 2014;20:2. doi:10.1108/RPJ-12-2012-0116.
8. Quintana R, Choi JW, Puebla K, et al. Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography- manufactured ASTM D-638 type I specimens. *Int J Adv Manuf Technol*. 2010;46:201–215. doi:10.1007/s00170-009-2066-z.
9. Hague R, Mansour S, Saleh N, et al. Materials analysis of stereolithography resins for use in Rapid Manufacturing. *J Mater Sci*. 2004;39(7):2457–2464. doi:10.1023/B:JMSC.0000020010.73768.4a.
10. Puebla K, Arcaute K, Quintana R, et al. Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyp J*. 2012;18(5):374–388. doi:10.1108/13552541211250373.
11. Jacobs PF. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers; 1992.

12. Chockalingam K, Jawahar N, Chandrasekhar U, et al. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Rapid Prototyp J.* 2006;12(2):106–113. doi:10.1108/13552540610652456.
13. Ajoku U, Saleh N, Hopkinson N, et al. Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2006;220(7):1077–1086. doi:10.1243/09544054JEM537.
14. Berti G, D'Angelo L, Gatto A, et al. Mechanical characterisation of PA-Al2O3 composites obtained by selective laser sintering. *Rapid Prototyp J.* 2010;16(2):124–129. doi:10.1108/13552541011025843.
15. Thompson DC, Crawford RH. Computational quality measures for evaluation of part orientation in freeform fabrication. *J Manuf Syst.* 1997;16(4):273–289. doi:10.1016/S0278-6125(97)89098-X.
16. Jain PK, Pandey PM, Rao PVM. Effect of delay time on part strength in selective laser sintering. *Int J Adv Manuf Technol.* 2009;43:117–126. doi:10.1007/s00170-008-1682-3.
17. Williams JM, Adewunmi A, Schek RM, et al. Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials.* 2005;26(23):4817–27. doi:10.1016/j.biomaterials.2004.11.057.
18. Jain PK, Pandey PM, Rao PVM. Experimental investigations for improving part strength in selective laser sintering. *Virtual Phys Prototyp.* 2008;3(January 2015):177–188. doi:10.1080/17452750802065893.
19. Gibson I, Shi D. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. *Rapid Prototyp J.* 1997;3:129–136. doi:10.1108/13552549710191836.
20. Majewski C, Hopkinson N. Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of laser sintered nylon-12 parts. *Rapid Prototyp J.* 2011;17(3):176–180. doi:10.1108/13552541111124743.
21. Bagsik A, Schöppner V. Mechanical Properties of Fused Deposition

Modeling Parts Manufactured with ULTEM 9085. *ANTEC 2011 Plast Annu Tech Conf Proc.* 2011.

22. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *J Adv Res.* 2012;3(1):81–90. doi:10.1016/j.jare.2011.05.001.
23. Stratasys. *Characterization of Material Properties for Fortus ABS-M30.*; 2011.
24. Stratasys. *Characterization of Material Properties for Fortus Polycarbonate (PC).*; 2014.
25. Espalin D, Arcaute K, Rodriguez D, et al. Fused deposition modeling of patient-specific polymethylmethacrylate implants. *Rapid Prototyp J.* 2010;16(3):164–173. doi:10.1108/13552541011034825.
26. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater Des.* 2010;31(1):287–295. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.016.
27. Durgun I, Ertan R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyp J.* 2014;20:228–235. doi:10.1108/RPJ-10-2012-0091.
28. Bagsik A, Schoeppner V, Klemp E. FDM Part Quality Manufactured with Ultem 9085. *14th Int Sci Conf Polym Mater.* 2010;15(17.2010). Available at: [http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM Test Reports/FDM Part Quality Manufactured with Ultem.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/FDM%20Part%20Quality%20Manufactured%20with%20Ultem.pdf).
29. Domingo-Espin M, Puigoriol-Forcada JM, Garcia-Granada A-A, et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Mater Des.* 2015;83:670–677.
30. Horn TJ, Harrysson OL a., Li H a. W, et al. Development of a patient-specific bone analog for the biomechanical evaluation of custom implants. *Rapid Prototyp J.* 2013;20(1):41–49. doi:10.1108/RPJ-08-2012-0069.
31. Spierings AB. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyp J.* 2013;19(2):88–94. doi:10.1108/13552541311302932.
32. Schmidtke K, Palm F, Hawkins a., et al. Process and Mechanical Properties:

Applicability of a Scandium modified Al-alloy for Laser Additive Manufacturing. *Phys Procedia*. 2011;12:369–374.
doi:10.1016/j.phpro.2011.03.047.

33. Pandey P, Reddy NV, Dhande S. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *J Mater Process Technol*. 2003;132(1-3):323–331. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602009536>. Accessed October 24, 2013.
34. Xu F, Loh H, Wong Y. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. *Rapid Prototyp J*. 1999;5(2):54–60. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1455152&show=abstract>. Accessed October 24, 2013.
35. Sabourin E, Houser S a., Bøhn JH. Adaptive slicing using stepwise uniform refinement. *Rapid Prototyp J*. 1996;2(4):20–26. doi:10.1108/13552549610153370.
36. Pérez CJL. Analysis of the surface roughness and dimensional accuracy capability of fused deposition modelling processes. *Int J Prod Res*. 2002;40(12):2865–2881. doi:10.1080/00207540210146099.
37. Armillotta A. Assessment of surface quality on textured FDM prototypes. *Rapid Prototyp J*. 2006;12(1):35–41. doi:10.1108/13552540610637255.
38. Vijay P, Danaiah P, D. Rajesh K V. Critical Parameters Effecting the Rapid Prototyping Surface Finish. *J Mech Eng Autom*. 2012;1(1):17–20. doi:10.5923/j.jmea.20110101.03.
39. McClurkin JE, Rosen DW. Computer-aided build style decision support for stereolithography. *Rapid Prototyp J*. 1998;4(1):4–13. doi:10.1108/13552549810197505.
40. Kumar GP, Regalla SP. Optimization of Support Material and Build Time in Fused Deposition Modeling (FDM). *Appl Mech Mater*. 2011;110-116:2245–2251. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245.
41. Singh R. Process capability analysis of fused deposition modelling for plastic components. *Rapid Prototyp J*. 2013;20(1):69–76. doi:10.1108/RPJ-02-2012-0018.

42. Singh R. Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components. *Rapid Prototyp J.* 2013;19(1):58–63. doi:10.1108/13552541311292745.
43. Domingo-Espin M, Borros S, Agulló N, et al. Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts. *3D Print Addit Manuf.* 2014;1(2):70–77. doi:10.1089/3dp.2013.0007.
44. Kazemi M, Rahimi AR. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts. *Rapid Prototyp J.* 2015;21(1):79–88. doi:10.1108/RPJ-12-2012-0118.
45. Duan B, Cheung WL, Wang M. Optimized fabrication of Ca-P/PHBV nanocomposite scaffolds via selective laser sintering for bone tissue engineering. *Biofabrication.* 2011;3:015001. doi:10.1088/1758-5082/3/1/015001.
46. Yokozeki T, Aoki T, Arai A, et al. Predictability of Plastic Parts Behaviour Made from Rapid Manufacturing. *Tsinghua Sci Technol.* 2009;14(June):100–104. doi:10.1016/S1007-0214(09)70075-6.
47. Chatterjee a. N, Kumar S, Saha P, et al. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel. *J Mater Process Technol.* 2003;136:151–157. doi:10.1016/S0924-0136(03)00132-8.
48. Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J Mater Process Technol.* 2001;118:2–5. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601009803>. Accessed October 24, 2013.
49. Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Ann - Manuf Technol.* 2009;58(1):189–192. doi:10.1016/j.cirp.2009.03.071.
50. Arivazhagan A, Masood SH. Dynamic Mechanical Properties of ABS Material Processed by Fused Deposition Modelling. *Int J Eng Res Appl.* 2012;2(3):2009–2014.

51. Williams JD, Deckard CR. Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. *Rapid Prototyp J.* 1998;4(2):90–100. doi:10.1108/13552549810210257.
52. Agarwala MK, Jamalabad VR, Langrana NA, et al. Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyp J.* 1996;2(4):4–19.
53. Hopkinson N, Dicknes P, Dickens P. Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci.* 2003;217(1):31–39.
54. Kruth JP, Leu M, Nakagawa T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann Technol.* 1998;47(1):525–540. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632405>. Accessed October 24, 2013.
55. Ang KC, Leong KF, Chua CK, et al. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. *Rapid Prototyp J.* 2006;12(2):100–105. doi:10.1108/13552540610652447.
56. Ahn SH, Montero M, Odell D, et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp J.* 2002;8(4):248–257. doi:10.1108/13552540210441166.
57. Lee BH, Abdullah J, Khan ZA. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *J Mater Process Technol.* 2005;169(1):54–61. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259.
58. Es-Said OS, Foyos J, Noorani R, et al. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Mater Manuf Process.* 2000;15(1):107–122.
59. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyp J.* 2008;14(2):72–80. doi:10.1108/13552540810862028.
60. Wang T, Xi J, Jin Y. A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *Int J Adv Manuf Technol.* 2007;33(11-12):1087–1096. doi:10.1007/s00170-006-0556-9.

61. El-Gizawy AS, Corl S, Graybill B. Process-induced Properties of FDM Products. In: *Proceedings of the ICMET, International Conference on Mechanical Engineerings and Technology Congress & Exposition.*; 2011.
62. Hambali RH, Celik HK, Smith PC, et al. Effect of build orientation on FDM parts: a case study for validation of deformation behaviour by FEA. In: *International Conference on Design and Concurrent Engineering (iDECON 2010): Manufacturing Challenges Towards Global Sustainability.*; 2010:20–21. Available at: <http://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/50979>. Accessed October 24, 2013.
63. Bellini A, Güçeri S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyp J.* 2003;9(4):252–264. doi:10.1108/13552540310489631.
64. Christensen AM, Humphries SM, Goh KYC, et al. Advanced “tactile” medical imaging for separation surgeries of conjoined twins. *Child’s Nerv Syst.* 2004;20:547–553. doi:10.1007/s00381-004-0982-7.
65. Drstvenšek I, Brajljić T, Paulič M, et al. Patient specific instruments for total hip replacement surgery. *Acad J Manuf Eng.* 2013;11(4):6–9. Available at: http://eng.upt.ro/auif/Lucrari_PDF_2013_4/1-Drstvensek I.pdf. Accessed January 19, 2015.
66. Drstvenšek I, Tomažič T. Additive manufacturing in practical use. *J Trends Dev Mach.* 2013;17(1):9–16. Available at: <http://tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013Journal/002-TMT13-002.pdf>. Accessed January 19, 2015.
67. Cooper DE, Stanford M, Kibble K a., et al. Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology. *Mater Des.* 2012;41:226–230. doi:10.1016/j.matdes.2012.05.017.
68. Taminger KMB, Hafley RA, Dicus DL, et al. Solid freeform fabrication: an enabling technology for future space missions. In: *Proceedings of International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing, San Antonio.* Citeseer; 2002:51–60. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
69. NASA. 3D Printer Headed to Space Station | NASA. 2014. Available at: http://www.nasa.gov/content/3d-printer-headed-to-space-station/#.VL_Qo1qE7ww. Accessed January 21, 2015.

70. NASA. Open for Business: 3-D Printer Creates First Object in Space on International Space Station | NASA. 25 Novemb. 2014.
71. Tadmor Z, Gogos CG. *Principles of Polymer Processing*. Wiley; 2006. Available at: http://books.google.es/books?id=TUdmBk1_mlAC.
72. Drive P, Rosato DVD V, Rosato DVD V, et al. *Injection molding handbook*. Springer Science & Business Media; 2000.
73. Kuo HC, Jeng MC. Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer. *Mater Des*. 2010;31(2):884–893. doi:10.1016/j.matdes.2009.07.041.
74. Domingos M, Chiellini F, Gloria A, et al. Effect of process parameters on the morphological and mechanical properties of 3D Bioextruded poly(E-caprolactone) scaffolds. *Rapid Prototyp J*. 2012;18(1):56–67. doi:10.1108/13552541211193502.
75. Stwora a, Skrabalak G. Influence of selected parameters of Selective Laser Sintering process on properties of sintered materials. *J Achiev Mater Manuf Engineering*. 2013;61(2):375–380.
76. Beal VE, Paggi RA, Salmoria G V., et al. Statistical Evaluation of Laser Energy Density Effect on Mechanical Properties of Polyamide Parts Manufactured by Selective Laser Sintering. *J Appl Polym Sci*. 2009;115(5):2910–2919. doi:10.1002/app.
77. Savalani MM, Hao L, Dickens PM, et al. The effects and interactions of fabrication parameters on the properties of selective laser sintered hydroxyapatite polyamide composite biomaterials. 2012. doi:10.1108/13552541211193467.
78. Ning Y, Wong YS, Fuh JYH. Effect and control of hatch length on material properties in the direct metal laser sintering process. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*. 2005;219(1):15–25.
79. Iv RWG, Baird DG, Bøhn JH. Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts. *Rapid Prototyp J*. 1998;4(1):14–25. doi:10.1108/13552549810197514.

80. Zhong W, Li F, Zhang Z, et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Mater Sci Eng A*. 2001;301(2):125–130. doi:10.1016/S0921-5093(00)01810-4.
81. Shofner M. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *J Appl Polym Sci*. 2003;89(11):3081–3090. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.12496/full>. Accessed October 24, 2013.
82. Wang F, Shor L, Darling a., et al. Precision extruding deposition and characterization of cellular poly--caprolactone tissue scaffolds. *Rapid Prototyp J*. 2004;10(1):42–49. doi:10.1108/13552540410512525.
83. Schey JA, Cárdenas JL. *Procesos de manufactura*. McGraw-Hill; 2002.
84. Joe Hiemenz. *3D Printing With Fdm.*; 2011. Available at: <http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/White Papers/SSYS-WP-3DP-HowItWorks-09-11.ashx>.
85. Ziemian C, Sharma M, Ziemian S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. In: Gokcek M, ed. *Mechanical Engineering*. InTech; 2012.
86. Villalpando L, Eiliat H, Urbanic RJ. An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures. *Procedia CIRP*. 2014;17:800–805. doi:10.1016/j.procir.2014.02.050.
87. Sa'ude N, Masood SH, Nikzad M, et al. Dynamic Mechanical Properties of Copper-ABS Composites for FDM Feedstock. *Int J Eng Res Appl*. 2013;3(3):1257–1263. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Dynamic+Mechanical+Properties+of+Copper-ABS+Composites+for+FDM+Feedstock#0>. Accessed October 24, 2013.
88. Arivazhagan A, Masood SH, Sbarski I. Dynamic Mechanical Analysis of Fused Deposition Modelling Processed Polycarboante. *ANTEC 2011 Plast Annu Tech Conf Proc*. 2010.
89. Ajoku U, Hopkinson N, Caine M. Experimental measurement and finite element modelling of the compressive properties of laser sintered Nylon-12. *Mater Sci Eng A*. 2006;428(1-2):211–216. doi:10.1016/j.msea.2006.05.019.

90. Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Mater Des.* 2014;58:242–246. doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038.
91. Chockalingam K, Jawahar N, Ramanathan KN, et al. Optimization of stereolithography process parameters for part strength using design of experiments. *Int J Adv Manuf Technol.* 2005;29(1-2):79–88. doi:10.1007/s00170-004-2307-0.
92. Stratasys. *PC-ABS*; 2014.
93. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des.* 2009;30(10):4243–4252. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.030.
94. Stratasys. *PC (Polycarbonate)*; 2014.
95. Kotliniski J. Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials. *Rapid Prototyp J.* 2014;20(6):499–510. doi:10.1108/RPJ-06-2012-0052.
96. Boschetto A, Giordano V, Veniali F. Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process. *Int J Adv Manuf Technol.* 2011;61(9-12):945–956. doi:10.1007/s00170-011-3744-1.
97. Menard K. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. CRC Press; 1 edition (March 25, 1999); 2008.
98. Pandey PM, Venkata Reddy N, Dhande SG. Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *J Mater Process Technol.* 2007;185(1-3):125–131. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.03.120.
99. Alfreda Campo E. *The Complete Part Design Handbook: for Injection Molding of Thermoplastics*; 2006.
100. Dimla DE, Camilotto M, Miani F. Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. *J Mater Process Technol.* 2005;164-165:1294–1300. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162.
101. Sánchez R, Aisa J, Martínez a., et al. On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding. *Meas J Int Meas Confed.*

- 2012;45:1051–1056. doi:10.1016/j.measurement.2012.01.039.
102. Wang WL, Cheah CM, Fuh JYH, et al. Influence of process parameters on stereolithography part shrinkage. *Mater Des.* 1996;17(4):205–213. doi:10.1016/S0261-3069(97)00008-3.
 103. Raghunath N, Pandey PM. Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering. *Int J Mach Tools Manuf.* 2007;47:985–995. doi:10.1016/j.ijmactools.2006.07.001.
 104. Guangshen X, Jing J, Sheng L, et al. Research on optimizing build parameters for stereolithography technology. *2009 Int Conf Meas Technol Mechatronics Autom ICMTMA 2009.* 2009;2(1):883–886. doi:10.1109/ICMTMA.2009.193.
 105. Karalekas D, Aggelopoulos a. Study of shrinkage strains in a stereolithography cured acrylic photopolymer resin. *J Mater Process Technol.* 2003;136:146–150. doi:10.1016/S0924-0136(03)00028-1.
 106. Ippolito R, Iuliano L, Gatto A. Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *CIRP Ann Technol.* 1995;44(1):157–160. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607622963>. Accessed October 24, 2013.
 107. Yang Y, Loh HT, Fuh JYH, et al. Feature extraction and volume decomposition for orthogonal layered manufacturing. *Comput Des.* 2003;35(12):1119–1128. doi:10.1016/S0010-4485(02)00206-3.
 108. Brooks H. Variable fused deposition modelling-concept design and tool path generation. 2011:113–122. Available at: <http://clock.uclan.ac.uk/3864/>. Accessed November 5, 2013.
 109. Espalin D, Ramirez JA, Medina F, et al. Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. *Rapid Prototyp J.* 2014;20(3):236–244. doi:10.1108/RPJ-12-2012-0112.
 110. Hayasi MT, Asiabanpour B. A new adaptive slicing approach for the fully dense freeform fabrication (FDFF) process. *J Intell Manuf.* 2013;24:683–694. doi:10.1007/s10845-011-0615-4.
 111. Pennington RC, Hoekstra NL, Newcomer JL. Significant factors in the

- dimensional accuracy of fused deposition modelling. *Proc Inst Mech Eng Part E J Process Mech Eng*. 2005;219(1):89–92. doi:10.1243/095440805X6964.
112. Chang D-Y, Huang B-H. Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process. *Int J Adv Manuf Technol*. 2010;53(9-12):1027–1037. doi:10.1007/s00170-010-2882-1.
 113. Hopkinson N, Dickens P. Analysis of rapid manufacturing — using layer manufacturing processes for production. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci*. 2003;217:31–39.
 114. Edition S, Gordon Jr MJ. *Total quality process control for injection molding*. John Wiley & Sons; 2010.
 115. Cheng W, Fuh JYH, Nee AYC, et al. Multi-objective optimization of part building orientation in stereolithography. *Rapid Prototyp J*. 1995;1(4):12–23.
 116. Atzeni E, Salmi A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012;62:1147–1155. doi:10.1007/s00170-011-3878-1.
 117. Hopkinson N, Dickens P. Rapid prototyping for direct manufacture. *Rapid Prototyp J*. 2001;7(4):197–202. doi:10.1108/EUM0000000005753.
 118. Shen C, Wang L, Li Q. Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. *J Mater Process Technol*. 2007;183:412–418. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.10.036.
 119. Yin F, Mao H, Hua L, et al. Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding. *Mater Des*. 2011;32(4):1844–1850. doi:10.1016/j.matdes.2010.12.022.
 120. Chen W-C, Tai P-H, Wang M-W, et al. A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process. *Expert Syst Appl*. 2008;35:843–849. doi:10.1016/j.eswa.2007.07.037.
 121. Ozcelik B, Erzurumlu T. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. *J Mater Process Technol*. 2006;171:437–445.

doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.120.

122. Sadeghi BHM. BP-neural network predictor model for plastic injection molding process. *J Mater Process Technol.* 2000;103:411–416. doi:10.1016/S0924-0136(00)00498-2.
123. Liao XP, Xie HM, Zhou YJ, et al. Adaptive adjustment of plastic injection processes based on neural network. *J Mater Process Technol.* 2007;187-188:676–679. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.11.068.
124. Chen W-C, Fu G-L, Tai P-H, et al. Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing. *Expert Syst Appl.* 2009;36(2):1114–1122. doi:10.1016/j.eswa.2007.10.020.
125. Ozcelik B, Erzurumlu T. Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm. *Int Commun Heat Mass Transf.* 2005;32:1085–1094. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.032.
126. Erzurumlu T, Oktem H. Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts. *Mater Des.* 2007;28:459–465. doi:10.1016/j.matdes.2005.09.004.
127. Woll SLB, Cooper DJ. Online Pattern-Based Part Quality Monitoring of the Injection Molding Process. *Polym Eng Sci.* 1996;36(11):1477–1488. doi:papers://590F92D9-0B76-4B88-8729-9AF064BE5AC8/Paper/p2137.
128. Oktem H, Erzurumlu T, Uzman I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. *Mater Des.* 2007;28:1271–1278. doi:10.1016/j.matdes.2005.12.013.
129. Tan KH, Yuen MMF. A fuzzy multiobjective approach for minimization of injection molding defects. *Polym Eng Sci.* 2000;40(4):956–971. doi:10.1002/pen.11223.
130. Woll SLB, Cooper DJ. A Dynamic Injection-Molding Process Model for Simulating Mold Cavity Pressure Patterns. *Polym Plast Technol Eng.* 1997;36(February 2013):809–840. doi:10.1080/03602559708000662.
131. Kurtaran H, Erzurumlu T. Efficient warpage optimization of thin shell plastic

- parts using response surface methodology and genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol.* 2006;27:468–472. doi:10.1007/s00170-004-2321-2.
132. Chen CP, Chuang MT, Hsiao YH, et al. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. *Expert Syst Appl.* 2009;36(7):10752–10759. doi:10.1016/j.eswa.2009.02.017.
 133. Tang SH, Tan YJ, Sapuan SM, et al. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage. *J Mater Process Technol.* 2007;182:418–426. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.08.025.
 134. Wiedemann B, Jantzen H a. Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG. *Comput Ind.* 1999;39:11–25. doi:10.1016/S0166-3615(98)00126-2.
 135. Upcraft S, Fletcher R. The rapid prototyping technologies. *Assem Autom.* 2003;23:318–330. doi:10.1108/01445150310698634.
 136. Mansour S, Hague R. Impact of rapid manufacturing on design for manufacture for injection moulding. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2003;217:453–461. doi:10.1243/095440503321628134.
 137. Ahn D, Kweon J-H, Kwon S, et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *J Mater Process Technol.* 2009;209(15-16):5593–5600. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016.
 138. Li A, Zhang Z, Wang D, et al. Optimization method to fabrication orientation of parts in fused deposition modeling rapid prototyping. *2010 Int Conf Mech Autom Control Eng MACE2010.* 2010:416–419. doi:10.1109/MACE.2010.5535335.
 139. Byun H-S, Lee KH. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robot Comput Integr Manuf.* 2006;22(1):69–80. doi:10.1016/j.rcim.2005.03.001.
 140. Thrimurthulu K, Pandey PM, Venkata Reddy N. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *Int J Mach Tools Manuf.* 2004;44(6):585–594. doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004.
 141. Vosniakos GC, Maroulis T, Pantelis D. A method for optimizing process

- parameters in layer-based rapid prototyping. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2007;221(8):1329–1340.
142. Reddy B V., Reddy N V., Ghosh a. Fused deposition modelling using direct extrusion. *Virtual Phys Prototyp.* 2007;2(August 2014):51–60.
doi:10.1080/17452750701336486.
 143. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. A hybrid ANN-BFOA approach for optimization of FDM process parameters. In: *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing.* Springer; 2010:396–403.
 144. Ziemian CW, Crawn III PM. Computer aided decision support for fused deposition modeling. *Rapid Prototyp J.* 2001;7(3):138–147.
doi:10.1108/13552540110395538.
 145. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2010;224(1):135–145.
 146. Equbal A, Ohdar RK, Mahapatra SS. Prediction of dimensional accuracy in fused deposition modelling: A fuzzy logic approach. *Int J* 2011;7(1):22–43.
Available at:
<http://inderscience.metapress.com/index/562H4177RW313VK7.pdf>.
Accessed October 24, 2013.
 147. Sood AK, Equbal A, Toppo V, et al. An investigation on sliding wear of FDM built parts. *CIRP J Manuf Sci Technol.* 2012;5(1):48–54.
doi:10.1016/j.cirpj.2011.08.003.
 148. Laeng J, Khan ZA, Khu SY. Optimizing flexible behaviour of bow prototype using Taguchi approach. *J Appl Sci.* 2006;6:622–630.
 149. Onuh SO, Hon KKB. Optimising build parameters for improved surface finish in stereolithography. *Int J Mach Tools Manuf.* 1998;38(4):329–342.
doi:10.1016/S0890-6955(97)00068-0.
 150. Bacchewar PB, Singhal SK, Pandey PM. Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. *Proc Inst Mech Eng Part B-Journal Eng Manuf.* 2007;221:35–52.
doi:10.1243/09544054JEM670.

151. Vijay I, Chockalingam K, Kailasanathan C, et al. Optimization of Surface Roughness in Selective Laser Sintered Stainless Steel Parts. *Int J ChemTech Res.* 2014;6(5):2993–2999.
152. Abellanas M. Envolvente convexa, triangulación de Delaunay y diagrama de Voronoi: Tres estructuras geométricas en una, con muchas aplicaciones. In: *Un Paseo por la Geometría.*; 2006:157–172.
153. De Berg M, Cheong O, Van Kreveld M, et al. *Computational Geometry: Algorithms and Applications.*; 2008. doi:10.2307/3620533.

9. Anexo

En este capítulo se incluyen los resultados de las experimentaciones realizadas y los programas en MATLAB® desarrollados y está dividido en tres bloques, uno para cada una de las experimentaciones realizadas: la caracterización de piezas fabricadas mediante FDM y su correlación con piezas físicas, el estudio del efecto de parámetros de fabricación en el comportamiento mecánico dinámico de las piezas fabricadas por FDM y la verificación de la función objetivo para el comportamiento mecánico.

9.1. Resultados de la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

9.1.1. Datos experimentales para caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

Aquí se muestran los resultados experimentales de los experimentos de tensión/elongación para las probetas fabricadas en seis direcciones distintas (sección 3.3.1).

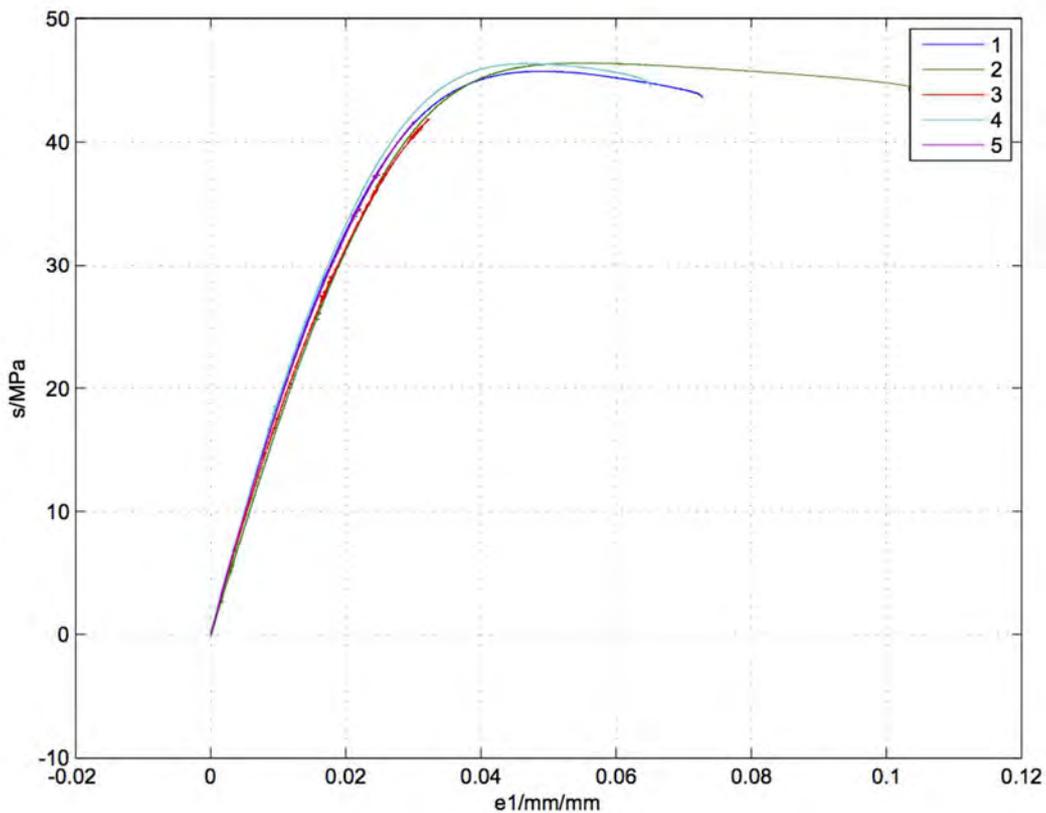


Figura 9.1: Datos de elongación tensión para la probeta en la dirección 1.

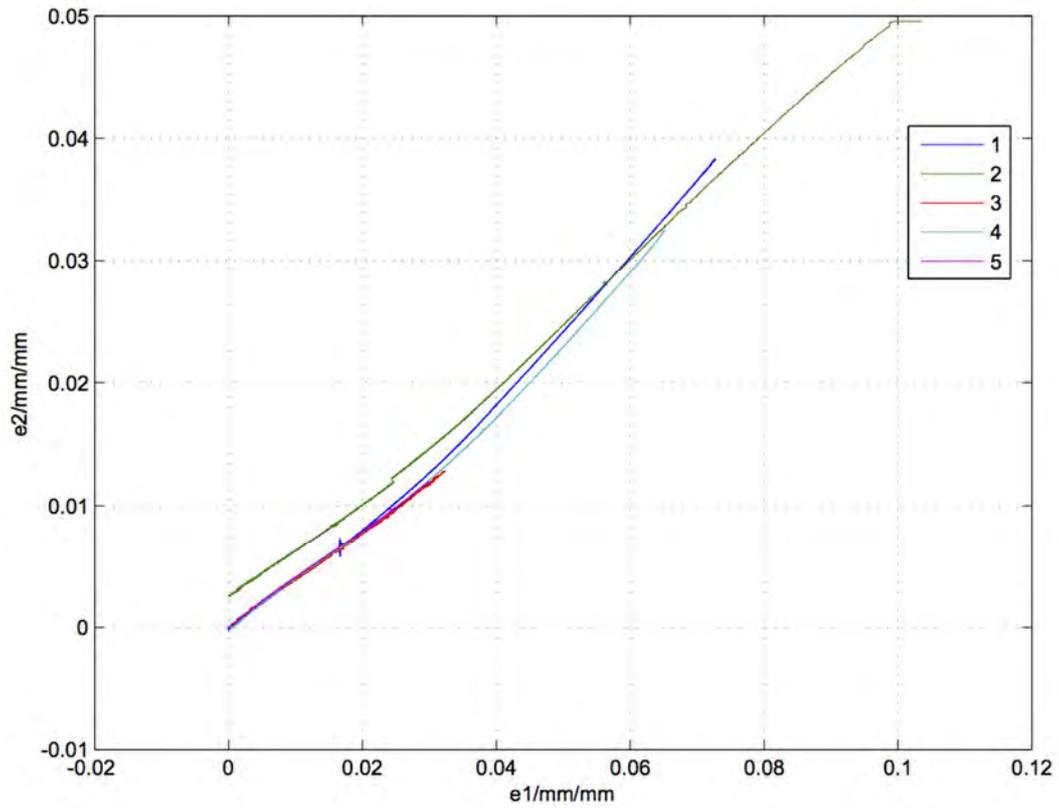


Figura 9.2: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 1.

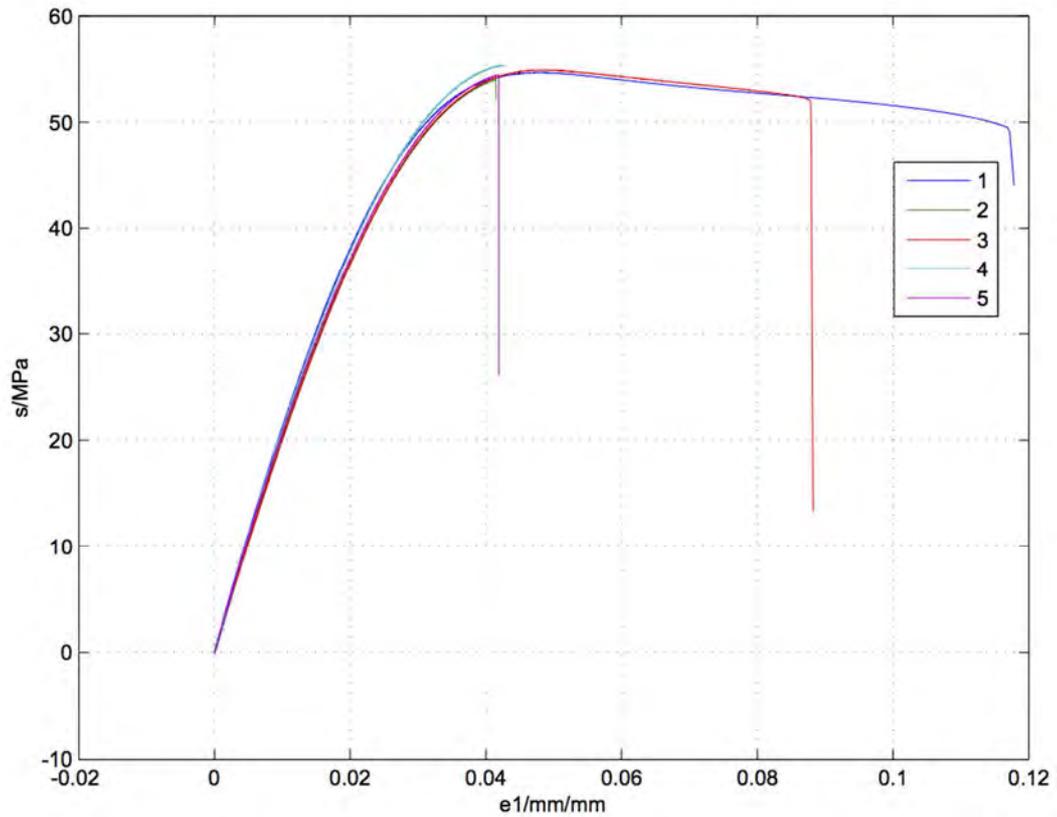


Figura 9.3: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 2.

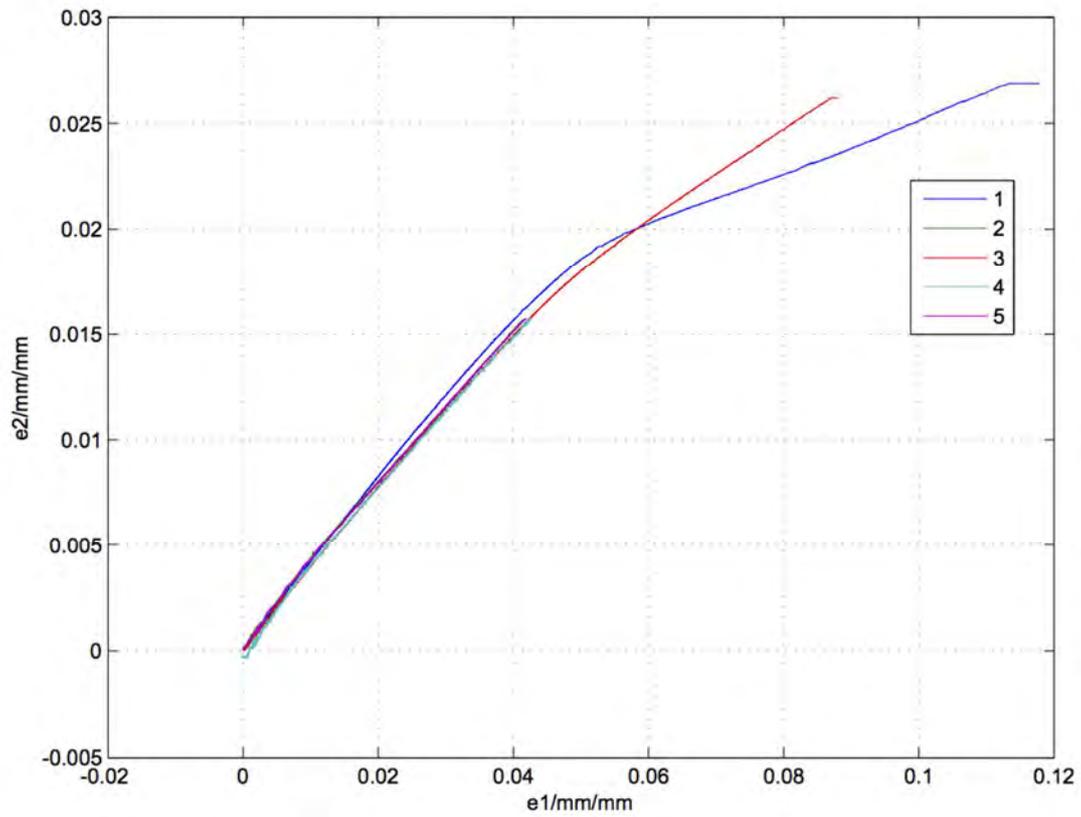


Figura 9.4: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 2.

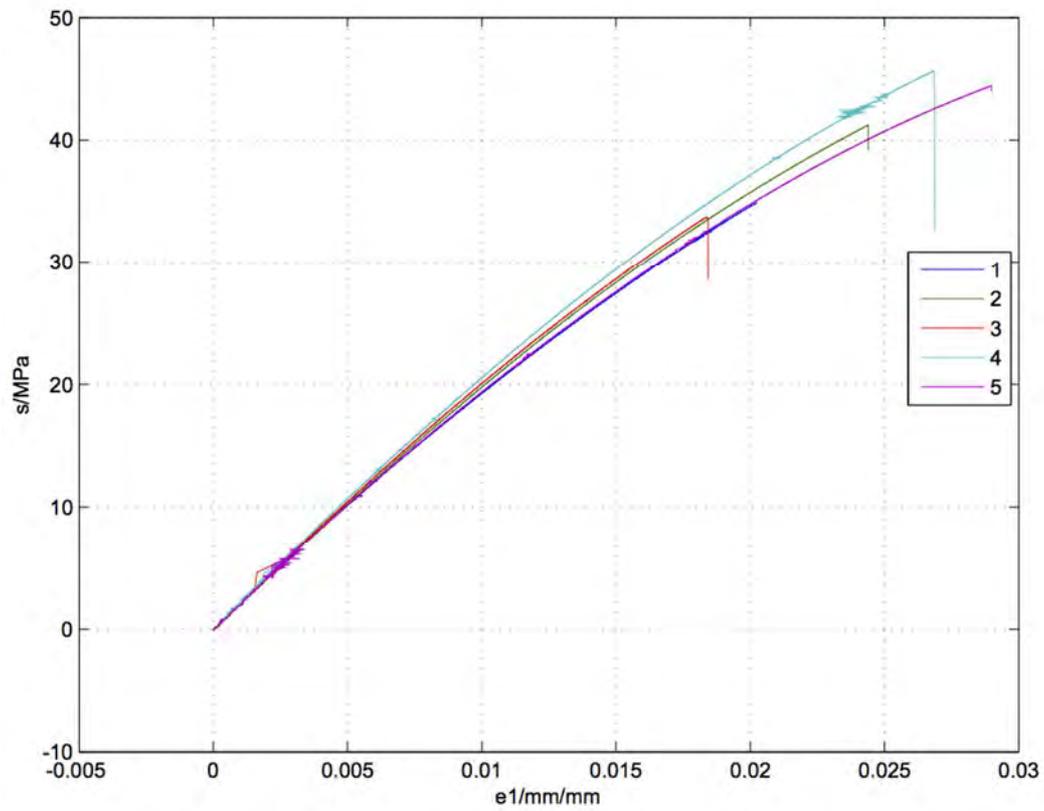


Figura 9.5: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 3.

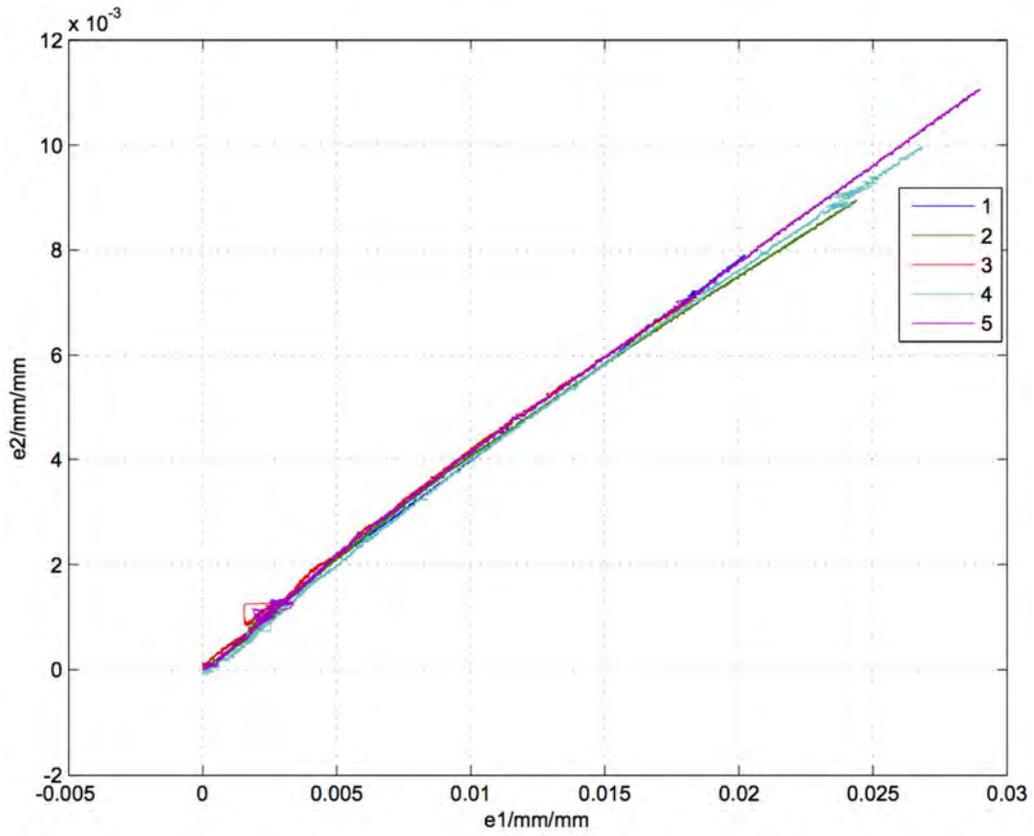


Figura 9.6: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 3.

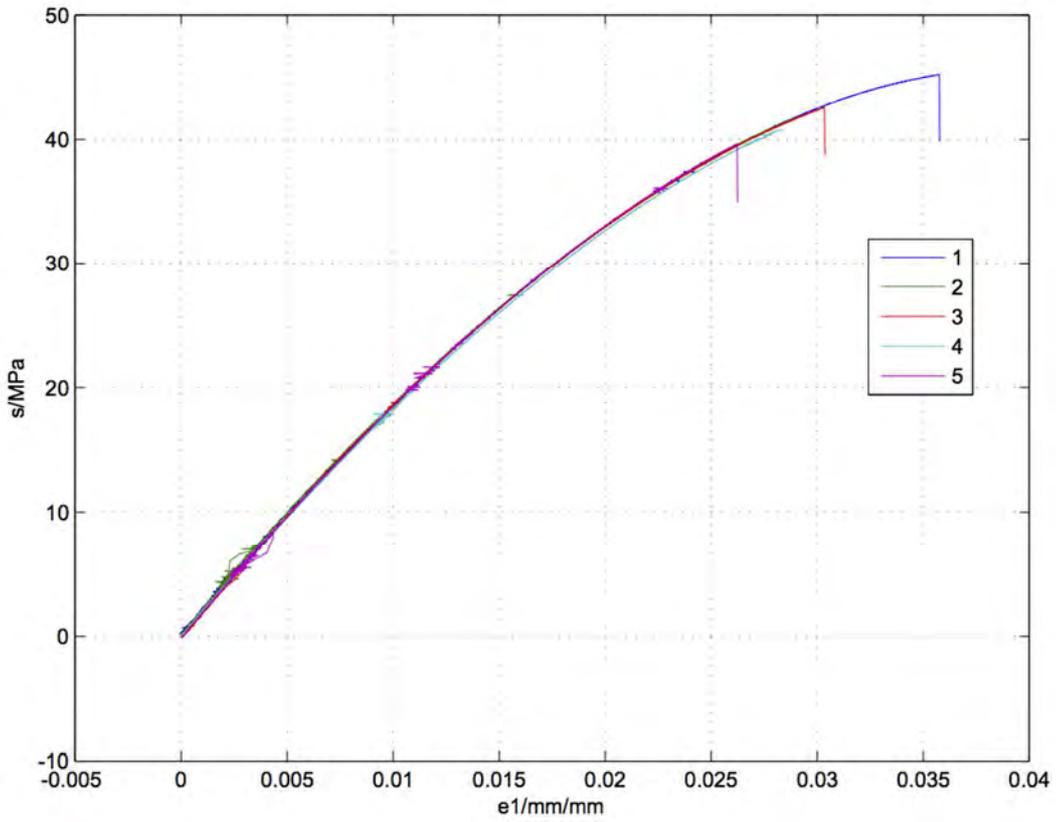


Figura 9.7: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 4.

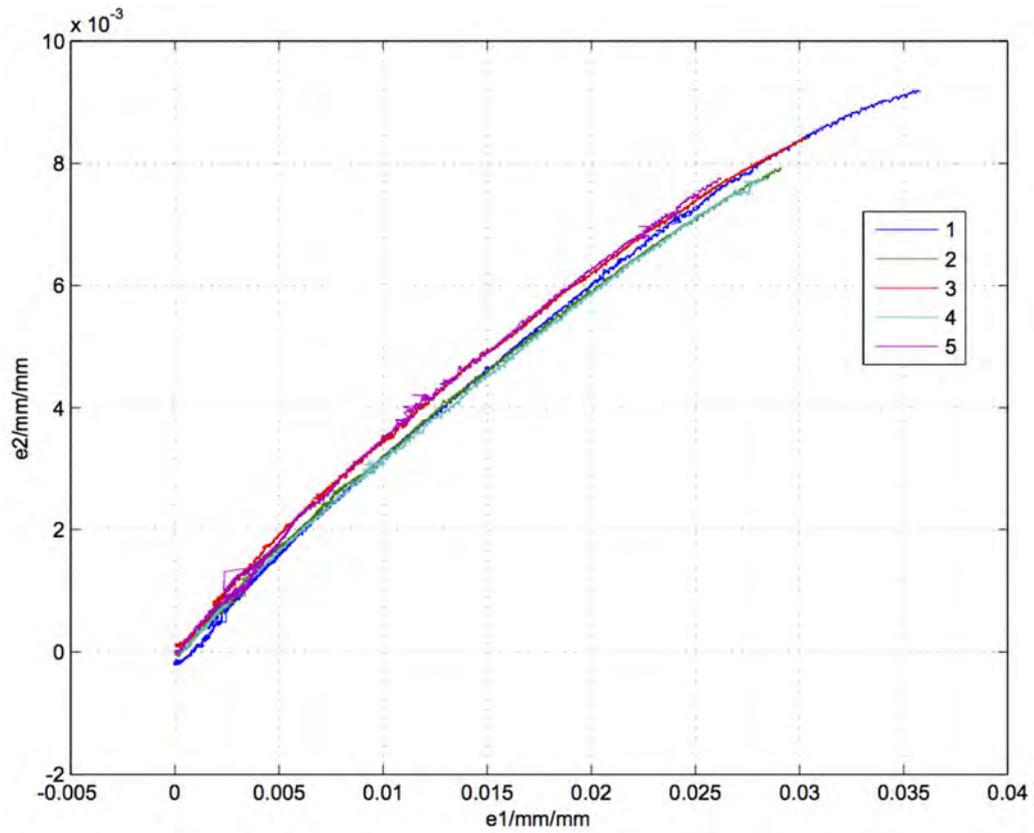


Figura 9.8: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 4.

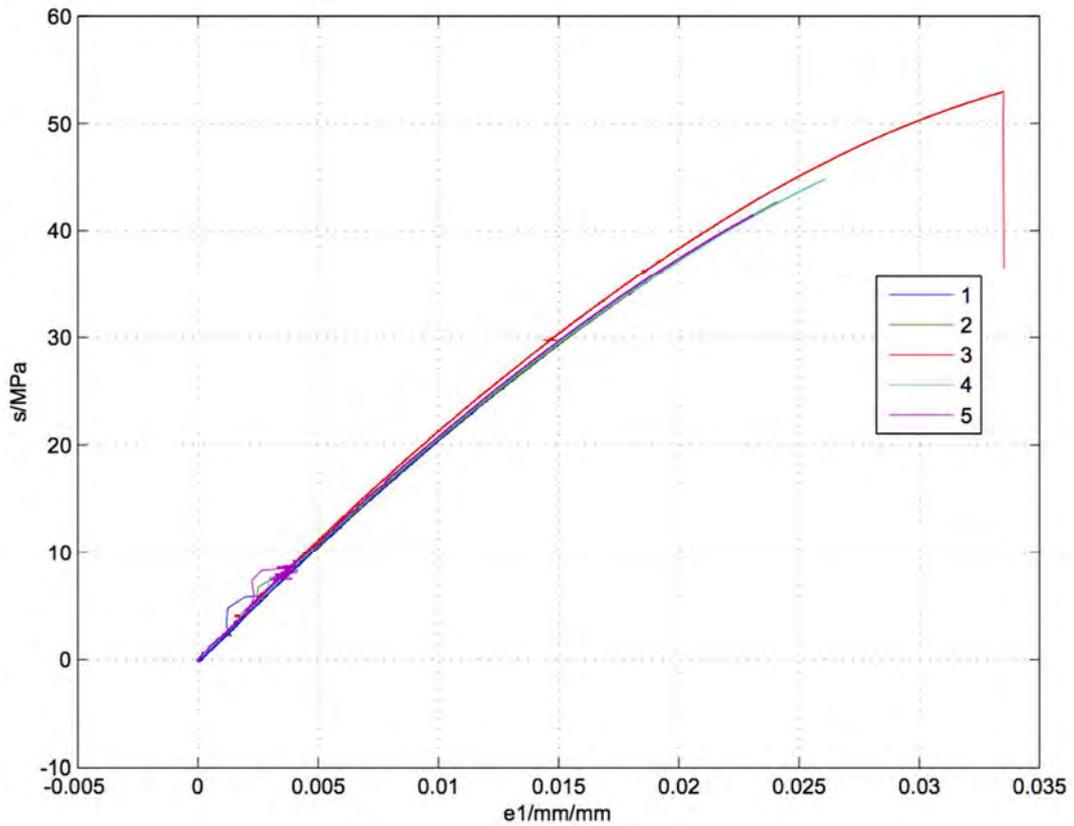


Figura 9.9: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 5.

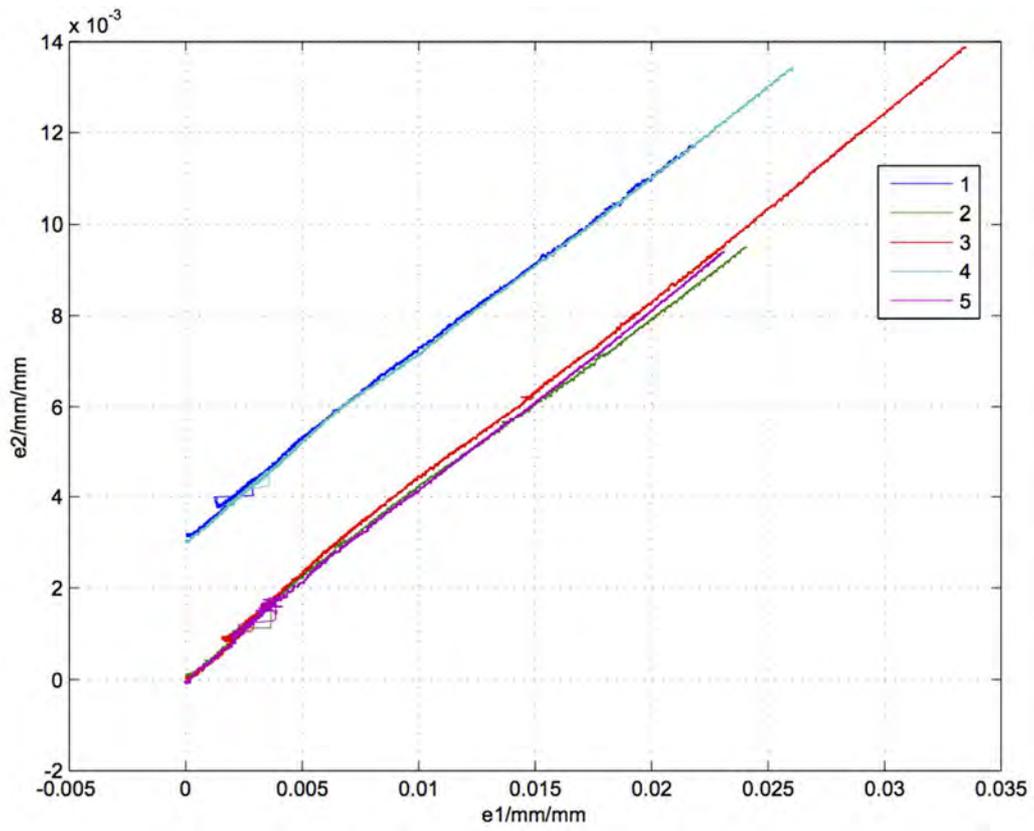


Figura 9.10: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 5.

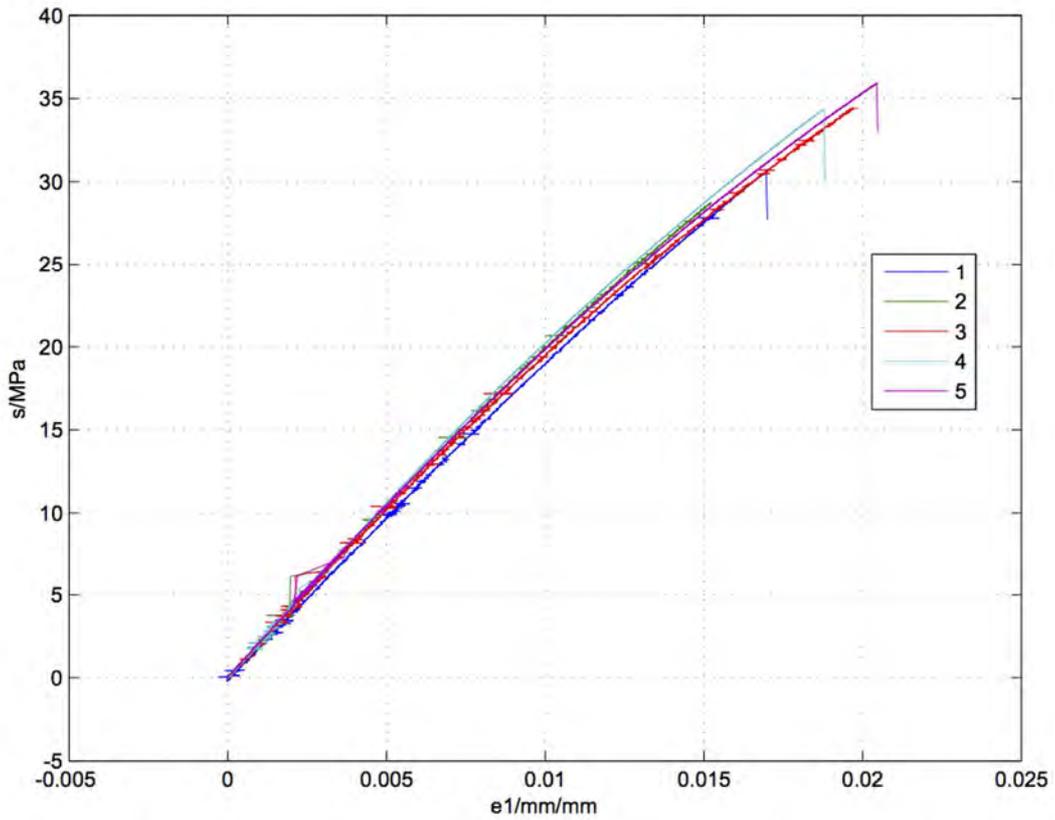


Figura 9.11: Datos experimentales de elongación tensión para la probeta en la dirección 6.

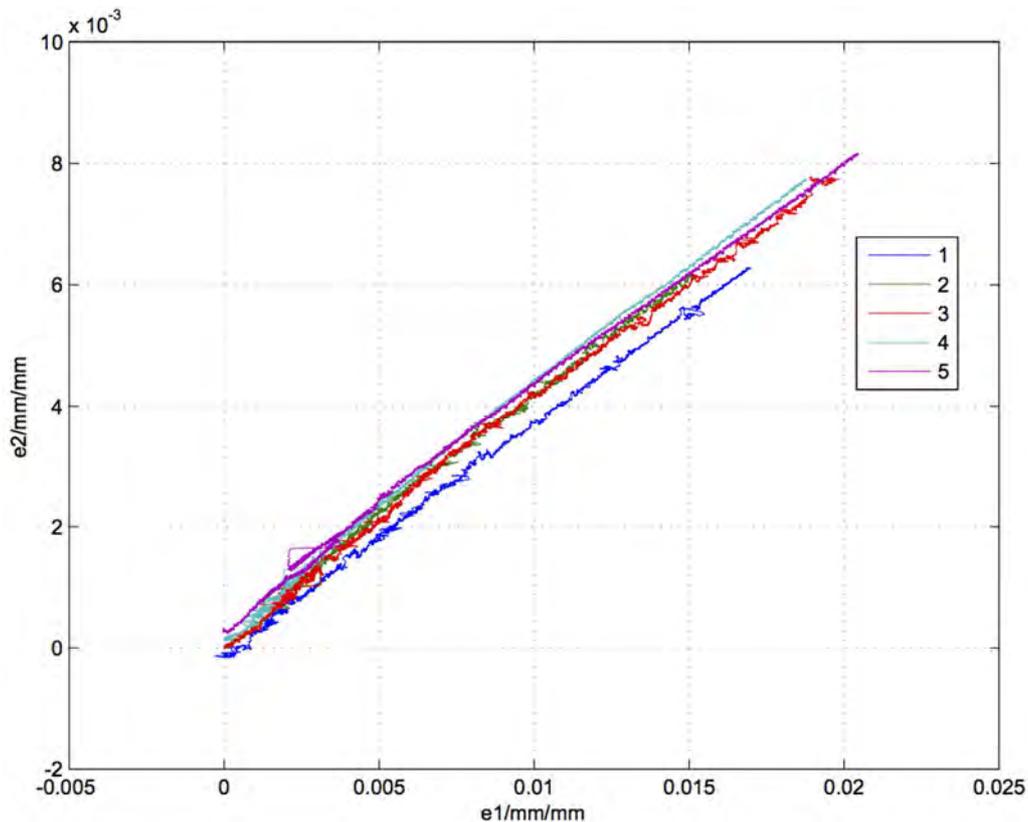


Figura 9.12: Datos experimentales de elongación longitudinal y transversal para la probeta en la dirección 6.

9.1.2. Programas de MATLAB® para la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

Aquí se muestra el programa desarrollado por MATLAB® que permite obtener el módulo elástico, el coeficiente de Poisson, el módulo cortante, la tensión máxima, la tensión de rotura, la elongación máxima y la elongación de rotura de las probetas fabricadas en seis direcciones distintas (sección 3.3.1).

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 1

```
function Stiffness_Matrix_01

clc
clear
close all

%llegir les dades
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
dades1=importdata('PC11-corva.txt');
dades2=importdata('PC12-corva.txt');
dades3=importdata('PC13-corva.txt');
dades4=importdata('PC14-corva.txt');
dades5=importdata('PC15-corva.txt');

M1=dades1.data;
M2=dades2.data;
M3=dades3.data;
```

```

M4=dades4.data;
M5=dades5.data;

%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);

%ajunto les taules de dades
Btot(1:n1,1:3)=B1;
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);

%ordeno la taula de dades
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

%dues corbes
des=11;
smax=max(Ctot(:,3))*0.9975;
ind=find(Ctot(:,3)>=smax);
p1=polyfit(Ctot(1:ind(1)+des,1),Ctot(1:ind(1)+des,3),2);
p2=polyfit(Ctot(ind(1)-des:end,1),Ctot(ind(1)-des:end,3),2);
sgraf1=polyval(p1,Ctot(1:ind(1)+des,1));
sgraf2=polyval(p2,Ctot(ind(1)-des:end,1));

%trobo on es creuen
x=fzero(@(x)sol(x,p1,p2),0.04);
ind2=find(Ctot(:,1)>=x);
s=zeros(length(Ctot),1);
s(1:ind2(1))=polyval(p1,Ctot(1:ind2(1),1));
s(ind2(1):end)=polyval(p2,Ctot(ind2(1):end,1));

%calculo les constants del material
percent=15;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

```

```

format long
MatRes(1,:)=resultats(Ctot,inds(1))
xgraf=0.03;

%calculem les dades amb lels grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,5)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(5));
MatRes(1,6)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,7)=s(end);
MatRes(1,8)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);
MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:));

figure(1)
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
grid on
figure(2)
plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0
xgraf*MatRes(1,1)],MatRes(1,4),MatRes(1,3),'x',...
    MatRes(1,6),MatRes(1,5),'x',MatRes(1,8),MatRes(1,7),'x')
grid on

graf(:,1)=egraf;
graf(:,2)=s;
save('graf_x.txt','graf','-ASCII')
save('res_x.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...
    '3','4','5'))
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
    B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
    '3','4','5'))
grid on
end

function A=delete_end(M)

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

```

```

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'Ūn iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

end

function Res=Res_separat(M,percent)

```

```

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3)*(1-percent/100)));

%E
p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(5));
Res(6)=M(ind3(1),1); %e_tensile
Res(1,7)=M(end,3);%s_ult
Res(1,8)=M(end,1);%e_ult

end

```

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 2

```

function Stiffness_Matrix_02

clc
clear
close all

%llegir les dades
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
dades1=importdata('PC21-corva.txt');
dades2=importdata('PC22-corva.txt');
dades3=importdata('PC23-corva.txt');
dades4=importdata('PC24-corva.txt');
dades5=importdata('PC25-corva.txt');

M1=dades1.data;
M2=dades2.data;
M3=dades3.data;
M4=dades4.data;
M5=dades5.data;

%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);

```

```

%ajunto les taules de dades
Btot(1:n1,1:3)=B1(:,1:3);
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);

%ordeno la taula de dades
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

%dues corbes
des=15;
smax=max(Ctot(:,3))*0.9975;
ind=find(Ctot(:,3)>=smax);
p1=polyfit(Ctot(1:ind(1)+des,1),Ctot(1:ind(1)+des,3),2);
p2=polyfit(Ctot(ind(1)-des:end,1),Ctot(ind(1)-des:end,3),2);
sgraf1=polyval(p1,Ctot(1:ind(1)+des,1));
sgraf2=polyval(p2,Ctot(ind(1)-des:end,1));

%trobo on es creuen
x=fzero(@(x)sol(x,p1,p2),0.04);
ind2=find(Ctot(:,1)>=x);
s=zeros(length(Ctot),1);
s(1:ind2(1))=polyval(p1,Ctot(1:ind2(1),1));
s(ind2(1):end)=polyval(p2,Ctot(ind2(1):end,1));

%calculo les constants del material
percent=15;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

format long
MatRes=resultats(Ctot,inds(1));
xgraf=0.03;

%calculem les dades amb lels grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,5)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(5));
MatRes(1,6)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,7)=s(end);
MatRes(1,8)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);

```

```

MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:))

figure(1)
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
grid on
figure(2)
plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0 xgraf*MatRes(1)])
grid on

graf(:,1)=egraf;
graf(:,2)=s;
save('graf_y.txt','graf','-ASCII')
save('res_y.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

end

function A=delete_end(M)

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'ón iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));

```

```

        B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
        B(a(i)+1,:)=NaN;
    end
    %esborro els NaNs
    M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

end

function Res=Res_separat(M,percent)

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3)*(1-percent/100)));

%E
p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(5));
Res(6)=M(ind3(1),1); %e_tensile

```

```
Res(1,7)=M(end,3);%s_ult
Res(1,8)=M(end,1);%e_ult
```

```
end
```

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 3

```
function Stiffness_Matrix_03
```

```
clc
clear
close all
```

```
%llegir les dades
```

```
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
```

```
dades1=importdata('PC31-corva.txt');
dades2=importdata('PC32-corva.txt');
dades3=importdata('PC33-corva.txt');
dades4=importdata('PC34-corva.txt');
dades5=importdata('PC36-corva.txt');
```

```
M1=dades1.data;
M2=dades2.data;
M3=dades3.data;
M4=dades4.data;
M5=dades5.data;
```

```
%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
```

```
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);
```

```
%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
```

```
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);
```

```
%ajunto les taules de dades
```

```
Btot(1:n1,1:3)=B1(:,1:3);
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);
```

```
%ordeno la taula de dades
```

```
Atot=ordenar_agrupar(Btot);
```

```
%creo el vector de x(e1) per interpolar
```

```
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';
```

```

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

% interpolem una corva
p1=polyfit(Ctot(:,1),Ctot(:,3),2);

%calculo la corva
s=polyval(p1,Ctot(:,1));

%calculo les constants del material
percent=0;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

format long
MatRes=resultats(Ctot,inds(1))
xgraf=e;

%calculem les dades amb lels grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,5)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(5));
MatRes(1,6)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,7)=s(end);
MatRes(1,8)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);
MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:))

% figure(1)
% plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
% grid on
% figure(2)
% plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
% grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0 xgraf*MatRes(1)])
grid on

graf(:,1)=egraf;
graf(:,2)=s;
save('graf_z.txt','graf','-ASCII')
save('res_z.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...

```

```

        '3', '4', '5')
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
      B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
          '3','4','5'))
grid on

end

function A=delete_end(M)

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'ùn iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

```

```

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

end

function Res=Res_separat(M,percent)

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3)*(1-percent/100)));

%E
p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(5));
Res(6)=M(ind3(1),1); %e_tensile
Res(1,7)=M(end,3);%s_ult
Res(1,8)=M(end,1);%e_ult

end

```

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 4

```

function Stiffness_Matrix_04

clc
clear
close all

%llegir les dades
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
dades1=importdata('PC41-corva.txt');
dades2=importdata('PC45-corva.txt');
dades3=importdata('PC43-corva.txt');
dades4=importdata('PC44-corva.txt');
dades5=importdata('PC46-corva.txt');

M1=dades1.data;
M2=dades2.data;

```

```

M3=dades3.data;
M4=dades4.data;
M5=dades5.data;

%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);

%ajunto les taules de dades
Btot(1:n1,1:3)=B1(:,1:3);
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);

%ordeno la taula de dades
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

% interpolem una corva
p1=polyfit(Ctot(:,1),Ctot(:,3),2);

%calculo la corva
s=polyval(p1,Ctot(:,1));

%calculo les constants del material
percent=0;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

format long
MatRes=resultats(Ctot,inds(1));
xgraf=e;

%calculem les dades amb lels grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,6)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(6));
MatRes(1,7)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,8)=s(end);

```

```

MatRes(1,9)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);
MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:))

% figure(1)
% plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
% grid on
% figure(2)
% plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
% grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0
xgraf*MatRes(1)],B1(:,1),...
      B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),...
      B5(:,1),B5(:,3))
grid on

graf(:,1)=egraf;
graf(:,2)=s;
save('graf_xy.txt','graf','-ASCII')
save('res_xy.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
      B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

end

function A=delete_end(M)

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

```

```

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'ûn iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

MatRes(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));

end

function Res=Res_separat(M,percent)

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3))*(1-percent/100));

%E

```

```

p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));%G
Res(6)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(6));
Res(7)=M(ind3(1),1); %e_tensile
Res(1,8)=M(end,3);%s_ult
Res(1,9)=M(end,1);%e_ult

end

```

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 5

```

function Stiffness_Matrix_05

clc
clear
close all

%llegir les dades
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
dades1=importdata('PC51-corva.txt');
dades2=importdata('PC52-corva.txt');
dades3=importdata('PC53-corva.txt');
dades4=importdata('PC54-corva.txt');
dades5=importdata('PC55-corva.txt');

M1=dades1.data;
M2=dades2.data;
M3=dades3.data;
M4=dades4.data;
M5=dades5.data;

%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);

%ajunto les taules de dades
Btot(1:n1,1:3)=B1(:,1:3);
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);

```

```

Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);

%ordeno la taula de dades
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

% interpolem una corva
p1=polyfit(Ctot(:,1),Ctot(:,3),2);

%calculo la corva
s=polyval(p1,Ctot(:,1));

%calculo les constants del material
percent=0;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

format long
MatRes=resultats(Ctot,inds(1))
xgraf=e;

%calculem les dades amb els grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,6)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(6));
MatRes(1,7)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,8)=s(end);
MatRes(1,9)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);
MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:));

% figure(1)
% plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
% grid on
% figure(2)
% plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
% grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0 xgraf*MatRes(1)])
grid on

graf(:,1)=egraf;

```

```

graf(:,2)=s;
save('graf_yz.txt','graf','-ASCII')
save('res_yz.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

end

function A=delete_end(M)

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'ón iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

```

```

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

MatRes(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));

end

function Res=Res_separat(M,percent)

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3)*(1-percent/100)));

%E
p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));%G
Res(6)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(6));
Res(7)=M(ind3(1),1); %e_tensile
Res(1,8)=M(end,3);%s_ult
Res(1,9)=M(end,1);%e_ult

end

```

Programa MATLAB® para las probetas en la dirección 6

```

function Stiffness_Matrix_06

clc
clear

```

```

close all

%llegir les dades
%primera columna e1 (axial), segona columna e2 (transversal), tercera
%columna s
dades1=importdata('PC61-corva.txt');
dades2=importdata('PC62-corva.txt');
dades3=importdata('PC63-corva.txt');
dades4=importdata('PC64-corva.txt');
dades5=importdata('PC65-corva.txt');

M1=dades1.data;
M2=dades2.data;
M3=dades3.data;
M4=dades4.data;
M5=dades5.data;

%elimino el final (la tornada) quan ja esta trencat
B1=delete_end(M1);
B2=delete_end(M2);
B3=delete_end(M3);
B4=delete_end(M4);
B5=delete_end(M5);

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(B1);
n2=length(B2);
n3=length(B3);
n4=length(B4);
n5=length(B5);

%ajunto les taules de dades
Btot(1:n1,1:3)=B1(:,1:3);
Btot(n1+1:n1+n2,:)=B2(:,1:3);
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=B3(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=B4(:,1:3);
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=B5(:,1:3);

%ordeno la taula de dades
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
e=max(Atot(:,1));
n=500;
en=e/n;
egraf=[0:en:e]';

%interpolo els valors
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

% interpolem una corva
p1=polyfit(Ctot(:,1),Ctot(:,3),2);

%calculo la corva
s=polyval(p1,Ctot(:,1));

%calculo les constants del material

```

```

percent=0;
syield=max(s)*(1-percent/100);
inds=find(s>=syield);

format long
MatRes=resultats(Ctot,inds(1))
xgraf=e;

%calculem les dades amb lels grafics per obtenir la desvest
MatRes(1,6)=max(s); %s_tensile
ind3=find(s>=MatRes(6));
MatRes(1,7)=Ctot(ind3(1),1); %e_tensile
MatRes(1,8)=s(end);
MatRes(1,9)=Ctot(end,1);

MatRes(2,:)=Res_separat(B1,percent);
MatRes(3,:)=Res_separat(B2,percent);
MatRes(4,:)=Res_separat(B3,percent);
MatRes(5,:)=Res_separat(B4,percent);
MatRes(6,:)=Res_separat(B5,percent);
MatRes(7,:)=max(MatRes(2:6,:));
MatRes(8,:)=min(MatRes(2:6,:))
% figure(1)
% plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),'+',Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-
des:end,1),sgraf2)
% grid on
% figure(2)
% plot(Ctot(1:ind(1)+des),sgraf1,Ctot(ind(1)-des:end,1),sgraf2)
% grid on
figure(3);
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,3),Ctot(:,1),s,[0 xgraf],[0 xgraf*MatRes(1)])
grid on

graf(:,1)=egraf;
graf(:,2)=s;
save('graf_xz.txt','graf','-ASCII')
save('res_xz.txt','MatRes','-ASCII')

figure(4)
plot(B1(:,1),B1(:,3),B2(:,1),B2(:,3),B3(:,1),B3(:,3),B4(:,1),B4(:,3),.
..
B5(:,1),B5(:,3)),xlabel('e1/mm'),ylabel('s/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

figure(5)
plot(B1(:,1),-B1(:,2),B2(:,1),-B2(:,2),B3(:,1),-B3(:,2),B4(:,1),-
B4(:,2),...
B5(:,1),-
B5(:,2)),xlabel('e1/mm'),ylabel('e2/MPa'),legend('1','2',...
'3','4','5')
grid on

end

function A=delete_end(M)

```

```

emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);

A=M(1:ind(1),:);

end

function M=ordenar_agrupar(A)

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'Ûn iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i),3)=mean(B(a(i):a(i)+1,3));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);

end

function C=interpolar(A,e,mode)

C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);
C(:,3)=interp1(A(:,1),A(:,3),e,mode);

end

function z=sol(x,p1,p2)

y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));
z=y1-y2;

end

function MatRes=resultats(Ctot,ind)

%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,3),1);
MatRes(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,3);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);

MatRes(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));

```

```

end
function Res=Res_separat(M,percent)

%calcularem E i v amb el mateix syield
ind=find(M(:,3)>=max(M(:,3)*(1-percent/100)));

%E
p=polyfit(M(1:ind(1),1),M(1:ind(1),3),1);
Res(1)=p(1);
%v
p2=polyfit(M(1:ind(1),1),-M(1:ind(1),2),1);
Res(2)=p2(1);

Res(3)=M(ind(1),3);%syield
Res(4)=M(ind(1),1);%eyield
Res(5)=p(1)/(2*(1+p2(1)));%G
Res(6)=max(M(:,3));%s_tensile
ind3=find(M(:,3)>=Res(6));
Res(7)=M(ind3(1),1); %e_tensile
Res(1,8)=M(end,3);%s_ult
Res(1,9)=M(end,1);%e_ult

end

```

9.1.3. Resultados de los ensayos físicos sobre las piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

Los resultados experimentales de los ensayos físicos par la correlación con las simulaciones realizadas mediante FEA (sección 3.3.1) se presentan a continuación.

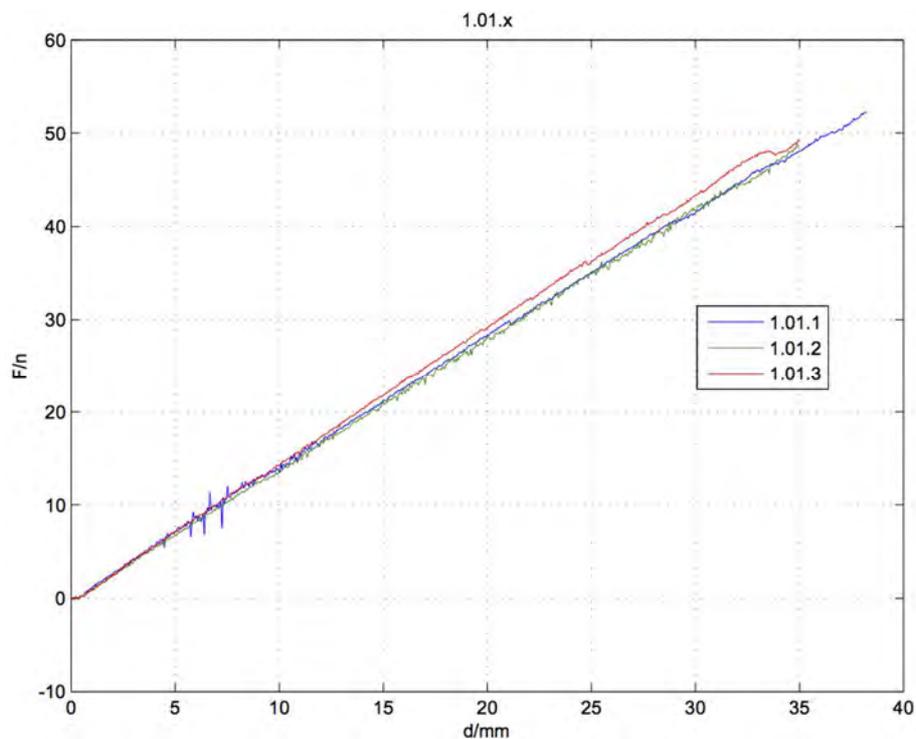


Figura 9.13: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 1.01.

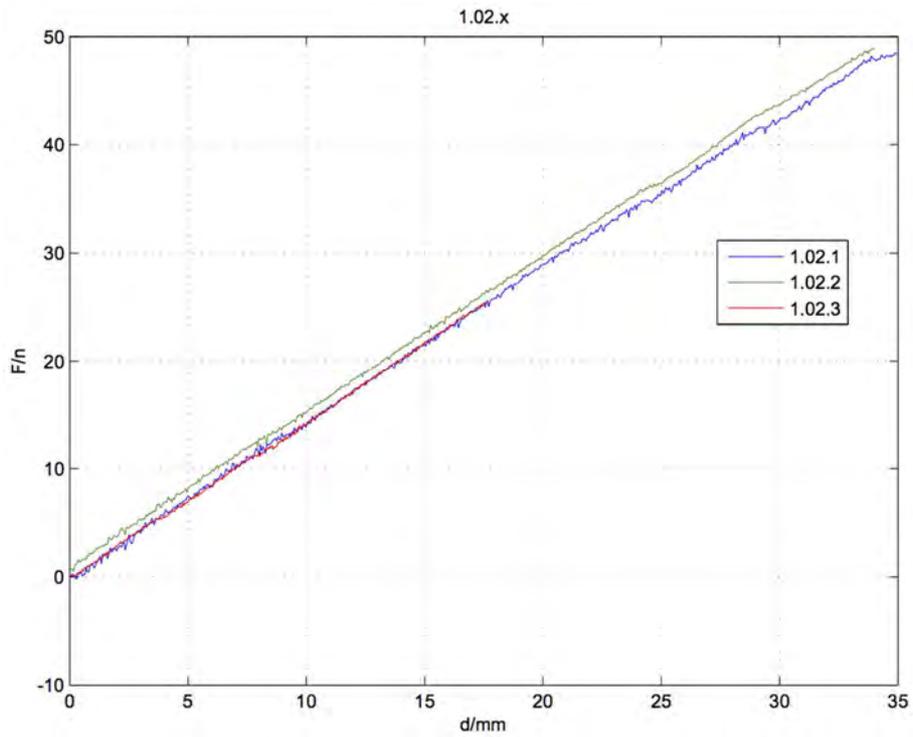


Figura 9.14: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 1.02.

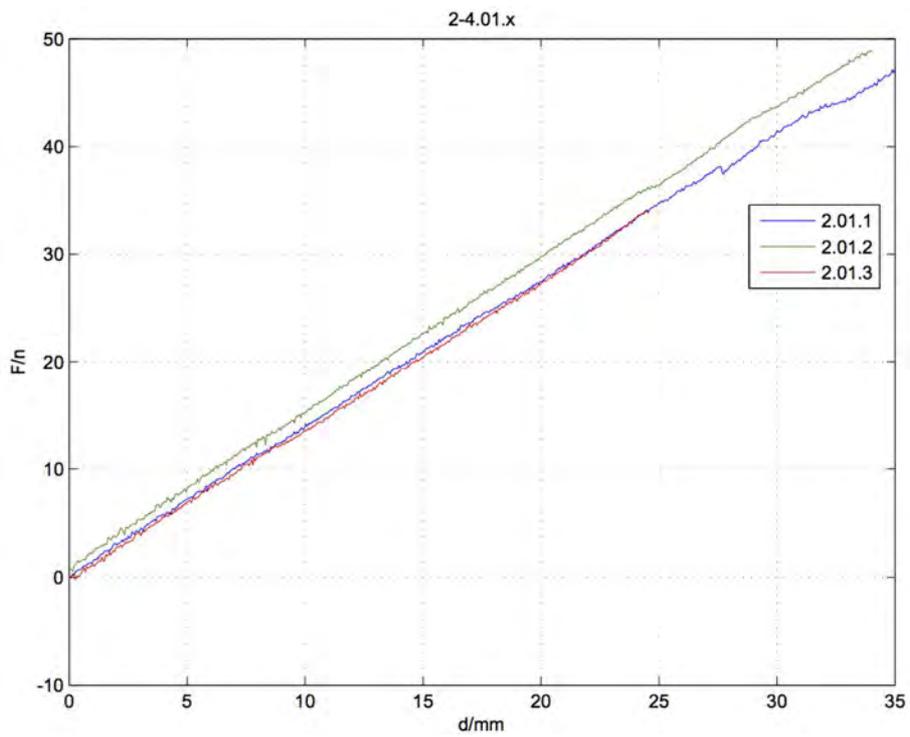


Figura 9.15: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 2-4.01.

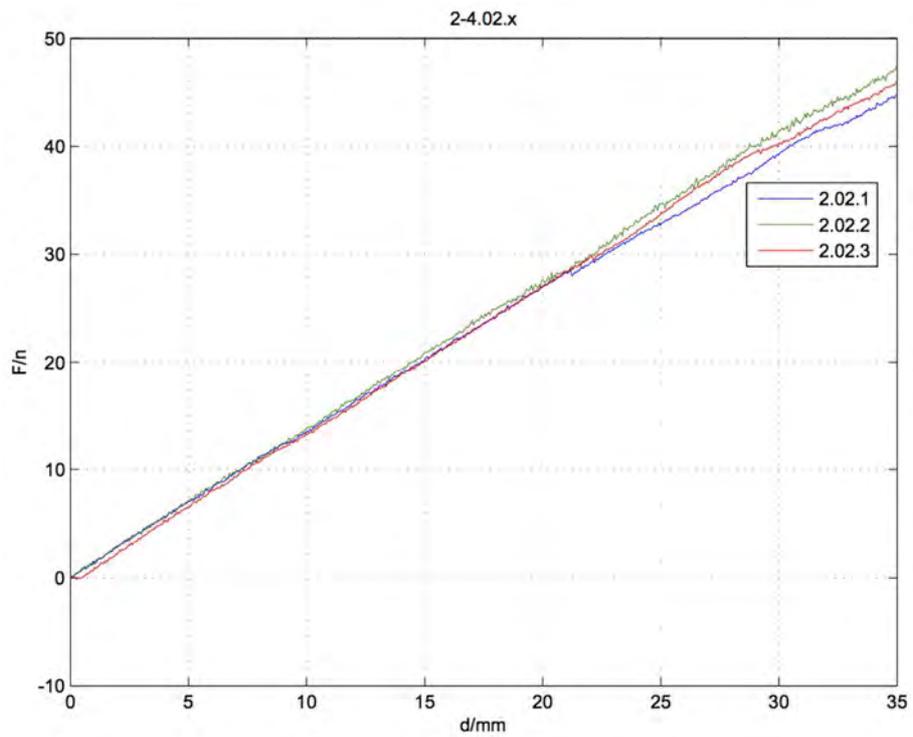


Figura 9.16: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 2-4.02.

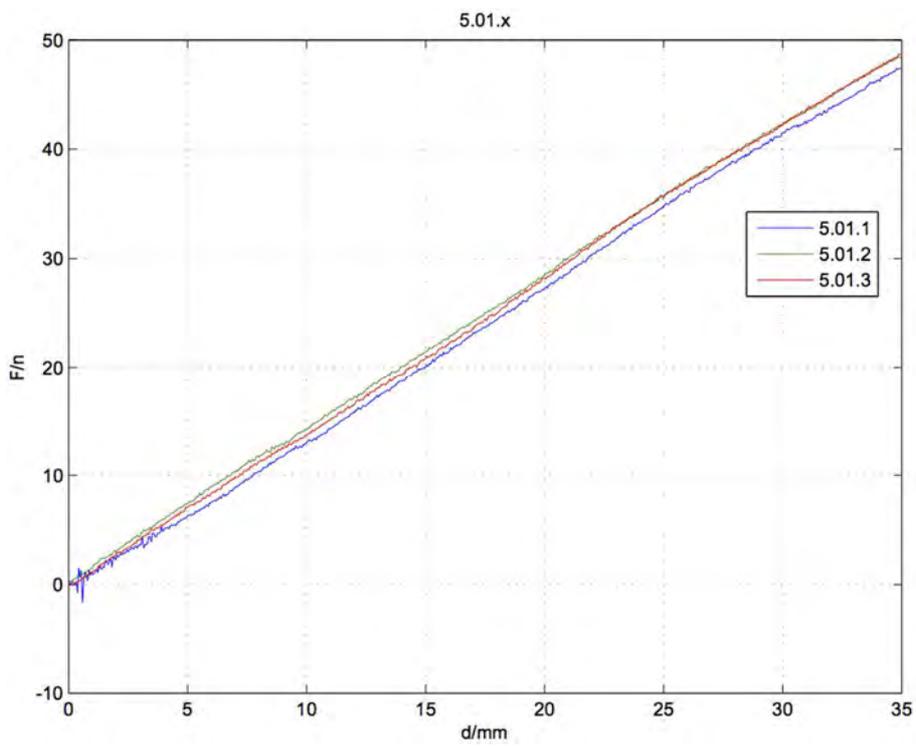


Figura 9.17: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 5.01.

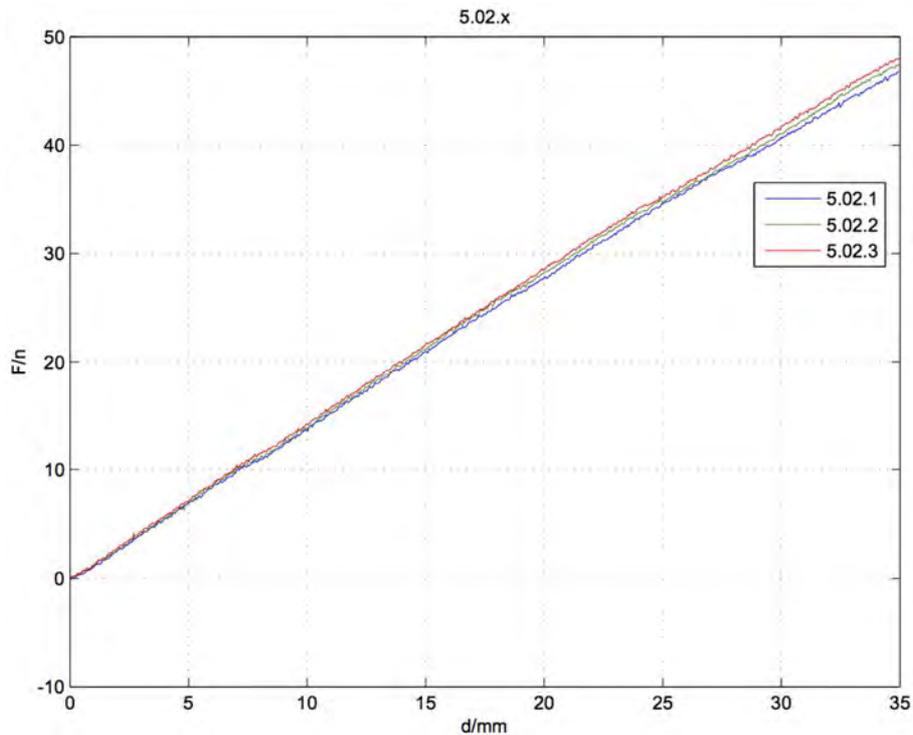


Figura 9.18: Resultados experimentales de desplazamiento y fuerza para las probetas de la orientación 5.02.

9.1.4. Programa de MATLAB® para la caracterización de piezas fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM)

El código del programa para calcular el coeficiente de rigidez de los ensayos físicos realizados para la correlación con las simulaciones realizadas mediante FEA (sección 3.3.1) es el siguiente.

```
function Maquina_Univ

clc
clear
close all

A01=importdata('01.txt');
A01f=importdata('01f.txt');
A02=importdata('02.txt');
A02f=importdata('02f.txt');
A03=importdata('03.txt');
A03f=importdata('03f.txt');
A04=importdata('04.txt');
A04f=importdata('04f.txt');
A05=importdata('05.txt');
A05f=importdata('05f.txt');
A06=importdata('06.txt');
A06f=importdata('06f.txt');
A07=importdata('07.txt');
A07f=importdata('07f.txt');
A08=importdata('08.txt');
A08f=importdata('08f.txt');
A09=importdata('09.txt');
```

```
A09f=importdata('08f.txt');
A10=importdata('10.txt');
A10f=importdata('10f.txt');
A11=importdata('11.txt');
A11f=importdata('11f.txt');
A12=importdata('12.txt');
A12f=importdata('12f.txt');
A13=importdata('13.txt');
A13f=importdata('13f.txt');
A14=importdata('14.txt');
A14f=importdata('14f.txt');
A15=importdata('15.txt');
A15f=importdata('15f.txt');
A16=importdata('16.txt');
A16f=importdata('16f.txt');
A17=importdata('17.txt');
A17f=importdata('17f.txt');
A18=importdata('18.txt');
A18f=importdata('18f.txt');
A19f=importdata('19f.txt');
```

```
M01=A01.data;
M01f=A01f.data;
M02=A02.data;
M02f=A02f.data;
M03=A03.data;
M03f=A03f.data;
M04=A04.data;
M04f=A04f.data;
M05=A05.data;
M05f=A05f.data;
M06=A06.data;
M06f=A06f.data;
M07=A07.data;
M07f=A07f.data;
M08=A08.data;
M08f=A08f.data;
M09=A09.data;
M09f=A09f.data;
M10=A10.data;
M10f=A10f.data;
M11=A11.data;
M11f=A11f.data;
M12=A12.data;
M12f=A12f.data;
M13=A13.data;
M13f=A13f.data;
M14=A14.data;
M14f=A14f.data;
M15=A15.data;
M15f=A15f.data;
M16=A16.data;
M16f=A16f.data;
M17=A17.data;
M17f=A17f.data;
M18=A18.data;
M18f=A18f.data;
M19f=A19f.data;
```

```
%fem que el grafic comenci al (0,0)
```

```

ind=find(M01(:,1)>0.2);
M01=M01(ind(1):end,:);
M01(:,3)=M01(:,3)-M01(1,3);
M01f(:,3)=M01f(:,3)-M01f(1,3);
ind=find(M01f(:,1)>0.5);
M01f=M01f(ind(1):end,:);
M02=M02(ind(1):end,:);
M02(:,3)=M02(:,3)-M02(1,3);
M02f(:,3)=M02f(:,3)-M02f(1,3);
ind=find(M03(:,1)>0.2);
M03=M03(ind(1):end,:);
M03(:,3)=M03(:,3)-M03(1,3);
M03f(:,3)=M03f(:,3)-M03f(1,3);
ind=find(M04(:,1)>0.1);
M04=M04(ind(1):end,:);
M04(:,3)=M04(:,3)-M04(1,3);
M04f(:,3)=M04f(:,3)-M04f(1,3);
M05(:,3)=M05(:,3)-M05(1,3);
M05f(:,3)=M05f(:,3)-M05f(1,3);
M06(:,3)=M06(:,3)-M06(1,3);
M06f(:,3)=M06f(:,3)-M06f(1,3);
M07(:,3)=M07(:,3)-M07(1,3);
M07f(:,3)=M07f(:,3)-M07f(1,3);
ind=find(M08(:,1)>0.1);
M08=M08(ind(1):end,:);
M08(:,3)=M08(:,3)-M08(1,3);
ind=find(M08f(:,1)>0.6);
M08f=M08f(ind(1):end,:);
M08f(:,3)=M08f(:,3)-M08f(1,3);
M09(:,3)=M09(:,3)-M09(1,3);
ind=find(M09f(:,1)>0.6);
M09f=M09f(ind(1):end,:);
M09f(:,3)=M09f(:,3)-M09f(1,3);
M10(:,3)=M10(:,3)-M10(1,3);
M10f(:,3)=M10f(:,3)-M10f(1,3);
M11(:,3)=M11(:,3)-M11(1,3);
M11f(:,3)=M11f(:,3)-M11f(1,3);
M12(:,3)=M12(:,3)-M12(1,3);
M12f(:,3)=M12f(:,3)-M12f(1,3);
ind=find(M13(:,1)>0.2);
M13=M13(ind(1):end,:);
M13(:,3)=M13(:,3)-M13(1,3);
M13f(:,3)=M13f(:,3)-M13f(1,3);
ind=find(M13f(:,3)>=24.5);
M13f=M13f(1:ind(1),:);
M14(:,3)=M14(:,3)-M14(1,3);
ind=find(M14f(:,3)>17.5);
M14f=M14f(1:ind(1),:);
M14f(:,3)=M14f(:,3)-M14f(1,3);
M15(:,3)=M15(:,3)-M15(1,3);
M15f(:,3)=M15f(:,3)-M15f(1,3);
M16(:,3)=M16(:,3)-M16(1,3);
M16f(:,3)=M16f(:,3)-M16f(1,3);
M17(:,3)=M17(:,3)-M17(1,3);
M17f(:,3)=M17f(:,3)-M17f(1,3);
ind=find(M18(:,1)>20.5);
M18=M18(1:ind(1),:);
M18(:,3)=M18(:,3)-M18(1,3);
M18f(:,3)=M18f(:,3)-M18f(1,3);
M19f(:,3)=M19f(:,3)-M19f(1,3);

```

```

%calculo les rectes de les 7.5 y 15mm
p01=polyfit(M01(:,3),M01(:,1),1);
p01f=polyfit(M01f(:,3),M01f(:,1),1);
p02=polyfit(M02(:,3),M02(:,1),1);
p02f=polyfit(M02f(:,3),M02f(:,1),1);
p03=polyfit(M03(:,3),M03(:,1),1);
p03f=polyfit(M03f(:,3),M03f(:,1),1);
p04=polyfit(M04(:,3),M04(:,1),1);
p04f=polyfit(M04f(:,3),M04f(:,1),1);
p05=polyfit(M05(:,3),M05(:,1),1);
p05f=polyfit(M05f(:,3),M05f(:,1),1);
p06=polyfit(M06(:,3),M06(:,1),1);
p06f=polyfit(M06f(:,3),M06f(:,1),1);
p07=polyfit(M07(:,3),M07(:,1),1);
p07f=polyfit(M07f(:,3),M07f(:,1),1);
p08=polyfit(M08(:,3),M08(:,1),1);
p08f=polyfit(M08f(:,3),M08f(:,1),1);
p09=polyfit(M09(:,3),M09(:,1),1);
p09f=polyfit(M09f(:,3),M09f(:,1),1);
p10=polyfit(M10(:,3),M10(:,1),1);
p10f=polyfit(M10f(:,3),M10f(:,1),1);
p11=polyfit(M11(:,3),M11(:,1),1);
p11f=polyfit(M11f(:,3),M11f(:,1),1);
p12=polyfit(M12(:,3),M12(:,1),1);
p12f=polyfit(M12f(:,3),M12f(:,1),1);
p13=polyfit(M13(:,3),M13(:,1),1);
p13f=polyfit(M13f(:,3),M13f(:,1),1);
p14=polyfit(M14(:,3),M14(:,1),1);
p14f=polyfit(M14f(:,3),M14f(:,1),1);
p15=polyfit(M15(:,3),M15(:,1),1);
p15f=polyfit(M15f(:,3),M15f(:,1),1);
p16=polyfit(M16(:,3),M16(:,1),1);
p16f=polyfit(M16f(:,3),M16f(:,1),1);
p17=polyfit(M17(:,3),M17(:,1),1);
p17f=polyfit(M17f(:,3),M17f(:,1),1);
p18=polyfit(M18(:,3),M18(:,1),1);
p18f=polyfit(M18f(:,3),M18f(:,1),1);
p19f=polyfit(M19f(:,3),M19f(:,1),1);

```

```

%el desplaçament màxim és de 35mm
dgraf=0:35;

```

```

%calculo les rectes
F01(:,1)=dgraf*p01(1);
F01(:,2)=dgraf*p01f(1);
F02(:,1)=dgraf*p02(1);
F02(:,2)=dgraf*p02f(1);
F03(:,1)=dgraf*p03(1);
F03(:,2)=dgraf*p03f(1);
F04(:,1)=dgraf*p04(1);
F04(:,2)=dgraf*p04f(1);
F05(:,1)=dgraf*p05(1);
F05(:,2)=dgraf*p05f(1);
F06(:,1)=dgraf*p06(1);
F06(:,2)=dgraf*p06f(1);
F07(:,1)=dgraf*p07(1);
F07(:,2)=dgraf*p07f(1);
F08(:,1)=dgraf*p08(1);

```

```

F08(:,2)=dgraf*p08f(1);
F09(:,1)=dgraf*p09(1);
F09(:,2)=dgraf*p09f(1);
F10(:,1)=dgraf*p10(1);
F10(:,2)=dgraf*p10f(1);
F11(:,1)=dgraf*p11(1);
F11(:,2)=dgraf*p11f(1);
F12(:,1)=dgraf*p12(1);
F12(:,2)=dgraf*p12f(1);
F13(:,1)=dgraf*p13(1);
F13(:,2)=dgraf*p13f(1);
F14(:,1)=dgraf*p14(1);
F14(:,2)=dgraf*p14f(1);
F15(:,1)=dgraf*p15(1);
F15(:,2)=dgraf*p15f(1);
F16(:,1)=dgraf*p16(1);
F16(:,2)=dgraf*p16f(1);
F17(:,1)=dgraf*p17(1);
F17(:,2)=dgraf*p17f(1);
F18(:,1)=dgraf*p18(1);
F18(:,2)=dgraf*p18f(1);
F19(:,1)=dgraf*p19f(1);

%faig la mitja de les pendents per cada tipus de probeta
a1(1,1:3)=[p01(1) p07(1) p17(1)];
a1(1,4)=mean(a1(1,1:3));
a1(1,5)=std(a1(1,1:3));

a1(2,1:3)=[p01f(1) p07f(1) p17f(1)];
a1(2,4)=mean(a1(2,1:3));
a1(2,5)=std(a1(2,1:3));
a1(3,1:3)=[p04(1) p08(1) p14(1)];
a1(3,4)=mean(a1(3,1:3));
a1(3,5)=std(a1(3,1:3));
a1(4,1:3)=[p04f(1) p08f(1) p14f(1)];
a1(4,4)=mean(a1(4,1:3));
a1(4,5)=std(a1(4,1:3));

a24(1,1:3)=[p05(1) p09(1) p13(1)];
a24(1,4)=mean(a24(1,1:3));
a24(1,5)=std(a24(1,1:3));
a24(2,1:3)=[p05f(1) p09f(1) p19f(1)];
a24(2,4)=mean(a24(2,1:3));
a24(2,5)=std(a24(2,1:3));
a24(3,1:3)=[p02(1) p10(1) p18(1)];
a24(3,4)=mean(a24(3,1:3));
a24(3,5)=std(a24(3,1:3));
a24(4,1:3)=[p02f(1) p10f(1) p18f(1)];
a24(4,4)=mean(a24(4,1:3));
a24(4,5)=std(a24(4,1:3));

a5(1,1:3)=[p06(1) p12(1) p15(1)];
a5(1,4)=mean(a5(1,1:3));
a5(1,5)=std(a5(1,1:3));
a5(2,1:3)=[p06f(1) p12f(1) p15f(1)];
a5(2,4)=mean(a5(2,1:3));
a5(2,5)=std(a5(2,1:3));
a5(3,1:3)=[p03(1) p11(1) p16(1)];
a5(3,4)=mean(a5(3,1:3));

```

```

a5(3,5)=std(a5(3,1:3));
a5(4,1:3)=[p03f(1) p11f(1) p16f(1)];
a5(4,4)=mean(a5(4,1:3));
a5(4,5)=std(a5(4,1:3));

figure(1)
plot(M01(:,3),M01(:,1),'x',M01f(:,3),M01f(:,1),'x',dgraf,F01,...
      M07(:,3),M07(:,1),'x',M07f(:,3),M07f(:,1),'x',dgraf,F07,...
      M17(:,3),M17(:,1),'x',M17f(:,3),M17f(:,1),'x',dgraf,F17),...

title('1.01.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
.
      '3','3f')
grid on
figure(2)
plot(M04(:,3),M04(:,1),'x',M04f(:,3),M04f(:,1),'x',dgraf,F04,...
      M08(:,3),M08(:,1),'x',M08f(:,3),M08f(:,1),'x',dgraf,F08,...
      M14(:,3),M14(:,1),'x',M14f(:,3),M14f(:,1),'x',dgraf,F14),...

title('1.02.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
.
      '3','3f')
grid on
figure(3)
plot(M05(:,3),M05(:,1),'x',M05f(:,3),M05f(:,1),'x',dgraf,F05,...
      M09(:,3),M09(:,1),'x',M09f(:,3),M09f(:,1),'x',dgraf,F09,...
      M13(:,3),M13(:,1),'x',M13f(:,3),M13f(:,1),'x',dgraf,F13,...
      M19f(:,3),M19f(:,1),'x',dgraf,F19),...
title('2-
4.01.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
      '3','3f','4','4')
grid on
figure(4)
plot(M02(:,3),M02(:,1),'x',M02f(:,3),M02f(:,1),'x',dgraf,F02,...
      M10(:,3),M10(:,1),'x',M10f(:,3),M10f(:,1),'x',dgraf,F10,...
      M18(:,3),M18(:,1),'x',M18f(:,3),M18f(:,1),'x',dgraf,F18),...
title('2-
4.02.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
      '3','3f')
grid on
figure(5)
plot(M06(:,3),M06(:,1),'x',M06f(:,3),M06f(:,1),'x',dgraf,F06,...
      M12(:,3),M12(:,1),'x',M12f(:,3),M12f(:,1),'x',dgraf,F12,...
      M15(:,3),M15(:,1),'x',M15f(:,3),M15f(:,1),'x',dgraf,F15),...

title('5.01.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
.
      '3','3f')
grid on
figure(6)
plot(M03(:,3),M03(:,1),'x',M03f(:,3),M03f(:,1),'x',dgraf,F03,...
      M11(:,3),M11(:,1),'x',M11f(:,3),M11f(:,1),'x',dgraf,F11,...
      M16(:,3),M16(:,1),'x',M16f(:,3),M16f(:,1),'x',dgraf,F16),...

title('5.02.x'),legend('1','1f','1','1f','2','2f','2','2f','3','3f',...
.
      '3','3f')
grid on
figure(7)
plot(dgraf,F01,dgraf,F07,dgraf,F17,dgraf,F04,dgraf,F08,...

```

```

dgraf,14),title('1.0x'),legend('1.01.1','1.01.1f','1.01.2','1.01.2f',.
..

'1.01.3','1.01.3f','1.02.1','1.02.1f','1.02.2','1.02.2f','1.02.3',...
'1.02.3f')
grid on
figure(8)
plot(dgraf,F05,dgraf,F09,dgraf,F13,dgraf,F02,dgraf,F10,...
dgraf,18),title('2-4.0x'),legend('2-4.01.1','2-4.01.1f','2-
4.01.2',...
'2-4.01.2f','2-4.01.3','2-4.01.3f','2-4.02.1','2-4.02.1f','2-
4.02.2',...
'2-4.02.2f','2-4.02.3','2-4.02.3f')
grid on
figure(9)
plot(dgraf,F06,dgraf,F12,dgraf,F15,dgraf,F03,dgraf,F11,...

dgraf,16),title('5.0x'),legend('5.01.1','5.01.1f','5.01.2','5.01.2f',.
..

'5.01.3','5.01.3f','5.02.1','5.02.1f','5.02.2','5.02.2f','5.02.3',...
'5.02.3f')
grid on

R1(1,1:6)=[p01(1) p07(1) p17(1) p04(1) p08(1) p14(1)];
R1(1,7)=mean(R1(1,1:6));
R1(1,8)=std(R1(1,1:6));
R1(2,1:6)=[p01f(1) p07f(1) p17f(1) p04f(1) p08f(1) p14f(1)];
R1(2,7)=mean(R1(2,1:6));
R1(2,8)=std(R1(2,1:6));

R2(1,1:6)=[p05(1) p09(1) p13(1) p02(1) p10(1) p18(1)];
R2(1,7)=mean(R2(1,1:6));
R2(1,8)=std(R2(1,1:6));
R2(2,1:6)=[p05f(1) p09f(1) p19f(1) p02f(1) p10f(1) p18f(1)];
R2(2,7)=mean(R2(2,1:6));
R2(2,8)=std(R2(2,1:6));

R5(1,1:6)=[p06(1) p12(1) p15(1) p03(1) p11(1) p16(1)];
R5(1,7)=mean(R5(1,1:6));
R5(1,8)=std(R5(1,1:6));
R5(2,1:6)=[p06f(1) p12f(1) p15f(1) p03f(1) p11f(1) p16f(1)];
R5(2,7)=mean(R5(2,1:3));
R5(2,8)=std(R5(2,1:3));

save('A1.txt','a1','-ASCII')
save('A24.txt','a24','-ASCII')
save('A5.txt','a5','-ASCII')
save('R1.txt','R1','-ASCII')
save('R2.txt','R2','-ASCII')
save('R5.txt','R5','-ASCII')

figure(10)
plot(M01f(:,3),M01f(:,1),M07f(:,3),M07f(:,1),M17f(:,3),M17f(:,1)),...

title('1.01.x'),legend('1.01.1','1.01.2','1.01.3'),xlabel('d/mm'),...
ylabel('F/n')
grid on

```

```

figure(11)
plot(M04f(:,3),M04f(:,1),M08f(:,3),M08f(:,1),M14f(:,3),M14f(:,1)),...

title('1.02.x'),legend('1.02.1','1.02.2','1.02.3'),xlabel('d/mm'),...
    ylabel('F/n')
grid on

figure(12)
plot(M05f(:,3),M05f(:,1),M09f(:,3),M09f(:,1),M13f(:,3),M13f(:,1)),...
    title('2-
4.01.x'),legend('2.01.1','2.01.2','2.01.3'),xlabel('d/mm'),...
    ylabel('F/n')
grid on

grid on
figure(13)
plot(M02f(:,3),M02f(:,1),M10f(:,3),M10f(:,1),M18f(:,3),M18f(:,1)),...
    title('2-
4.02.x'),legend('2.02.1','2.02.2','2.02.3'),xlabel('d/mm'),...
    ylabel('F/n')
grid on

figure(14)
plot(M06f(:,3),M06f(:,1),M12f(:,3),M12f(:,1),M15f(:,3),M15f(:,1)),...

title('5.01.x'),legend('5.01.1','5.01.2','5.01.3'),xlabel('d/mm'),...
    ylabel('F/n')
grid on

figure(15)
plot(M03f(:,3),M03f(:,1),M11f(:,3),M11f(:,1),M16f(:,3),M16f(:,1)),...

title('5.02.x'),legend('5.02.1','5.02.2','5.02.3'),xlabel('d/mm'),...
    ylabel('F/n')
grid on

end

```

9.2. Resultados del análisis de varianza de el estudio de las propiedades dinámicas-mecánicas de las piezas fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM)

En este apartado se muestran los resultados del análisis de varianza realizado en el estudio de las propiedades mecánicas-dinámicas de las piezas fabricadas mediante tecnología FDM (sección 3.3.2).

Tabla 9.1: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para el *Storage Modulus*.

Señal			Ruido			S/N		
Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac
B	45.07	45.07	A	30.73	30.73	B	46.04	46.04
C	39.51	84.58	C	26.49	57.22	C	35.72	81.76
A	7.68	92.27	B	18.05	75.27	A	7.90	89.66
BxC	4.55	96.81	AxB	11.86	87.13	BxC	7.35	97.01
E	0.83	97.65	AxC	3.81	90.94	E	1.30	98.31
AxC	0.79	98.44	D	3.74	94.68	AxC	1.28	99.59
F	0.72	99.15	BxC	2.63	97.31	F	0.18	99.77
D	0.55	99.71	F	1.86	99.17	D	0.13	99.91
AxB	0.27	99.98	e	0.44	99.61	AxB	0.08	99.98
e	0.02	100.00	E	0.39	100.00	e	0.02	100.00

Tabla 9.2: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para el *Loss Modulus*.

Señal			Ruido			S/N		
Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac
B	45.69	45.69	F	49.87	49.87	B	45.04	45.04
D	26.72	72.41	C	10.05	59.92	C	15.92	60.96
E	8.01	80.42	BxC	9.35	69.27	D	8.48	69.44
C	5.94	86.36	E	8.46	77.73	E	7.28	76.72
AxC	4.17	90.53	AxB	7.33	85.05	BxC	6.99	83.71
A	3.29	93.83	B	5.83	90.88	A	6.56	90.26
BxC	3.11	96.94	D	3.47	94.35	AxC	3.78	94.04
F	1.77	98.71	A	2.62	96.97	F	2.77	96.81
AxB	0.66	99.36	AxC	1.52	98.49	AxB	2.38	99.19
e	0.64	100.00	e	1.51	100.00	e	0.81	100.00

Tabla 9.3: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para la *Tan Delta*.

Señal			Ruido			S/N		
Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac
D	50.85	50.85	F	40.60	40.60	D	27.47	27.47
B	23.49	74.34	C	10.33	50.92	B	25.37	52.84
E	10.61	84.96	D	10.04	60.96	E	13.04	65.88
F	3.81	88.76	BxC	8.77	69.73	F	10.57	76.45
AxC	3.34	92.10	AxC	8.19	77.92	AxB	5.78	82.23
AxB	2.17	94.27	AxB	6.73	84.65	AxC	5.77	88.01
A	1.81	96.09	e	5.80	90.45	BxC	4.14	92.15
BxC	1.61	97.69	B	4.32	94.78	A	3.30	95.45
e	1.52	99.21	E	3.84	98.62	C	2.43	97.89
C	0.79	100.00	A	1.38	100.00	e	2.11	100.00

Tabla 9.4: Contribución y contribución acumulada en tanto por cien de cada factor, interacciones y ruido en la mediana, el ruido y la señal/ruido para la rigidez.

Señal			Ruido			S/N		
Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac	Factor	Contribución	Cont. Ac
C	32.67	32.67	B	35.87	35.87	B	34.78	34.78
B	30.80	63.47	C	29.97	65.84	C	31.65	66.43
A	30.46	93.93	AxB	10.21	76.05	A	25.52	91.95
BxC	3.34	97.27	A	5.87	81.92	BxC	5.71	97.66
E	0.77	98.04	BxC	5.62	87.54	E	1.28	98.94
AxB	0.75	98.79	E	3.92	91.46	AxC	0.84	99.78
F	0.53	99.32	F	3.76	95.23	D	0.08	99.87
D	0.44	99.76	AxC	2.35	97.57	AxB	0.06	99.93
e	0.19	99.95	D	1.57	99.15	F	0.04	99.97
AxC	0.05	100.00	e	0.85	100.00	e	0.03	100.00

9.3. Programa de MATLAB® para la verificación de los resultados de la función del acabado superficial

Seguidamente se presenta el código del programa realizado para la verificación de los resultados de la función del comportamiento mecánico (sección 6.6.2).

```
function comprobacio_mecanica_01

clc
clear
close all

ninterp=1000;
dinterp=20;

M1_1=arreglar('1.01.txt');
M1_2=arreglar('1.02.txt');
M1_3=arreglar('1.03.txt');

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(M1_1);
n2=length(M1_2);
n3=length(M1_3);

%ajunto les taules de dades
M(1:n1,:)=M1_1;
M(n1+1:n1+n2,:)=M1_2;
M(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=M1_3;

MA=ordenar_agrupar(M);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
d=max(MA(:,1));
n=ninterp;
dn=d/n;
dgraf=[0:dn:d]';
```

```

%interpolo els valors
mode='linear';
M1=interpolar(MA,dgraf,mode);

ind=find(M1(:,1)>=dinterp);
M1f=M1(1:ind(1),1);
p=polyfit(M1(1:ind(1),1),M1(1:ind(1),2),1);
M1f(:,2)=polyval([p(1) 0],M1(1:ind(1),1));

R1=corrcoef(M1(1:ind(1),2),M1f(:,2));
Res(1,1)=p(1);
Res(1,2)=R1(1,2);

figure(1)
plot(M1_1(:,1),M1_1(:,2),M1_2(:,1),M1_2(:,2),M1_3(:,1),M1_3(:,2),...
      M1(:,1),M1(:,2),M1f(:,1),M1f(:,2)),legend('1','2','3','Tot','Fin'))
grid on

M2_1=arreglar('2.01.txt');
M2_2=arreglar('2.02.txt');
M2_3=arreglar('2.03.txt');

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(M2_1);
n2=length(M2_2);
n3=length(M2_3);

%ajunto les taules de dades
M(1:n1,:)=M2_1;
M(n1+1:n1+n2,:)=M2_2;
M(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=M2_3;

MA=ordenar_agrupar(M);

%creo el vector de x(el) per interpolar
d=max(MA(:,1));
n=ninterp;
dn=d/n;
dgraf=[0:dn:d]';

%interpolo els valors
mode='linear';
M2=interpolar(MA,dgraf,mode);

ind=find(M2(:,1)>=dinterp);
M2f=M2(1:ind(1),1);
p=polyfit(M2(1:ind(1),1),M2(1:ind(1),2),1);
M2f(:,2)=polyval([p(1) 0],M2(1:ind(1),1));

%r^2 del ajust
R1=corrcoef(M2(1:ind(1),2),M2f(:,2));
Res(2,1)=p(1);
Res(2,2)=R1(1,2);

figure(2)
plot(M2_1(:,1),M2_1(:,2),M2_2(:,1),M2_2(:,2),M2_3(:,1),M2_3(:,2),M2(:,
1),...
      M2(:,2),M2f(:,1),M2f(:,2)),legend('1','2','3','Tot','Fin'))

```

```

grid on

M5_1=arreglar('5.01.txt');
M5_2=arreglar('5.02.txt');
M5_3=arreglar('5.03.txt');

%calculo la longitud de cada taula de dades per poderles ajuntar
n1=length(M5_1);
n2=length(M5_2);
n3=length(M5_3);

%ajunto les taules de dades
M(1:n1,:)=M5_1;
M(n1+1:n1+n2,:)=M5_2;
M(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=M5_3;

MA=ordenar_agrupar(M);

%creo el vector de x(e1) per interpolar
d=max(MA(:,1));
n=ninterp;
dn=d/n;
dgraf=[0:dn:d]';

%interpolo els valors
mode='linear';
M5=interpolar(MA,dgraf,mode);

ind=find(M5(:,1)>=dinterp);
M5f=M5(1:ind(1),1);
p=polyfit(M5(1:ind(1),1),M5(1:ind(1),2),1);
M5f(:,2)=polyval([p(1) 0],M5(1:ind(1),1));

R1=corrcoef(M5(1:ind(1),2),M5f(:,2));
Res(3,1)=p(1);
Res(3,2)=R1(1,2);

figure(3)
plot(M5_1(:,1),M5_1(:,2),M5_2(:,1),M5_2(:,2),M5_3(:,1),M5_3(:,2),M5(:,
1),...
      M5(:,2),M5f(:,1),M5f(:,2)),legend('1','2','3','Tot','Fin'))
grid on

figure(4)
plot(M1_1(:,1),M1_1(:,2),M1_2(:,1),M1_2(:,2),M1_3(:,1),M1_3(:,2),...
      M2_1(:,1),M2_1(:,2),M2_2(:,1),M2_2(:,2),M2_3(:,1),M2_3(:,2),...
      M5_1(:,1),M5_1(:,2),M5_2(:,1),M5_2(:,2),M5_3(:,1),M5_3(:,2))
grid on

figure(5)
plot(M1(:,1),M1(:,2),M2(:,1),M2(:,2),M5(:,1),M5(:,2)),legend('1','2','
5'))
grid on

figure(6)
plot(M1f(:,1),M1f(:,2),M2f(:,1),M2f(:,2),M5f(:,1),M5f(:,2)),legend('1'
,'2','5'))
grid on

```

```

save('M1_1.txt','M1_1','-ascii')
save('M1_2.txt','M1_2','-ascii')
save('M1_3.txt','M1_3','-ascii')

```

```

save('M2_1.txt','M2_1','-ascii')
save('M2_2.txt','M2_2','-ascii')
save('M2_3.txt','M2_3','-ascii')

```

```

save('M5_1.txt','M5_1','-ascii')
save('M5_2.txt','M5_2','-ascii')
save('M5_3.txt','M5_3','-ascii')

```

```

save('Res.txt','Res','-ascii')

```

```

save('M1f.txt','M1f','-ascii')
save('M2f.txt','M2f','-ascii')
save('M5f.txt','M5f','-ascii')

```

```

end

```

```

%funció per fer que les dades comencin en (0,0)
function M=arreglar(arxiu)

```

```

A=importdata(arxiu);
B=A.data;
%busco el desplaçament zero
ind=find(B(:,3)>0);
%redim la matriu
B=B(ind(1):end,:);
%obligo que passin per el (0,0)
B(:,3)=B(:,3)-B(1,3);
B(:,1)=B(:,1)-B(1,1);

```

```

%trec la part del final
ind=find(B(:,1)==max(B(:,1)));

```

```

M(:,1)=B(1:ind(1),3);
M(:,2)=B(1:ind(1),1);

```

```

end

```

```

function M=ordenar_agrupar(A)

```

```

%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que són iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la
fila
%repetida
for i=1:length(a)
    B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
    B(a(i)+1,:)=NaN;
end
%esborro els NaNs

```

```
M=B(all(~isnan(B),2),:);  
  
end  
  
function C=interpolar(A,e,mode)  
  
C(:,1)=e;  
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);  
  
end
```