

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo/Tesina/Proyecto Fin de Máster

TÍTULO	Revisión de tecnologías aditivas emergentes y estudio de la influencia de parámetros de fabricación en las propiedades mecánicas de materiales polímeros fabricados mediante FDM
AUTOR	Adrián Rodríguez Panes
TUTOR	Ana María Camacho López
CO-TUTOR	Juan Claver Gil
DEPARTAMENTO	Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

TÍTULO: Revisión de tecnologías aditivas emergentes y estudio de la influencia de parámetros de fabricación en las propiedades mecánicas de materiales polímeros fabricados mediante FDM

AUTOR: Adrián Rodríguez Panes

TUTOR: Ana María Camacho López

CO-TUTOR: Juan Claver Gil

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE: _____

VOCAL _____

SECRETARIO _____

FECHA DEFENSA ___ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____ Fdo.: _____ Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer el gran apoyo que he recibido de mis tutores Ana María Camacho López y Juan Claver Gil; desde la fase de definición del proyecto, en la que me ayudaron a elegir la línea de investigación más adecuada y a concretar los objetivos, durante el desarrollo de las pruebas y ensayos, en los que se involucraron para encontrar soluciones a todas las dificultades y problemas que fueron surgiendo y finalmente, en la interpretación de los resultados, siempre pude contar con sus consejos sin los cuales no hubiera podido realizar este trabajo.

También me gustaría mencionar a Carlos y José María Ballesteros García, los estudiantes que construyeron el equipo de impresión 3D que se ha utilizado en este trabajo y lo donaron al departamento; dado que este proyecto se basa en la fabricación y ensayo de piezas utilizando la impresora Prusa i3 ensamblada por estos estudiantes, sin su trabajo hubiera sido imposible realizar estos experimentos.

Por último quiero agradecer la ayuda recibida de los demás miembros del departamento y personal de la facultad, que siempre estuvieron dispuestos a echar una mano y a proporcionarme los materiales y recursos necesarios para realizar este proyecto .

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación y contexto.....	1
2. OBJETIVO.....	2
2.1. Objetivo del Proyecto.....	2
3. REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVAS.....	3
3.1. Procesos de fabricación aditiva o impresión 3D.....	3
3.1.1. Fotopolimerización en cuba (<i>Vat photopolymerization</i>).....	4
3.1.2. Proyección de aglutinante (<i>Binder Jetting - BJ</i>).....	6
3.1.3. Proyección de material (<i>Material Jetting - MJ</i>).....	8
3.1.4. Fusión de lecho de polvo (<i>Powder Bed Fusion - PBF</i>).....	10
3.1.5. Deposición de energía focalizada (<i>Directed Energy Deposition - DED</i>).....	15
3.1.6. Laminado de hojas (<i>Sheet Lamination</i>).....	17
3.1.7. Extrusión de material (<i>Material Extrusion</i>).....	19
3.2. Características de la fabricación por extrusión de material polímero.....	20
3.2.1. Descripción y fundamentos del proceso y equipo básico.....	20
3.2.2. Evolución y estado actual. Marcas, equipos y proyectos.....	24
3.2.3. Aplicaciones de la impresión 3D.....	32
3.2.4. Software para impresión 3D.....	35
3.2.5. Materiales para impresión 3D por extrusión de polímero.....	39
3.2.6. Diseño y fabricación de piezas mediante impresión 3D.....	51
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	60
4.1. Normativa y procedimientos de ensayo para fabricación aditiva.....	60
4.1.1. Normativa de ensayo a tracción para piezas fabricadas con métodos aditivos.....	60
4.1.2. Indicaciones para el ensayo a tracción de polímeros según ISO 527 y ASTM D638-14.....	65
4.2. Equipo y procedimientos de fabricación aditiva utilizados.....	74
4.2.1. Impresora 3D Prusa Mendel i3. Descripción y funcionamiento.....	74
4.2.2. Calibración y ajustes del <i>firmware</i> Marlin/Sprinter.....	84
4.2.3. Procedimiento de impresión. Uso del software Cura.....	87
4.3. Equipo utilizado para el ensayo de materiales poliméricos.....	90
4.3.1. Descripción del equipo. Máquina HOYTOM HM-D.....	90
4.3.2. Procedimiento de ensayo a tracción. Control mediante software HOYWIN.....	97
5. PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS.....	102
5.1. Proceso de fabricación aditiva.....	102
5.1.1. Pruebas de fabricación. Definición de parámetros. Problemas encontrados.....	102
5.2. Ensayos a tracción.....	110
5.2.1. Pruebas iniciales con las distintas normas y tipos de probeta.....	110
5.2.2. Definición de los ensayos y parámetros a analizar.....	114
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	121
6.1. Ensayo a tracción ABS.....	121
6.1.1. Dimensiones de las probetas.....	121
6.1.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos.....	122
6.2. Ensayo a tracción PLA.....	128
6.2.1. Dimensiones de las probetas.....	128
6.2.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos.....	130
6.3. Ensayo a tracción otros materiales.....	138

6.3.1. Dimensiones de las probetas	138
6.3.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos	139
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	145
7.1. Conclusiones	145
7.2. Líneas futuras	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
<i>CURRÍCULUM VITAE DEL AUTOR</i>	155

LISTA DE SÍMBOLOS

TP	Tutor del Trabajo
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
TFM	Trabajo Fin de Máster
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
3D	Tres dimensiones
UV	Radiación ultravioleta
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
STL	<i>Stereo Lithographic data</i> (formato archivo 3D)
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i> (formato archivo 3D)
OBJ	<i>Wavefront .obj file</i> (formato archivo 3D)
POV	<i>POV-Ray document</i> (formato archivo 3D)
AMF	<i>Additive Manufacturing Format</i> (formato archivo 3D)
3MF 3D	<i>Manufacturing Format</i> (formato archivo 3D)
G-CODE	Lenguaje de control numérico
SGC	<i>Solid Ground Curing</i> (proceso de AM)
DLP	<i>Digital Light Processing</i> (proceso de AM)
BJ	<i>Binder Jetting</i> (proceso de AM)
3DP	<i>3D Printing</i> (proceso de AM)
CJP	<i>ColorJet Printing</i> (proceso de AM)
MJ	<i>Material Jetting</i> (proceso de AM)
DOD	<i>Drop On Demand</i> (proceso de AM)
MJP/MJM	<i>Multi Jet Modeling/ Multi Jet Printing</i> (proceso de AM)
PBF	<i>Powder Bed Printing</i> (proceso de AM)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (proceso de AM)
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (proceso de AM)
DMLS/DMP	<i>Direct Metal Laser Sintering/ Direct Metal Printing</i> (proceso de AM)
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> (proceso de AM)
SHS	<i>Selective Heat Sintering</i> (proceso de AM)
ME	<i>Material Extrusion</i> (proceso de AM)
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (proceso de AM)
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> (proceso de AM)
DED	<i>Direct Energy Deposition</i> (proceso de AM)
DMD	<i>Direct Metal Deposition</i> (proceso de AM)
UAM	<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i> (proceso de AM)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (proceso de AM)
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (material para impresión 3D)
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (material para impresión 3D)
PETG	<i>PolyEthylene Terephthalate Glycol</i> (material para impresión 3D)
PC	PoliCarbonato (material para impresión 3D)
TPE	<i>ThermoPlastic Elastomer</i> (material para impresión 3D)
HIPS	<i>High Impact PolyStirene</i> (material para impresión 3D)

PVA	<i>PolyVinyl Alcohol</i> (material para impresión 3D)
ASA	<i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i> (material para impresión 3D)
PP	PoliPropileno (material para impresión 3D)
POM	PoliOxiMetileno (material para impresión 3D)
PMMA	PoliMetil MetAcrilato (material para impresión 3D)
HDPE	<i>High-Density PolyEthylene</i> (material para impresión 3D)
PEEK	<i>PolyEther Ether Ketone</i> (material para impresión 3D)
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
TVM	Tasa de variación media

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotopolimerización por láser	
Figura 2. Fotopolimerización con máscara.....	4
Figura 3. Comparación SLA-DLP (Formlabs, 2016).....	6
Figura 4. Proyección de aglutinante	7
Figura 5. Proceso CJP (3D Systems, 2016).....	8
Figura 6. Proyección de material.....	9
Figura 7. Proceso <i>MultiJet</i> (Custompart.net, 2017).....	10
Figura 8. Fusión en lecho de polvo por láser	
Figura 9. Fusión en lecho de polvo por haz de electrones.....	11
Figura 10. Esquema de un proceso SLS (Wikipedia, 2017).....	12
Figura 11. <i>Direct metal laser sintering</i> (DMLS) (Imaginethat-3d, 2015)	13
Figura 12. Esquema del EBM de Arcam (Arcam EBM - A GE Company, 2017).....	14
Figura 14. Deposición de Energía Focalizada	16
Figura 15. Direct metal deposition (DM3D)(Cruz-Robles & Dutta, 2015)	17
Figura 16. Laminación Continua	17
Figura 17. Laminación de placas discontinuas	18
Figura 18. Proceso UAM (Fabrisonic, 2017)	18
Figura 19. Proceso LOM (Custompart.net, 2017).....	19
Figura 13. Extrusión de material	20
Figura 20. Esquema de un Proceso FDM/FFF. (Wikipedia, 2017).....	21
Figura 21. Esquema del extrusor de un proceso FDM/FFF(Wikipedia, 2017).....	22
Figura 22. Deposición de material en proceso FDM/FFF (Rep-Rap Project, 2017).....	23
Figura 23. Calidad en función del espesor de capa (Rep-Rap Project, 2017)	24
Figura 24. Equipos de impresión 3D más utilizados en 2010 (Rep-Rap Project, 2017).....	24
Figura 25. Impresora <i>Cube</i> (3D Systems, 2016)	25
Figura 26. Ultimaker 3 (Ultimaker, 2017).....	26
Figura 27. BCN3D Sigma R17 (BCN3D Technologies, 2017)	27
Figura 28. Robo C2 (Robo3d, 2017)	27
Figura 29. Darwin (Rep-Rap Project, 2017)	
Figura 30. Mendel (Rep-Rap Project, 2017)	
Figura 31. Huxley (Rep-Rap Project, 2017).....	28
Figura 32. Prusa Mendel Original (Proyecto Clone Wars, 2017)	
Figura 33. Prusa Mendel Iteración 2 (Proyecto Clone Wars, 2017)	29
Figura 34. Prusa Mendel Iteración 3 (versión MK2S) (Rep-Rap Project, 2017)	29
Figura 35. Delta Rostock MAX V2(Rep-Rap Project, 2017).....	30
Figura 36. Ultimaker Original (Ultimaker, 2017)	31
Figura 37. Velleman Vertex K8400 (Velleman, 2016)	31
Figura 38. Bukito Kit (Deezmaker, 2016).....	32
Figura 39. Prototipos creados por impresión 3D (UANL, 2013)	32
Figura 40. Prótesis craneal impresa en 3D (Dima3D, 2015).....	33
Figura 41. Máquina de impresión 3D de alimentos <i>Foodini Creator</i> (NaturalMachines, 2016) ..	34
Figura 42. Laboratorio de impresión 3D en una escuela (Dima3D, 2015)	35
Figura 43. Interfaz de Cura (Ultimaker, 2017).....	36
Figura 44. Interfaz de Simplify 3D (Simplify3D, 2017).....	37
Figura 45. Interfaz de Slic3r (Slic3r, 2017).....	38
Figura 46. Logo de Marlin (StaticBoards, 2016)	39

Figura 47. Materiales usados en impresión 3D (Forster, 2015)	40
Figura 48. Materiales polímeros más utilizados para impresión 3D FDM/FFF (All3DP, 2017)..	40
Figura 49. Zapatillas impresas con Filaflex (Recreus, 2017).....	44
Figura 50. Piezas impresas con PETG (All3DP, 2017).....	45
Figura 51. Material de soporte PVA soluble en agua (All3DP, 2017).....	47
Figura 52. Otros filamentos para impresión 3D(All3DP, 2017)	47
Figura 53. Pieza impresa en PMMA (All3DP, 2017).....	48
Figura 54. Piezas impresas con filamentos metálicos (All3DP, 2017)	49
Figura 55. Piezas impresas con filamento fluorescente (All3DP, 2017).....	50
Figura 56. Extrusión insuficiente (Simplify3D, 2017).....	53
Figura 57. Deformación en la base de la pieza (<i>warping</i>) (Simplify3D, 2017)	55
Figura 58. Huecos entre relleno y contorno (Simplify3D, 2017).....	56
Figura 59. Mala unión de las capas (Simplify3D, 2017).....	58
Figura 60. Filamentos entre las partes de la pieza(Simplify3D, 2017)	58
Figura 61. Ubicación y orientación de las piezas en el volumen de construcción (ISO/ASTM 52921:2013).....	61
Figura 62. Modos de avance de la fractura entre superficies(Forster, 2015)	62
Figura 63. Variables geométricas de la deposición de material en EM (Forster, 2015)	63
Figura 64. Diagramas tensión-deformación para material frágil y dúctil(Areatecnología, 2015)	65
Figura 65. Probetas Normalizadas en forma de haltera y cilíndrica(ISO/ASTM 52921:2013 (ASTM F2921-13))	67
Figura 66. Probeta tipo 1A de acuerdo con la Norma ISO 527-2	67
Figura 67. Probeta tipo I de acuerdo con la Norma ASTM D638-14	68
Figura 68. Probeta tipo II de acuerdo con la Norma ASTM D638-14	69
Figura 69. Curvas Tensión-Deformación para distintos comportamientos de materiales (ISO 527- 2:2012).....	71
Figura 70. Cálculo del módulo de elasticidad a tracción. (ASTM D638 - 14).....	72
Figura 71. Cálculo del módulo de elasticidad a tracción para materiales sin región lineal(ASTM D638 - 14).....	73
Figura 72. Imagen de la impresora Prusa i3 utilizada en este trabajo	74
Figura 73. Elementos de una impresora 3D RepRap(Rep-Rap Project, 2017)	75
Figura 74. Modelo CAD de la impresora Prusa i3	76
Figura 75. Piezas de una impresora Prusa i3 (Kitprinter3d, 2016).....	76
Figura 76. Piezas impresas de una impresora 3D(Kitprinter3d, 2016)	77
Figura 77. Estructura de aluminio de la Prusa i3(Ballesteros-García, 2015)	77
Figura 78. Final de carrera.....	77
Figura 79. Termistor (Ballesteros-García, 2015).....	78
Figura 80. Motor Nema 17 (Ballesteros-García, 2015).....	78
Figura 81. Termistor(Ballesteros-García, 2015)	78
Figura 82. Tornillo dentado (<i>Hobbed Bolt</i>) (Ballesteros-García, 2015).....	79
Figura 83. Montaje del filamento en el extrusor	79
Figura 84. Imagen CAD del extrusor	80
Figura 85. Plataforma calefactada (Heat Bed)(Ballesteros-García, 2015)	80
Figura 86. Base de impresión	80
Figura 87. Acoples y elementos de transmisión (Rep-Rap Project, 2017).....	81
Figura 88. Placa Arduino e interfaz RAMPS 1.4 (Rep-Rap Project, 2017)	81
Figura 89. Pantalla LCD (Ballesteros-García, 2015)	82
Figura 90. Conexiones de los elementos de la impresora (Rep-Rap Project, 2017)	82

Figura 91. Carro del cabezal extrusor.....	83
Figura 92. Elementos básicos de la impresora Prusa i3	83
Figura 93. Configuración de Marlin	84
Figura 94. Interfaz Pronterface	85
Figura 95. Opciones de temperatura de Marlin	85
Figura 96. Opciones de regulación PID de la temperatura de Marlin	86
Figura 97. Definición de límites de impresión	86
Figura 98. Opciones de calibración, velocidad y aceleración de Marlin.....	87
Figura 99. Nivelación del carro del cabezal extrusor (Trainnova, 2016).....	87
Figura 100. Tornillos que permiten nivelar la base	88
Figura 101. Control de la altura y nivelación de la base mediante la pantalla LCD	88
Figura 102. Interfaz del programa Cura	89
Figura 103. Filamento introducido en el extrusor	90
Figura 104. Máquina HOYTOM modelo HM-D	90
Figura 105. Alzado y perfil bastidor de la máquina HOYTOM.....	92
Figura 106. Mordazas MO-CP	93
Figura 107. Cuñas de las mordazas MO-CP	94
Figura 108. Equipo de ensayo	95
Figura 109. Control de velocidad CV/PC.....	95
Figura 110. Interfaz del programa HOWIN para ensayos de tracción	96
Figura 111. Extensómetro Epsilon modelo EPS-5025/3542.....	96
Figura 112. Esquema del extensómetro Epsilon modelo EPS-5025/3542	97
Figura 113. Medida de las probetas y trazado de las marcas de referencia.....	97
Figura 114. Colocación de la probeta en las mordazas	98
Figura 115. Colocación del extensómetro	98
Figura 116. Definición del ensayo mediante el software HOWIN.....	99
Figura 117. Definición de las condiciones de ensayo mediante el software HOWIN	99
Figura 118. Definición de las dimensiones de la probeta.....	100
Figura 119. Gráfica tensión-deformación resultante del ensayo	100
Figura 120. Selección de variables de la gráfica de resultados	101
Figura 121. Dimensiones finales de la probeta.....	101
Figura 122. Base de datos de resultados.....	101
Figura 123. Cubo de prueba	103
Figura 124. Resultado de la primera impresión.....	103
Figura 125. Resultado de la segunda impresión	104
Figura 126. Geometría utilizada en las impresiones de prueba (Probeta ISO tipo A1)	104
Figura 127. Distintos resultados de la base en función del juego inicial boquilla-plataforma....	105
Figura 128. Resultado obtenido tras varias pruebas (Probeta+plataforma adhesión)	105
Figura 129. Orientación de la probeta en el volumen de impresión en el programa Cura.....	106
Figura 130. Distintos filamentos para impresión FFF/FDM (PrintedDreams, 2017)	106
Figura 131. Opciones de impresión de Cura	107
Figura 132. Distintas orientaciones de construcción de las probetas	108
Figura 133. Uso de soportes para la orientación de fabricación 2.....	108
Figura 134. Probeta impresa con material flexible Filaflex	109
Figura 135. Intentos fallidos de impresión con nylon	109
Figura 136. Distintos tipos de probetas según las normas ISO 527-2 y ASTM 628-14.	112
Figura 138. Comparativa de resultados obtenidos con distintas probetas.....	113
Figura 139. Comportamiento frágil y dúctil (Areatecnología, 2015).....	113

Figura 140. Material con una pequeña zona plástica.....	114
Figura 141. Material con comportamiento rígido (PLA)	114
Figura 142. Distintas opciones de relleno	115
Figura 143. Distintos espesores de capa.....	115
Figura 144. Distintas orientaciones de construcción.....	116
Figura 145. Algunos de los filamentos utilizados	117
Figura 146. Ensayos con los filamentos en bruto.....	118
Figura 147. Geometría de la probeta de uso general tipo I según ASTM 638-14.....	120
Figura 148. Probetas fabricadas con ABS	122
Figura 149. Probetas de ABS tras el ensayo (una de cada tipo).....	123
Figura 150. Sección de fractura. Probeta 20% relleno y orientación 1	123
Figura 151. Sección de fractura. Probeta 50% relleno	124
Figura 152. Sección de fractura. Probeta orientación 2.....	124
Figura 153. Sección de fractura. Probeta orientación 3.....	124
Figura 154. Gráfico tensión-deformación probeta ABS.....	125
Figura 155. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con ABS	125
Figura 156. Comparativa de resistencia máxima de probetas de ABS.....	127
Figura 157. Probetas fabricadas con PLA	130
Figura 158. Probetas ensayadas de PLA (una de cada tipo).....	130
Figura 159. Sección de fractura. Probeta de referencia.....	131
Figura 160. Sección de fractura. Probeta relleno 50%	131
Figura 161. Sección de fractura. Probeta orientación 2.....	131
Figura 162. Sección de fractura. Probeta orientación 3.....	131
Figura 163. Gráfico tensión-deformación probeta PLA.....	132
Figura 164. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con PLA.....	132
Figura 165. Gráficas tensión-deformación PLA Caso 1.....	133
Figura 166. Gráficas tensión-deformación PLA Caso 2	
Figura 167. Gráficas tensión-deformación PLA Caso 3.....	133
Figura 168. Gráficas tensión-deformación PLA Caso 4	
Figura 169. Gráficas tensión-deformación PLA Caso 5.....	133
Figura 170. Gráfica tensión-deformación agrupada de cada tipo de probeta.....	134
Figura 171. Comparativa de resistencia máxima de probetas de PLA.....	136
Figura 172. Detalle del relleno con la orientación 2	
Figura 173. Detalle del relleno con la orientación 1.....	137
Figura 174. Detalle orientación 3	137
Figura 175. Probetas fabricadas en PETG+Fibra Carbono, PLA+Latón y Filaflex.....	139
Figura 176. Probetas rotas de PETG+Fibra Carbono, PLA+Latón y Filaflex	140
Figura 177. Sección de fractura de los distintos materiales	140
Figura 178. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con los distintos materiales.....	141
Figura 179. Gráfico tensión-deformación Filaflex	141
Figura 180. Probeta de Filaflex sometida a ensayo de tracción	142
Figura 181. Comparativa de resistencia a la tracción de los distintos materiales	143

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y contexto

La **fabricación aditiva** o "**impresión 3D**", engloba numerosas tecnologías que permiten construir piezas tridimensionales mediante la superposición de capas de material. Estas técnicas han experimentado un gran desarrollo en los últimos años; han surgido nuevas técnicas, se han consolidado las existentes, han evolucionado los equipos y se ha extendido el uso de estos procesos a múltiples aplicaciones.

Debido a esta rápida evolución y a lo actual del tema, resulta de gran interés llevar a cabo un estudio de estos procesos, para definirlos, clasificarlos e identificar sus características y aplicaciones utilizando como referencia la literatura científica y la normativa más relevante.

Además se van a estudiar en profundidad las posibilidades de las técnicas de fabricación aditiva por extrusión de material polímero. Estos procesos tienen la gran ventaja de los bajos costes del equipo y los materiales, la facilidad para utilizarlos en laboratorios y ámbitos domésticos y la versatilidad para fabricar en poco tiempo todo tipo de formas con un amplio abanico de materiales plásticos.

Entre otros aspectos se va a profundizar en los parámetros que se deben tener en cuenta al utilizar estos procesos para obtener los resultados de calidad deseados. Estas consideraciones son de vital importancia, ya que la fabricación de piezas mediante procesos aditivos está sujeta a numerosas variables, pues requieren la aplicación selectiva de procesos termofísicos y/o químicos para poder producir piezas con diferentes características, dependiendo del método utilizado y de los parámetros del proceso. Esto implica que para poder cumplir unos requisitos tecnológicos estos parámetros deben ser controlados, optimizados y, si es necesario, personalizados.

Por tanto es necesario evaluar la calidad de las piezas y comprobar que cumplen los requisitos específicos, y dado que no es posible realizar pruebas completas de todas las características de las piezas, cuando se formulan sus especificaciones, es fundamental definir la naturaleza y el alcance de los ensayos (ISO 17296-3:2014).

En este trabajo se van a establecer las pautas para comprobar las características mecánicas a tracción de las piezas fabricadas con estas tecnologías; se va a estudiar la normativa existente así como la literatura y artículos de referencia en este campo y se va a proponer un método con el que se van a realizar una serie de ensayos con los que establecer una primera aproximación al comportamiento mecánico de las piezas producidas mediante técnicas de fabricación aditiva por extrusión de material polímero en función de los parámetros de fabricación.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo del Proyecto

Este proyecto tiene dos objetivos fundamentales: el primero es la investigación y aprendizaje sobre las técnicas de Fabricación Aditiva, haciendo especial hincapié en la tecnología de impresión 3D por Extrusión de Material. Con dicho estudio se pretende:

- Clasificar y describir las tecnologías existentes, e investigar sobre sus aplicaciones, características, materiales de fabricación, ventajas y limitaciones.
- Aprender sobre el funcionamiento, montaje y características de un equipo de 3D por Adición de Material Polímero fabricada a partir del Proyecto RepRap (*Prusa Mendel i3*).
- Desarrollar y mejorar el procedimiento de impresión con dicho equipo mediante pruebas de fabricación y análisis de los resultados obtenidos en función de los parámetros de impresión.

El segundo objetivo de este trabajo es una aplicación práctica de estos métodos; se pretende llevar a cabo una primera aproximación al comportamiento mecánico de las piezas producidas mediante técnicas de Fabricación Aditiva por Extrusión de Material polímero en función de los parámetros de fabricación. Para ello se van a realizar las siguientes tareas:

- Estudio de la Normativa y literatura científica y desarrollo de procedimientos de ensayo para dichos materiales.
- Desarrollo del método de selección, diseño y fabricación aditiva de probetas normalizadas utilizando distintos materiales y parámetros.
- Caracterización mecánica que permita establecer criterios de selección de parámetros de fabricación según condiciones operativas (requerimientos mecánicos, tiempo de fabricación, acabado...).

3. REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVAS

3.1. Procesos de fabricación aditiva o impresión 3D

Se denomina impresión 3D a un conjunto de procesos de fabricación aditiva basados en la idea de convertir un modelo digital en un objeto tridimensional sólido mediante la unión de las materias primas a granel capa sobre capa, en oposición a otras tecnologías de fabricación convencionales (Snyder, 2014). El término “impresión en 3D” se refería originalmente a un proceso que empleaba cabezales de impresión de chorro de tinta estándar y personalizados (Wikipedia, 2017). Con los años, varias tecnologías de impresión 3D se han desarrollado en la industria con la característica común de crear un modelo físico capa por capa (3DNatives, 2017).

El origen del concepto se remonta a la década de los 80 cuando el Dr. Kodama del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya ideó una técnica de prototipado rápido utilizando la fabricación de un objeto capa a capa (Kodama, 1981). En 1984, un equipo de investigadores franceses (Alain Le Méhauté, Olivier de Witte y Jean Claude André) presentó la primera patente antes de ser finalmente abandonada unos años más tarde (Mendoza, 2015). Finalmente fue Charles Hull, futuro fundador del gigante 3D Systems, al que se debe la primera patente comercial en 1986 por una técnica llamada “Estereolitografía” (Hull, 1984).

El proceso de Estereolitografía (SLA) utiliza como material de impresión una resina líquida que solidifica bajo el efecto de la luz UV. Desde este primer avance, han surgido nuevas técnicas de fabricación aditiva a lo largo de los años (Snyder, 2014). En 1988, el profesor Carl Deckard de la Universidad de Texas presentó una patente de Sinterización Selectiva por Láser (SLS), basada en la fusión de un polvo de plástico mediante un láser (Gibson I., 2015). Al mismo tiempo, Scott Crump, fundador del grupo Stratasys, desarrolló las primeras impresoras 3D mediante extrusión de un filamento de plástico (3D Natives, 2017). Esta técnica, patentada como FDM (*Fused Deposition Modeling*), es ahora una de las tecnologías de impresión más populares debido a su fácil manejo y a un coste de adquisición relativamente bajo (Stratasys, 2017).

Desde los años 90, la fabricación aditiva ha seguido desarrollándose con la llegada de tecnologías innovadoras, como la Inyección de Aglutinantes (*Binder Jetting*) inventadas por ZCorp (adquirida por 3D Systems), utilizando tintas de un polvo mineral (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015), o las *PolyJet* (Stratasys, 2017) o *Material Jetting* creadas por la empresa israelí Object (adquirida por Stratasys) (BusinessWire, 2012), que proyecta miles de finas gotitas de polímero solidificadas bajo el efecto de un destello de luz. Las tecnologías SLS han alcanzado gran auge centrándose en la fabricación aditiva de metal con el desarrollo de técnicas tales como la Sinterización de Metal por Láser Directo (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015) (comercializado por empresas como Phoenix Systems, SLM Solutions y Concept Laser) o la Fusión por Haz de Electrones (E-BEAM) desarrollado por la empresa sueca Arcam en los años 2000 (Arcam EBM - A GE Company, 2017).

Este conjunto de técnicas se utiliza principalmente para fabricar prototipos que facilitan el diseño y en producción de piezas, así como para facilitar los procesos educativos y en nuevas aplicaciones como robótica o medicina.

Estos métodos permiten la fabricación personalizada de artículos únicos en pequeñas cantidades; una de las grandes ventajas es que la impresión 3D no requiere costes de preforma o de herramientas y es capaz de fabricar directamente piezas únicas. Frente a los procesos de mecanizado, estampación, inyección o fundición, que se han utilizado tradicionalmente para la

fabricación en serie de piezas, que implican una inversión significativa para crear los útiles de producción, permiten una complejidad limitada e incluso pequeños cambios en el diseño pueden resultar demasiado costosos, estas novedosas técnicas de fabricación aditivas reportan beneficios tales como la facilidad de creación de prototipos, una mayor complejidad geométrica y una extrema versatilidad de diseño (Snyder, 2014).

En la segunda parte de la Norma ISO sobre Fabricación Aditiva (ISO 17296-2:2015) recientemente publicada, se enumeran las diferentes categorías existentes y se describen los fundamentos básicos de estos procesos. En las normas del comité F42 de la ASTM también se establecen estas categorías. Además se puede encontrar la traducción de dicha clasificación al castellano en la norma (UNE 17296-2:2017). Basada en dichas categorías, junto con las expuestas en otras fuentes (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015) se propone la siguiente clasificación y se describen los principales procesos comerciales comprendidos dentro de cada categoría:

- Fotopolimerización en cuba (Vat photopolymerization)
- Proyección de aglutinante (Binder Jetting - BJ)
- Proyección de material (Material Jetting - MJ)
- Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion - PBF)
- Deposición de energía focalizada (Directed Energy Deposition - DED)
- Laminado de hojas (Sheet Lamination)
- Extrusión de material (Material Extrusion)

3.1.1. Fotopolimerización en cuba (*Vat photopolymerization*)

En estos procesos de fabricación aditiva un fotopolímero líquido dispuesto en una cuba se cura selectivamente mediante polimerización activada por luz (ISO 17296-2:2015).

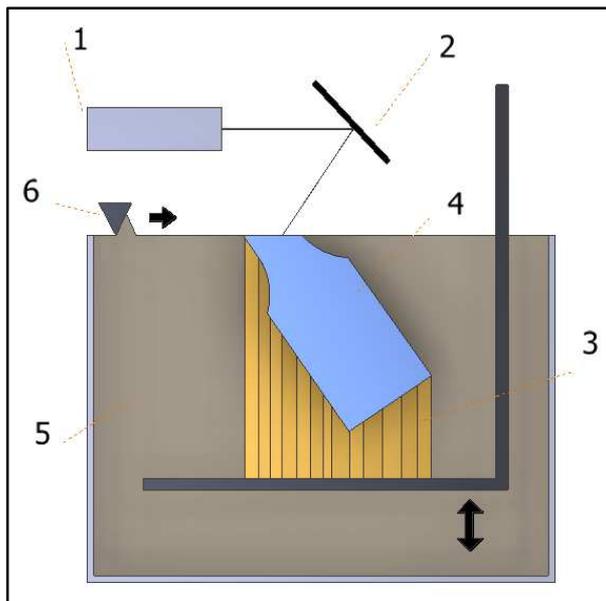


Figura 1. Fotopolimerización por láser

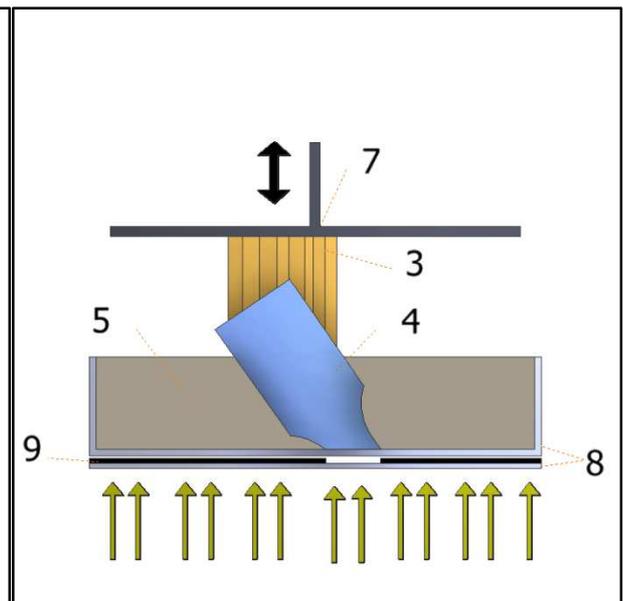


Figura 2. Fotopolimerización con máscara

Leyenda

- | | |
|---|---|
| 1. <i>Fuente de energía luminosa</i> | 6. <i>Mecanismos de recubrimiento y nivelación de la superficie</i> |
| 2. <i>Espejo inclinado focalizado</i> | 7. <i>Plataforma de construcción y elevadora</i> |
| 3. <i>Soportes estructurales</i> | 8. <i>Placas transparentes</i> |
| 4. <i>Pieza</i> | 9. <i>Máscara</i> |
| 5. <i>Cuba con resina líquida fotocurable</i> | |

El primer proceso de fabricación aditiva que se desarrolló corresponde a esta categoría: la **Estereolitografía (SLA)**, patentada por la empresa 3DSystems (Hull, 1984), es un proceso de fabricación por el cual se obtiene una pieza de plástico sólido a partir de un polímero líquido fotosensible contenido en una cuba, exponiéndolo a radiación (típicamente luz ultravioleta). Esta radiación provoca una reacción química causando el curado del polímero. La fabricación de la pieza se logra con una serie de capas, de forma que una vez curada la resina, la plataforma se desplaza hacia abajo para construir una nueva capa sobre la anterior y formar gradualmente la configuración geométrica tridimensional deseada (Loughborough University, 2015).

El proceso SLA tiene un alto nivel de precisión y buen acabado, pero debido a que el proceso utiliza líquido para formar objetos, no hay soporte estructural del material durante la fase de construcción, por lo que a menudo requiere de estructuras de soporte. Además es necesario un postprocesado de la pieza con un baño de tinta, limpieza y un curado posterior para que la pieza sea lo suficientemente fuerte para el uso estructural (Kalpakjian & Schmid, 2009).

El comenzar el proceso la plataforma se desplaza hacia abajo la altura de la capa desde la superficie superior de la cuba de resina. A continuación se produce el curado de la capa mediante fotopolimerización. Para ello se utiliza láser que genera un rayo ultravioleta que, mediante elementos ópticos controlados por motores, se concentra en un área superficial seleccionada del fotopolímero y luego se mueve alrededor en el plano x-y (Kalpakjian & Schmid, 2009). El rayo cura dicha parte del fotopolímero y produce así un cuerpo sólido, mientras que el polímero circundante sigue siendo fluido. Después la plataforma se baja lo suficiente para cubrir el polímero curado con otra capa de polímero líquido y la secuencia se produce de nuevo, de forma que el objeto se construye desde su base hacia arriba mediante superposición de capas.

Se utilizan cuchillas que pasan sobre las capas anteriores para asegurar que no haya defectos en la resina para la construcción de la capa siguiente (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015). Además el proceso de fotopolimerización y el material de soporte pueden haber causado defectos tales como huecos de aire, que necesitan ser rellenados con resina para conseguir un modelo de alta calidad. El espesor de capa típico para el proceso es 0,025 - 0,5 mm (Chua & Leong, 2016).

Este sistema resulta ventajoso respecto a otros debido a la velocidad y la variedad de tamaños posibles de las impresiones. Además se pueden emplear soportes para piezas de formas complicadas. Los sistemas SLA pueden fabricar piezas de diferentes geometrías al mismo tiempo y están diseñados para producir prototipos, patrones o piezas funcionales de múltiples tamaños y aplicaciones. Las piezas de SLA son lo suficientemente resistentes como para ser mecanizadas y pueden utilizarse como modelo para moldes de inyección, termoformado y soplado y en procesos de fundición de metales (Snyder, 2014).

Otro proceso incluido en esta categoría es la **Fotopolimerización por luz ultravioleta o Curado en tierra sólida (Solid Ground Curing - SGC)**, nacida de la empresa israelí Cubital en 1991. Se basa, al igual que la Estereolitografía, en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. En la fotopolimerización, sin embargo, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente (Martín-Infante, 2012), por lo que es necesario el empleo de máscaras.

La tecnología SGC realiza un curado del fotopolímero capa a capa. En lugar de usar un láser explorador para realizar el curado de una capa dada, la capa completa se expone a una fuente de luz UV a través de una máscara que se coloca encima de la superficie de un polímero líquido. Por tanto se debe generar una máscara para cada capa. El proceso de endurecimiento requiere de 2 a 3 segundos por capa.

En el primer paso del proceso se distribuye una capa delgada y plana de fotopolímero líquido sobre la superficie de trabajo y se coloca la máscara encima y a continuación se expone a una fuente UV de alta energía. El líquido expuesto a la fuente solidifica y el que queda oculto por la máscara queda en estado líquido. Acto seguido se limpia el área de trabajo retirando el líquido sobrante y se rellenan las áreas abiertas de la capa con cera caliente, la cual servirá de soporte al enfriarse.

Este proceso cayó en desuso tras la quiebra de la empresa en 2002 (aunque la patente fue adquirida por Object). Si bien el método ofrecía una buena precisión y una tasa de fabricación muy alta, sufría de altos costos de adquisición y operación debido a la complejidad del sistema (Gebhardt, 2003).

Por último, dentro de este grupo también se incluye el **Procesamiento digital por luz (Digital Light Processing - DLP)** inventado por Larry Hornbeck de Texas Instruments en 1987 (3DPrinterPro, 2014).

Este proceso consiste en la exposición de un polímero líquido dispuesto en una cuba a la luz de un proyector DLP. Este aparato proyecta la imagen del modelo 3D sobre el polímero líquido, de forma que la superficie expuesta se endurece. Tras este proceso la plataforma de construcción se mueve hacia abajo y la siguiente capa de polímero se expone a la luz. El proceso se repite hasta que el modelo 3D se completa y la cuba se drena de líquido, revelando el modelo solidificado (Whiteclouds, 2017). Algunas empresas que comercializan esta tecnología son Envision Technology o Formlabs (Rapid Prototyping, 2015).

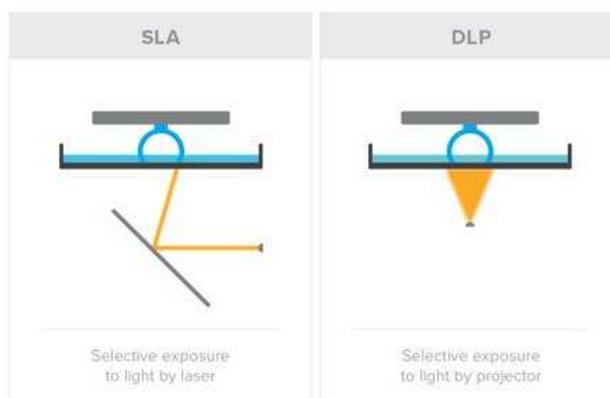


Figura 3. Comparación SLA-DLP (Formlabs, 2016)

Este proceso utiliza un proyector digital para proyectar de una sola vez en toda la plataforma la imagen de cada capa, esto hace que se consigan tiempos de impresión menores que en SLA para cierto tipo de piezas. Además, debido a que el proyector es una pantalla digital, la imagen de cada capa se compone de píxeles cuadrados, lo que resulta en una capa formada por pequeños ladrillos rectangulares llamados "voxels". Esto hace que pueda imprimir objetos con una resolución más alta que con otras técnicas de fotopolimerización (Formlabs, 2016).

3.1.2. Proyección de aglutinante (Binder Jetting - BJ)

Estos procesos se basan en la deposición selectiva de un aglutinante líquido para unir materiales en forma de polvo (ISO 17296-2:2015).

Se utilizan dos tipos de materiales; uno de construcción a base de polvo y un aglutinante líquido. El aglutinante actúa como un adhesivo entre las capas de polvo.

El proceso consiste en la deposición alternativa de capas de polvo y aglutinante. En primer lugar el material en polvo se extiende sobre la plataforma de construcción usando un rodillo y a continuación el cabezal de impresión deposita gotas de aglutinante en la zona requerida de la parte superior del polvo. Una vez finalizada la capa, la plataforma de construcción baja una distancia equivalente al espesor de capa para comenzar la siguiente. El polvo sin unir permanece en su posición alrededor del objeto funcionando como soporte, por lo que se pueden construir piezas complejas sin necesidad de estos apoyos (Loughborough University, 2015).

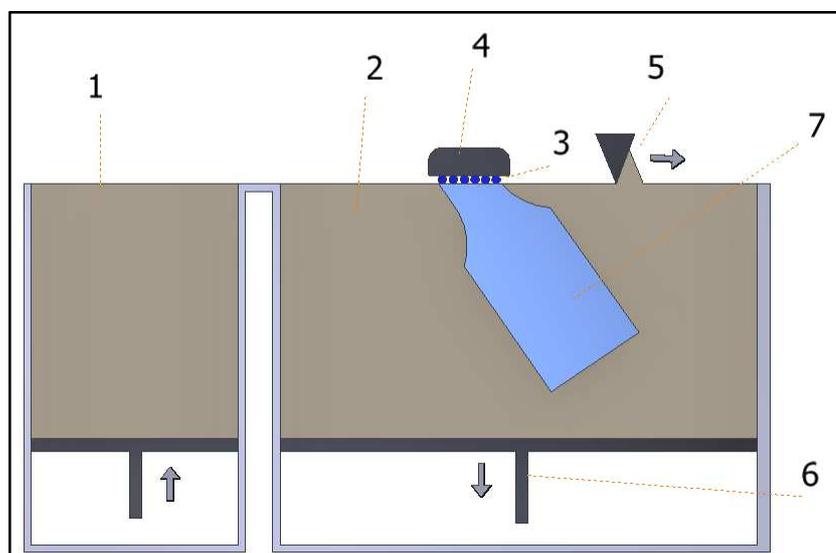


Figura 4. Proyección de aglutinante

Leyenda

- | | |
|--|--|
| 1. Sistema de alimentación de polvos | 5. Sistema dispensador y nivelador de polvos |
| 2. Material en polvo distribuido sobre la plataforma | 6. Plataforma de construcción y elevadora |
| 3. Agente aglutinante líquido | 7. Pieza |
| 4. Dispensador de aglutinante | |

Debido al método de unión, las características del material no siempre son adecuadas para piezas estructurales y a pesar de la velocidad relativamente alta de la impresión, el post-procesado adicional puede añadir un tiempo significativo al proceso global, ya que antes de retirar la pieza se debe esperar a que el aglutinante se fije correctamente y la pieza se enfríe para que solidifique totalmente. Posteriormente se requiere un procesamiento para hacer la pieza más resistente y dar al material aglutinante mejores propiedades mecánicas y estructurales (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Además de ser uno de los procesos aditivos con mayor velocidad de fabricación y de no requerir soportes, tiene otras ventajas como la ausencia de fuentes de calor, lo que simplifica el proceso y evita tensiones térmicas, la posibilidad de obtener piezas grandes y en color y la capacidad de imprimir una gran variedad de materiales incluyendo metales y materiales

cerámicos. Algunos de ellos, como la arena, no requieren procesamiento adicional (Exone, 2017).

El proceso comercial más importante incluido en esta categoría es el proceso de **Impresión a chorro de color (ColorJet Printing - CJP)** originalmente desarrollado por investigadores del MIT en 1993 y comercializado por ZCorp con el nombre de **3DP**. Tras la adquisición de esta empresa por parte de 3DSystems se renombró esta tecnología como **CJP** (Chua & Leong, 2016). Este proceso permite producir impresiones 3D de gran formato en color (Snyder, 2014).

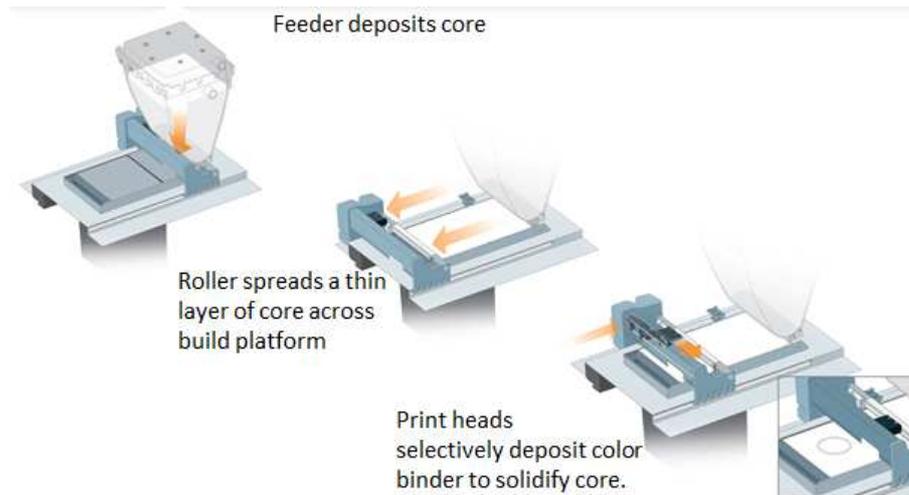


Figura 5. Proceso CJP (3D Systems, 2016)

3.1.3. Proyección de material (Material Jetting - MJ)

En estos procesos de fabricación aditiva se depositan selectivamente gotitas de material para formar la geometría final(ISO 17296-2:2015).El material es proyectado en una plataforma de construcción de forma continua o gota a gota (*Drop on Demand - DOD*).

Esta tecnología funciona de un modo similar a la impresión por inyección de tinta, pero en lugar de inyectar gotas en papel, se proyectan sobre una plataforma para formar capas de fotorolímico líquido que se endurecen mediante radiación luminosa o térmica. La impresora deposita y endurece el material al instante, normalmente mediante luz ultravioleta (UV), de forma que sobre la plataforma se van acumulando capas finas para crear la geometría final(Loughborough University, 2015).

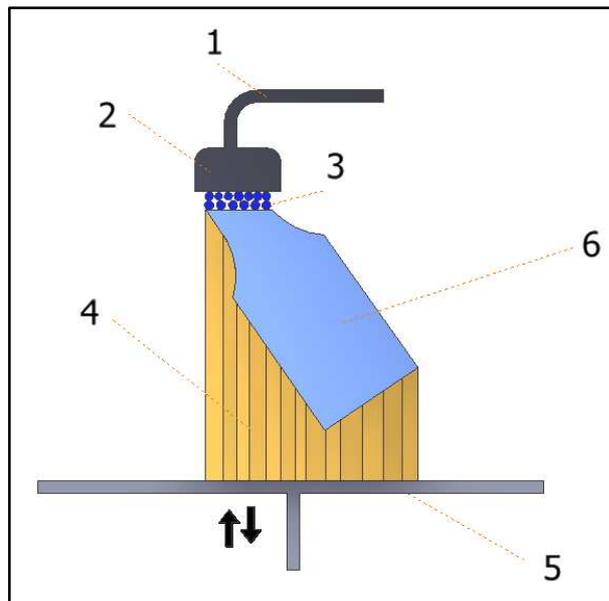


Figura 6. Proyección de material

Leyenda

- | | |
|---|---|
| 1. Sistema de alimentación de material de construcción y soporte | 3. Gotas de material |
| 2. Dispensador de material con fuente de radiación luminosa o térmica | 4. Soporte estructural |
| | 5. Plataforma de construcción y elevadora |
| | 6. Pieza |

El proceso comienza con el cabezal de impresión colocado encima de la plataforma de construcción. A continuación, el material se deposita cuando es necesario en forma de gotitas desde la boquilla del cabezal de impresión, que se desplaza horizontalmente sobre la superficie. Las gotitas de material se solidifican y forman la primera capa. En el siguiente paso la plataforma se desplaza verticalmente y la siguiente capa se construye de la misma forma, en la parte superior de la precedente. Las capas se dejan enfriar y endurecer o se curan por luz UV.

La principal característica que diferencia a este proceso del resto es la forma de deposición del material, que varía de una máquina a otra; a diferencia de los sistemas con flujo continuo de material, las gotitas se dispensan sólo cuando se necesitan, liberadas por un cambio de presión en la boquilla de los actuadores térmicos o piezoeléctricos. Los actuadores térmicos depositan gotitas a una velocidad muy rápida y usan una resistencia de película delgada para formar la gotita. El método piezoeléctrico es a menudo considerado mejor, ya que permite utilizar una gama más amplia de materiales. Los diseños de una cabeza de impresión típica DOD cambian de una máquina a otra, pero de acuerdo con Ottnad (Ottnad, Kagerer, Eiler, Irlinger, & Lueth, 2012), suelen incluir un depósito, un anillo de sellado, elementos piezoeléctricos y placa de silicio con boquilla, todo unido con pegamento de alta temperatura.

A causa del método de deposición en gotas, los materiales disponibles para este proceso son limitados. Los más utilizados son polímeros y ceras, ya que son adecuados por su naturaleza viscosa y la capacidad de formar gotas. La viscosidad es un factor fundamental del proceso y limita la velocidad de impresión debido a la necesidad de volver a llenar el depósito rápidamente.

Debido a la alta precisión de la tecnología de proceso, el nivel de post-procesamiento requerido para mejorar las propiedades es limitado. El material de soporte puede eliminarse utilizando una solución de hidróxido sódico o un chorro de agua.

Una técnica comercial que pertenece a esta categoría es la **PolyJet** patentada por Object (actualmente adquirida por Stratasys). Esta técnica cura el material utilizando luz UV y, por lo tanto, no se necesita ningún proceso de post-curado (Stratasys, 2017).

Otra técnica similar a la anterior es el **Proceso de impresión multichorro (MultiJet Printing - MJP)** también conocido como **MultiJet Modeling (MJM)** desarrollado por 3DSystems en 1996, que utiliza una inyección 3D de tinta de alta precisión (Chua & Leong, 2016). Esta tecnología utiliza materiales plásticos fotocurables o ceras.

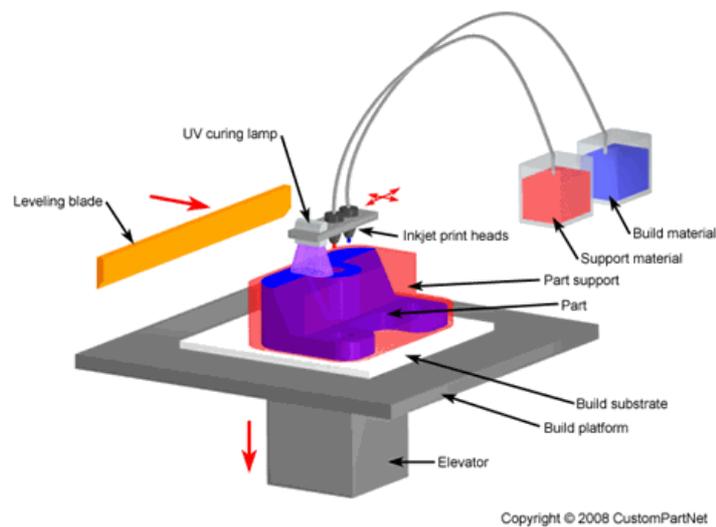


Figura 7. Proceso *MultiJet* (Custompart.net, 2017)

3.1.4. Fusión de lecho de polvo (*Powder Bed Fusion - PBF*)

Estos procesos consisten en la fusión selectiva de las regiones de un lecho de polvo mediante energía térmica producida por láser o haz de electrones (ISO 17296-2:2015).

Todos los procesos PBF implican la dispersión del material en polvo sobre capas anteriores mediante mecanismos como rodillos o cuchillas. Una tolva o depósito proporciona el suministro de material. En el proceso se sinteriza el polvo capa por capa y una plataforma baja el modelo en cada paso.

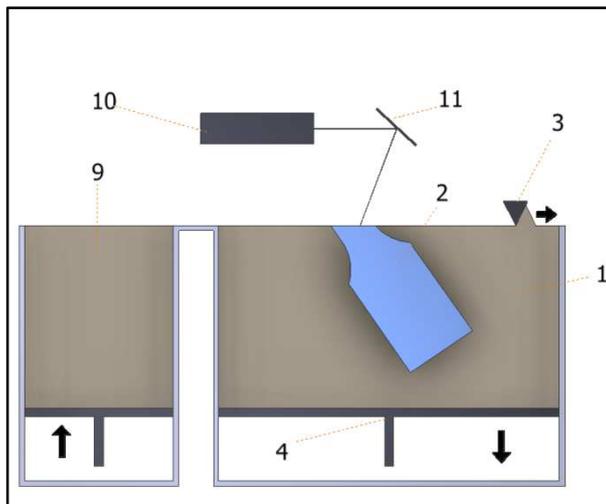


Figura 8. Fusión en lecho de polvo por láser

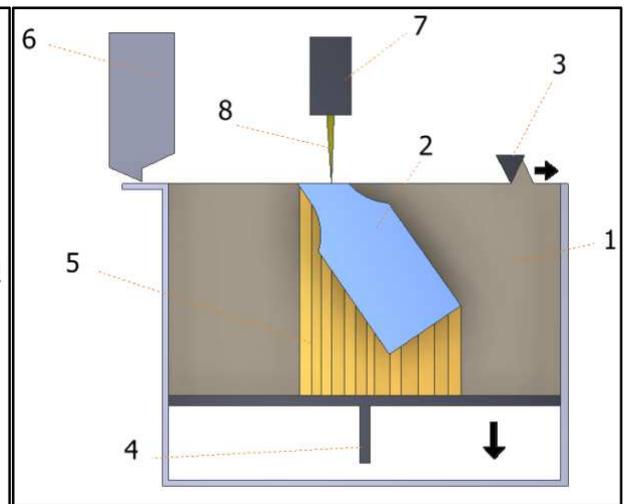


Figura 9. Fusión en lecho de polvo por haz de electrones

Leyenda

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Material en polvo distribuido sobre la plataforma | 5. Contenedor de alimentación |
| 2. Pieza | 6. Proyector del haz de electrones |
| 3. Mecanismos de recubrimiento y nivelación de la superficie | 7. Haz de electrones focalizado |
| 4. Plataforma de construcción y elevadora | 8. Sistema de alimentación de polvos |
| | 9. Láser |
| | 10. Espejo inclinado focalizado |

Estas tecnologías han alcanzado gran desarrollo, pues permiten emplear diversos materiales (entre ellos metales) para fabricar piezas funcionales de gran precisión y complejidad. Debido a ello han surgido multitud de procesos comerciales entre los que destacan el **Sinterizado selectivo por láser (SLS)**, la **Fusión selectiva por láser (SLM)**, el **Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)**, la **Fusión por haz de electrones (EBM)** y el **Sinterizado selectivo por calor (SHS)**. El DMLS es similar al SLS, pero con el uso de metales en vez de plásticos. El SHS difiere de otros procesos en el uso de un cabezal de impresión térmico calentado para fundir el material en polvo. La fusión de haz de electrones (EBM) debe ser realizada en vacío, pero puede utilizarse con metales y aleaciones en la creación de partes funcionales.

El **Sinterizado selectivo por láser (*Selective Laser Sintering - SLS*)** fue inventado por Carl Deckard y Joe Beaman en la Universidad de Texas a mediados de la década de 1980 y lo desarrollaron creando la empresa DTM (Deckard, 1989). En 2001, 3D Systems, adquirió DTM (Wikipedia, 2017) y actualmente cuenta con la patente de dicha tecnología (3D Systems, 2016).

Este método consiste en fundir selectivamente zonas de cada capa de material en polvo para construir la pieza. Para ello, se esparce uniformemente una capa de material sobre la plataforma de construcción y las secciones seleccionadas de dicha capa son fundidas con láser. El proceso físico puede ser fusión completa, fusión parcial o sinterización en fase líquida.

Las máquinas de sinterización láser selectiva están formadas por tres componentes: una fuente de calor para fundir el material, un método para controlar esta fuente de calor y un mecanismo para añadir nuevas capas de material sobre el anterior. Este proceso tiene la ventaja adicional de no requerir una estructura de soporte, ya que el material en polvo sirve como soporte al modelo durante todo el proceso de construcción. La plataforma de construcción se encuentra dentro de una cámara con temperatura estable, fijada pocos grados por debajo del punto de fusión del

material, reduciendo así la energía que necesita el láser para fusionar capas entre sí. La cámara se llena a menudo de nitrógeno para minimizar la oxidación y mejorar la calidad final del modelo. Algunas máquinas monitorean la temperatura capa por capa y adaptan la potencia del láser respectivamente para mejorar la calidad (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

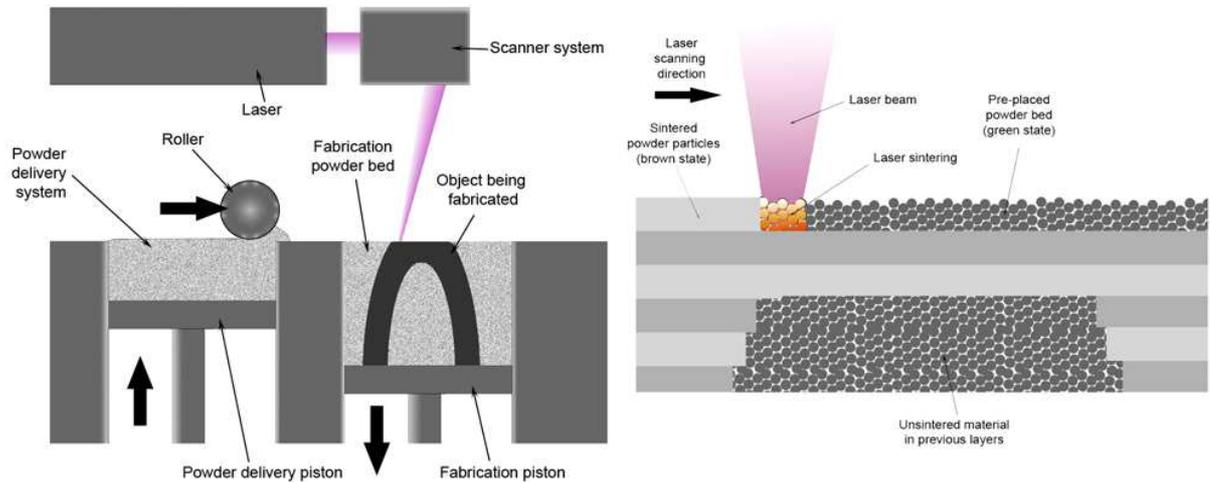


Figura 10. Esquema de un proceso SLS (Wikipedia, 2017)

Este proceso puede ser usado con una amplia gama de materiales, incluidos plásticos como nylon, metales o materiales cerámicos, y se pueden producir estructuras de gran complejidad y resistencia por lo que es un proceso ampliamente utilizado. Aunque comenzó como una forma de construir prototipos en la fase de diseño, se utiliza cada vez más para producir piezas de uso final cuando se necesitan pequeñas cantidades de piezas de alta calidad como en la industria aeronáutica (Snyder, 2014).

Antes de retirar la pieza se requiere un período de enfriamiento para asegurar una buena tolerancia y calidad de la fusión.

El **Sinterizado directo de metal por láser (Direct Metal Laser Sintering - DMLS)**, desarrollado por EOS en 1995 (EOS, 2017) o el proceso equivalente de 3D Systems, la Impresión directa de metal (DMP) (3D Systems, 2016), usan el mismo proceso que el SLS pero enfocado a la producción de piezas metálicas, por lo que se requiere mayor potencia del láser (el acero inoxidable se funde a una temperatura cercana a los 1.510°C) y solo sinteriza el material sin fundirlo por completo.

En este proceso se esparcen polvos finos de diversas aleaciones metálicas en una plataforma de impresión y se sinterizan en geometrías precisas utilizando un rayo láser.

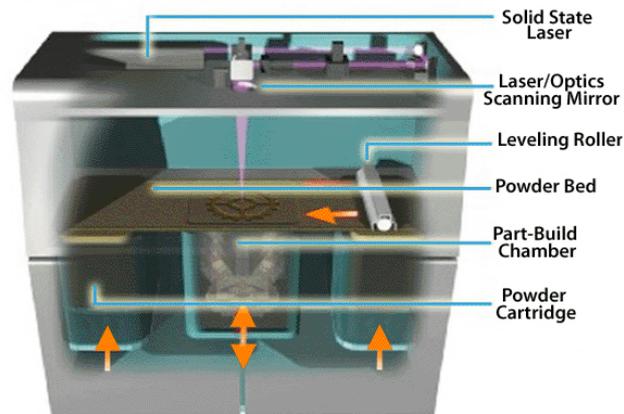


Figura 11. Direct metal laser sintering (DMLS) (Imaginethat-3d, 2015)

Esta tecnología se utiliza principalmente en aplicaciones aeroespaciales, donde se requieren modelos únicos y complejos. Estos sistemas crean piezas químicamente puras de metal con el 100% de densidad, con tolerancias finas y espesores de 20 μm en todas las direcciones. Los materiales incluyen acero inoxidable, acero para herramientas, súperaleaciones, aleaciones no férricas, metales preciosos y alúmina (Snyder, 2014).

La **Fusión selectiva por láser (*Selective Laser Melting - SLM*)** es un método de fabricación aditiva especialmente desarrollado para la impresión 3D de aleaciones metálicas. Es bastante similar al SLS y a menudo resulta más rápido que este, pero requiere el uso de un gas inerte (argón o nitrógeno con niveles de oxígeno inferiores a 500 partes por millón) a fin de crear las condiciones perfectas para la fusión y tiene mayor consumo energético, ya que en este proceso, igual que sucede en el EBM, los polvos metálicos se funden totalmente en vez de sinterizarse como en el SLS o el DMLS (Gibson I., 2015).

La primera patente de SLM la publicó en 1995 el Instituto Fraunhofer ILT en Alemania. Esta tecnología también fue desarrollada por los Doctores Dieter Schwarze y Matthias Fockele de F&S, empresa que firmó una asociación comercial con MCP HEK y que se convertiría en 2006 en SLM Solutions. En 2004 el Dr. Fockele fundó la empresa Realizer que también distribuye esta tecnología.

Los pasos del proceso SLM son los mismos que los de otras tecnologías aditivas basadas en láser: en primer lugar se aplica un rodillo a una capa de polvo de metal, a continuación, el láser funde el polvo convirtiéndolo en una sustancia líquida que se solidifica al enfriarse y la plataforma desciende antes de aplicar una nueva capa de polvo. El proceso se repite las veces que sea necesario hasta que se cree la pieza deseada. Una vez que esté terminada, la pieza metálica se debe enfriar antes de ser extraída; debido a que se necesita alcanzar una temperatura superior para fundir completamente el material, el tiempo de enfriamiento será también mayor al del proceso DMLS. Además este proceso requiere de elementos de apoyo que se deben retirar manualmente después del enfriamiento. Habitualmente se utilizan diversas técnicas de acabado, tales como el fresado o el tratamiento térmico, después de la impresión con el fin de alcanzar los requisitos funcionales de la pieza (Sculpteo, 2017).

El proceso de fusión completa permite que el metal conforme un bloque homogéneo con una gran resistencia cercana a la obtenida con procesos convencionales. Los materiales más usados son el acero inoxidable, acero para herramientas, cromo, cobalto, titanio y aluminio (HXX, 2014). Dependiendo de la calidad de la superficie y los requisitos de velocidad de producción, el

polvo se aplica automáticamente con espesores de capa de 20 a 100 μm y se pueden producir piezas con espesores de pared de mínimas de 40 μm (Realizer, 2015).

Este proceso se utiliza sobre todo para generar piezas metálicas para la creación de prototipos o para su producción inmediata cuando se requiere personalización y reducción de los plazos de salida al mercado. También permite crear piezas de geometrías complejas o paredes muy finas que no serían posibles con ninguna otra tecnología tradicional.

La **Fusión por haz de electrones** (*Electron Beam Melting - EBM*), desarrollada por la empresa sueca Arcam en los años 2000 (Arcam, 2014), consiste en fusionar polvos metálicos en vacío (para evitar porosidades y defectos) usando un haz de electrones.

El proceso comienza con la distribución uniforme de una fina capa de polvo de metal en la cámara de impresión mediante un rodillo automatizado. El lecho de polvo es elevado a una cierta temperatura para facilitar su posterior fusión. A continuación el haz de electrones comienza a moverse a través del polvo fundiendo una sección transversal del objeto. El haz se controla de forma precisa mediante bobinas electromagnéticas. Este sistema permite mantener de forma simultánea a varios bloques de fusión, por lo que se pueden construir al mismo tiempo varias partes del objeto, mejorando notablemente los tiempos de impresión. Finalizada una capa, una nueva capa de polvo se extiende sobre la parte superior de la capa anterior y el haz de electrones procede a formar la siguiente sección transversal.

Al igual que sucede en otros procesos, el polvo sin fundir sirve de apoyo para geometrías complejas y salientes que podrían requerir soportes especiales en otros procesos de impresión 3D. Una vez que se ha completado la impresión se deja enfriar la pieza dentro de la cámara de impresión.

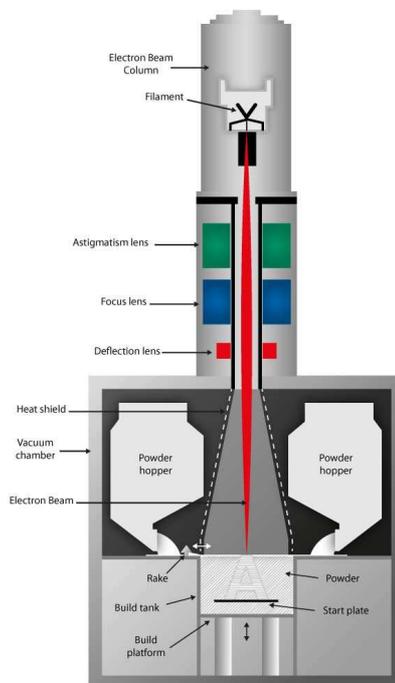


Figura 12. Esquema del EBM de Arcam (Arcam EBM - A GE Company, 2017)

Este proceso es ideal para aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica o a altas temperaturas, ya que produce objetos densos y resistentes. Los materiales más usados son titanio

y aleaciones cromo-cobalto. Una de sus aplicaciones más interesantes está en el sector de la medicina para la fabricación de prótesis.

Dado que el proceso se lleva a cabo en vacío a alta temperatura, produce objetos comparables al material forjado y mejores que el material fundido. Sin embargo, debido a las altas temperaturas alcanzadas en el proceso, el objeto puede estar sujeto a tensiones de origen térmico o a deformaciones producidas en el enfriamiento. Además las impresoras 3D de EBM son muy caras y requieren de un personal muy especializado para su manejo, por lo que la inversión inicial es muy alta. Por otro lado, la superficie final de las piezas es rugosa, haciendo necesario un postprocesado mecánico si la aplicación lo requiere.

El **Sinterizado selectivo por calor** (*Selective Heat Sintering - SHS*) fue desarrollado en 2011 por la empresa danesa BluePrinter y era comercializado en exclusiva por dicha marca, actualmente en quiebra (O'Connor, 2016). El último modelo de impresora desarrollado por la marca es la Blueprinter M3.

La sinterización selectiva por calor es un proceso de fabricación aditiva similar al SLS, con la diferencia de que el SHS utiliza un cabezal de impresión térmico en vez de un láser para sinterizar el polvo termoplástico. Los beneficios de utilizar una cabeza de impresión térmica sobre un láser son que se reduce significativamente la potencia requerida y que la impresora 3D puede ser mucho más pequeña y más barata.

La impresora esparce una fina capa de polvo termoplástico (la última versión de este polvo termoplástico se llama M-Flex) sobre la plataforma de construcción, alojada en una cámara en la que el polvo se mantiene a una temperatura ligeramente elevada para facilitar la fusión. A continuación el cabezal de impresión térmico se mueve a través del lecho de polvo y funde las secciones transversales para formar una capa de plástico sólido. Una vez que una capa está completa, la impresora 3D repite este proceso para construir el objeto capa por capa. El modelo acabado se extrae de la cámara de construcción y el polvo termoplástico no utilizado puede ser reutilizado (GoPrint 3D, 2016).

Este proceso tiene la ventaja sobre la Extrusión de Material de que no requiere soportes, por lo que se pueden fabricar modelos muy complejos. Además el polvo termoplástico que usa, M-Flex, es muy similar al nylon y genera piezas resistentes y duraderas. En general este proceso se usa para prototipos de diseño más que para piezas funcionales.

3.1.5. Deposición de energía focalizada (*Directed Energy Deposition - DED*)

En estos procesos de fabricación aditiva se utiliza energía térmica enfocada para fundir el material mientras se está depositando (ISO 17296-2:2015). Este es un proceso de impresión complejo comúnmente utilizado para reparar o añadir material adicional (recubrimientos) a piezas existentes (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015); estos procesos eran tradicionalmente conocidos como recargues.

Una máquina DED típica consiste en una boquilla montada en un brazo multieje, que deposita el material fundido sobre la superficie especificada, donde se solidifica. El proceso es similar en principio a la extrusión del material, pero la boquilla puede moverse en múltiples direcciones y no está fijada a un eje específico. El material, que se puede depositar desde cualquier ángulo en máquinas de 4 y 5 ejes, se funde tras la deposición con un haz de láser, de electrones, con un arco de plasma o con arco eléctrico. En la mayoría de los casos el proceso tiene lugar dentro de una cámara controlada con atmósfera de oxígeno reducido. Aunque se pueden usar polímeros y cerámicas, los materiales más empleados son los metales, en forma de polvo o alambre.

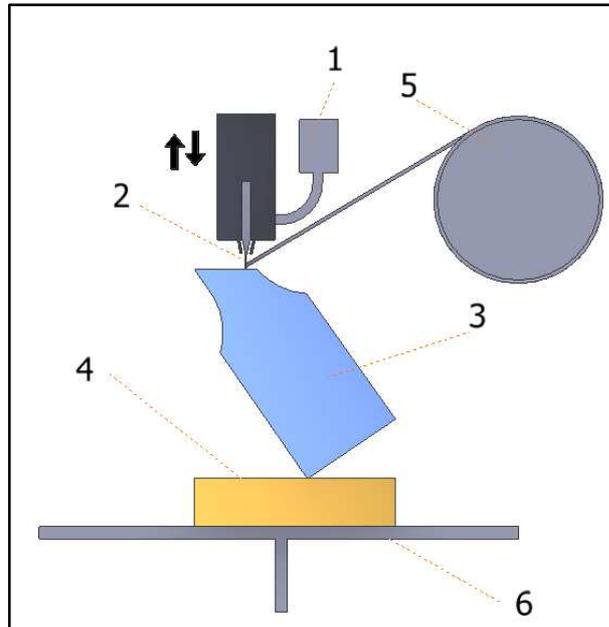


Figura 13. Deposición de Energía Focalizada

Leyenda

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Tolva de polvo (en el caso de utilizar polvos como material) | 3. Pieza |
| 2. Haz de energía focalizada (láser, arco de plasma, haz de electrones...) | 4. Sustrato |
| | 5. Bobina de filamento |
| | 6. Plataforma de construcción |

Las aplicaciones típicas de la Deposición de energía focalizada incluyen la reparación y mantenimiento de piezas estructurales, pero se están empezando a aplicar para la fabricación de piezas y herramientas por los buenos resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas de las piezas obtenidas.

Mientras que en la mayoría de los casos, es el brazo que se mueve y el objeto permanece en una posición fija, puede ser la plataforma la que se desplace mientras que el brazo permanece fijo. Los tiempos de enfriamiento del material son muy rápidos, típicamente entre 1000 - 5000 °C/s. Este enfriamiento rápido genera una estructura de grano fina, aunque también debe considerarse la superposición de material, debido a la cual el material se vuelve a fundir modificando su estructura. Los grosores de capa típicos de 0,25 mm a 0,5 mm (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Uno de los principales procesos incluidos en esta categoría es el **WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)** Basados en la soldadura al arco, que se puede generar mediante diferentes sistemas (TIG, MIG, Plasma, CMT). En esta técnica el sustrato y el material de relleno, aportado en forma de hilo, se funden mediante un arco transferido entre el electrodo de la boquilla y el sustrato (Prado-Cerqueira, Diéguez, & Camacho, 2017).

También cabe destacar la **Deposición directa de material (Direct Metal Deposition - DMD)** patentada por la empresa POM (POM Group, 2008).

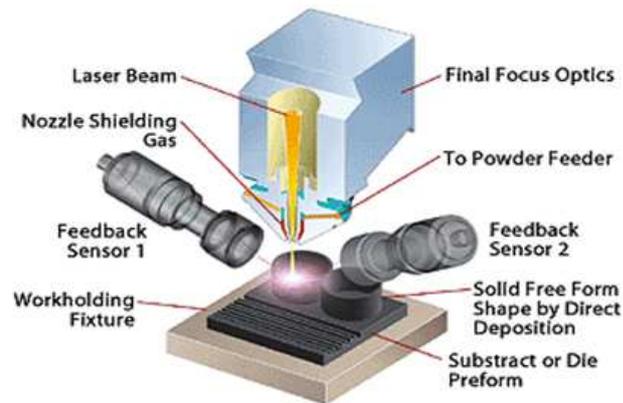


Figura 14. Direct metal deposition (DM3D)(Cruz-Robles & Dutta, 2015)

3.1.6. Laminado de hojas (*Sheet Lamination*)

En estos procesos de fabricación aditiva se unen láminas de material para formar el objeto (ISO 17296-2:2015).

Dentro de los procesos de laminado de hojas se incluyen la **Fabricación aditiva ultrasónica** (*Ultrasonic Additive Manufacturing - UAM*) patentada por Dawn White, fundador de la empresa Sodica, en 1999 y actualmente comercializada por Fabrisonic (Wikipedia, 2017) y la **Fabricación de objetos laminados** (*Laminated Object Manufacturing - LOM*), desarrollada por la empresa Helisys en 1991 (Pham & Dimov, 2012).

Estos procesos se pueden llevar a cabo de forma continua o discontinua.

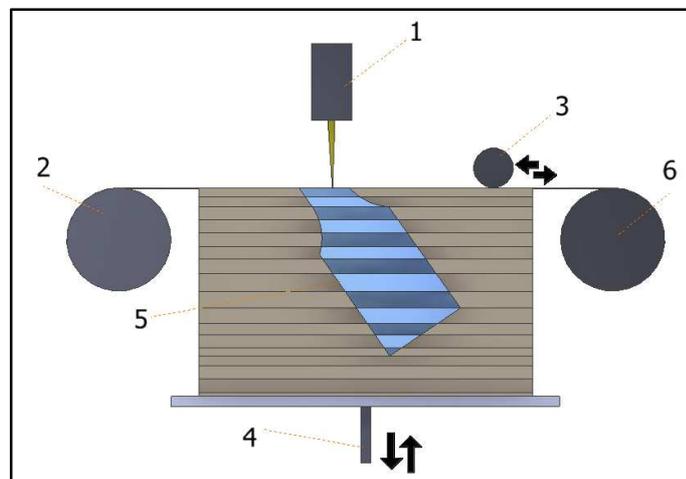


Figura 15. Laminación Continua

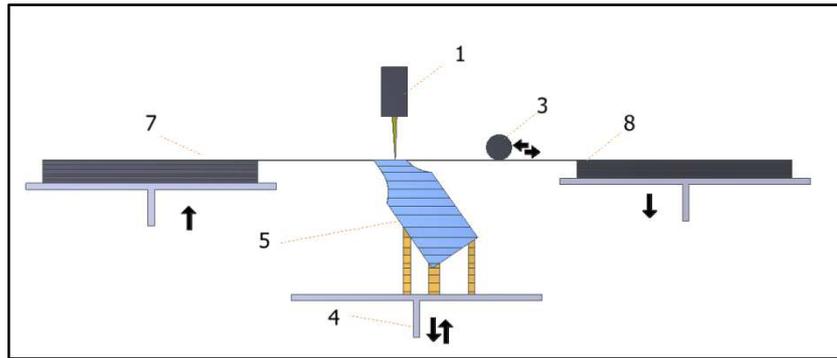


Figura 16. Laminación de placas discontinuas

Leyenda

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1. Mecanismo de corte | 5. Pieza |
| 2. Bobina de material sobrante | 6. Rollo de material de construcción |
| 3. Rodillo laminador | 7. Pila de material sobrante |
| 4. Plataforma de construcción y elevadora | 8. Pila de material de construcción |

La **Fabricación aditiva ultrasónica (UAM)** utiliza láminas de metal, que se unen mediante soldadura ultrasónica. El proceso requiere un mecanizado CNC adicional y la eliminación del metal no unido, a menudo durante el proceso de soldadura. Los metales más utilizados son aluminio, cobre, acero inoxidable y titanio (*Ultrasonic Additive Manufacturing Overview*, 2014). Este proceso permite unir materiales diferentes, es de baja energía y temperatura, ya que el metal no se funde, sino que utiliza una combinación de frecuencia y presión ultrasónica y permite la creación de geometrías internas.

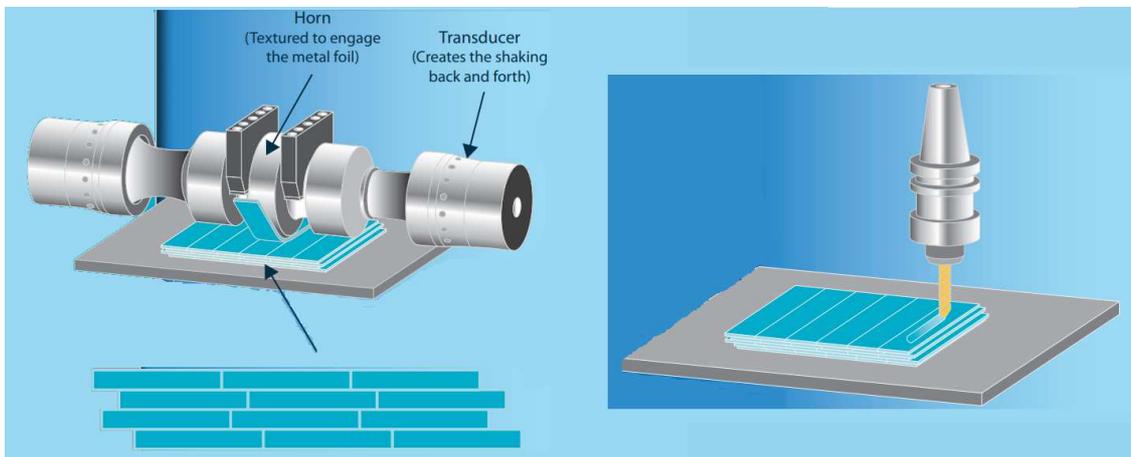


Figura 17. Proceso UAM (Fabrisonic, 2017)

La **Fabricación de objetos laminados (LOM)** tiene un enfoque de capa a capa similar al UAM, pero emplea papel como material y adhesivo en lugar de soldadura. Esta es una de las primeras técnicas de fabricación aditiva creadas y entre sus ventajas se cuentan el uso de papel A4, que puede conseguirse fácilmente y es de bajo coste, así como utilizar un equipo relativamente simple y barato, en comparación con otros procesos. Por contra los objetos laminados no son adecuados para usos estructurales por lo que se suelen utilizar para modelos estéticos y visuales (Loughborough University, 2015).

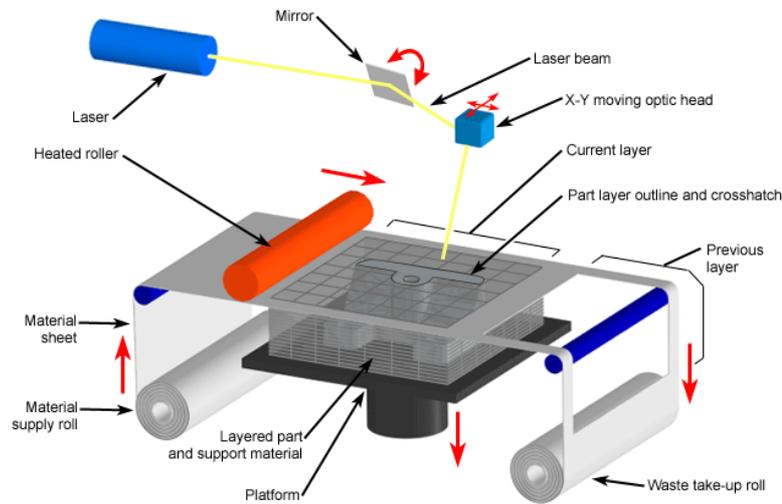


Figura 18. Proceso LOM (Custompart.net, 2017)

El post-procesamiento de estos procesos requiere la extracción de la pieza del material a laminar circundante, si bien en el LOM este puede retirarse a mano en el UAM debe ser mecanizado.

3.1.7. Extrusión de material (*Material Extrusion*)

Es un proceso de fabricación aditiva en el cual el material (usualmente termoplástico) es selectivamente aportado a través del orificio de una boquilla para formar cada capa (ISO 17296-2:2015). Esta tecnología es ideal para aficionados dado el bajo coste del equipo y el material y la facilidad de operación.

El proceso comercial más importante se conoce como **Modelado por deposición fundida** (*Fused Deposition Modeling - FDM*), patentado por el fundador de **Stratasys** hace más de 20 años. En esta técnica, la impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultra finas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje (Stratasys, 2017). La **Fabricación por filamento fundido** (*Fused Filament Fabrication - FFF*), es un proceso similar pero no sujeto a esta patente (Wikipedia, 2017).

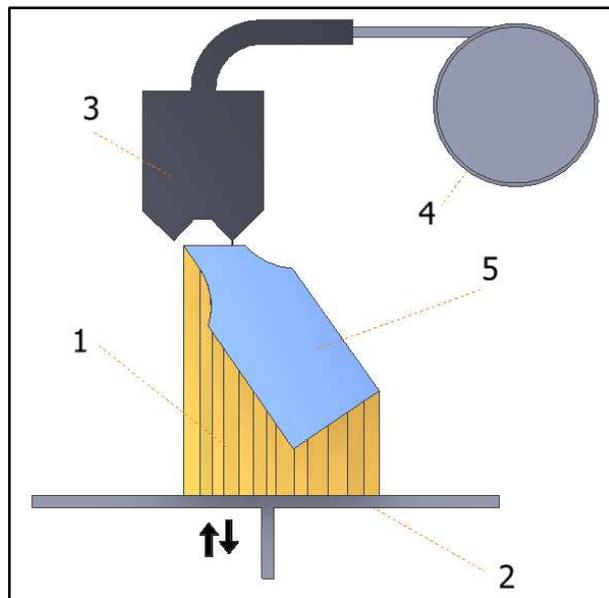


Figura 19. Extrusión de material

Leyenda

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Soportes estructurales | 3. Boquilla calefactada |
| 2. Plataforma de construcción y elevadora | 4. Dispensador de material |
| | 5. Pieza |

Esta es la tecnología que se va a utilizar en este trabajo, por lo que sus características se van a desarrollar con mayor detalle en los apartados siguientes.

3.2. Características de la fabricación por extrusión de material polímero

Este es el tipo de proceso que se va a utilizar en este trabajo, por lo que se van a concretar las distintas tecnologías existentes, sus aplicaciones, los materiales que se pueden emplear y las consideraciones generales de diseño y fabricación que se deben tener en cuenta al emplear estos procesos.

3.2.1. Descripción y fundamentos del proceso y equipo básico

Aunque existen varios nombres comerciales para estas tecnologías (FDM de Stratasys y FFF), los fundamentos del proceso son similares.

La extrusión de material tiene en común con el resto de técnicas aditivas que el objeto se construye capa por capa, pero se diferencia de las demás en que el material se agrega a través de una boquilla a presión y temperatura controlada y en una corriente continua.

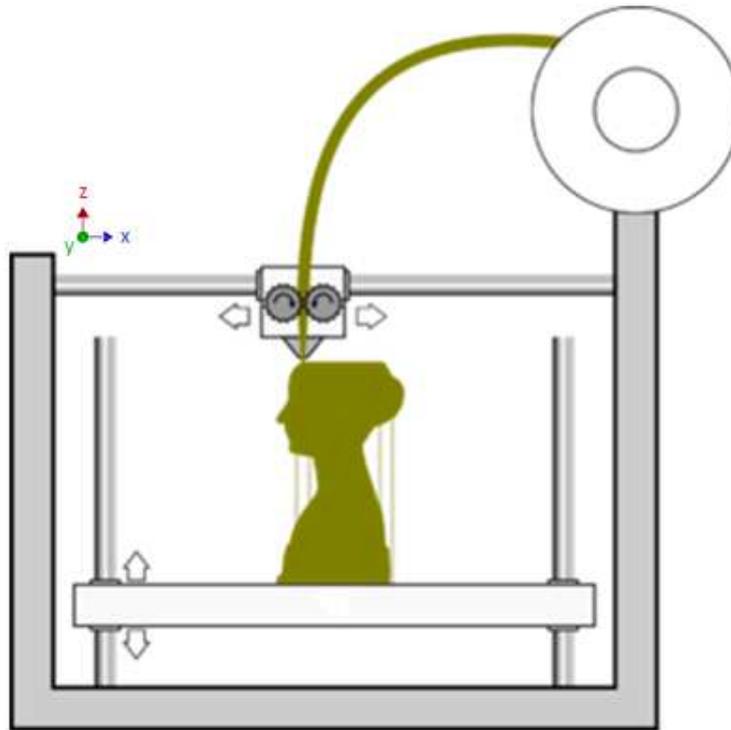


Figura 20. Esquema de un Proceso FDM/FFF. (Wikipedia, 2017)

En este proceso el material se extruye a través de una boquilla, en la que se calienta hasta su punto de fusión (los termoplásticos se calientan más allá de su temperatura de transición vítrea) y se deposita en la posición correspondiente de la capa que se está imprimiendo, donde se enfría y solidifica. La boquilla se mueve en el plano horizontal según los ejes X e Y, mientras que la plataforma de construcción se desplaza verticalmente (aunque también puede ser el carro de la boquilla el que avance verticalmente y la plataforma se desplace en el eje Y) una determinada distancia para comenzar una nueva capa, una vez que se ha terminado de formar la anterior. Esta es una técnica muy extendida que se utiliza en muchas impresoras 3D de bajo costo y domésticas (Loughborough University, 2015).

El proceso tiene muchos factores que influyen en la calidad del modelo final, pero tiene un gran potencial y viabilidad cuando estos factores se controlan con éxito. La presión y temperatura de extrusión debe ser controlada con exactitud para permitir resultados precisos (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

El sistema de extrusión cuenta con dos partes: el extremo frío (*Cold End*) es el encargado de controlar el suministro de material. Produce la presión mecánica que tira del filamento termoplástico, aún en fase sólida, y lo empuja hacia el extremo caliente (*Hot End*) donde se funde. Este mecanismo suele consistir en un par de apriete de engranajes o rodillos accionados mediante un motor paso a paso que permite controlar la velocidad de alimentación. Por este medio se controla la velocidad del proceso. La fuerza requerida para extruir la masa fundida es la necesaria para superar la caída de presión a través del sistema, que depende de las propiedades viscosas del material fundido y de la geometría de flujo del fusor y la boquilla. El material fundido se somete a deformación por cizallamiento durante el flujo. En la mayoría de los materiales utilizados en este tipo de impresión tridimensional se observa un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento.

El suministro de material a la máquina suele realizarse mediante un carrete de filamento como se muestra en la Figura 12. El filamento suele tener un diámetro de 1,75 mm, aunque también existen otras medidas, como los filamentos de 3 mm.

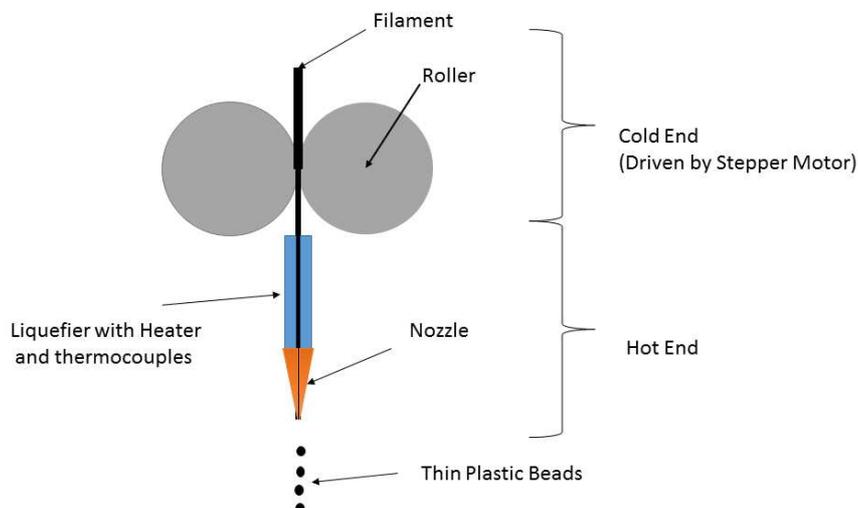


Figura 21. Esquema del extrusor de un proceso FDM/FFF(Wikipedia, 2017)

El control de la temperatura se lleva a cabo en el extremo caliente (*Hot End*), que es la parte que aloja el licuador de la impresora 3D que funde el filamento. Este sistema permite que el plástico fundido salga de la boquilla en forma de cordón delgado de plástico que se adherirá al material sobre el que se coloca. Esta parte del equipo consiste en una cámara de calentamiento con un cartucho calentador formado por una resistencia eléctrica y un termopar que mide la temperatura y una boquilla. La temperatura es regulada por el calor generado por la resistencia eléctrica. El sistema ajusta continuamente la potencia suministrada a las bobinas de acuerdo con la diferencia de temperatura entre el valor deseado y el valor detectado por el termopar, formando un bucle de realimentación negativa. La boquilla tiene un orificio de diámetro comprendido entre 0,3 mm y 1,0 mm. Se utilizan diferentes tipos de boquillas y métodos de calentamiento dependiendo del material a imprimir (Wikipedia, 2017).

La boquilla está montada en un carro de manera que se puede mover tanto en dirección horizontal como vertical (aunque en ocasiones es la plataforma la que se desplaza verticalmente) mediante un mecanismo controlado numéricamente, siguiendo una trayectoria de herramienta controlada mediante un software. Este movimiento se lleva a cabo normalmente mediante servomotores (o motores paso a paso). El mecanismo utilizado es a menudo un diseño rectilíneo X-Y-Z, aunque se han empleado otros diseños mecánicos tales como el de coordenadas polares de la impresora 3D Deltabot. De esta forma la pieza se construye de abajo hacia arriba, capa a capa.

El primer paso antes de la fabricación es la construcción del modelo digital mediante software CAD, la conversión en un formato compatible como el STL, la descomposición en capas y la conversión de esta geometría en instrucciones de fabricación numérica (*G-Code*) que puedan ser realizadas por la impresora.

El proceso comienza con la construcción de la primera capa a medida que la boquilla deposita el material en la zona requerida de la plataforma de construcción, formando el área de la sección transversal de la primera porción del objeto. Las capas siguientes se agregan encima de las

anteriores, de forma que se funden juntas durante la deposición mientras el material permanece licuado.



Figura 22. Deposición de material en proceso FDM/FFF (Rep-Rap Project, 2017)

Para que se produzca una buena unión de las capas y buena adherencia a la plataforma es importante controlar el ambiente térmico (sobre todo para materiales como nylon o ABS). Para ello se puede disponer el equipo dentro de una cámara, mantenida a una temperatura justo por debajo del punto de fusión del material que se está depositando, o utilizar una plataforma de construcción calefactada.

Si es necesario, se pueden generar estructuras de soporte. Si la máquina dispone de varios extrusores puede dispensar múltiples materiales para lograr diferentes objetivos: por ejemplo, uno puede usar un material para construir el modelo y usar otro como una estructura de soporte soluble, o se podrían usar múltiples colores del mismo tipo de termoplástico en el mismo modelo. En caso de no disponer de esta opción estos equipos son capaces de hacer frente a pequeños voladizos por el apoyo de capas inferiores, pero tienen restricciones en la pendiente del saliente, y no pueden producir superficies no soportadas, por ello los software de impresión incluyen la opción de construir soportes provisionales fácilmente retirables con el mismo material de construcción.

Las ventajas del proceso de extrusión de material incluyen el uso de materiales como el PLA (polímero biodegradable) o el ABS (similar al de las piezas LEGO), baratos y fácilmente disponibles, que permiten producir modelos con buenas propiedades estructurales, de características cercanas a las piezas de producción final. En casos de bajo volumen de producción (incluso piezas únicas) y necesidad de personalización este puede ser un método más económico que usar el moldeo por inyección, debido al bajo coste de los equipos y a la extrema flexibilidad en el diseño que aportan estas técnicas, ya que no se necesitan los costosos moldes de inyección.

Sin embargo, el proceso requiere controlar muchos factores para lograr un acabado de alta calidad (temperatura y presión de la boquilla, velocidad de impresión, contracción del material, etc.). La boquilla que deposita material tendrá siempre un radio, ya que no es posible hacer una boquilla perfectamente cuadrada y esto afectará la calidad final del objeto impreso (Chua & Leong, 2016). La precisión y la velocidad son bajas en comparación con otros procesos y la calidad del modelo final se limita al grosor de la boquilla del material (Krar *et al.*, 2003), que restringe el espesor de capa que se puede lograr (el espesor de capa típico varía de 0,1 mm a 0,4 mm (Chua & Leong, 2016)).

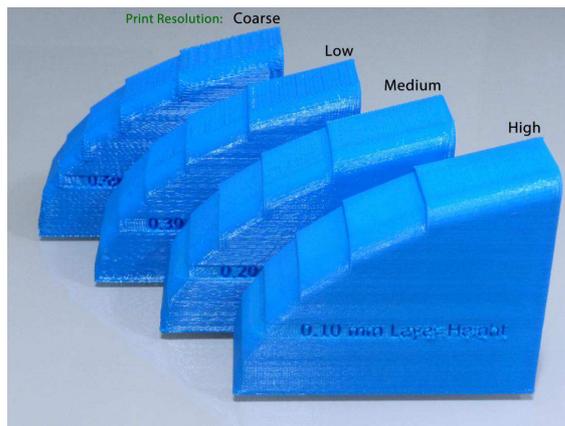


Figura 23. Calidad en función del espesor de capa (Rep-Rap Project, 2017)

3.2.2. Evolución y estado actual. Marcas, equipos y proyectos

Esta tecnología cuya principal patente comercial se conoce como *Fusion Deposition Modeling* (FDM), fue inventada y patentada a finales de los años 80 por Scott Crump quien la empezó a comercializar a través de la empresa Stratasys (Stratasys, 2017).

La tecnología FDM estaba protegida por patente, por lo que nació una tecnología que en esencia es similar, *Fused Filament Fabrication* (FFF), que es la utilizada en impresoras como las del proyecto RepRap (Wikipedia, 2017).

Desde que esta tecnología fue patentada a finales de los 80 han surgido múltiples marcas, equipos y proyectos *open source* que han contribuido a su desarrollo.

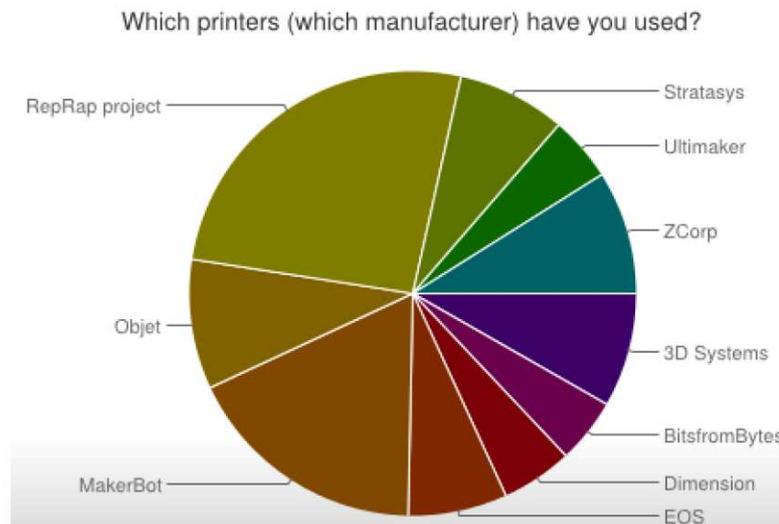


Figura 24. Equipos de impresión 3D más utilizados en 2010 (Rep-Rap Project, 2017)

La impresión por filamento fundido es actualmente el proceso más popular (por número de máquinas) para la impresión 3D de aficionados (Xataka, 2014), mientras que la fotopolimerización y sinterización de polvo, que pueden ofrecer mejores resultados a un coste mayor, todavía dominan la impresión comercial. Algunas de las principales empresas y equipos que destacan en la fabricación de equipos a nivel industrial son:



Es una de las empresas más importantes del sector al haber adquirido las empresas Object y Makerbot y disponer de la patente de la tecnología FDM. Esta marca cuenta además con múltiples tecnologías de impresión 3D. Dentro de los equipos de extrusión de polímero, ha desarrollado una pequeña impresora para uso doméstico y para pequeñas empresas. Se trata de la Mojo, una impresora de deposición de plástico ABS de reducidas dimensiones que imprime un volumen máximo de 12.7×12.7×12.7cm (Formizable, 2014).



Esta marca desarrolló la primera técnica comercial de impresión 3D, la Estereolitografía, en los años 80, y actualmente está especializada en impresión 3D a nivel industrial, aunque fabrica también impresoras domésticas con tecnología de extrusión de polímero como la popular *Cube*. Además esta cuenta con el repositorio de piezas CAD *GrabCad* (3D Systems, 2016).

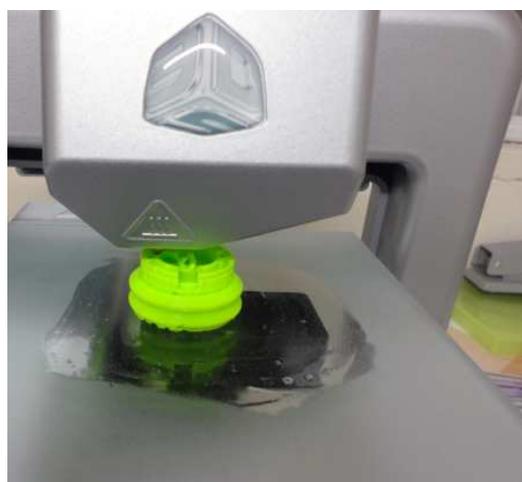


Figura 25. Impresora *Cube* (3D Systems, 2016)

También dentro de la Fabricación Aditiva a nivel industrial, cabe mencionar otras empresas que aunque no destacan en tecnologías de extrusión de polímero, pero son o han sido claves para el desarrollo de la impresión 3D, como Zcorp (adquirida por 3DSystems) y Object (adquirida por por Stratasys), que destacaron por el desarrollo de sistemas de impresión por inyección de tinta, EOS fundada en 1989, y especializada en Sinterizado directo de metal por láser (DML), Arcam, empresa fundada en 1993 y creadora de la tecnología EBM o Formlabs creada en 2011 desde el MIT, que destaca por sus tecnologías SLS para fabricación industrial, pero sobre todo por haber desarrollado los primeros y más extendidos equipos domésticos de impresión SLA.

Por otro lado, existen varias compañías especializados en equipos de fabricación por extrusión de polímero domésticos y para empresas de coste moderado:

➤ **MakerBot**

Esta empresa estadounidense fundada en 2009 es uno de los fabricantes más populares de impresoras 3D domésticas. En sus orígenes contribuyó al desarrollo del proyecto RepRap y actualmente cuenta con el soporte del gigante Stratasys.

Dispone de varios modelos de impresoras como la *Makerbot Replicator*, el escáner *Digitizer* y un extenso catálogo de filamentos en ABS y PLA.

Dentro de su plataforma se incluye también *Thingiverse*, uno de los repositorios más grandes de piezas para impresión 3D. Además fueron los desarrolladores iniciales del software de impresión Cura y actualmente cuentan con el "fileteador" *Makerbot Print* (antes *Makerware*).

Por último cabe destacar su programa orientado al mundo educativo "Una impresora en cada escuela", de momento sólo en Estados Unidos.



➤ **Ultimaker**

Ultimaker es una compañía holandesa dedicada a la impresión 3D que comenzó en 2011 trabajando en impresoras de código abierto; comenzaron con la fabricación del modelo RepRap Darwin 3D, para acabar diseñando sus propios prototipos denominados *Ultimaker Protobox*. Actualmente su línea de productos incluye la familia *Ultimaker 3*, la familia *Ultimaker 2* y el *Ultimaker Original*.

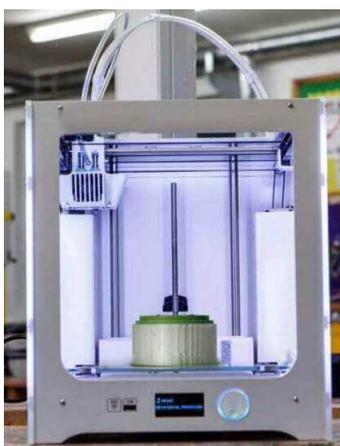


Figura 26. Ultimaker 3 (Ultimaker, 2017)



➤ **printrbot**

Printrbot dispone de impresoras para montar en kit o ya montadas. También distribuye cualquier accesorio, recambio y filamentos de ABS y PLA. En la actualidad comercializan la impresora de bajo coste *Printrbot Simple Pro*.



BQ es una marca española fundada en 2009 por ingenieros de la Universidad Politécnica de Madrid dedicada al diseño, venta y distribución de lectores electrónicos, tabletas, teléfonos inteligentes, impresoras 3D y kits de robótica (BQ, 2017). Fabrica y vende la impresora 3D *Witbox* que extruye plástico PLA, con gran calidad y volumen de impresión. También han desarrollado a partir de la impresora Prusa Mendel de RepRap el modelo *Do It Yourself Prusa Hephesos*.



BCN3D es un proyecto de la Fundació CIM con el objetivo de ofrecer a la sociedad la posibilidad de tener acceso a las tecnologías de fabricación digital, haciéndoles partícipes del cambio. Diseñan y producen impresoras 3D domésticas y profesionales con un método de trabajo Open Source que hace partícipe al usuario, transfiriendo así a la sociedad todo el aprendizaje técnico adquirido durante el desarrollo de sus productos. Actualmente su producto estrella es la *BCN3D Sigma R17*, aunque también han desarrollado equipos DIY como la *BCN3D Delta*.

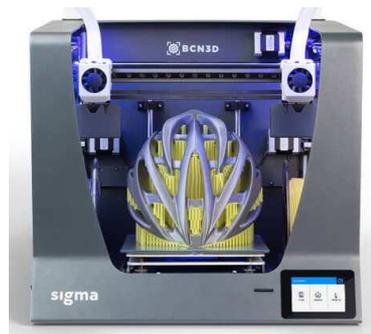


Figura 27. BCN3D Sigma R17 (BCN3D Technologies, 2017)



El gigante chino de fabricación de impresoras domésticas lleva desde 2011 trabajando para llevar sus máquinas a todos los rincones del mundo. En la actualidad su modelo más vendido es el *FlashForge Creator Pro*. Esta marca dispone también de todo tipo de componentes para sus impresoras y distribuye filamento ABS y PLA en algunos colores básicos. En su web se pueden encontrar recursos para solucionar algunos problemas de impresión y descargar el *firmware* de la impresora o solicitar soporte técnico directamente.



La impresora *TAZ* de LulzBot, que ya va por su sexta versión, está íntegramente basada en open hardware y software. Esta empresa americana es distribuidora también de filamento ABS, PLA y compuestos especiales de Formfutura y Taulman.

Existen muchas más empresas como Deezmaker con su impresora *Bukobot*, MakerGear con la *MakerGear M3*, RigidBot, Robox con su *CEL RoboxDual*, marcas como Wanhao o Anet con modelos derivado de la *Prusa i3* como el *Wanhao Duplicator i3 Plus*, Leapfrog, Airwolf 3D con su familia *AXIOM*, Robo3D con sus impresoras *Robo C2* y *Robo R2*, Zortrax con su impresora *Zortrax M200*, Makerdreams, Tiertime o Monoprice con sus impresoras mini de bajo coste *UP mini 2* y *Monoprice MP Select Mini*, la empresa española En3D, Afinia...(All3DP, 2017)



Figura 28. Robo C2 (Robo3d, 2017)

Por otro lado existen una serie de proyectos y desarrollos orientados a la fabricación casera del equipo de impresión y al desarrollo de tecnologías *OpenSource*. El pionero y más importante de ellos es RepRap (Rep-Rap Project, 2017); el desarrollo de la mayoría de las impresoras 3D de

fabricación aditiva que existen en la actualidad surgió a partir de proyecto, una iniciativa británica creada por el Dr. Adrian Bowyer de la Universidad de Bath, en Reino Unido, en 2005, con el propósito de crear una máquina de prototipado rápido libre capaz de replicarse a sí misma. Una máquina de este tipo permite fabricar objetos físicos, capa a capa, a partir de modelos generados por ordenador y para ello utilizan materiales plásticos, generalmente ABS o PLA.

Actualmente es una iniciativa mundialmente conocida con la que colaboran miles de personas de todas las partes del mundo y al estar sujeto el proyecto a licencia GNU GPL, permite a los miembros copiar, estudiar, distribuir y mejorar los diseños y el código fuente. Esto ha provocado que se genere una comunidad alrededor del proyecto que mejora los diseños actuales permitiendo que la máquina evolucione con el tiempo y brinda la posibilidad a cualquier usuario de aprender a construir sus propios equipos, resolver problemas de montaje e impresión, contribuir con el desarrollo de nuevas tecnologías y compartir sus conocimientos, soluciones dudas y experiencias relacionadas con la impresión 3D.

Clone Wars es un grupo dentro de la comunidad RepRap (Proyecto Clone Wars, 2017), que trata de documentar en español todo lo necesario para que los usuarios puedan construir sus propias impresoras 3D. Además se recopila información como dónde adquirir piezas para los equipos de impresión, se incluyen experiencias, soluciones y manuales creados por otros usuarios y se facilitan recursos como repositorios de piezas imprimibles que puede ayudar con tu proyecto.

Esta tendencia de creación de impresoras de código abierto se mantiene hasta la fecha y ha dado pie a la creación de muchas de las grandes marcas de la industria.

La comunidad RepRap ha desarrollado múltiples modelos; actualmente existen cientos de variantes, pero hay varias versiones que han marcado el desarrollo de estos equipos de impresión 3D. El primero de ellos es el *Darwin*, la impresora RepRap versión I. Fue el primer prototipo funcional del proyecto RepRap. Se considera el padre del resto de variantes e iteraciones. De hecho, Darwin imprimió las piezas de la siguiente evolución de RepRap, la *Mendel*. Es la segunda versión mejorada de RepRap: tiene un funcionamiento perfecto, pero el montaje es más complicado que el de las variantes posteriores. Es lo suficientemente pequeña como para caber en un escritorio, pero con un volumen de impresión lo suficientemente grande como para que se pueda hacer grandes cosas (200 mm (ancho) x 200 mm (fondo) x 140 mm (alto)). La máquina se compone de partes adquiridas a proveedores locales o en línea, y de las partes que otras impresoras pueden hacer por sí mismas. En paralelo se desarrolló la *Huxley*, con la que se trató de conseguir la máquina más compacta y sencilla posible. Estos diseños han sido reemplazados por otros más recientes.

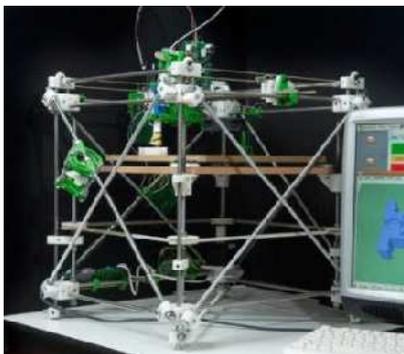


Figura 29. Darwin

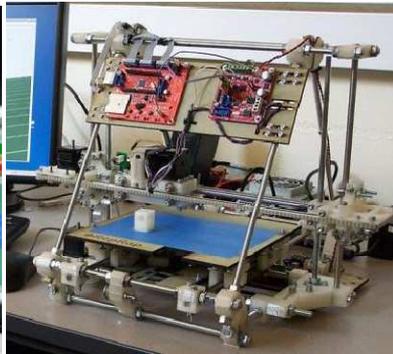


Figura 30. Mendel
(Rep-Rap Project, 2017)

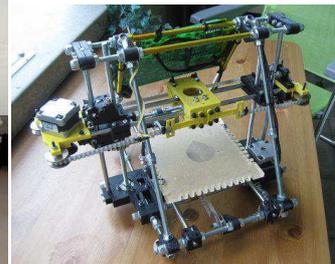


Figura 31. Huxley

El siguiente modelo que surgió fue la *Prusa Mendel*, un equipo desarrollado por el ingeniero alemán Josef Prusa, basado en la impresora *Mendel* y terminado en agosto del año 2010. El objetivo principal de este modelo era conseguir un bajo coste en su construcción y una mayor facilidad de abastecimiento, así como facilitar su montaje. Es el modelo más popular, y de hecho, es el modelo con más iteraciones y mejoras que existe.

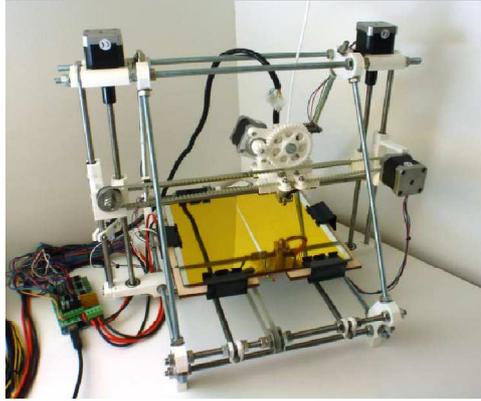


Figura 32. Prusa Mendel Original



Figura 33. Prusa Mendel Iteración 2

(Proyecto Clone Wars, 2017)

La Prusa va ya por su tercera iteración, e incluso existen modificaciones de la comunidad RepRap, en la que se sustituye el cuadro de varillas roscadas por un marco de madera, aluminio o acero, como es el caso de la *Prusa Mendel i3 Steel* (este es el equipo de impresión que se va a utilizar en este trabajo), una mezcla entre la Twelvepro y la Prusa i3 creada en 2013, construida con acero de 3mm, lo que le confiere gran estabilidad y simplifica la construcción, al no ser necesario atornillar.

Esta impresora, que utiliza ABS, PLA y otros tipo de materiales, cuenta con un volumen de impresión de 200 x 200 x 180 mm y una resolución de 100 μ m y es quizá el mejor y más exitoso equipo de código abierto que existe, por lo que han surgido infinidad de clones de distinta calidad. Actualmente uno de los mejores que se pueden encontrar es el *Original Prusa i3 MK2S*.

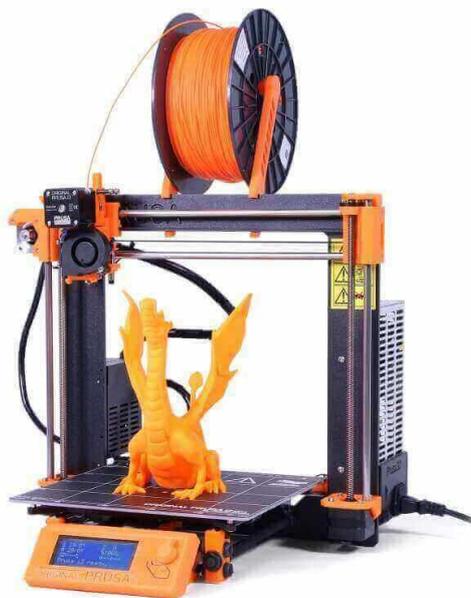


Figura 34. Prusa Mendel Iteración 3 (versión MK2S) (Rep-Rap Project, 2017)

Además, basándose en esta iniciativa, otros proyectos y marcas han desarrollado varios modelos de impresoras 3D que pueden ser fabricadas de forma casera (DIY) (3DNatives, 2016). Entre ellas destaca la BQ *Prusa Hephestos 2*, otra evolución de la *Prusa i3*, mejorada por el departamento de Innovación y Robótica de la empresa española BQ. La impresora está creada con hardware 100% libre el cual se puede modificar. Tiene un volumen de impresión de 210 x 297 x 220 mm, una resolución de hasta 50 micras por capa y puede imprimir en materiales como el PLA, HIPS o FilaFlex.

También ha tenido gran éxito la impresora *Delta Rostock MAX V2*, que trabaja con coordenadas polares y no cartesianas y cuya primera versión nació a través de una campaña de *crowdfunding* en Indiegogo. De acuerdo a la revista estadounidense *Make*, en 2015 ocupó el primer lugar en la categoría de “mejor oferta”. Uno de sus principales atractivos es su gran volumen de impresión de 28 x 28 x 35 cm, permite el uso de diferentes tipos de filamentos y tiene un precio de unos \$1000. La comercialización está a cargo de la marca SeeMeCNC.



Figura 35. Delta Rostock MAX V2(Rep-Rap Project, 2017)

La *BCN3D Delta*, es la versión de la marca catalana BCN3D de este último equipo, es *Open Source* y se caracteriza por su sistema de ejes paralelos y la utilización del llamado *BCNozzle*, un extrusor que soporta altas temperaturas y permite imprimir piezas de gran calidad. La impresora cuenta con un volumen de impresión de 170 x 180 mm, una resolución de 0,05 mm, es capaz de alcanzar temperaturas de hasta 260° e imprime con PLA. Otra versión del modelo Delta de *Rostock* es la impresora *Kossel Delta*.

Otra impresora que ha tenido gran relevancia es la *Ultimaker Original*, el primer modelo creado por la marca holandesa, y que sigue cosechando éxitos seis años después de su lanzamiento. Está disponible con o sin placa de calentamiento y ofrece un diseño retro gracias a su marco de madera. Respecto a su rendimiento ofrece una precisión de 20 μm en 3 ejes, velocidad de 300 mm/s, un volumen de impresión de 210 x 210 x 205 mm y está disponible a partir de €1.195.

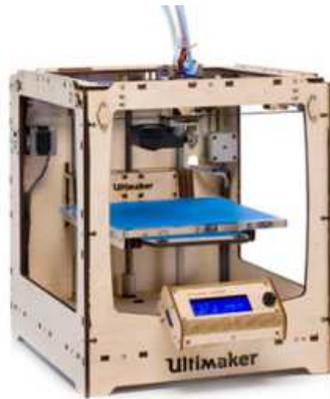


Figura 36. Ultimaker Original (Ultimaker, 2017)

Printrbot es otra marca a tener en cuenta dentro del mundo de las impresoras *DIY*, gracias a su modelo *Printrbot Simple Metal*. La primera versión de esta impresora fue lanzada a partir de una campaña de Kickstarter y la Simple Metal es una evolución de la Printrbot de madera, pero en su caso el metal le aporta mayor resistencia. Fue seleccionada como una de las mejores impresoras 3D con mejor relación calidad/precio por 3DHubs en 2015. Se puede ensamblar con o sin cama de impresión y tiene una capacidad de impresión de 150x150x150mm. Tiene un precio entre \$599 y \$749.

Otro de estos equipos es el *Vertex K8400*, de la empresa belga Velleman, especializada en electrónica fundada en 1975, que actualmente está centrada en la distribución de Kit de impresoras *DIY*. La *Vertex K8400* tiene un cuerpo de plástico y una mesa de cristal, y se puede construir con doble extrusor. Su volumen de impresión es de 180x200x190 mm y cuenta con una resolución entre 0.05 mm y 0.2 mm.

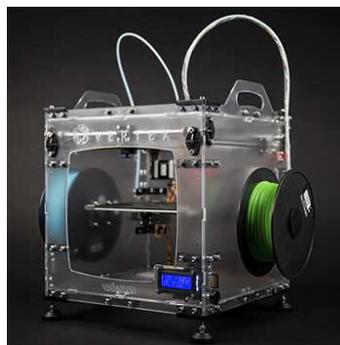


Figura 37. Velleman Vertex K8400 (Velleman, 2016)

La *Bukito Kit*, de la marca Deezmaker, es una impresora 3D rápida y portátil que llegó al mercado tras su éxito en su campaña de *Kickstarter* y se desarrolló a partir del sistema *Open Source V-hold*. Debido a su construcción rígida y a su sistema de extrusor la *Bukito* es capaz de imprimir a muy alta velocidad. Tiene un volumen de impresión de 125 x 150 x125mm y una resolución de hasta 0.05mm por capa. Es capaz de imprimir con PLA, ABS, Nylon y *Laywood*.

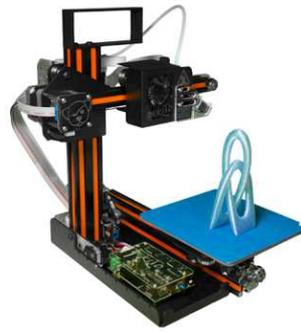


Figura 38. Bukito Kit (Deezmaker, 2016)

Por último la *Kiwi 3D* pertenece a la marca italiana Sharebot, tiene una gran solidez y dimensiones pequeñas, lo cual la convierte en una excelente opción de impresora de escritorio, pensada especialmente para las escuelas, jóvenes profesionales y todos aquellos que quieran iniciarse en el mundo de la impresión 3D. La *Kiwi 3D* dispone de un volumen de impresión de 140 x 100 x 100 mm, tiene una altura de capa mínima de 0.01mm, además cuenta con una pantalla LCD que facilita su manejo.

3.2.3. Aplicaciones de la impresión 3D

Las aplicaciones de impresión 3D cubren diversos sectores, desde la educación a la industria, en la que sus usos van desde la creación de prototipos hasta la gestión de piezas de repuesto.

Uno de sus principales usos se localiza en el sector del diseño mecánico, en el que la fabricación aditiva de prototipos ofrece amplias posibilidades de diseño y optimización topológica, lo que permite realizar múltiples pruebas de forma sencilla y a bajo coste para conseguir la combinación óptima de resistencia, peso y costes de producción para piezas mecánicas. Estos prototipos son de gran importancia en sectores como la aeronáutica automoción, donde se pueden utilizar para estudios aerodinámicos o en el diseño de estructuras para la construcción (Sculpteo, 2017).

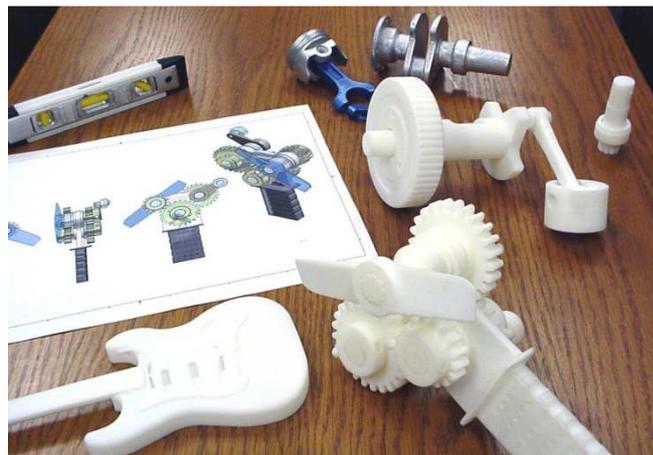


Figura 39. Prototipos creados por impresión 3D (UANL, 2013)

La adopción de la impresión 3D surgió de la necesidad de disponer de prototipos rápidos para diseño e ingeniería, pero actualmente además de para producir modelos, existe un gran campo de aplicación en la producción de piezas finales en series cortas y totalmente personalizables. Por ejemplo en el sector de la automatización y electrónica, (existen proyectos como Google Ara Phone), en la fabricación de robots, drones, o juguetes (un ejemplo es la fabricación aditiva de

dispositivos electromecánicos conocidos como *Addimata*). También en ciertas áreas de investigación puede ser útil contar con estas tecnologías. Por ejemplo permiten la construcción de aparatos para la investigación sobre capilaridad de fluidos (Snyder, 2014).

Además permite producir piezas de recambio en cualquier momento, para industrias como la automoción, sin necesidad de disponer de un amplio *stock* o de esperar al envío del pedido.

En el sector de la medicina se están desarrollando múltiples aplicaciones como la facilitación de diagnósticos. La impresión 3D permite la creación de modelos tridimensionales partiendo de imágenes digitales obtenidas a través de algunas pruebas médicas como las resonancias magnéticas. Otra aplicación en el ámbito médico es la simulación de procedimientos quirúrgicos. Gracias a la creación de modelos impresos estudiantes y profesionales mejoran sus habilidades con modelos específicos ajustados a la realidad. Aunque el uso más conocido de esta tecnología es la elaboración de prótesis. Gracias a la personalización de las piezas que permite la impresión 3D se pueden realizar prótesis totalmente adaptadas a las necesidades de los pacientes suprimiendo los problemas de adaptabilidad que generan otras técnicas protésicas existentes. En Utrecht, Países Bajos, se realizó el primer implante craneal en el que se sustituyó el cráneo del paciente por una prótesis impresa en 3D. Por último, un campo que actualmente se encuentra en fase de desarrollo es la bioimpresión, es decir la impresión de tejidos y órganos. Ya se ha conseguido la creación de tejidos humanos con vascularización, actualmente se encuentran en desarrollo diferentes proyectos de creación de órganos, lo que supondría una gran revolución en el mundo de los trasplantes.



Figura 40. Prótesis craneal impresa en 3D (Dima3D, 2015)

La impresión 3D también se utiliza en la industria textil. Por ejemplo en el sector de la alta costura ya ha sido utilizada por jóvenes diseñadores en colecciones presentadas en importantes pasarelas de moda. También está siendo muy utilizada por marcas deportivas que ya han introducido esta tecnología en varios de sus diseños. *Nike* comenzó utilizando la impresión 3D para la fabricación personalizada de tacos de botas de jugadores de la *Super Bowl* y, actualmente, la incluye ya frecuentemente en muchos de sus diseños, como espinilleras o suelas específicas para botas de fútbol (Dima3D, 2015). Recientemente se han desarrollado impresoras capaces de imprimir ropa con fibras de poliéster y algodón. En este caso, se parte de las fibras en estado líquido y estas se extruyen sobre un molde, diseñado por un programa CAD, que puede ser impreso en 3D mediante la tecnología FFF u otras similares. El resultado es una prenda de vestir de tela.

También se utilizan estas tecnologías en sectores como decoración, bisutería, joyería e incluso en el mundo del arte para producir diseños únicos y personalizados. Para ello se fabrican moldes de cera que permiten el moldeo de piezas mediante la técnica de la cera perdida o se fabrican directamente piezas utilizando materiales compuestos mezclados con pigmentos, madera, metales, o incluso metales preciosos.

En cuanto al sector alimentario, la impresión 3D se puede utilizar para la fabricación de moldes y envases personalizados, ya que existen materiales imprimibles que son aptos para el uso alimentario como el PLA, pero la aplicación que más interés despierta es la impresión de alimentos. Este proyecto surgió como idea de la NASA, pero después han sido múltiples las empresas que han desarrollado máquinas para la impresión de alimentos, como la española Foodini (NaturalMachines, 2016). Por lo general estas impresoras se especializan en la repostería, pero además de postres, pastas y panes son capaces de reproducir cualquier alimento basado en masas o fluidos.



Figura 41. Máquina de impresión 3D de alimentos *Foodini Creator* (NaturalMachines, 2016)

Otra de sus aplicaciones más importantes es la educación. La impresión 3D permite a los maestros, educadores y estudiantes vincular la teoría y la realidad fabricando objetos que se adapten a cada situación.

Estas tecnologías permiten aprender manipulando; imprimir ejemplos en 3D permite agregar una nueva dimensión a la experiencia educativa. La impresión 3D permite que las ideas complejas vivan en el mundo real. Desde las matemáticas hasta la geografía o historia, uno de los principales retos de la educación es permitir que todos comprendan los conceptos más abstractos y estas tecnologías son la solución para darles vida y permitir que los alumnos manipulen físicamente ideas complejas. La posibilidad de visualizar datos en el espacio o crear físicamente material educativo es una gran incorporación a los textos, imágenes y vídeos utilizados actualmente. Piezas mecánicas, maquetaciones arquitectónicas, elementos químicos o biológicos o representaciones artísticas son algunos ejemplos (Sculpteo, 2017).

Por otro lado la impresión 3D es una nueva y cautivadora tecnología que es intrínsecamente emocionante y atrae a personas de todas las edades y proporciona a los estudiantes la oportunidad de dar vida a sus proyectos rápidamente y en condiciones que simulan la vida profesional (Snyder, 2014).

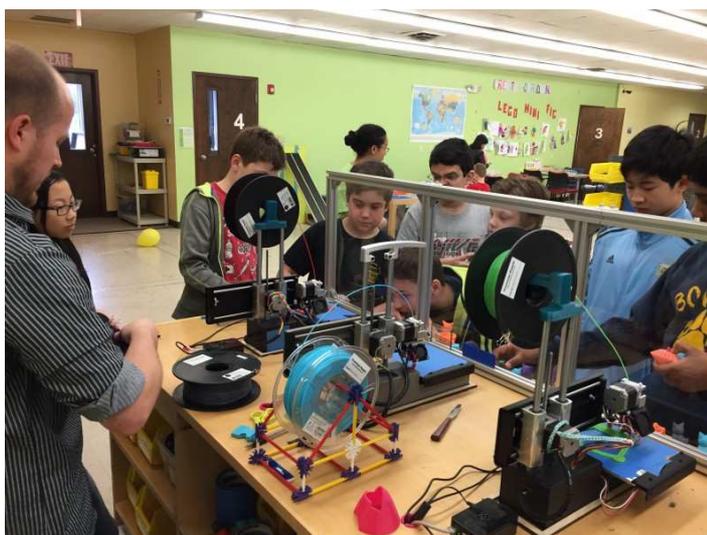


Figura 42. Laboratorio de impresión 3D en una escuela (Dima3D, 2015)

Un ejemplo de los procesos de fabricación aditiva aplicados a la educación es la experiencia de la Escuela Laboratorio de Fabricación Avanzada de la Universidad de Virginia (Bull, Hariri, Atkins, & Moran, 2015), cuyo objetivo es el de desarrollar prácticas avanzadas de fabricación en las escuelas públicas del país. La Escuela Laboratorio se basa en la premisa de que los estudiantes pueden aprender a través del proceso de diseño y fabricación. Estas tecnologías de fabricación digital como la impresión 3D de escritorio ofrecen a los estudiantes la oportunidad de ver sus ideas y conceptos realizados en forma física. Esta capacidad ofrece además a las escuelas la oportunidad de reconsiderar el currículo y establecer las interconexiones entre temas relacionados de varias asignaturas. Por ejemplo, los *kits* de invención diseñados y fabricados en las clases de ingeniería están siendo utilizados para avanzar experimentos en clases de ciencias.

Pero conseguir estos beneficios requiere una planificación cuidadosa. Los factores que deben abordarse incluyen tanto elementos pedagógicos como la alineación con los objetivos de aprendizaje y procesos industriales que incluyen el aprovisionamiento de materiales, flujo de trabajo y programación. Estas actividades pueden fomentar un interés en la ingeniería como carrera para algunos estudiantes, mientras que en otros incentivan intereses relacionados con la realización personal en áreas como las artes.

Otro estudio interesante en este campo es el propuesto por García-Domínguez *et al.* (García-Domínguez, Claver, & Camacho, 2017) sobre los efectos y dificultades de la incorporación de estas tecnologías como estrategia de enseñanza en cursos de fabricación y diseño a nivel universitario. Se estudia la contribución en cuanto a resultados del aprendizaje, adquisición de habilidades o mejora de los procesos de aprendizaje y evaluación, así como la dificultad de incorporación de estas tecnologías en asignaturas como Fundamentos y Tecnología de Materiales, Fundamentos de Ciencia de Materiales I y II, Oficina Técnica y Proyectos, y Trabajo Final de Grado en distintos grados de Ingeniería de la UNED. De este estudio se puede extraer una metodología para identificar situaciones en las que este tipo de tecnologías pueden incorporarse de inmediato y otras en las que, a pesar de ser de gran interés, se requiere un proceso complejo para su incorporación.

3.2.4. Software para impresión 3D

Estos programas generan las instrucciones de impresión en forma de *G-Code* que ejecuta la impresora a partir del fileteado en capas de la geometría 3D introducida y de los parámetros

fijados (velocidad, espesor de capa, temperatura...), de forma que generan las trayectorias y calculan la cantidad de material a extruir.

Como se ha explicado, estos programas trabajan a partir de una geometría 3D, creada a partir de *softwares* CAD o escaneada y la convierten en instrucciones de impresión. Pero para realizar dicho proceso, dicha geometría debe ser discretizada, aproximando la superficie mediante una malla. El primer tipo de archivo desarrollado para almacenar la malla y cada faceta con sus vértices y vector normal fue el .STL, creado en 1987 por 3D Systems y actualmente el más utilizado. También existen otros formatos como WRL u OBJ.

Los principales *softwares* de impresión utilizados actualmente son los siguientes(All3DP, 2017):

➤  **Cura:**

Cura es un software para impresión 3D de código abierto creado por David Braam, y que actualmente es desarrollado por Ultimaker, aunque también se puede utilizar con muchos otros equipos y marcas. Esta aplicación funciona tanto como fileteador como controlador de la impresora (*printer host*).

El primer software desarrollado por Ultimaker funcionaba bajo una versión modificada de Replicator-G. Más tarde comenzaron a utilizar Cura en sus impresoras aunque este programa había sido producido originalmente para las impresoras Makerbot. Finalmente el desarrollador de Cura pasó a trabajar para Ultimaker, convirtiéndose en el software de referencia para esta marca.

Algunas de las ventajas de este software son la sencillez de uso para los principiantes combinada con los más de 200 parámetros que se pueden modificar en su uso experto, la posibilidad de imprimir varios objetos a la vez con diferentes configuraciones para cada uno, los múltiples formatos que soporta (STL, 3MF y OBJ), la posibilidad de utilizar dos extrusores y el hecho de ser un *software* muy probado y depurado así como de código abierto y gratuito.

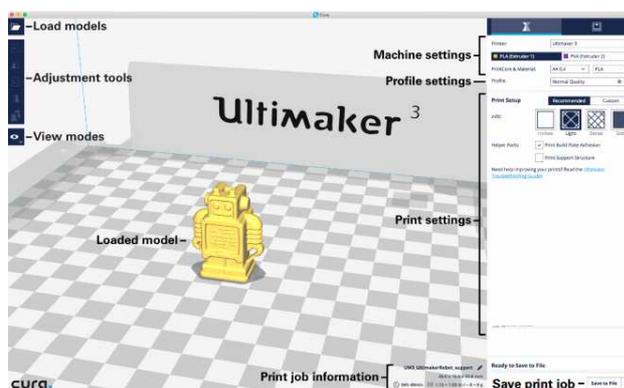


Figura 43. Interfaz de Cura (Ultimaker, 2017)

➤  **Simplify3D:**

Este software de pago es una de las soluciones de impresión 3D más utilizadas. Este programa permite comunicarse con la impresora y preparar, previsualizar e imprimir de manera eficiente archivos 3D. Simplify3D ofrece un flujo de trabajo intuitivo y el control múltiples parámetros, lo que proporciona grandes posibilidades de personalización e innovación para conseguir los resultados deseados en la impresión de piezas, incluidas aquellas que requieran de doble

extrusión o soportes. El software es compatible con cientos de impresoras 3D y está disponible en todo el mundo a través de una extensa red de colaboradores (Simplify3D, 2017).

Esta empresa de Ohio, Estados Unidos, fue fundada en 2013 tras años de participar en iniciativas *Open Source* de impresión 3D. El equipo tiene el objetivo de simplificar la impresión 3D y dar al usuario el control que necesita para obtener los mejores resultados. BCN3D Technologies, como socio clave en el mercado español, ha colaborado con Simplify3D en la traducción del software. El objetivo de BCN3D es acercar las tecnologías de fabricación digital al público general (BCN3D Technologies, 2017).

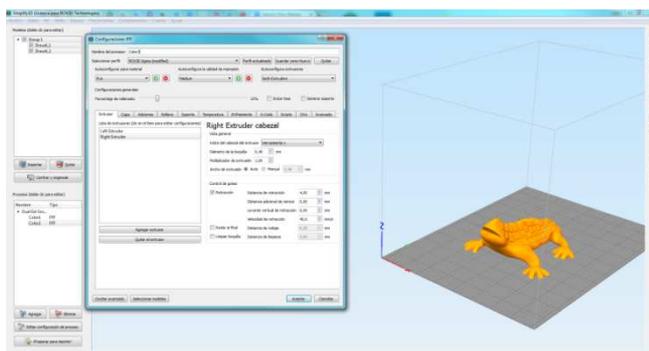


Figura 44. Interfaz de Simplify 3D (Simplify3D, 2017)



El proyecto Slic3r nació en 2011 dentro de la comunidad RepRap para dotar a la emergente tecnología de impresión 3D de una cadena de herramientas abierta y flexible.

El código y los algoritmos no se basan en ningún otro trabajo anterior. La legibilidad y la capacidad de mantenimiento del código están entre los objetivos de diseño; al ser un proyecto comunitario sin ánimo de lucro, permitió a la gente experimentar con varias nuevas características originales que se han convertido en comunes a partir de entonces, tales como múltiples extrusores, plataforma de adhesión, detección de soporte, laminado mediante línea de comandos, relleno en panel, corte de malla, división de objetos en partes, soporte AMF, evitar perímetros de cruce, anchuras de extrusión distintas, modificadores y mucho más. Todas estas características se introdujeron por primera vez en Slic3r y ahora son parte de la mayoría de los *softwares* comerciales (Slic3r, 2017).

Slic3r se basa en una comunidad de personas que trabajan en colaboración en GitHub, discutiendo nuevas características y probándolas, es utilizado por decenas de miles de personas en todo el mundo y cuenta con más de 790 versiones.

Sus principales ventajas son ser software abierto, estar en continuo proceso de mejora y ser compatible con la mayoría de los firmwares y *G-Code*, soportar múltiples formatos (STL, OBJ, AMF y POV) y disponer de múltiples opciones y parámetros que permiten un ajuste fino, por lo que es utilizado principalmente por usuarios avanzados.

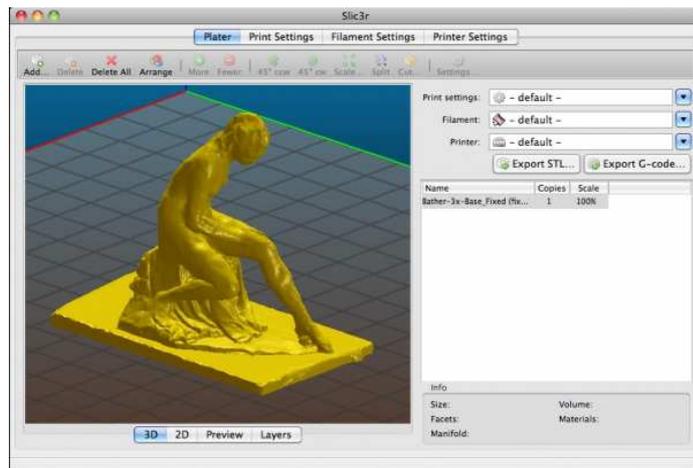


Figura 45. Interfaz de Slic3r (Slic3r, 2017)



➤ Repetier:

Este proyecto nació en 2011 a partir de un equipo de "entusiastas de la impresión 3D" que comenzó a desarrollar soluciones de software y firmware para la impresora RepRap *Mendel*, en un momento en el que aún no había software disponible para impresoras 3D. Repetier comenzó como un hobby y rápidamente se convirtió en un trabajo a tiempo completo, y actualmente es una opción de *software* host y firmware ampliamente utilizada y de código abierto.

De la misma forma que el resto de los programas, este *software* permite importar uno o más modelos 3D y colocarlos, escalarlos, rotarlos o duplicarlos en su superficie virtual. A continuación corta la pieza con diferentes fileteadores y permite ajustar múltiples parámetros para obtener los resultados deseados. Este programa ofrece la posibilidad de comprobar los resultados por completo, en regiones o capa para capa, e imprimir directamente desde el host a través de una conexión USB o TCP / IP, mediante tarjeta SD o mediante Repetier-Server.

Otras soluciones son Makerbot Print, Kisslicer o Skeinforge, que es un conjunto de herramientas diseñado por el proyecto RepRap compuesto de scripts de Python que convierte el modelo 3D en instrucciones de G-Code. También destaca Craftware, un programa compilador para impresoras 3D desarrollado internamente por el fabricante de impresoras 3D CraftUnique para apoyar a su impresora 3D CraftBot financiada con *crowdfunding*. No obstante, también se puede utilizar en otras impresoras. Al igual que pasa con Cura, la aplicación CraftWare se puede utilizar en modo "fácil" y "experto". Es una aplicación rápida, con una visualización G-Code en la que cada característica aparece en un color diferente. Pero la verdadera característica a destacar es el soporte a la gestión individual. Netfabb Basic es un software compilador de pago de Autodesk con el que además se puede analizar, reparar y editar archivos STL antes de compilarlos. Por último Printron es un conjunto completo de interfaces de host para impresoras 3D y CNC, que entre otras herramientas contiene la aplicación Pronterface, un host GUI con todas las funciones que permite controlar de forma interactiva la máquina, cortar objetos directamente desde el host, imprimir objetos, cargar en tarjetas SD y ejecutar impresiones SD.

Como se ha explicado, estos programas generan el *G-Code* que contiene la información necesaria para la impresión, pero este código debe ser interpretado y traducido en movimientos de los motores y extrusor y en órdenes de control para los dispositivos calentadores. Existen

múltiples *firmwares* creados para el control de impresoras 3D así como distintas versiones de G-code: Marlin, Repetier, Mach3, LinuxCNC, Machinekit, Smoothie, Makerware, Sailfish...



Figura 46. Logo de Marlin (StaticBoards, 2016)

Marlin es una de las opciones más utilizadas. Su origen está en el conocido *firmware* para máquinas CNC, GRBL, que ha sido modificado, adaptado y extendido para controlar también los extrusores, cama caliente, pantallas LCD y todo lo que necesita una impresora 3D.

Está diseñado para controlar los movimientos de los motores paso a paso y del extrusor de tal forma que el resultado de la impresión sea el deseado. Su función es leer la lista de comandos G-Code, línea a línea, y convertir cada comando en los pulsos necesarios para mover los motores paso a paso. Además tiene un sistema avanzado para controlar la temperatura del extrusor y de la cama caliente de forma precisa (control PID).

Este firmware está desarrollado para instalarse en una placa Arduino, lo que permite que la impresora funcione independiente del PC. Marlin puede leer los programas de G-Code desde el puerto serie, o desde una tarjeta SD.

Además incluye muchos sistemas de seguridad, que pueden evitar situaciones peligrosas. Por ejemplo, si el sensor de temperatura se estropea, Marlin lo detecta y detiene todo el proceso, en vez de continuar calentando el extrusor (StaticBoards, 2016).

Por último existen otro tipo de programas que permiten editar y reparar piezas STL (MeshLab, Meshmixer, Meshfix), programas CAD de código abierto (Blender, FreeCad, SketchUp), así como programas CAD comerciales usados en el sector del diseño y fabricación (SolidWorks, Autodesk Inventor, SolidEdge, Catia...).

3.2.5. Materiales para impresión 3D por extrusión de polímero

Los filamentos para impresoras 3D por extrusión de polímero (FDM/FFF) que existen en el mercado son fundamentalmente de tipo termoplástico. Se caracterizan por su diámetro en milímetros y se venden normalmente en bobinas. Algunos de los materiales más utilizados en impresión 3D son el ácido poliláctico (PLA), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el poliestireno de alto impacto (HIPS), el elastómero termoplástico (TPE) o el nylon, además de materiales compuestos como PLA + latón, fibra de carbono o madera.

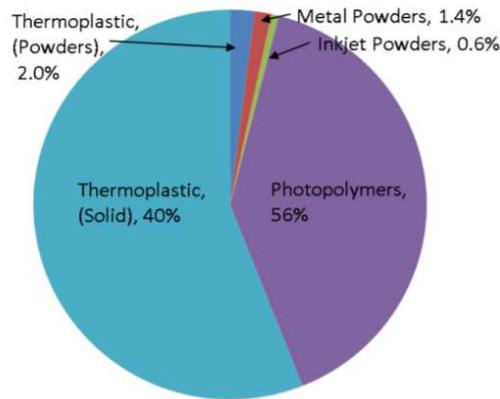


Figura 47. Materiales usados en impresión 3D (Forster, 2015)

El PLA y el ABS son los reyes indiscutibles de la impresión 3D por extrusión de material, aunque dentro del grupo de materiales comúnmente utilizados se incluyen también el nylon, los Termoplásticos Elastómeros (TPE), el Polietileno (PET, PETG) y el Policarbonato (PC):

3D Printer Filament	Easy to Use	Physical Properties		
		Strength	Flexibility	Durability
PLA	YES	2/5	1/5	2/5
ABS		2/5	3/5	4/5
PETG (PET, PETT)	YES	2/5	3/5	5/5
Nylon		3/5	4/5	5/5
TPE, TPU, TPC (Flexible)		1/5	5/5	4/5
PC		4/5	3/5	5/5

Figura 48. Materiales polímeros más utilizados para impresión 3D FDM/FFF (All3DP, 2017)

➤ **PLA**

El PLA o Ácido Poliláctico es el material más utilizado en el mundo de la fabricación 3D casera. Aunque sus propiedades mecánicas son un poco inferiores al ABS, su facilidad de uso y ser biodegradable hacen que en general sea mejor opción.

El PLA es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Se fabrica a partir de recursos renovables, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Además es incoloro, resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor similares al PET, que es usado como envase para bebidas. También es resistente a la radiación UV, ignífugo, no tóxico y bioabsorbible, por lo que es ideal para aplicaciones en los sectores textil, médico y alimenticio (All3DP, 2017).

Algunas de sus principales propiedades son:

- Densidad: 1,25 g/cm³

- Módulo de elasticidad (Young): 3.5 GPa
- Elongación a la rotura: 6%
- Módulo de flexión: 4 GPa
- Resistencia a la flexión: 80 MPa
- Temperatura de transición vítrea: 60°C
- Comienzo de fusión: 160°C
- Módulo de corte: 2,4 GPa
- Capacidad calorífica específica: 1800 J/kg-K
- Relación fuerza-peso: 40 kN-m/kg
- Resistencia a la tracción (UTS): 50 MPa
- Conductividad térmica: 0,13 W/m-K

La principal ventaja de este material es su facilidad de uso en impresión 3D y sus buenos resultados. El PLA tiene una temperatura de extrusión inferior al ABS, no se deforma tan fácilmente durante la impresión y se adhiere bien a la plataforma, lo que significa que no requiere una base calefactada. Otro beneficio al usar PLA es que no emite mal olor ni vapores tóxicos durante la impresión. Finalmente, como es un termoplástico biodegradable, el PLA es más respetuoso con el medio ambiente que la mayoría de los filamentos de impresoras 3D.

Sin embargo, en comparación con otros tipos de filamentos, el PLA es quebradizo y no excesivamente resistente, por lo que no se debe usar para aplicaciones que deban soportar repetidos golpes o grandes esfuerzos. Además debe evitarse su uso en piezas que soporten altas temperaturas, ya que el PLA tiende a deformarse a partir de los 60°C.

Propiedades de Impresión:

- Dificultad de uso: Baja
- Temperatura de impresión: 180 ° C - 230 ° C
- Temperatura de la plataforma de impresión: 20 ° C - 60 ° C (pero no es necesario)
- Contracción / deformación: Mínima
- Soluble: No

Al igual que el ABS o el PETG, el PLA es el material base utilizado en muchos filamentos exóticos, como los que tienen propiedades conductoras o fluorescentes, o los compuestos con madera o metal.

➤ ABS

El ABS es uno de los materiales plásticos más usados en la industria. De hecho se le suele conocer como “plástico de ingeniería”, ya que es un termoplástico muy resistente al impacto, a la abrasión y a los elementos químicos. En impresión 3D es el material más utilizado después del PLA.

El acrónimo ABS deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: Acrilonitrilo, Butadieno y Estireno. El acrilonitrilo proporciona resistencia térmica, química y a la fatiga, así como dureza y rigidez, el butadieno le da proporciona ductilidad a baja temperatura, resistencia al impacto y resistencia a la fusión y el estireno facilidad de procesado, brillo, dureza y rigidez (HXX, 2015).

El ABS tiene importantes aplicaciones en la ingeniería, dada su buena resistencia mecánica combinada con cierta facilidad para el procesado. Por otro lado es soluble en acetona, no es biodegradable, y no es resistente a la radiación UV.

Propiedades:

- Densidad: 1,03 a 1,38 g/cm³
- Módulo de elasticidad (Young): 1,7 a 2,8 GPa
- Elongación a la rotura: 3% al 75%
- Módulo de flexión: 2,1 a 7,6 GPa
- Resistencia a la flexión: 69 a 97 MPa
- Temperatura de transición vítrea: 100°C
- Capacidad calorífica específica: 1080 a 1400 J/kg-K
- Relación fuerza-peso: 31 a 80 kN-m/kg
- Resistencia a la tracción (UTS): 33 a 110 MPa
- Expansión térmica: 83 a 95 µm/m-K

Sus buenas propiedades mecánicas, resistencia a la temperatura, bajo precio, moderada flexibilidad, disponibilidad en múltiples colores, larga duración y su rango de temperaturas de fusión que lo hacen apto para cualquier impresora, lo hacen una excelente opción para fabricar todo tipo de piezas mediante tecnologías FDM, en especial juguetes, carcasas de teléfonos o piezas de automóviles que deben soportar repetidos golpes y cambios temperatura.

Por contra, las dificultades que ocasiona en la impresión, como su contracción y deformación durante el proceso, despegue de la plataforma así como los gases tóxicos que desprende durante la impresión hacen que no sea adecuado para todas las aplicaciones (3DPrinting, 2017).

Propiedades de impresión:

- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión: 210 ° C - 250 ° C
- Temperatura de la plataforma: 80 ° C - 110 ° C
- Contracción / deformación: Considerable
- Soluble: En ésteres, cetonas y acetona

➤ Nylon

El Nylon es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas. Se genera por policondensación de un diácido con una diamina (Tecnología de los plásticos, 2012). Hay muchas variedades y el más conocido es el PA66. Es un material resistente, flexible y de larga duración, con un color blanco natural (aunque puede ser teñido en cualquier color con un colorante ácido) y de precio moderado.

Propiedades del Nylon PA66 (Makeitfrom, 2017):

- Calor específico: 1,67 J/(mol.K)
- Conductividad térmica: 0,43 W/(m.K)
- Resistividad eléctrica: $6 \cdot 10^{14}$ W.cm
- Módulo de Young: 1,6 a 23 GPa
- Módulo a flexión: 1,3 a 19 GPa
- Resistencia a la tracción (UTS): 60 a 240 MPa
- Resistencia a flexión: 80 a 260 MPa
- Elongación a la rotura: 2,8 a 46 %
- Temperatura de transición vítrea: 50°C
- Temperatura de Fusión: 260 °C

Con esta fibra sintética se pueden obtener buenos acabados y piezas de gran resistencia en impresión 3D pero presenta algunos inconvenientes: tiende a encogerse y curvarse, presenta problemas con la unión entre capas, no se adhiere bien al aluminio ni al cristal y tampoco es biodegradable. Se funde entre los 240 y 250 grados centígrados.

Estos problemas hacen que sea uno de los materiales más complejos de utilizar en impresión 3D. Su tendencia a curvarse y la falta de adhesión de la pieza a la bandeja causa muchos fallos, en ocasiones difíciles de controlar. Además suele absorber humedad, por lo que previamente a la impresión 3D se debe secar en horno durante 3 o 4 horas. A pesar de estas dificultades tiene grandes ventajas; el nylon es un material muy resistente, poco viscoso, resistente a la radiación UV y a muchos químicos, muy resistente a la temperatura y con distintas variedades que le aportan flexibilidad, transparencia y otras cualidades. Uno de los principales distribuidores de este material es Taulman con sus variedades Nylon 618, Nylon 645 (Taulman3D, 2017).

Propiedades de impresión:

- Dificultad para usar: Alta
- Temperatura de impresión: 240 ° C - 260 ° C
- Temperatura de la plataforma: 70 ° C - 100 ° C
- Contracción / deformación: Alta
- Soluble: No

➤ Elastómeros Termoplásticos (TPE)

Los Elastómeros Termoplásticos, también conocidos como TPE (Thermoplastic Elastomers) o "cauchos" termoplásticos, son una clase de polímeros o mezcla física de polímeros (generalmente un plástico y un caucho) que dan lugar a materiales con características termoplásticas y elastoméricas. Mientras que los elastómeros habituales, por ejemplo silicona, goma-caucho, espuma de poliuretano, etc., son termoestables, los elastómeros termoplásticos son, en cambio, relativamente fáciles de utilizar en procesos de fabricación aditiva.

Los TPE's combinan las ventajas típicas de las gomas y de los materiales termoplásticos. La diferencia principal entre los elastómeros termoestables y los termoplásticos es el grado de entrecruzamiento, la propiedad estructural que les confiere propiedades elásticas. El entrecruzamiento en polímeros termoestables está formado por enlaces covalentes mientras que en los termoplásticos es muy débil, pues se forma a partir de dipolos. Estas fuerzas se anulan al calentarlos y la masa fundida resultante puede ser procesada como un termoplástico, por ello, sometidos a calor, pueden soldarse y también reutilizarse (Tecnología de los plásticos, 2012).

Hay muchos tipos. Uno de los más utilizados es el Poliuretano Termoplástico TPE-U. Se caracteriza por su alta resistencia a la abrasión, al oxígeno, al ozono y a las bajas temperaturas. Esta combinación de propiedades hace del poliuretano termoplástico un plástico de ingeniería y por esta razón, se utiliza en aplicaciones especiales. Ejemplos comerciales de estos materiales son el Filaflex o el NinjaFlex (Recreus, 2017).

Propiedades del Filaflex:

- Densidad: 1,215 g/cm³
- Resistencia a la tracción: 39 MPa
- Alargamiento hasta la rotura: 700%

Este material permite imprimir piezas de gran flexibilidad, aunque requiere ajustar ciertos parámetros como reducir la velocidad, cambiar la retracción o asegurarse de que el extrusor es compatible, ya que puede ocasionar atascos en el extrusor o problemas de extrusión insuficiente.



Figura 49. Zapatillas impresas con Filaflex (Recreus, 2017)

Propiedades de impresión:

- Dificultad de uso: Media
- Temperatura de impresión: 210 ° C - 230 ° C
- Temperatura de la plataforma: 30 ° C - 60 ° C (o fría)
- Contracción / deformación: Mínima
- Soluble: No

➤ PC

El Policarbonato es un termoplástico resistente a los golpes (se utiliza en la fabricación de vidrio a prueba de balas y CDs) y a la temperatura. Puede doblarse y formarse en frío sin agrietarse o deformarse, es moderadamente flexible (menos que el nylon) y es transparente (aunque opaco a luz UV).

Las dos moléculas principales que intervienen en la síntesis del policarbonato son el bisfenol A y el fosgeno. Debido a que los grupos bencénicos están directamente en la cadena principal, la molécula es muy rígida, haciendo que el policarbonato tenga una estructura amorfa, una baja contracción en el moldeo (tanto transversal como paralela al flujo) y sea transparente. Este compuesto posee una elevada temperatura de transición vítrea, T_g 150 °C, lo que le confiere excelentes propiedades térmicas y buena estabilidad dimensional. Funde a partir de 300°C y generalmente no es sensible a ácidos orgánicos e inorgánicos en condiciones normales de temperatura y concentración, sin embargo su resistencia a los demás compuestos orgánicos es baja. Además posee una óptima estabilidad a las radiaciones UV.

Propiedades:

- Densidad 1,2 g/cm³
- Resistencia a la Compresión >80 MPa
- Resistencia a la Tracción 55-75 MPa
- Módulo de Tracción 2,3-2,4 GPa
- Alargamiento a la Rotura 100-150 %
- Relación de Poisson 0,37
- Resistencia al Impacto 600-850 Izod J/ m
- Dureza - Rockwell M70
- Coeficiente de rozamiento 0.31

- Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos) 10-15

El policarbonato es el filamento para impresión 3D con mayor resistencia mecánica y a los impactos y la temperatura (puede soportar temperaturas de 110°C), por eso es ideal para piezas que necesitan conservar su resistencia, dureza y forma en entornos de alta temperatura, como componentes eléctricos, mecánicos o automotrices. También es útil su transparencia para aplicaciones como envases o pantallas. Sus principales problemas son la elevada temperatura necesaria para su extrusión (al menos 300°C), su contracción en el proceso de impresión (*warping*) y su tendencia a absorber agua.

Propiedades de impresión:

- Dificultad de uso: Alta
- Temperatura de impresión: 270 ° C - 310 ° C
- Temperatura de la plataforma de impresión: 90 ° C - 110 ° C
- Contracción / deformación: Considerable
- Soluble: No

➤ PET/PETG

El Tereftalato de Polietileno (PET) se define químicamente como un poliéster aromático. Es el plástico más utilizado del mundo. Se utiliza en botellas, envases, fibras textiles, etc... (All3DP, 2017).

En impresión 3D se suele usar el PETG, una versión modificada de PET. La 'G' es de 'glicol modificado', que se añade a la composición del material durante la polimerización. El resultado es un filamento más transparente, menos quebradizo y más fácil de usar que su forma base de PET. La estructura molecular es irregular; la resina es transparente y amorfa con una temperatura de transición vítrea de 88 °C (Textos Científicos, 2017).



Figura 50. Piezas impresas con PETG (All3DP, 2017)

Propiedades:

- Densidad: 1,34 – 1,39 g/cm³
- Resistencia a la tracción: 59 – 72 MPa
- Resistencia a la compresión: 76 – 128 MPa
- Resistencia al impacto: 0,01 – 0,04 Izod (J/mm):
- Dureza Rockwell: M94 – M101
- Temperatura de fusión: 244 - 254 °C

El filamento PETG es una solución intermedia entre el ABS y el PLA, ya que combina la funcionalidad, flexibilidad y resistencia mecánica, a la temperatura y a los impactos del ABS y la facilidad de impresión del PLA en un solo material. La adherencia entre capas es buena, tiene gran adherencia a la plataforma y no se contrae ni se deforma demasiado durante la impresión. Es bastante higroscópico por lo que debe conservarse en un lugar seco o secarse con horno.

- Dificultad de uso: Baja
- Temperatura de impresión: 220 ° C - 250 ° C
- Temperatura de la plataforma de impresión: 50 ° C - 75 ° C
- Contracción / deformación: Mínima
- Soluble: No

PETT (*T-Glase* distribuido por Taulman), es otra variante del PET. Es un poco más rígido que PETG y más transparente (Filament2Print, 2016).

Además de estos materiales de uso general existen otros polímeros que por ser solubles en ciertos disolventes se emplean fundamentalmente como material de soporte:

➤ HIPS

El Poliestireno de Alto Impacto es un copolímero derivado del Poliestireno que se obtiene por polimerización por radicales libres del monómero estireno, por agregado de caucho polibutadieno a la mezcla. Esto lo hace más resistente, no quebradizo y capaz de soportar impactos más violentos sin romperse que el poliestireno normal.

Es un material muy parecido al ABS en cuanto a propiedades mecánicas y térmicas, fundiendo a una temperatura similar, por ello suele usarse en combinación con este para formar las estructuras de soporte que luego se eliminan con D-Limoneno, en el que es soluble, y que no afecta al ABS (este polímero se disuelve en acetona). Al igual que el ABS soporta mal la luz UV y su densidad es de 1,04 g/cm³.

A pesar de su uso principal como material de soporte, el HIPS es un buen material para impresión 3D; es más resistente que el PLA o ABS, y se deforma menos que este último durante la impresión.

➤ PVA

El Alcohol Polivinílico (PVA) es un polímero sintético soluble en agua, y eso es exactamente lo que aprovechan las aplicaciones comerciales. Los usos populares incluyen el empaquetado para las "vainas" del detergente del lavaplatos.

Esta propiedad es también la que se utiliza en la impresión 3D, haciendo del PVA un gran material de soporte cuando se empareja con otro filamento en una impresora con doble extrusor. La ventaja de usar PVA sobre HIPS es que se puede imprimir otros plásticos distintos del ABS que resultarían dañados por el D-Limoneno como el PLA y Nylon.



Figura 51. Material de soporte PVA soluble en agua (All3DP, 2017)

La impresión con este material es de dificultad media, funde a partir de 180°C y se debe tener cuidado con su almacenamiento, ya que incluso la humedad en la atmósfera puede dañar el filamento antes de la impresión.

3D Printer Filament	Physical Properties			Special Properties
	Strength	Flexibility	Durability	
HIPS	N/A	N/A	N/A	Support material
PVA	N/A	N/A	N/A	Support material
ASA				Weather resistant
PP				
Acetal (POM)				
PMMA (Acrylic)				Transparent

Figura 52. Otros filamentos para impresión 3D(All3DP, 2017)

Por otro lado, aunque son menos comunes en impresión 3D, también se usan otros polímeros empleados típicamente en la industria de los plásticos, que aportan interesantes propiedades de resistencia, flexibilidad o transparencia:

➤ PP

El Polipropileno (PP) es un polímero lineal vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo. Es resistente, flexible, ligero, químicamente resistente, reciclable y seguro para los alimentos, lo que explica su amplia gama de aplicaciones, incluyendo plásticos de ingeniería, envases de alimentos, textiles y billetes de banco. Sin embargo no se utiliza demasiado en impresión 3D ya que es difícil trabajar con él, pues presenta una gran deformación y mala adherencia entre capas y a la plataforma.

➤ POM (Acetal)

El Polioximetileno (POM), también conocido como acetal, es conocido por su uso como plástico de ingeniería, por ejemplo en piezas motrices o requieren alta precisión como

engranajes, rodamientos, mecanismos de enfoque de cámara y cremalleras. Esto se debe a su resistencia, rigidez, estabilidad dimensional, resistencia al desgaste, sobre todo a su bajo coeficiente de fricción.

Debido a esta propiedad el POM es un gran filamento para impresión 3D, ya que su naturaleza resbaladiza permite que las impresiones sean casi tan funcionales como las piezas producidas en masa mediante procesos como inyección. Para imprimir con este material el equipo debe disponer de base calefactada, ya que su adherencia a la plataforma no es buena.

➤ PMMA (Acrílico)

El Polimetacrilato de Metilo procede de la polimerización del ácido acrílico. Es un material rígido, resistente a impactos y transparente por lo que se utiliza como alternativa ligera y resistente al vidrio. Sin embargo es muy poco flexible, por lo que no se puede utilizar para piezas que deban doblarse.

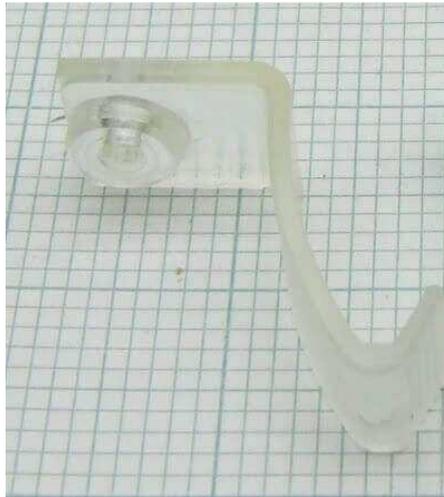


Figura 53. Pieza impresa en PMMA (All3DP, 2017)

La impresión 3D con este material no resulta fácil por su tendencia a deformarse y su mala adherencia. Para evitar deformaciones y para maximizar la transparencia, la extrusión debe ser consistente, lo que requiere una alta temperatura de la boquilla. Se debe usar plataforma calefactada y también puede ayudar a encerrar la cámara de impresión con el fin de regular mejor la temperatura.

➤ HDPE

El Polietileno de Alta Densidad es un polímero opaco resultado de la polimerización del etileno, con un peso molecular de entre 200.000 y 500.000. Es un polímero de cadena lineal no ramificada, más duro, fuerte y un poco más denso que el de baja densidad, pero menos dúctil. Es más flexible que el PP y resiste especialmente bien ante los disolventes y pegamentos. No se utiliza demasiado en impresión 3D porque tiene tendencia a encogerse, no se adhiere bien a la plataforma y no es reciclable. Su fusión se produce cuando alcanza los 135 grados centígrados.

➤ ASA

El Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA) es un polímero con características similares al ABS pero está desarrollado para ser más resistente a los efectos del clima.

Además de ser un filamento resistente, rígido y relativamente fácil de imprimir, es extremadamente resistente a la exposición química, al calor y, sobre todo, a los cambios de

forma y color. Otra ventaja del ASA sobre el ABS es que se deforma menos durante la impresión. Pero tiende a agrietarse fácilmente durante la impresión debido a un flujo excesivo del ventilador de capa.

➤ PEEK

El PEEK o Polieterecetona es un termoplástico semicristalino con excelentes propiedades de resistencia mecánica y química que se mantienen a altas temperaturas. El módulo de Young es de 3,6 GPa y su resistencia a la tracción de 90 a 100 MPa, tiene una temperatura de transición vítrea de alrededor de 143 ° C y se funde alrededor de 343 ° C. Esta temperatura relativamente alta de fusión hace que se pueda utilizar en pocos equipos FDM o FFF, pero ya se han desarrollado algunos (por ejemplo la marca APIUM) que permiten aprovechar las excelentes propiedades de este material. (3DPrint, 2015).

Por último se están desarrollando infinidad de materiales exóticos y compuestos que permiten obtener nuevas texturas y acabados así como interesantes propiedades de resistencia, magnetismo, fluorescencia, etc.

➤ Madera

Estos materiales permiten obtener piezas con un aspecto similar a la madera empleando mezclas a base de PLA y polvo de madera. En este caso el atractivo estético y táctil se produce a costa de una flexibilidad y una resistencia reducidas. Además se debe tener cuidado con la temperatura de extrusión (175 °C son suficientes), ya que el exceso de calor puede resultar en un aspecto quemado o caramelizado. Al ser el polímero base PLA la impresión con este material es sencilla. El más conocido de estos compuestos es el *Laywoo-D3*.

➤ Metal

De la misma forma que los compuestos con madera, estos materiales permiten simular el aspecto del metal. Se basan en una mezcla de polvo de metal y PLA o ABS. El resultado es muy similar al del metal e incluso el peso también se parece, ya que las mezclas tienden a ser varias veces más densas que el polímero matriz puro. Los metales más utilizados son el bronce, el latón, el cobre, el aluminio o el acero inoxidable

Uno de sus inconvenientes es la abrasión que ocasionan en la boquilla, por ello suele ser necesario reemplazarla antes de tiempo cuando se utilizan estos materiales.

Las mezclas de filamentos de impresora 3D más comunes tienden a ser alrededor de 50% de polvo de metal y 50% de PLA o ABS, pero también existen mezclas de hasta un 85%. Un ejemplo comercial de estos materiales es el *BrassFill* con latón.



Figura 54. Piezas impresas con filamentos metálicos (All3DP, 2017)

➤ Cerámico

Entre estos compuestos destaca el *Lay-Brick*, que al igual que el *Laywoo-D3* está indicado para la impresión 3D de piezas para decoración. Este es un filamento para impresión 3D fabricado con arenisca y un polímero de unión que crea un acabado superficial similar al de un objeto cerámico o de piedra.

Su temperatura de extrusión se encuentra entre 165 y 210°C y no requiere plataforma caliente. Por otro lado es recomendable limpiar la boquilla extruyendo PLA tras la impresión con este compuesto, ya que puede causar atascos.

➤ Fibra de carbono

Para aumentar la rigidez de compuestos como PLA, ABS, PETG y nylon se pueden reforzar con fibra de carbono. Con esta mezcla se consiguen compuestos de mayor rigidez y ligereza. Aun así, las propiedades mecánicas de estos compuestos no son comparables a las de los materiales fabricados mediante otros procesos con fibras largas de carbono y resinas termoestables, ya que estos consiguen mucha mayor resistencia en la dirección de la fibra, mientras que los filamentos para impresión 3D solo incluyen fibras cortadas ya que deben ser extruidos.

La dificultad y el resultado de la impresión vendrán determinados por el polímero que actúe como matriz. Un problema de este material es el severo desgaste que ocasiona en la boquilla.

Entre estos filamentos destaca el *CarbonFill*, que se basa en la mezcla del compuesto HDglass (PETG) reforzado con un 20% de fibras relativamente largas de fibra de carbono. Según el fabricante el compuesto resultante es dos veces más rígido que el compuesto matriz y un 10% más resistente a los impactos.

➤ Termocromáticos, fotocromáticos y fluorescentes

Los filamentos fluorescentes se basan en materiales fosfatados mezclados con una base de PLA o ABS. Gracias a estos materiales añadidos, el objeto impreso brilla en la oscuridad, ya que es capaz de absorber y posteriormente emitir fotones. Las impresiones brillarán solamente después de exponerse un tiempo a la luz, ya que tienen que almacenar energía luminosa antes de poder emitirla.

Para obtener mejores resultados, se deben imprimir paredes gruesas y poco relleno, ya que cuanto más gruesas sean las paredes, más fuerte será el resplandor.



Figura 55. Piezas impresas con filamento fluorescente (All3DP, 2017)

Los filamentos termocromáticos, igual que la mayoría de filamentos exóticos, también se basan en mezclas de ABS o PLA con sustancias que les confieren propiedades especiales. En este caso cambiar de color en función de los cambios de calor. Normalmente cambian entre dos colores, por ejemplo de púrpura a rosa, azul a verde, o amarillo a verde.

➤ Conductivos y magnéticos

Los filamentos conductivos se basan en la adición de partículas conductoras de carbono al PLA o ABS, por lo que permiten imprimir circuitos electrónicos de baja tensión si se combinan con un filamento de PLA o ABS ordinario en una máquina de doble extrusión.

A pesar de que este filamento de impresora 3D sólo soporta corrientes de baja tensión es más que suficiente para proyectos de electrónica casera. Estos filamentos pueden usarse para construir circuitos que conecten LEDs, sensores, o incluso un procesador como Raspberry o Arduino.

El material magnético es un filamento exótico basado en PLA o ABS infundido con hierro pulverizado, lo que le confiere un acabado ferroso y propiedades ferromagnéticas.

A pesar del nombre, este filamento es en realidad ferromagnético, lo que significa que mientras es atraído por los campos magnéticos, no genera campos propios. En otras palabras, los objetos que imprima pueden pegarse a los imanes, pero en realidad no serán imanes.

3.2.6. Diseño y fabricación de piezas mediante impresión 3D

Cuando se utilizan estas tecnologías se debe tener en cuenta el efecto que tienen los parámetros de diseño y fabricación en el resultado final; la elección de los parámetros correctos de temperatura, espesor de capa o velocidad de impresión, así como el correcto diseño de la pieza, su relleno u orientación y el correcto ajuste y calibración del equipo es fundamental para obtener el resultado deseado en cuanto a acabado dimensional, ausencia de defectos, tolerancias dimensionales, velocidad de producción o propiedades mecánicas.

Algunos parámetros fundamentales que miden la calidad del equipo y la impresión son la resolución de la impresora 3D, que se define como la capacidad de posicionamiento o de discernimiento de distancias antes de la inyección o depósito de material, mientras que la tolerancia de impresión dependerá, además, del proceso de solidificación o de acabado. Estos son conceptos diferentes y a menudo la tolerancia de impresión suele presentar valores más desfavorables que la resolución.

La resolución puede estar dada en espesor de capa, mientras que en el plano X-Y, puede estarlo por puntos por pulgada (ppp). El espesor típico de capa es del orden de 100 μ m (0,1mm), aunque algunas máquinas imprimen capas de hasta 16 μ m. La resolución X-Y es comparable a la de las impresoras láser convencionales. En el caso de que el proceso las use, las partículas son del orden de 50 a 100 μ m (0,05-0,1mm) de diámetro.

La tolerancia final de pieza dependerá, además de la resolución antes descrita, de la tecnología y material utilizados. Es uno de los parámetros más importantes en la elección de proceso de impresión y del dispositivo, ya que no sólo determinará la propia tolerancia dimensional de la pieza, sino, en caso de espesores pequeños, si dicha pieza es realizable o no. El límite actual de tolerancia para dispositivos DIY o de bajo coste están en torno a 0,1 - 0,2 mm. Para trabajos de más demanda dimensional, algunos fabricantes son capaces de garantizar tolerancias del orden de las decenas de μ m.

La impresión 3D funciona construyendo el objeto capa a capa. Cada capa sucesiva se imprime en la parte superior de la anterior para crear la forma 3D deseada. Por tanto, para que la pieza final sea fuerte y consistente, cada capa debe soldar adecuadamente a la anterior. Conseguir una buena unión entre capas es un problema con algunos materiales como el nylon.

El plástico que sale de la extrusora se encuentra entre 190 y 240 grados centígrados según el material. Mientras que el plástico todavía está caliente, es flexible y se puede moldear fácilmente

en diversas formas. Sin embargo, a medida que se enfría, se vuelve sólido y conserva su forma. Es necesario lograr el equilibrio correcto entre temperatura y enfriamiento para que el plástico pueda fluir libremente a través de la boquilla y se solidifique rápidamente para mantener las dimensiones exactas de la pieza impresa en 3D. Para conseguir mejores resultados se utiliza el ventilador de capa, que se puede regular de forma que aporte mayor flujo en capas más rápidas y menor en capas más lentas; además se puede desconectar en las capas iniciales para mejorar la adherencia a la plataforma.

Otros parámetros que se puede modificar para mejorar la adherencia son la construcción de una plataforma de adhesión alrededor de la primera capa, y ajustar la temperatura de la plataforma, algo especialmente importante para materiales como ABS o nylon que tienden a despegarse.

Los parámetros recomendados de temperatura y enfriamiento para cada material son los siguientes (Filament2Print, 2017), (Impresoras3D, 2017), (BQ, 2017), (Taulman3D, 2017), (Dima3D, 2017), (Recreus, 2017), (All3DP, 2017), (3DNatives, 2016):

Material	Rango temperatura fusor	Temperatura ideal fusor	Temperatura plataforma	Ventilador de capa
ABS	210-260 °C	235 °C	80-110 °C	0-25%
PLA	190-220 °C	200 °C	40-50 °C ó fría	50-100%
HIPS	210-260 °C	240 °C	80-110 °C	25%-50%
NYLON	210-260 °C	235 °C	80-110 °C	10%-30%
PETG	220-260 °C	245 °C	60-80 °C	50-100%
TPE FLEXIBLE	190-240 °C	220 °C	Plataforma fría	50-100%
METAL	190-240 °C	220 °C	40-50 °C o fría	50-100%
FIBRA CARBONO	230-265 °C	245 °C	40-60 °C o fría	50-100%
MADERA	190-240 °C	220 °C	50 °C	50-100%

Se debe buscar un buen compromiso entre velocidad de impresión y calidad de la pieza, de forma que el tiempo para que el plástico se una adecuadamente a la superficie antes de iniciar la siguiente capa sea suficiente y no se produzcan fenómenos de extrusión insuficiente debidos a exigencias de velocidad excesivas para el extrusor. Los valores normales para este parámetro oscilan entre los 20 a los 90 mm/s dependiendo del equipo y sobretodo del material que se está utilizando, siendo 60 mm/s una velocidad habitual de impresión para la mayoría de los filamentos. Para materiales como el TPU flexible es necesario establecer un flujo de material mayor del 100% y fijar una velocidad de impresión lenta (≤ 40 mm/s) para evitar fenómenos de extrusión insuficiente. Otro material que suele requerir velocidades más lentas de lo habitual es el nylon.

El espesor de capa es fundamental para el acabado de la pieza, la consistencia en la unión de las capas y la calidad de los detalles. El espesor de capa habitual es de 0,1 mm. Para acabados más finos se pueden emplear espesores de 0,06 mm, a costa de un mayor tiempo de fabricación. Para realizar un prototipo rápido con calidad de borrador se pueden emplear espesores de 0,2 mm o mayores. No obstante, dado que es necesario que la nueva capa sea presionada contra la inferior para que se produzca una unión consistente, se debe seleccionar un espesor de capa al menos un 20% más pequeño que el diámetro de la boquilla (0,32mm para una boquilla estándar de 0,4mm).

En cuanto al diseño de la pieza es fundamental tener en cuenta que no se pueden fabricar superficies con grandes pendientes o voladizos sin construir soportes que luego se deben retirar o utilizar un segundo material de soporte que se disuelva en algún disolvente (para ello el equipo debe disponer de un segundo extrusor). Los *softwares* para impresión 3D permiten crear estas estructuras.

Para ahorrar plástico, la mayoría de las piezas impresas 3D se crean para tener una cáscara sólida que rodee el interior parcialmente hueco. Por ejemplo, el interior de la pieza puede utilizar un porcentaje de relleno del 30%, lo que significa que sólo el 30% del interior es plástico sólido, mientras que el resto es aire. El relleno se encarga de conectar las capas exteriores de la impresión 3D, y también debe servir de apoyo para las superficies superiores que se imprimirán encima del relleno. El espesor de las paredes y las bases que cubren este relleno, así como su número de capas es fundamental para conseguir un buen acabado que cubra correctamente los huecos y aporte una solidez estructural al conjunto. Además el espesor de la base también tiene influencia en la adherencia a la plataforma.

Por último es fundamental realizar una correcta calibración del equipo para conseguir tolerancias dimensionales correctas y buena calidad de detalles. Además se debe ajustar la alineación de la plataforma y los ejes y regular la distancia inicial en el eje Z de la boquilla para conseguir una capa inicial con buen acabado, buena adherencia a la plataforma y dimensiones correctas en el eje Z (Dima3D, 2015).

Algunos de los problemas que se producen al imprimir y sus causas y posibles soluciones son las siguientes (Simplify3D, 2017):

- **No extruye al comienzo:** puede deberse a que la extrusora no ha sido cebada antes de comenzar la extrusión, a que la boquilla está demasiado cerca de la cama caliente (ver *Mala adherencia a la cama caliente*), a que el *filamento* haya sido *pelado por el tornillo* y ya no avance o que el *extrusor* esté *obstruido*.
- **Extrusión insuficiente:** en estos casos se aprecia falta de material y huecos entre el perímetro y contorno. Este problema puede deberse a que se está seleccionando un diámetro de filamento incorrecto o a una calibración del extrusor incorrecta en el *firmware*. También puede ser causado por una velocidad de impresión excesiva para la extrusora. Por otro lado la mayoría de las impresoras 3D no tienen forma de controlar la cantidad de plástico que realmente se extrude, por lo que si el problema persiste, se puede solucionar aumentando el flujo de material por encima del 100% en el software.

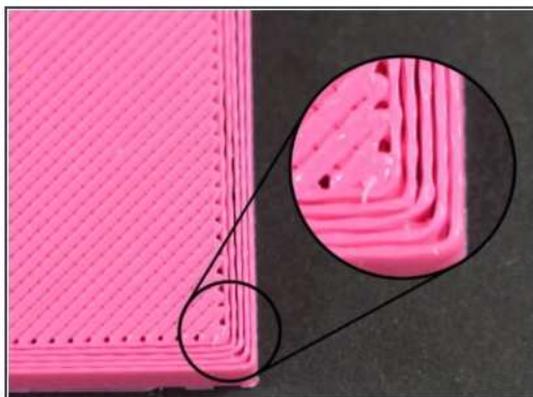


Figura 56. Extrusión insuficiente (Simplify3D, 2017)

- **Extrusión excesiva:** de la misma forma que en el caso anterior, el problema se puede solucionar disminuyendo el flujo de material por debajo del 100% en el software.
- **Extrusión inconsistente e inexacta:** la calidad de impresión se ve afectada cuando la extrusión varía entre diferentes partes de la impresión. Este problema se identifica fácilmente cuando las líneas impresas varían de tamaño. Algunas de las posibles causas son que el carrete o el filamento se hayan enredado y no puedan moverse libremente, que la *boquilla esté obturada*, que se esté utilizando un espesor de capa muy pequeño de forma que el plástico apenas tiene espacio para salir, que el ancho de extrusión esté entre el 100% y el 150% del diámetro de la boquilla, ya que si es muy inferior el flujo de plástico no será constante, que el filamento sea de calidad (una variación de solo 5% en el diámetro de filamento puede variar la anchura del plástico extruido hasta 0,05 mm) y esté en buen estado. Por último el problema puede deberse al agarre de los dientes del tornillo extrusor al filamento; si es deficiente o el ajuste es demasiado flojo reducirá la capacidad del extrusor para controlar con precisión la posición del filamento.
- **Extrusora obstruida:** este problema es muy común debido al pequeño tamaño del orificio de la boquilla. Para solucionarlo se puede calentar la boquilla a la temperatura requerida por el material y empujar manualmente el filamento en la extrusora. También se puede probar a retirar el filamento, cortarlo y volverlo a cargar. Por último, si esto no funciona se pueden utilizar otras soluciones como calentar a 100°C y tirar manualmente el filamento hacia fuera para sacar cualquier residuo que hubiera dentro o utilizar la cuerda E de una guitarra para empujar el material hacia atrás a través de la punta de la boquilla. Si es imposible desobturar la boquilla esta se debe sustituir.
- **Filamento pelado que ya no se mueve:** este problema se debe a que los dientes del engranaje que empujan y tiran del filamento lo han desgarrado, de forma que este ya no se mueve solidariamente con el engranaje. Cuando se produce este problema se puede observar como los engranajes del extrusor se mueven y el filamento permanece quieto, así como la aparición de virutas de plástico. La causa puede ser una velocidad o distancia de retracción excesiva. La temperatura de la extrusora también influye; un aumento de 5-10 C° puede facilitar el flujo del plástico solucionando este problema. Otra solución es reducir la velocidad de impresión, lo que exigirá menor velocidad de movimiento al extrusor. Por último se debe comprobar que no existe obstrucción en la boquilla.
- **Se detiene la impresión sin finalizar la pieza:** esto se puede deber a que a partir de un cierto instante se haya dejado de extrudir material debido a que este se ha agotado, a que el *filamento se haya pelado* o a que el *extrusor esté obstruido*. También se puede haber detenido la impresión debido al calentamiento de alguna parte de la impresora, principalmente el motor de extrusión. Esto se puede solucionar añadiendo un ventilador adicional.
- **Calentamiento excesivo del material impreso:** debido a este problema el material depositado no conserva su forma. Esto puede deberse a un enfriamiento demasiado lento de las capas. Para solucionarlo se debe aumentar la velocidad del ventilador de capa. También se puede bajar la temperatura de impresión (entre 5 y 10 °C) o disminuir la velocidad de impresión, de forma que aumente el tiempo para que la capa anterior se enfríe correctamente antes de intentar depositar la siguiente capa de plástico caliente encima. Por último, si ninguna solución funciona, imprimir dos piezas a la vez puede ser una buena alternativa para disminuir el sobrecalentamiento, ya que la boquilla caliente necesitará moverse a una ubicación diferente para imprimir la segunda pieza, lo que proporciona más tiempo para que la primera se enfríe.

- **Deformación en la base de la pieza (*warping*):** la base de la pieza en contacto con la cama se adhiere bien inicialmente pero más tarde se curva, llegando a despegarse de la plataforma. Este efecto se produce sobretodo en piezas grandes fabricadas con materiales de alta temperatura con el ABS, debido a que el plástico tiende a encogerse al enfriarse. Las soluciones son similares al caso de *mala adherencia a la cama caliente*, utilizar cama caliente, desactivar el ventilador de capa, aislar térmicamente la impresora o utilizar bordes externos (*brim*) para la primera capa.



Figura 57. Deformación en la base de la pieza (*warping*) (Simplify3D, 2017)

- **Esquinas curvadas tras la impresión:** este problema puede deberse al *calentamiento excesivo del material impreso*; el plástico se extruye a alta temperatura, y si no se enfría rápidamente, puede cambiar de forma con el tiempo. Este defecto se puede prevenir enfriando rápidamente cada capa mediante el ventilador de capa de modo que no tenga tiempo para deformarse antes de que se haya solidificado. Si se produce este problema en la primera capa la causa puede ser la *mala adherencia a la cama caliente*.
- **Mala adherencia a la cama caliente:** en estos casos se produce el despegue entre la pieza y el soporte. Puede deberse a que la cama caliente no está bien nivelada y a una distancia adecuada de la posición inicial de la boquilla. Para solucionarlo muchas impresoras incluyen una cama ajustable con varios tornillos que controlan su posición. Además se puede utilizar el desplazamiento global del eje Z en el *G-Code* para realizar ajustes muy finos en la posición inicial de la boquilla. Por ejemplo, introduciendo -0,05 mm para el eje Z, la boquilla se iniciará la impresión de 0,05 mm más cerca de la plataforma. Otra posible causa del despegue puede ser que la primera capa esté imprimiéndose demasiado rápido, de forma que no hay tiempo suficiente para que el plástico se una adecuadamente a la superficie antes de iniciar la siguiente capa. Por otro lado disponer de una cama caliente regulada a la temperatura adecuada (60-70C° PLA, 100-120C° ABS), deshabilitar el ventilador de capa para las primeras capas o aislar la impresora de corrientes de aire y cambios de temperatura ayuda a que las capas iniciales no se enfríen demasiado rápido y así no se despeguen de la superficie de impresión. También tiene gran importancia el material de la superficie, su estado (libre de polvo o grasa) y el uso de cintas adhesivas o lacas (como la laca *Nelly*) ayuda a la adhesión de la primera capa. Por último cuando la superficie inferior de la pieza es demasiado pequeña para adherirse bien, se puede añadir un borde adicional alrededor de la primera capa.
- **Mala calidad de la superficie apoyada en soportes:** para solucionar este problema se puede utilizar un espesor de capa más pequeño, ya que permite dar pasos más pequeños al crear un saliente. Esto provoca que cualquier saliente por encima de 45° requiera soportes cuando use una altura de capa de 0,2 mm, pero no serían necesarios hasta 60° si se reduce la altura de la capa a 0,1 mm. Aumentar el porcentaje de relleno del soporte también permite fabricar

superficies más inclinadas. Si se utiliza demasiado soporte, las estructuras auxiliares pueden comenzar a ligar a la pieza, haciéndolas difíciles de separar. Pero si se proporciona muy poco apoyo, estas estructuras serán fáciles de quitar, pero la pieza puede no tener suficiente base. Para hacer más fácil la separación se pueden seleccionar las capas vacías que se dejan entre las estructuras de soporte y la pieza así como la separación horizontal que permite que los lados del soporte no se unan a las paredes de la pieza. En caso de usar un segundo extrusor con material soluble para los soportes no es necesario dejar estas separaciones.

- **Huecos en las capas superiores:** este problema puede deberse a que no hay suficientes capas sólidas (de borde) que cubran los huecos del relleno. Para solucionarlo se debe aumentar el número de capas de borde, aumentar el espesor del borde o disminuir el espesor de las capas del borde. También puede aumentarse el porcentaje de relleno (por encima del 20%) para reducir este defecto. Por otro lado una *extrusión insuficiente* puede ser también la causa de este problema.
- **Huecos entre relleno y contorno:** debido a que el relleno utiliza un patrón diferente que el contorno, es importante que estas dos secciones se unen de forma sólida. Si se aprecian espacios entre los bordes de relleno esto se puede deber a que el solapamiento del relleno con el contorno es insuficiente (este parámetro se puede modificar en algunos *softwares*). Otra posible causa es una impresión excesivamente rápida; si el relleno se imprime demasiado rápido, no tendrá tiempo suficiente para adherirse al perímetro del contorno. Además esta velocidad excesiva puede dar lugar a una *extrusión insuficiente* que ocasionará dichos huecos.

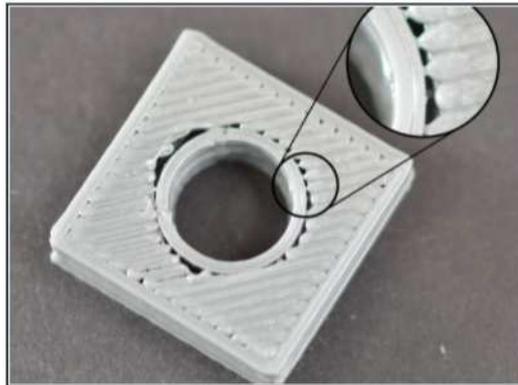


Figura 58. Huecos entre relleno y contorno (Simplify3D, 2017)

- **Huecos en las esquinas de las bases:** se producen principalmente en las esquinas, donde cambia el tamaño de la pieza. Se deben a unos cimientos demasiado débiles en estas zonas. Se puede solucionar aumentando las capas del perímetro exterior o las de las bases superiores, o aumentar el porcentaje de relleno, ya que sirve de soporte para las capas de la base.
- **Huecos en paredes delgadas:** estos problemas se producen al tratar de imprimir paredes solo varias veces mayores que el diámetro de la boquilla. Algunos *softwares* incluyen opciones que permiten rellenar estos huecos. También se puede aumentar la superposición entre el relleno y el contorno. Otra opción es elegir el ancho de extrusión de forma manual para que sea coherente con el ancho de pared (para una pared de 1,0 mm de grosor, podría conseguirse una impresión rápida y fuerte si la boquilla está configurada para crear una extrusión de 0,5 mm).
- **Relleno débil:** si el relleno tiene apariencia débil o fibrosa una forma de solucionarlo puede ser modificar su patrón; las formas en cuadrícula, triangular y de nido de abeja sólido son más consistentes que las rectilíneas o en nido de abeja rápida, con las que se obtienen velocidades

de impresión más rápidas. El problema también puede deberse a una velocidad de impresión excesiva que provoca una *extrusión insuficiente*, ya que el relleno se imprime por defecto más rápido que el resto de partes. Para solucionarlo se debe reducir su velocidad de impresión. También se puede aumentar el ancho de las líneas de relleno, aunque si no se modifica el porcentaje de relleno esto creará líneas más gruesas pero más espaciadas. Por ello una buena solución es aumentar también el porcentaje de relleno.

- **Pequeños detalles no impresos:** este problema se produce si se intentan imprimir detalles de menor tamaño que el diámetro de la boquilla. El software puede eliminar de forma automática estos detalles, pero se puede forzar a que las imprima seleccionando un ancho de extrusión menor que la boquilla, aunque la calidad resultante puede no ser buena. Por tanto si es posible se deben rediseñar las piezas o instalar una boquilla más pequeña.
- **Mala precisión dimensional:** este problema puede ser causado por una mala calibración del firmware, la configuración de la primera capa (la posición inicial de la boquilla tiene gran efecto sobre la altura de las primeras capas), problemas de *sobreextrusión* o *extrusión insuficiente* que modifican el tamaño de las capas. Cuando el error es constante e independiente del tamaño se puede corregir con los parámetros de compensación de cada eje del software. Si el error es proporcional al tamaño de la dimensión (por ejemplo debido a la contracción) se puede establecer factor de escala en el software.
- **Superficie ondulada:** estos patrones ondulados se deben a vibraciones provocadas por la inercia del extrusor en cambios bruscos de dirección. Para solucionarlo se puede reducir la velocidad de impresión o de desplazamiento en vacío o modificar los parámetros de aceleración del firmware. Estas vibraciones también pueden deberse a problemas mecánicos como tronillos flojos o soportes rotos.
- **Capas desalineadas:** la mayoría de las impresoras 3D utilizan un sistema de control de bucle abierto, es decir que no tienen retroalimentación sobre la ubicación real del cabezal, por lo que si hay algún problema en el movimiento (ej. un choque) la impresora no lo detectará y seguirá imprimiendo como si nada hubiera pasado. Algunas causas que pueden provocar distorsión entre la posición teórica y real del cabezal son una velocidad de impresión o desplazamiento en vacío demasiado alta, o una aceleración excesiva (esta se configura en el firmware), mayor de la que los motores pueden proporcionar. También se puede deber una pérdida de tensión en las correas que provoque su deslizamiento o una excesiva tensión que dificulte el movimiento. Otra causa de la pérdida de pasos puede ser un mal anclaje de la polea al motor. Por último se debe comprobar que no existen problemas eléctricos.
- **Mala adherencia entre capas:** estos problemas en la unión de las capas se pueden deber a un espesor de capa demasiado grande en comparación con la boquilla, ya que es necesario que la nueva capa sea presionada contra la inferior para que se produzca una unión consistente. Para ello se debe seleccionar un espesor de capa al menos un 20% más pequeño que el diámetro de la boquilla (0,32mm como máximo para una boquilla de 0,4mm). Este problema también puede deberse a una temperatura demasiado baja de impresión o a un enfriamiento excesivamente rápido de las capas (no usar ventilador de capa). Hay materiales en los que la adhesión entre capas es mala, como es el caso de nylon, en los que ayuda mantenerlos en horno a cierta temperatura antes de la impresión.



Figura 59. Mala unión de las capas (Simplify3D, 2017)

- **Filamentos de plástico entre las partes de la pieza:** este problema se debe a que el plástico escurre fuera de la boquilla mientras el extrusor se está desplazando a un nuevo punto de impresión. Para solucionarlo se debe activar la retracción. La distancia normal de retracción suele comprenderse entre 0,5-2,0 mm y la velocidad entre 1200-6000 mm / min. Una retracción excesiva puede provocar que el filamento se separe del plástico caliente y una velocidad demasiado elevada puede ocasionar el *pelado del filamento*. Otros factores que influyen en este fenómeno son una temperatura excesiva del extrusor (se puede probar a disminuirla entre 5 y 10 °C), movimientos en vacío demasiado largos (este problema puede solucionarse con ciertos *softwares* que permiten acortar dichas trayectorias) o velocidad de movimiento en vacío demasiado lenta.



Figura 60. Filamentos entre las partes de la pieza(Simplify3D, 2017)

- **Gotas en la superficie de la pieza:** estos defectos se producen habitualmente al principio de la impresión de una línea del perímetro o cuando se completa dicha línea debido al plástico que rezuma de la boquilla. El primer caso puede solucionarse ajustando la distancia de retracción y cebado del extrusor, de forma que la distancia que avanza el extrusor al reiniciar la impresión sea ligeramente menor que la distancia que se ha retraído al finalizar la línea anterior. Por ejemplo, si la distancia de retracción es de 1,0 mm, se establece una diferencia de reinicio de -0,02mm, de forma que cada vez que el extrusor tiene que empezar de nuevo extrusión, solo se empuje 0,8 mm plástico de nuevo a la boquilla. En el segundo caso hay que ajustar un parámetro del software que detiene la extrusora un poco antes de que finalice la línea del perímetro para aliviar la presión que se acumula dentro de la boquilla. Por otro lado se debe mantener la retracción en el mínimo valor posible debido a los problemas que puede provocar en el extrusor como el *pelado del filamento*. Una última opción para disimular estos defectos es agrupar los puntos de inicio en una zona en vez de dejar que los elija el software según criterios de velocidad de impresión (si el software proporciona esta posibilidad).

- **Cicatrices en la superficie superior:** estas marcas se producen cuando la boquilla roza con plástico previamente impreso al intentar moverse a una nueva ubicación. Esto puede deberse a una *extrusión excesiva*, que provoca que cada capa sea ligeramente más gruesa de lo previsto. Si esta no es la causa se puede intentar solucionar el problema ajustando la calibración del eje Z o utilizando la configuración de elevación vertical del software; con esta opción se conseguirá que la boquilla suba una distancia establecida por encima de la capa impresa previamente antes de pasar a una nueva ubicación.
- **Líneas en los laterales de la pieza:** las capas laterales deberían parecerán ser una sola superficie lisa, pero en estos casos son claramente identificables, pues aparecen en forma de líneas o cantos en los lados de la pieza. En ocasiones estos defectos aparecen de forma cíclica. Una posible causa es la *extrusión inconsistente* debido a un material de mala calidad; una variación de solo 5% en el diámetro de filamento puede variar la anchura del plástico extruido hasta 0,05 mm, generando una capa más ancha que aparece como una línea lateral. Otra posibilidad es un mal ajuste del control PID que regula la temperatura, ya que variaciones mayores de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura pueden variar de forma significativa la extrusión. Para solucionarlo se debe recalibrar el controlador PID del firmware. Por último puede que el problema se deba a cambios de posición de la cama o problemas con la varilla del eje Z.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta parte del trabajo se van a definir los equipos y procedimientos utilizados para determinar las características mecánicas principales de las piezas fabricadas mediante procesos aditivos.

4.1. Normativa y procedimientos de ensayo para fabricación aditiva

La fabricación de piezas mediante procesos aditivos está sujeta a numerosas variables, que deben ser controladas y optimizadas para poder cumplir unos requisitos tecnológicos.

Por tanto es de vital importancia evaluar la calidad de las piezas y comprobar que cumplen los requisitos específicos, y dado que no es posible realizar pruebas completas de todas las características de las piezas, cuando se formulan sus especificaciones, es fundamental definir la naturaleza y el alcance de los ensayos.

A continuación se van a establecer las pautas para comprobar las características mecánicas a tracción de las piezas fabricadas con estas tecnologías; se va a estudiar la normativa existente así como la literatura científica y artículos de referencia en este campo y se van a proponer métodos y condiciones para realizar este tipo de ensayos.

4.1.1. Normativa de ensayo a tracción para piezas fabricadas con métodos aditivos

A continuación se tratan de definir los posibles procedimientos a utilizar y las características de las probetas para el ensayo a tracción de piezas fabricadas mediante procesos aditivos de material polímero. Para ello se toman como referencia normas y artículos científicos en los que se establezcan métodos de ensayo adecuados para estas piezas.

Un texto que aporta mucha información sobre esta cuestión es el artículo de Aaron M. Forster del NIST (*National Institute of Standards and Technology*) sobre la aplicabilidad de los métodos actuales de la ASTM y la ISO para determinar las propiedades mecánicas y las condiciones de fallo de materiales poliméricos generados a partir de procesos de fabricación aditiva (Forster, 2015).

En el artículo se expone que actualmente existen pocas normas que traten específicamente las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas mediante AM. El comité ASTM F42.01 ha desarrollado una serie de normas y procedimientos centrados en la producción de metales mediante estos procesos. También existe una norma en la que se describe un método para definir requisitos para piezas de plástico creadas usando procesos de fusión en lecho de polvo; la ASTM F3091 / F3091M – 14. Además el subcomité WK 40419 cubre, entre otras materias, la evaluación de los sistemas de fabricación.

El autor también se refiere a la Norma ISO 17296-3: 2014, que cubre los principales aspectos relativos al ensayo de piezas producidas mediante procesos de fabricación aditiva; especifica las principales características de calidad de las piezas y los procedimientos de ensayo apropiados (ISO 17296-3:2014).

En esta parte de la norma se desarrollan los criterios de selección de los métodos de ensayo en función del tipo de requisito de calidad que se pretenda evaluar, el material del que esté compuesto la pieza y lo crítica que sea la función de la misma. Además se establecen unas consideraciones generales sobre las especificaciones, criterios de calidad, seguimiento de los

procesos de fabricación, el tipo de muestras y ensayos adecuados y el alcance y contenido de los acuerdos de ensayo y suministro entre fabricantes, proveedores y usuarios.

En esta norma se indica la norma de ensayo adecuada para las piezas de plástico producidas mediante fabricación aditiva. En concreto, para el ensayo de tracción nos remite a la ISO 527, que establece las condiciones de ensayo para la determinación de las propiedades a tracción de plásticos. Esta norma es adecuada, entre otros materiales y procesos, para el ensayo de plásticos rígidos y semi-rígidos obtenidos por extrusión, el caso más parecido a nuestras piezas (ISO 527-2:2012).

En ella se definen distintos tipos de probeta según el material, así como los métodos adecuados para investigar el comportamiento a tracción de dichas probetas y determinar su resistencia a tracción, módulo de elasticidad y otros aspectos de la relación esfuerzo/deformación en condiciones definidas.

Otra norma a tener en cuenta en fabricación aditiva es la ISO/ASTM 52921-13(ISO/ASTM 52921:2013 (ASTM F2921-13)). En ella se especifica la nomenclatura y términos asociados a los sistemas de coordenadas y metodologías de ensayo para fabricación aditiva (*Additive Manufacturing - AM*) con el objetivo de estandarizar la terminología usada por los distintos usuarios de esta tecnología, sobre todo en lo relacionado con el informe de los resultados de los ensayos (trata de coincidir con la ISO 841, sobre automatización industrial de sistemas, adaptándola a la fabricación aditiva).

Esta norma se centra en la ubicación y orientación de las piezas dentro del volumen de construcción y en la terminología relacionada con las máquinas para fabricación aditiva y sus sistemas de coordenadas.

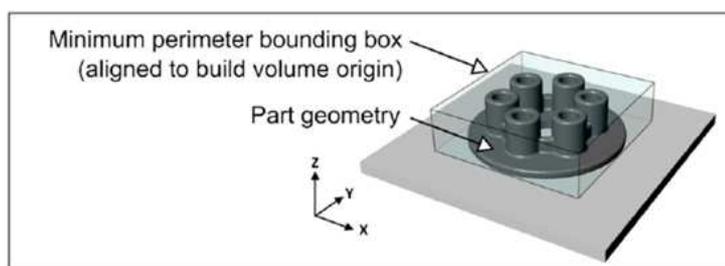


Figura 61. Ubicación y orientación de las piezas en el volumen de construcción (ISO/ASTM 52921:2013)

Además en este texto se hace referencia a dos normas para la fabricación de especímenes para ensayos de piezas producidas mediante fabricación aditiva: la ASTM D638-14(ASTM D638 - 14) y la ISO 527 ya mencionada.

También se menciona la norma ASTM D-400, que proporciona un sistema de clasificación para tabular las propiedades de los materiales plásticos no rellenos, rellenos y reforzados adecuados para su transformación en piezas.

La Norma ASTM D638-14 establece un método de ensayo para la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en forma de probetas estándar en condiciones determinadas (acondicionamiento, temperatura, humedad y velocidad de ensayo).

Mediante este método se pueden obtener datos de propiedades de tracción para el control y la especificación de materiales plásticos, para la caracterización cualitativa y para la investigación y el desarrollo y para propósitos de diseño de ingeniería de plásticos. Este método de ensayo es aplicable para pruebas de materiales de espesor hasta 14 mm.

El problema de todas estas directrices es que se remiten a procedimientos de ensayo en los que no hay consideraciones específicas para AM. La falta de normativa específica para la fabricación aditiva supone un grave problema, ya que hace difícil establecer comparaciones válidas entre máquinas, materiales y modelos que permitan predecir las propiedades de las piezas finales y que hagan posible establecer pautas de diseño válidas.

Las propiedades mecánicas básicas que se requieren para el diseño de piezas tienen que ver con el comportamiento en la zona lineal, caracterizado por los módulos definidos como la tensión dividida entre la deformación en tracción, compresión, etc. Normalmente se suelen reportar el Módulo de Young y el coeficiente de Poisson. En el caso de los polímeros estos parámetros varían con la temperatura y el tiempo. También son relevantes para los procesos de fabricación y diseño los datos que cuantifican el límite de elasticidad, la resistencia final y la resistencia al impacto para diferentes modos de carga (tracción, compresión, flexión...), no obstante estos datos no son suficientes para determinar la resistencia a la fractura de materiales que fallan por propagación de grietas y separación de capas como es el caso de piezas obtenidas por ME. En estos casos es necesario determinar la tenacidad o energía de fractura del material en tres modos (I: apertura de grieta, II: en el plano de cizallamiento y III: fuera del plano de cizallamiento). Por último también se requieren datos de resistencia a la fatiga en el proceso de diseño.

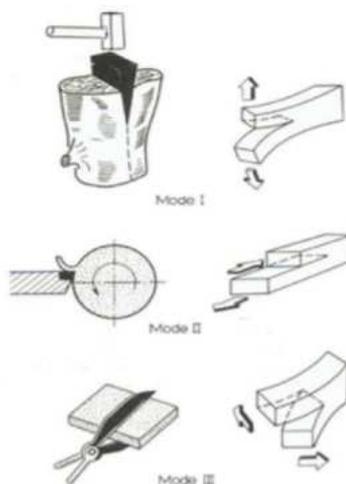


Figura 62. Modos de avance de la fractura entre superficies(Forster, 2015)

En este trabajo se va a realizar el estudio del comportamiento a tracción, proponiendo como líneas futuras abordar otros modos de carga (compresión, flexión, torsión...), incluir la resistencia a la fatiga y estudiar la energía de fractura en los tres modos propuestos.

Una cuestión fundamental que se debe tener en cuenta es el hecho de que los procesos de fabricación aditiva tienen diferencias sustanciales respecto de los tradicionales, lo que provoca que las piezas tengan distintas propiedades mecánicas y que los procedimientos de ensayo tradicionales no siempre sean adecuados para determinar su comportamiento mecánico. Una de las diferencias de los procesos AM respecto al procesamiento tradicional de polímeros estriba en que no todo el material se funde y se homogeniza; al fabricarse por capas, se generan piezas con propiedades anisotrópicas y con tensiones residuales. Por este motivo se requieren métodos estandarizados que permitan relacionar las propiedades del material, las características del proceso y el diseño de la pieza, lo cual supone un gran reto.

A pesar de la importancia de este problema, la literatura disponible en esta área no es muy extensa dado el carácter emergente de algunas de las tecnologías y su rápido desarrollo. Es por ello que en este trabajo se va a tratar de realizar una primera aproximación a la relación entre los parámetros de fabricación y las propiedades de la pieza utilizando las normas existentes (utilizando probetas estandarizadas), proponiendo como línea futura incluir también la influencia de las variables geométricas de diseño de la pieza en las propiedades mecánicas.

En el artículo del NIST se enumeran algunas variables geométricas de la deposición de material en el proceso de extrusión de material que tienen influencia en las propiedades mecánicas de la pieza (Forster, 2015):

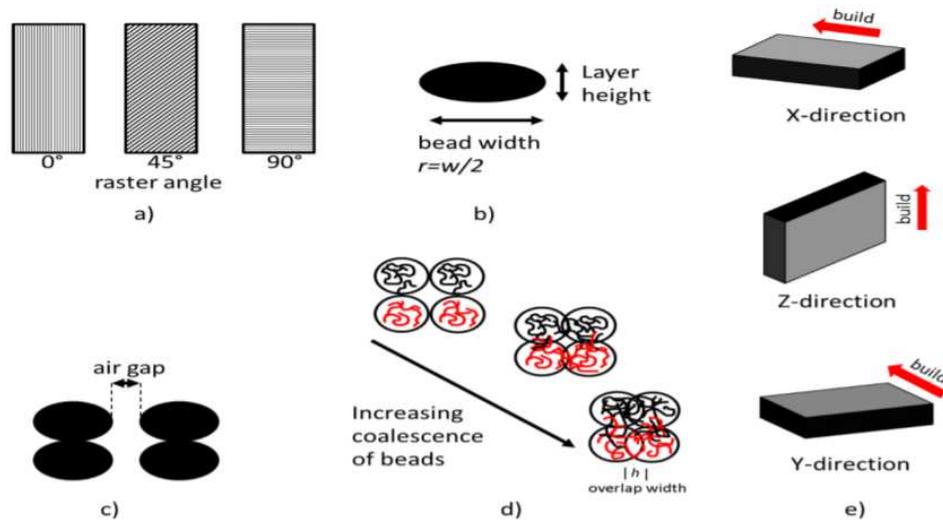


Figura 63. Variables geométricas de la deposición de material en EM (Forster, 2015)

Leyenda

- | | |
|--|---|
| <p>a) <i>Ángulo de la trama</i></p> <p>b) <i>Alto y ancho de la capa</i></p> <p>c) <i>Espacio entre filamentos extruidos</i></p> | <p>d) <i>Combinación de variables (espacio entre filamentos extruidos, anchura y altura de capa o velocidad de deposición) que pueden aumentar la superposición entre filamentos.</i></p> <p>e) <i>Orientación de la pieza en la fabricación que puede afectar a la transferencia de carga entre filamentos e interfaces de capas</i></p> |
|--|---|

Existen algunos trabajos previos que han analizado la influencia de algunos de estos parámetros para ciertos materiales. Muchos de ellos se centran en la influencia del ángulo de trama, ya que es un parámetro del proceso que afecta a la anisotropía y la resistencia de las piezas de forma determinante. Según el estudio de Rodríguez et. al., este parámetro ocasiona variaciones del módulo de Young de entre el 11% y el 37% (Rodríguez, Thomas, & Renaud, 2006). La mayoría de estos trabajos muestran que las piezas son más resistentes cuando las líneas se orientan en la dirección de carga para ensayos de tracción (Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002), (Riddick, Hall, Haile, Wahle, Cole, & S.J., 2012) (Hill & Haghi, 2014) ángulos mixtos para la flexión (Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002) (Bellini & Selcuk, 2003) y ortogonales a la carga en compresión (Materials & Design, 2010). A medida que el ángulo de trama aumenta, las propiedades de tracción del material se reducen (Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002) (Rodríguez, Thomas, & Renaud, 2006) y alcanzan un mínimo entorno a los 50° (Huang & Singamneni, 2014). La resistencia de un material fabricado con AM

siempre es inferior a la del material original o a las piezas obtenidas por inyección, pero con la orientación de las líneas con la carga se puede obtener un 80% de la resistencia de un material inyectado (Masood, Mau, & Song, 2010).

Un estudio que analiza la influencia del patrón y porcentaje de relleno es el de Fernández-Vicente *et. al.* Los resultados obtenidos muestran que la influencia de los diferentes patrones de impresión produce una variación de menos del 5% en la resistencia a la tracción máxima, por lo que el comportamiento es similar. El cambio la densidad de relleno resulta determinante en la resistencia a la tracción; la combinación de un patrón rectilíneo con un relleno del 100% muestra la mayor resistencia a la tracción, con un valor de 36,4 MPa, con una diferencia de menos de 1% con el material en bruto (ABS) (Fernandez-Vicente, Calle, & Conejero, 2016).

En cuanto a la influencia del espacio entre filamentos, la presencia de huecos y esquinas agudas aumenta la tensión dentro de la pieza, lo que puede suponer la causa del fallo (Bellini & Selcuk, 2003). En general, minimizar el espacio entre los filamentos aumenta el área de contacto entre ellos y conduce a un interfaz de fusión más resistente. Los procesos de extrusión de material dependen de los gradientes térmicos entre filamentos contiguos para permitir que los polímeros termoplásticos se difundan y formen una interfaz de fusión sólida; existen varios estudios que tratan de establecer reglas de fabricación relacionadas con la velocidad y temperatura de deposición así como la temperatura de la cámara que permitan obtener uniones más fuertes y así mejorar las propiedades mecánicas.(Materials & Design, 2010)(Sood, Ohda, & Mahapatra, 2012)(Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002).

Estos estudios han puesto de relieve la complicada relación entre los parámetros de construcción, el diseño de las piezas y las propiedades finales, ya que la interacción entre parámetros puede llevar a resultados indeseados. Por ejemplo disminuir el ancho de las líneas extruidas reduce la tensión residual en el filamento y puede aumentar la longitud de difusión, pero requiere más pasadas para crear la pieza, lo que aumenta la tensión residual causada por la contracción del polímero durante el enfriamiento y además los sucesivos cambios de velocidad de la boquilla tienen consecuencias negativas en la difusión(Sood, Ohda, & Mahapatra, 2012). Otro ejemplo de interacción indeseada resulta de maximizar la temperatura y la altura de capa para mejorar las propiedades mecánicas, dado que estos cambios pueden conducir a una distorsión de la pieza y rugosidad de la superficie, que afecta negativamente el aspecto y las propiedades mecánicas

En cuanto a la dirección de fabricación, es difícil aislar su impacto sobre la anisotropía del efecto de otros parámetros de fabricación. Riddick *et al.* combinaron las direcciones xz, yz y xy con varios ángulos de trama (0°, 0° / 90° y 90°) y encontraron que la dirección xz tenía el módulo más alto (2,67 GPa) y la mayor resistencia a tracción (15,26 MPa) (Riddick, Hall, Haile, Wahlde, Cole, & S.J., 2012). Otros autores han comprobado que maximizar la alineación de las capas en dirección de carga lleva a un aumento de la resistencia (Bellini & Selcuk, 2003).

Por otro lado, algo que complica aún más el análisis del comportamiento mecánico de estas piezas es que su fractura es normalmente frágil y debida a fallas inter-laminares facilitadas por defectos en la fabricación que son difíciles de controlar.

En este trabajo se va a analizar la influencia de la altura de capa, el porcentaje de relleno y la orientación del objeto en la fabricación para los polímeros PLA y el ABS. Se propone como línea futura incluir los factores de la dirección de la trama y la velocidad de fabricación, así como la influencia de la combinación de estos factores.

Por último en el artículo del NIST se recopilan los procedimientos existentes para el ensayo de polímeros y se analiza su viabilidad para procesos de fabricación aditiva. Para la caracterización de las propiedades a tracción se indican las normas ya citadas ISO 527 y ASTM D638-14, que según el análisis realizado resultan válidas para procesos aditivos aunque pueden requerir modificaciones como el post-procesamiento de las probetas para cumplir con los requisitos de la norma (acabado superficial o requisitos dimensionales) o tener límites en su aplicabilidad debido a que no se cumplen los requisitos de isotropía material; esto provoca que aunque se puedan aplicar los métodos de medición para materiales isotrópicos, los resultados obtenidos tengan mayor incertidumbre y no se puedan equiparar las propiedades obtenidas para el material con las que tendrá la pieza concreta (Forster, 2015).

4.1.2. Indicaciones para el ensayo a tracción de polímeros según ISO 527 y ASTM D638-14

A continuación se exponen las indicaciones generales de estas normas, que serán las utilizadas en este trabajo para determinar las propiedades a tracción de las piezas fabricadas mediante ME utilizando distintos parámetros de fabricación.

Como se ha explicado, ambas normas tienen el mismo objetivo, pero utilizan distinta metodología. En ambos estándares el principio de ensayo es similar; la probeta se somete a tracción por su eje longitudinal, a velocidad constante hasta que rompe o hasta que el esfuerzo o la deformación alcanzan un valor determinado. Durante este proceso se registran los valores de carga y alargamiento que experimenta la probeta.

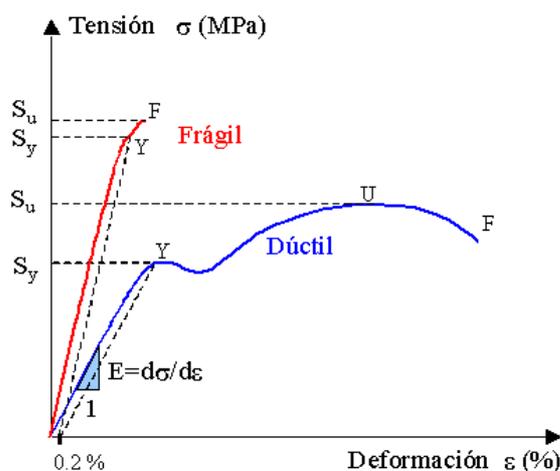


Figura 64. Diagramas tensión-deformación para material frágil y dúctil (Areatecnología, 2015)

Las probetas deben ser normalizadas; los tipos de probetas, su preparación y dimensiones también se establecen en las normas. Además pueden obtenerse mediante diversos procesos.

En ambos documentos se hace hincapié en el control sobre factores como la preparación de la muestra, la velocidad y la temperatura de las pruebas para obtener resultados comparativos precisos, ya que las propiedades de tracción varían en función de dichos elementos.

En cuanto a los aparatos de medida, en la Norma ISO 527 se especifica que la máquina debe ajustarse a las Normas ISO 7500-1 e ISO 9513, debe ser capaz de mantener las velocidades de ensayo establecidas en esta Norma y tener una frecuencia de adquisición de datos (fuerza y deformación) igual o superior a los mínimos establecidos en la norma. Las mordazas deben estar fijadas a la máquina de forma que su línea central del montaje de sujeción coincida con la dirección del alargamiento y el eje principal de la probeta. Además este sistema de sujeción debe

evitar el desplazamiento de la probeta respecto de la mordaza pero sin provocar la rotura o deformación de la misma.

El indicador de fuerza debe ajustarse a la clase 1 según la Norma ISO 7500-1 y el extensómetro de contacto a la clase 1 de la Norma ISO 9513; debe registrar la variación de longitud en cualquier momento del ensayo y sin presentar ningún retardo a la velocidad de ensayo. Para poder medir de forma correcta el módulo de elasticidad en tracción debe ser capaz de medir la variación de la longitud de referencia con una exactitud del 1% del valor pertinente; en el caso de las probetas 1A el requisito de exactitud es de $\pm 1,5\mu\text{m}$. También se pueden usar extensómetros ópticos o galgas extensométricas. En esta Norma se recomienda una longitud de referencia de 75mm pero también es aceptable 50mm, aunque conduce a menor exactitud, especialmente para la determinación del módulo.

Para la medida de las dimensiones de la probeta antes y después del ensayo se deben utilizar equipos que se ajusten a las Normas ISO 16012 e ISO 23529.

En la Norma ASTM D638-14 también se definen los distintos aparatos implicados en el ensayo (Máquina de ensayos, Mordazas, Indicador de Carga, Extensómetro, Micrómetro...) y se establecen distintas consideraciones sobre los mismos:

Las mordazas pueden ser fijas o autoalineantes. Cuando se usan las primeras se debe asegurar que la muestra se inserta y se sujeta de modo que el eje mayor de la probeta sea coincidente con la dirección de tracción a través de la línea central del conjunto de agarre. Se debe evitar el deslizamiento entre probeta y mordaza; con dentados de aproximadamente 2,4 mm y profundidad de aproximadamente 1,6 mm se obtienen resultados satisfactorios para la mayoría de los termoplásticos. También se ofrecen recomendaciones para evitar la rotura de la probeta dentro de la mordaza en caso de que esta se produzca.

Todos estos aparatos no deben exceder el 1% de la deformación longitudinal total entre las dos marcas de calibración de la probeta en ningún momento del ensayo.

El indicador de carga debe tener una precisión del $\pm 1\%$ del valor indicado, o mejor. La exactitud de la máquina de ensayo deberá ser verificada de acuerdo con el método ASTM E4.

Los extensómetros deben seguir la clasificación y calibración establecida en el método ASTM E83. Para medir el módulo de elasticidad se requiere un extensómetro con un error de deformación de 0.0002 mm / mm (Clase B-2 de la E83). Estos requerimientos de precisión se deben a que este parámetro se determina a partir de la pendiente de la porción lineal de la curva tensión-deformación, y dado que para la mayoría de los plásticos esta porción lineal es muy pequeña y se produce muy rápidamente, debe ser registrada con gran precisión. Para mediciones de baja extensión menor del 20%, el mismo extensómetro anterior es aceptable. Para realizar mediciones en elongaciones superiores al 20%, es aceptable un error no superior a +10% del valor medido. En cualquier caso el extensómetro debe cumplir los requisitos de la Clase C de la E83.

Los micrómetros para medir las dimensiones de los especímenes deben ajustarse a los requerimientos del método ASTM D5947.

En cuanto a los especímenes de ensayo, en la segunda parte de la Norma ISO 527 se definen los tipos de probeta, preparación y dimensiones para plásticos rígidos y semi-rígidos obtenidos por extrusión e inyección.

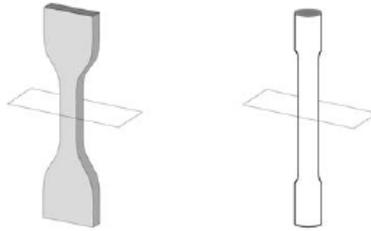


Figura 65. Probetas Normalizadas en forma de haltera y cilíndrica(ISO/ASTM 52921:2013 (ASTM F2921-13))

En esta Norma se presentan varios tipos de probeta y se recomienda utilizar las de tipo 1A y 1B cuyas dimensiones se proporcionan en este mismo texto. Las del primer tipo se usan preferentemente para inyección y las segundas para mecanizado. Estas probetas son similares a las probetas universales de las normas ISO 3167 e ISO 20753.

Por lo tanto, siguiendo esta Norma, el espécimen más adecuado para los ensayos que se van a desarrollar en este trabajo es la de tipo 1A (figura 66); estas probetas tienen forma de haltera con una longitud total de 170 mm, una sección central de 10 mm de ancho, 4 mm de espesor y 80 mm de longitud.

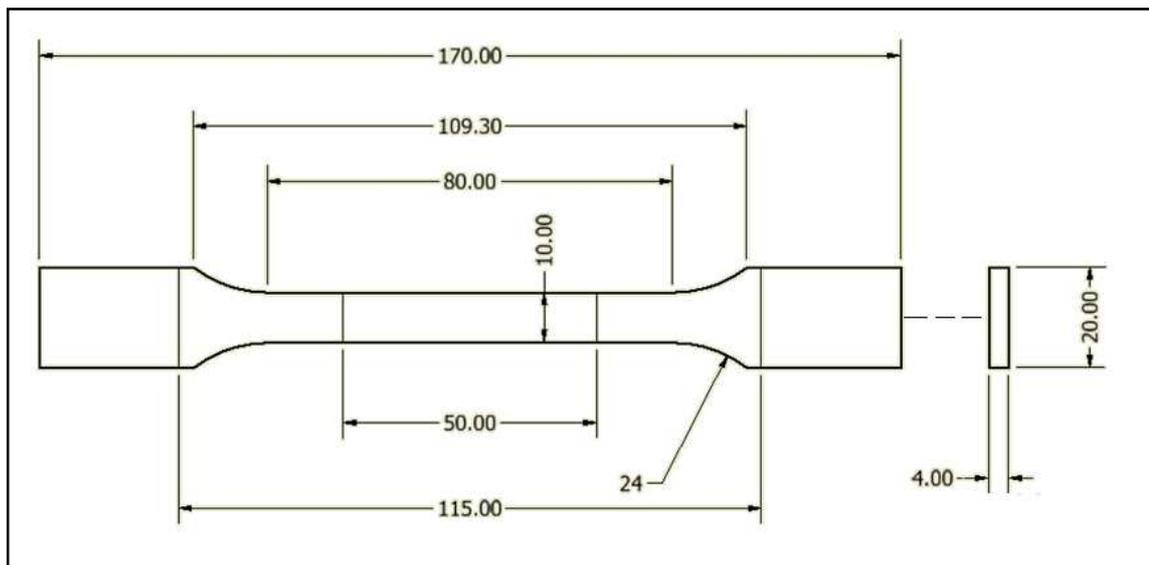


Figura 66. Probeta tipo 1A de acuerdo con la Norma ISO 527-2

También se establecen probetas miniaturizadas para casos de número elevado de especímenes y espacio limitado (ej. expuestas a radiación), como las de tipo C de la Norma 20753 o las de tipo 1BA, 1BB, 5 A o 5B, que son las recomendadas en caso de que por cualquier razón no se pudieran usar las de tipo 1A y 1B. En estos casos habrá que ajustar la velocidad de ensayo según especifica esta Norma, seleccionando el valor normalizado que más se ajuste al 1% de deformación por minuto.

En cuanto a su preparación, se establece que las probetas deben moldearse por compresión o inyección conforme a las norma ISO 293, ISO 294-1, ISO 295 o ISO 10724 o mecanizarse según la Norma ISO 2818, aunque según lo indicado en la ISO 17296-3: 2014, estas probetas también son adecuadas para el ensayo de materiales obtenidos mediante fabricación aditiva.

Se debe establecer un control estricto de las condiciones de preparación. Las probetas deben estar exentas de defectos superficiales y rebabas. Deben presentar superficies planas o de curvatura mínima y paralelas y estar libres de torsión. Se deben inspeccionar visualmente y

medirse con calibres micrométricos con puntas que permitan medir desde la posición adecuada. Las probetas que no cumplan estos requisitos deben ser rechazadas o si son sometidas a ensayo, se deben especificar los motivos. Para probetas obtenidas por inyección son aceptables diferencias de espesor de hasta 0,1mm entre el centro y los bordes. En el caso de ser fabricadas por extrusión, la anisotropía procedente del proceso debido a la orientación por flujo puede evaluarse mediante la producción de probetas paralela y perpendicularmente a la dirección del flujo del proceso de moldeo(ISO 527-2:2012).

Las longitudes de referencia vienen definidas también por esta norma para cada probeta (en general es preferible 75mm pero también es válida una longitud de 50mm, mientras que para probetas miniaturizadas se especifican longitudes menores). Las marcas no deben dañar la pieza, deben equidistar del centro con una precisión de ± 1 mm y deben medirse con precisión superior al 1%.

Deben ensayarse al menos 5 probetas. El número será superior si se requiere una precisión mayor (ver Norma 2602 sobre intervalos de confianza). Se deben repetir ensayos en los que la probeta rompa o deslice dentro de la mordaza pero no se deben excluir resultados dispersos por ninguna otra razón.

En la norma ASTM D638-14 también se definen varios tipos de especímenes de ensayo para plásticos rígidos y semirrígidos de diferentes espesores. El de tipo I, de espesor máximo de 7 mm, es el indicado en general.

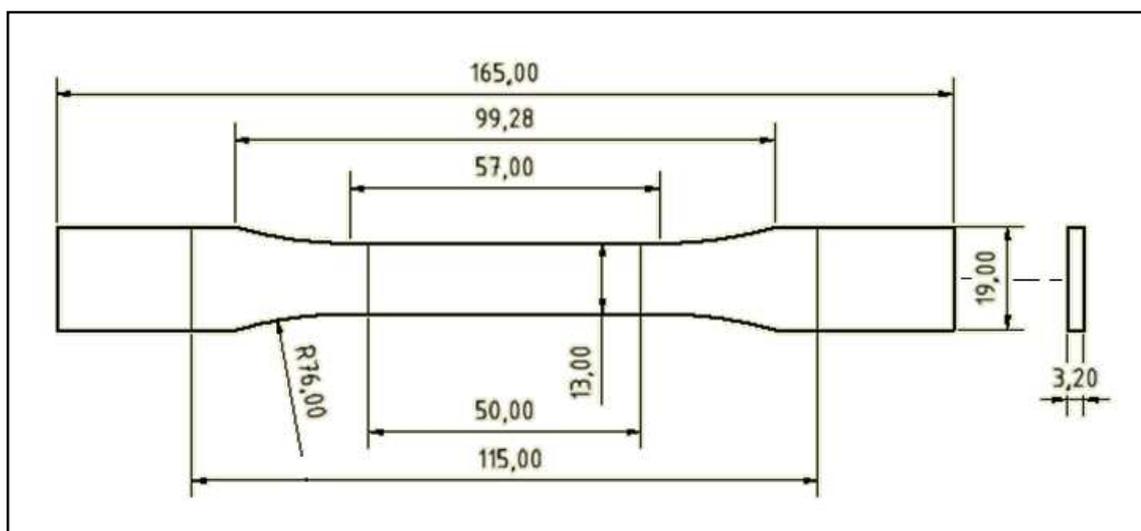


Figura 67. Probeta tipo I de acuerdo con la Norma ASTM D638-14

Se recomienda un segundo tipo (II) para los casos en los que la probeta no rompa por la sección estrecha. El tipo V, de 4mm de espesor máximo, se recomienda cuando existe limitación de material o deben exponerse gran número de especímenes en un pequeño espacio. Para comparaciones entre plásticos con grandes diferencias de rigidez se emplea el tipo IV. Para materiales más gruesos con espesores de entre 7 y 14 mm se emplea el tipo III. El espesor recomendado para piezas fabricadas por moldeo y para cualquier tipo de proceso para las probetas I y II es de 3.2 ± 0.4 mm. Como se ha indicado para plásticos no rígidos se empleará el tipo IV o el III en caso de presentar más de 7 mm de espesor. Por último para materiales reforzados se recomienda utilizar el tipo I. También se incluyen las dimensiones de probeta adecuada para ensayar barras y tubos.

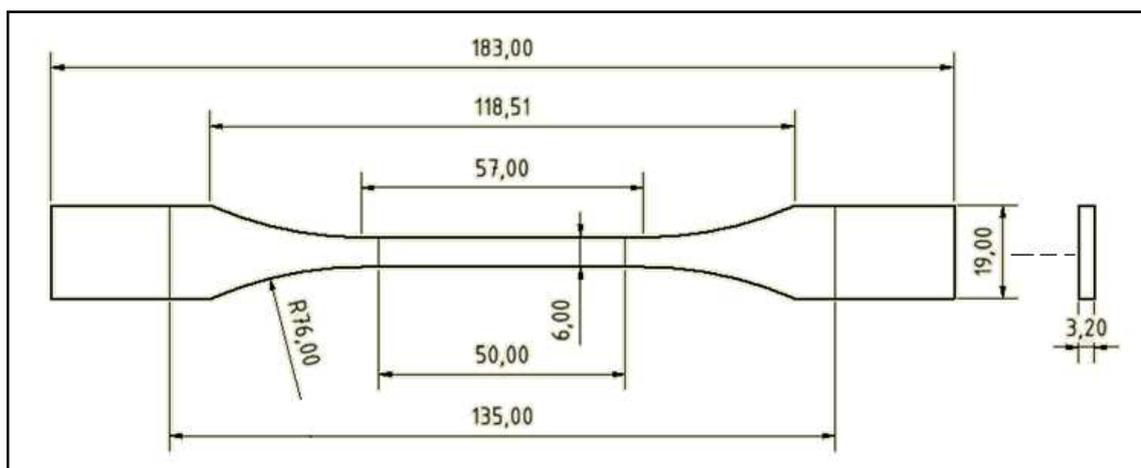


Figura 68. Probeta tipo II de acuerdo con la Norma ASTM D638-14

En cuanto a los métodos de preparación de las probetas se incluyen el moldeo por inyección y procesos de mecanizado o corte, a partir de materiales en forma de chapa o placa.

Se especifica que todas las superficies deben estar libres de defectos visibles, arañazos o imperfecciones. Si se colocan marcas de calibración en la muestra debe hacerse con cera o tinta que no afecte al material. Para casos sospechosos de anisotropía se prepararán conjuntos duplicados de especímenes de ensayo, disponiendo los ejes mayores paralelos y normales a la dirección sospechada de anisotropía en cada conjunto.

En cuanto al número de muestras, en el caso de materiales isotrópicos, se deben probar al menos cinco probetas para cada caso y cinco ejemplares, normales y paralelos al eje principal de la anisotropía en el caso de materiales anisotrópicos. Se deben desechar las muestras que se rompan por alguna falla, o que rompan fuera de la sección transversal estrecha.

Las normas también fijan pautas para el acondicionamiento de las muestras; la norma ISO establece un periodo de acondicionamiento de al menos 16 h en las condiciones fijadas por la norma ISO 291. En general se recomienda una atmósfera de $23 \pm 2^\circ$ y $50 \pm 10\%$ de humedad.

La norma ASTM establece que el acondicionamiento de las probetas (temperatura, humedad y tiempo de acondicionamiento) debe seguir la norma ASTM D618. En ambas normas se establece que los ensayos se deben realizar en las mismas condiciones que el acondicionamiento.

En la Norma ISO se definen los siguientes pasos para el procedimiento de ensayo:

- En primer lugar se determinan las dimensiones de la probeta según la Norma ISO 16012 o ISO 2329; se registran los valores mínimos y máximos para la anchura y espesor de cada probeta en el centro y al menos a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y se comprueba que están dentro de la tolerancia de la normativa de ensayo. Se utilizan las medias para calcular la sección transversal
- A continuación se fija la probeta en las mordazas alineando su eje longitudinal con el eje de la máquina de ensayo. Se aprietan las mordazas para evitar el deslizamiento de la probeta pero sin provocar su aplastamiento. Se puede aplicar un esfuerzo de precarga para evitar la zona inicial irregular en el diagrama de deformación. Este esfuerzo no debe ser muy grande; sus valores límite se establecen en esta Norma.
- El siguiente paso consiste en montar el extensómetro calibrado a la longitud de referencia de la probeta de forma simétrica respecto al medio de la parte paralela y

sobre la línea central de la probeta. Para medir el coeficiente de Poisson se utiliza otro extensómetro en dirección transversal.

- Después se fija la velocidad de ensayo, que debe ser de 1mm/min, lo que corresponde aproximadamente al 1% de deformación longitudinal por minuto para estas probetas. Se puede variar después del punto de fluencia o utilizar distintas probetas para distintas velocidades para determinar el módulo de elasticidad en tracción.
- Por último, se registra la fuerza, el incremento de longitud de referencia y la distancia entre mordazas (3 entradas de datos).

En la norma de la ASTM se estipula un procedimiento similar al de la ISO. También comienza con la medición de las probetas. Se determina la anchura y el espesor en el centro y a 5 mm de cada extremo de la longitud de calibrado de cada muestra, ajustando a los 0,025 mm más cercanos, usando los métodos de ensayo aplicables de la Norma D5947. Además se establecen algunas indicaciones específicas para la medición de piezas producidas por inyección, de láminas delgadas y para probetas cilíndricas o tubulares.

El siguiente paso es la colocación de las probetas en la máquina de ensayo, igual que se especificaba en la norma anterior, se debe tener cuidado de alinear el eje longitudinal del espécimen y las mordazas con la línea imaginaria que une los puntos de fijación de las mordazas a la máquina. En la Norma se especifica la distancia entre los extremos de las superficies de agarre. Se deben fijar de forma uniforme y firme para evitar el deslizamiento de la muestra durante la prueba, pero evitando aplastarla y a continuación se fija el extensómetro,

Por último se establece la velocidad de ensayo y se pone en marcha la máquina. La velocidad de ensayo se define como la velocidad relativa de movimiento de las mordazas durante la prueba. Para controlar con precisión esta velocidad la máquina debe disponer de un sistema de control con realimentación. Se puede utilizar la velocidad relativa de las mordazas en vacío (control sin realimentación) si se puede demostrar que la velocidad de ensayo resultante está dentro de los límites de variación permitidos por esta norma. Para el valor de la velocidad se recomienda utilizar el valor más bajo adecuado a la geometría utilizada, según la tabla proporcionada por esta norma, que ocasione la rotura en un tiempo de prueba de 0,5 a 5 minutos. Para probetas de tipo I se deben seleccionar los valores 5, 50 o 500 mm/min. De ellos el menor, 5mm/min, es el que en el caso de los materiales que se van a ensayar provoca la rotura en un tiempo comprendido entre 0,5 y 5 minutos, por lo que es el valor que se debería seleccionar.

Se debe registrar la curva de carga-alargamiento, así como la carga y el alargamiento en el límite de elasticidad (si existe) y en la rotura.

En estas normas también se reflejan las pautas a seguir para el cálculo de resultados del ensayo como la resistencia a la tracción, porcentaje de deformación, desplazamiento entre mordazas, módulo de elasticidad...

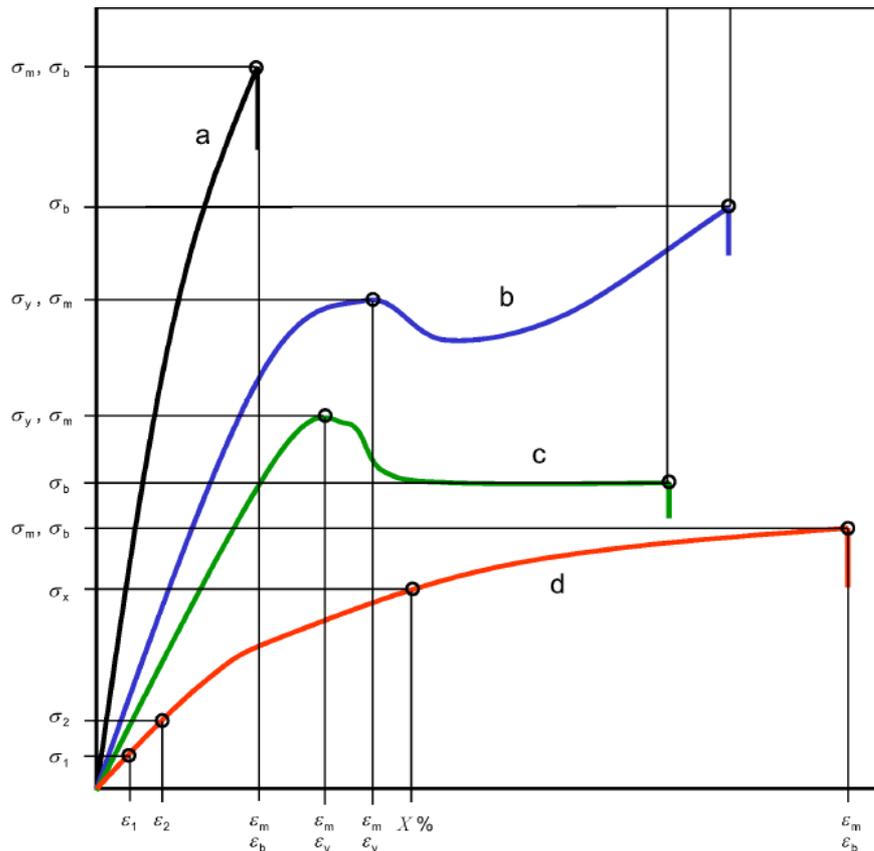


Figura 69. Curvas Tensión-Deformación para distintos comportamientos de materiales (ISO 527-2:2012)

Leyenda

- | | |
|---|---|
| a) <i>Material Frágil que rompe con bajas deformaciones</i> | c) <i>Material con zona Elástica y zona Plástica sin endurecimiento por deformación</i> |
| b) <i>Material con zona Elástica y zona Plástica con endurecimiento por deformación</i> | d) <i>Material Elástico que rompe con deformaciones muy elevadas</i> |

El esfuerzo σ es la fuerza perpendicular por unidad de superficie de la sección transversal inicial en la longitud de referencia. Se deben calcular los valores del esfuerzo de fluencia σ_y , resistencia máxima σ_m y esfuerzo en el punto de rotura σ_b , así como el esfuerzo a un % dado de la deformación σ_x si procede. Estos esfuerzos se calculan dividiendo la fuerza medida en el punto considerado entre el área inicial de la sección estrecha.

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

La resistencia máxima a la tracción se calcula como el esfuerzo del primer máximo local observado en el ensayo. El resultado se debe expresar en MPa.

La deformación ϵ es el incremento de la longitud por unidad de longitud inicial de la longitud de referencia. Esta variación de la longitud de referencia se mide con un extensómetro.

En los materiales en los que predomina una distribución homogénea de las deformaciones en la sección paralela de la probeta se calculan estas deformaciones en los puntos de fluencia ϵ_y , rotura ϵ_b y resistencia máxima ϵ_m . El punto de fluencia se da en la primera ocasión en la que se

produce un incremento de deformación sin un incremento de esfuerzo, mientras que la deformación en el punto de rotura es la deformación en el último punto registrado antes de que el esfuerzo se reduzca un 10% respecto del máximo si se produce la rotura antes que la fluencia.

El cálculo de las deformaciones se realiza con la siguiente fórmula y el resultado se expresa como una relación adimensional en porcentaje:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

Los valores de la deformación determinados mediante un extensómetro están promediados sobre la longitud de referencia. Esto es válido cuando la deformación dentro de la longitud de referencia es homogénea y por tanto los datos recogidos son cuantitativamente relevantes y apropiados para el diseño de ingeniería. No obstante, cuando se produce una deformación no uniforme, como sucede en casos de adelgazamiento del material, las deformaciones medidas con el extensómetro dependerán de la posición de la zona de estrechamiento y es más apropiado utilizar la deformación nominal ε_t para describir la evolución de la deformación tras el punto de fluencia o durante todo el ensayo en caso de que no se use extensómetro.

La deformación nominal ε_t es la variación en la longitud entre mordazas respecto a la separación de original de las mismas expresada como un porcentaje. Según lo estipulado en la Norma ASTM D638-14, la máquina de ensayo debe cumplir lo especificado en el apartado 5.1.7 para poder tomar esta medida. Estos valores son de utilidad cualitativa solamente. Se calcula mediante la siguiente fórmula, donde L_t es el incremento de la distancia entre mordazas y L la longitud inicial de la parte de la probeta entre mordazas.

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L}$$

El módulo de elasticidad a tracción E_t , según la Norma ISO527, se calcula como la pendiente de la curva esfuerzo deformación $\sigma(\varepsilon)$ en el intervalo de deformación comprendido entre $\varepsilon_1=0,05\%$ y $\varepsilon_2=0,25\%$.

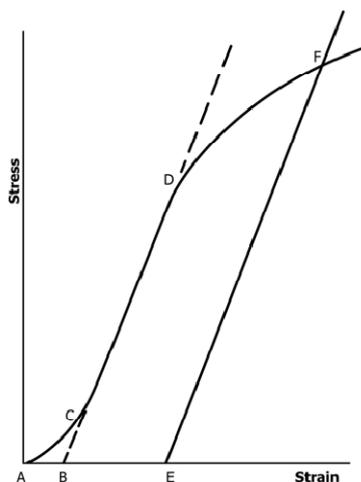


Figura 70. Cálculo del módulo de elasticidad a tracción. (ASTM D638 - 14)

Para obtenerlo se pueden tomar los valores de tensión y deformación correspondientes al 0,05% y al 0,25% de deformación y calcular la TVM:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

También se puede obtener la pendiente de una recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados al intervalo de deformación comprendido entre 0,05% y 0,025%.

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

En la Norma ASTM se indica que para materiales sin región lineal se debe calcular el módulo secante como la pendiente de la recta B'G'.

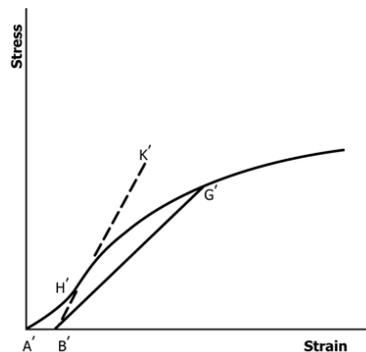


Figura 71. Cálculo del módulo de elasticidad a tracción para materiales sin región lineal (ASTM D638 - 14)

El coeficiente de Poisson (ν), según la Norma ISO 527, se define en la norma como la relación negativa entre el incremento de la deformación $\Delta\varepsilon_n$ en uno de los dos ejes perpendiculares a la dirección de alargamiento y del incremento de deformación correspondiente $\Delta\varepsilon_1$ en la dirección de alargamiento, en la parte lineal de la curva de deformación longitudinal en función de la deformación normal. Para calcularlo se determina la pendiente de la curva de la variación de la anchura en función de la variación de la longitud de referencia $\Delta n/\Delta L_0$ calculada mediante un análisis de regresión lineal de mínimos cuadrados entre dos límites dentro de la zona lineal. La ecuación es la siguiente, siendo L la longitud de referencia y n la anchura:

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta\varepsilon_1} = -\frac{L_0}{n_0} \frac{\Delta n}{\Delta L_0}$$

Se deben calcular las medias aritméticas de los resultados obtenidos en toda la serie de probetas (usualmente 5) y, si se requiere, las desviaciones típicas y los intervalos de confianza al 95% según lo establecido en la Norma ISO 2602.

En la Norma ASTM se indica la fórmula para la desviación típica:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n-1)}$$

Los esfuerzos y el módulo de elasticidad se calculan en MPa con tres cifras significativas y las deformaciones y el coeficiente de Poisson solo con dos.

Por último en las Normas se especifican los datos del ensayo que se deben reportar (condiciones del ensayo, número de probetas, velocidad de ensayo, resultados de los ensayos...).

En la siguiente tabla se incluyen otras Normas para propiedades mecánicas de plásticos obtenidos mediante AM indicadas en la ISO 17296-3 (ISO 17296-3:2014).

Dureza	ISO 2039 ISO 868
Resistencia a la tracción	ISO 527-(1-5)
Resistencia al impacto	ISO 179-(1-2) (charpy) ISO 180 (izod)
Resistencia a la compresión	ISO 604
Resistencia a la flexión	ISO 178
Resistencia a la fatiga	ISO 13003 ISO 15850
Fluencia	ISO 899-(1-2)
Envejecimiento	ISO 4892-(1-4)
Coefficiente de fricción	ISO 6601
Resistencia a la cortadura	ISO 14129
Extensión de grieta	ISO 15850

4.2. Equipo y procedimientos de fabricación aditiva utilizados

4.2.1. Impresora 3D Prusa Mendel i3. Descripción y funcionamiento

El equipo de fabricación aditiva que se va a utilizar es la impresora Prusa I3 Aluminum, similar a la Prusa I3 Steel, que ya se ha mencionado en este trabajo (sección 3.2.2).

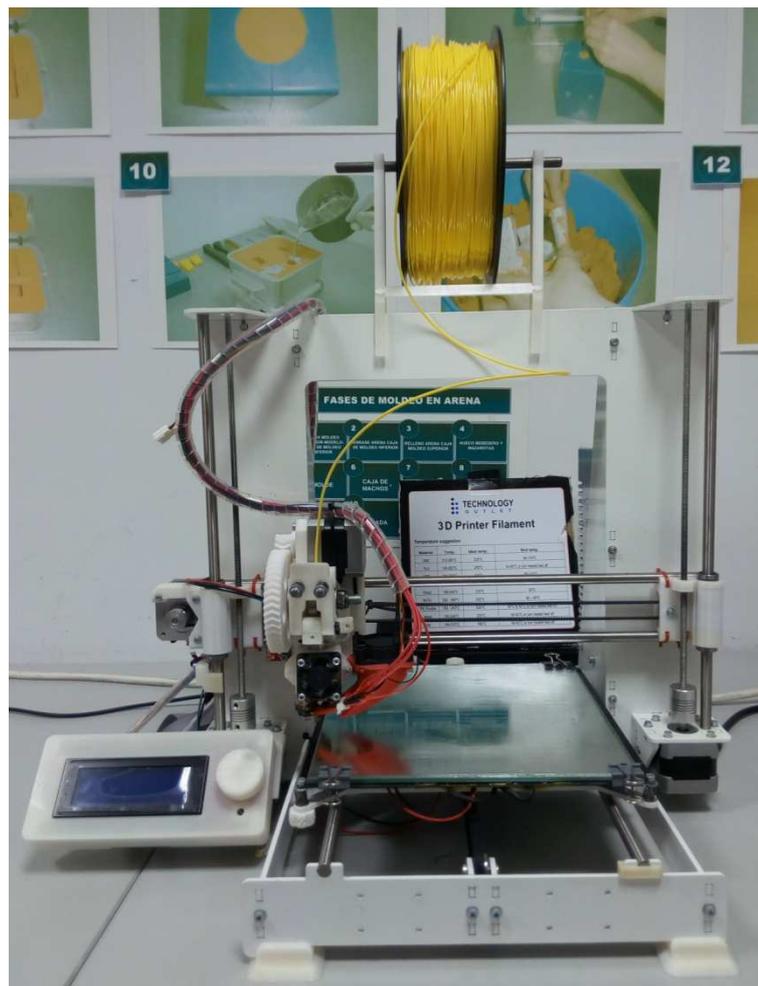


Figura 72. Imagen de la impresora Prusa i3 utilizada en este trabajo

Esta impresora usa la tecnología FFF (sección 3.2.1) y está basada en el Proyecto RepRap (sección 3.2.2). Consta de elementos mecánicos (cremalleras, varillas roscadas, poleas, rodamientos, engranajes...), estructurales (acoples imprimibles, marco de aluminio, tornillos, etc), de un extrusor con un mecanismo para tirar del filamento termoplástico (*Cold End*) y un sistema para calentarlo (*Hot End*) y de elementos electrónicos que permiten controlar la impresora (procesador Arduino, circuito RAMPS, finales de carrera, servomotores, drivers de los motores, plataforma calefactada, relés...).

Además lleva instalado en la memoria interna de la placa Arduino el *firmware* Marlin, que interpreta las instrucciones *G-code* y las transforma en movimientos de los motores y control de las fuentes de calor. Por último, para crear la geometría que se va a imprimir se requiere usar programas CAD y para convertir dicha geometría (en formato .STL) se utiliza un software fileteador (Cura en este caso) que divide el sólido en capas, permita fijar los parámetros de impresión y genere el *G-code* que será interpretado por la impresora.

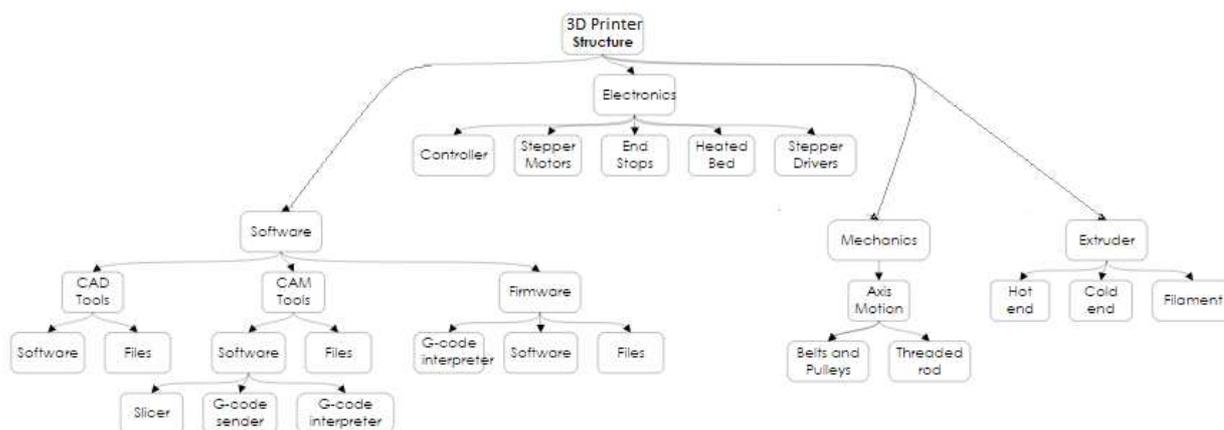


Figura 73. Elementos de una impresora 3D RepRap (Rep-Rap Project, 2017)

Características técnicas (Ballesteros-García, 2015):

- Dimensiones del equipo: 460(x) x 370(y) x 510(z sin rollo) mm.
- Área máxima de impresión: 215(x) x 210(y) x 180(z) mm. (aunque se limita a 200x200x180 para no exceder los límites de la placa de cristal).
- Fuente de alimentación con transformador 220 AC - 12 DC 100W y cartucho calefactor DC 12V 40W.
- *Firmware* Marlin, conexión USB, lector de SD y pantalla LCD.
- Utiliza filamento de 1,75 mm.
- Boquilla de 0,4 mm de diámetro.
- Imprime en PLA, ABS y PETG entre otros materiales.
- Resolución, es decir capacidad de posicionamiento, de 0,1 mm. Por tanto este es el menor espesor de capa que se puede imprimir.
- Velocidad máxima de impresión: 80mm/s (está limitada a 70 mm/s en el firmware). Su velocidad máxima de translación es de 120mm/s.

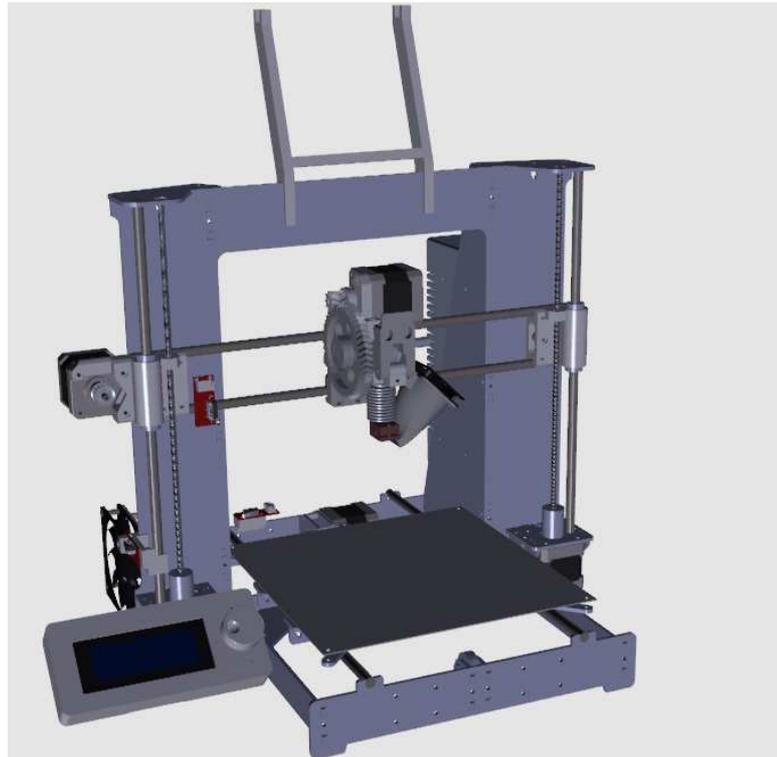


Figura 74. Modelo CAD de la impresora Prusa i3

La lista de sus elementos es la siguiente:



Figura 75. Piezas de una impresora Prusa i3 (Kitprinter3d, 2016)

- Piezas imprimibles: son principalmente soportes, acoples para los ejes y piezas del extrusor (*Cold End*). Estas piezas pueden ser impresas con un equipo similar al que se está construyendo, algo de gran importancia ya que con estos equipos se busca la autorreplicación.



Figura 76. Piezas impresas de una impresora 3D(Kitprinter3d, 2016)

- Estructura de aluminio: es similar a la de la Prusa Steel i3 pero más ligera. Está realizada mediante corte por láser.

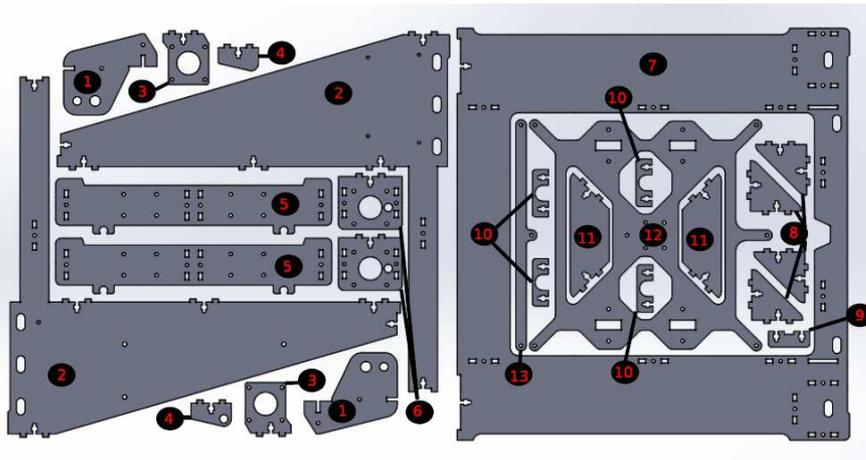


Figura 77. Estructura de aluminio de la Prusa i3(Ballesteros-García, 2015)

- Finales de carrera: la impresora lleva tres finales de carrera, uno por cada eje. Estos dispositivos informan al control de la impresora de cuando el cabezal ha alcanzado el origen de cada eje.

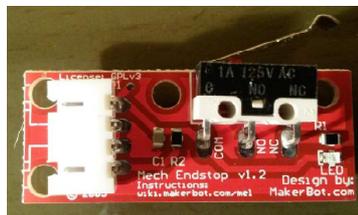


Figura 78. Final de carrera

- Termistores para el *Hot End* y la *Heat Bed*: estas resistencias sensibles a la temperatura permiten registrar el valor de la temperatura en el cabezal extrusor y en la plataforma calefactada, de forma que pueda ser controlada.



Figura 79. Termistor (Ballesteros-García, 2015)

- Motores paso a paso: se utilizan seis motores paso a paso *Nema17 Stepper Motor* 1,2 A a 2 V con un par de 40N·cm. Se requiere dos para mover el eje Z, uno para el eje Y, otro para el eje X y un último motor para el extrusor.



Figura 80. Motor Nema 17 (Ballesteros-García, 2015)

- Ventiladores para el cabezal, para la electrónica y de capa: el ventilador del cabezal va montado en el *Hot End* y tiene la función de enfriar la parte del mismo que sube hacia el *Cold End*. El ventilador de capa también va montado en el cabezal extrusor y su función es enfriar el plástico que se acaba de depositar para que la capa siguiente pueda formarse sobre él.
- Relé: este relé permite controlar la temperatura de la plataforma caliente.
- Fuente de alimentación *Input AC 220V Output DC 12V 30 A*.
- *Hot End* (Cabezal extrusor) (Bloque *E3D Full Metal V5* + Cartucho calefactor 12V/40W): el bloque calefactor lleva montado un cartucho calefactor cerámico y soporta hasta 300°C. Además incluye un termistor para medir la temperatura y permitir su control preciso. El cabezal tiene también un disipador y un ventilador para enfriar la parte del filamento más cercana al *Cold End*. Por último, esta parte del equipo termina en una boquilla de 0,4mm.



Figura 81. Termistor(Ballesteros-García, 2015)

- *Cold End* (Cabezal extrusor): esta parte del cabezal extrusor es la que permite tirar del filamento e introducirlo a presión en el *Hot End*. Consiste en un tornillo dentado que gira accionado por un motor paso a paso y una reductora.



Figura 82. Tornillo dentado (*Hobbed Bolt*) (Ballesteros-García, 2015)

Para presionar el filamento contra el tornillo se utiliza un rodamiento que se puede retirar mediante dos tornillos con muelles cuando es necesario cambiar el filamento.

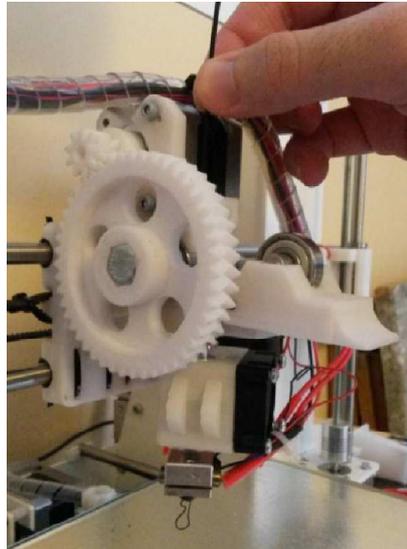


Figura 83. Montaje del filamento en el extrusor

El conjunto completo del cabezal extrusor se muestra en la imagen:

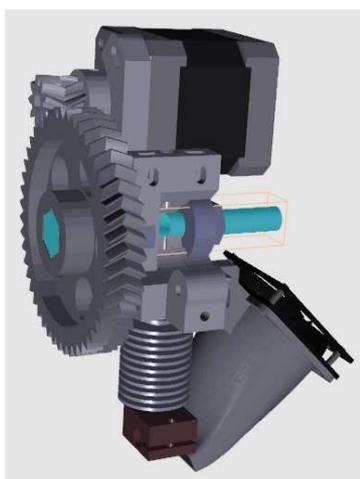


Figura 84. Imagen CAD del extrusor

- Plataforma calefactada para la primera capa (*Heat Bed*): esta superficie calefactada facilita la adherencia de la primera capa a la placa de cristal que se coloca sobre ella. Soporta temperaturas de 150 °C, más que suficiente para imprimir con ABS sin problemas. Se monta sobre la plataforma mediante tres tornillos y muelles que permiten regular su altura.



Figura 85. Plataforma calefactada (*Heat Bed*)(Ballesteros-García, 2015)

- Base de impresión de cristal de 200x200 sujeta con clips.

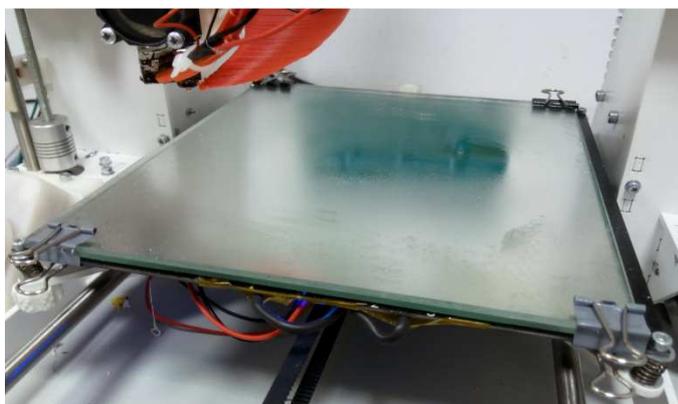


Figura 86. Base de impresión

- Rodamientos: se utilizan rodamientos lineales LM8UU para permitir el desplazamiento de los carros de los ejes y rodamientos axiales de bolas B623ZZ para los extremos de las correas de los ejes X e Y y para empujar el filamento contra el tornillo dentado del extrusor.
- Correas, poleas y acoples: se utilizan correas GT2 de 5mm de ancho. Sirven como mecanismo de transmisión entre los motores paso a paso y la base y el carro sobre el que va montado el cabezal extrusor. Permiten convertir el giro de los motores en desplazamiento lineal de los ejes X e Y. Además se utilizan acoplamientos flexibles para las varillas roscadas del eje Z



Figura 87. Acoples y elementos de transmisión (Rep-Rap Project, 2017)

- Varillas roscadas y lisas: las varillas roscadas de M5 funcionan como tornillos sin fin que permiten convertir el giro de los motores en un desplazamiento vertical del eje Z. Las varillas lisas son de métrica 8 y tienen fines estructurales
- Tornillos, tuercas y arandelas.
- Electrónica (Arduino Mega 2560 + RAMPS 1.4 + Drivers para motores A4988): la placa Arduino es el “cerebro” de la impresora. Lleva montada la placa RAMPS que sirve como interfaz entre la placa Arduino y el hardware de la impresora.

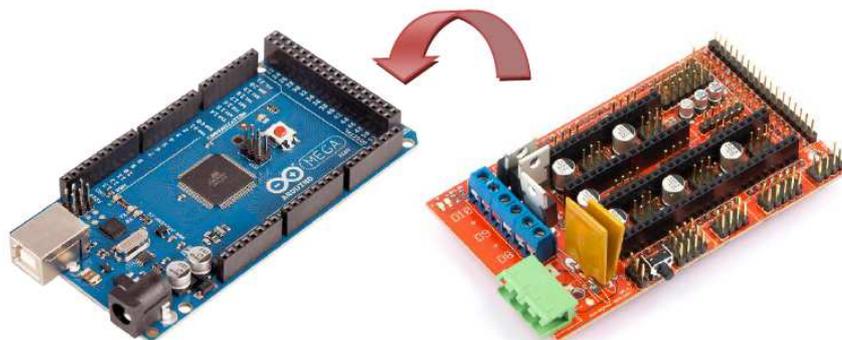


Figura 88. Placa Arduino e interfaz RAMPS 1.4 (Rep-Rap Project, 2017)

- Smart LCD con lector de SD: mediante esta pantalla se pueden realizar impresiones de forma autónoma cargando el *G-code* mediante una tarjeta SD. Además mediante una rueda se puede navegar por el menú y seleccionar opciones de temperatura o mover los ejes.



Figura 89. Pantalla LCD (Ballesteros-García, 2015)

- *Firmware* (Marlin): es el programa instalado en la memoria de la placa Arduino que permite controlar la impresora y convertir las instrucciones del *G-code* en movimientos de los motores y generación de calor en las resistencias.

Conexiones:

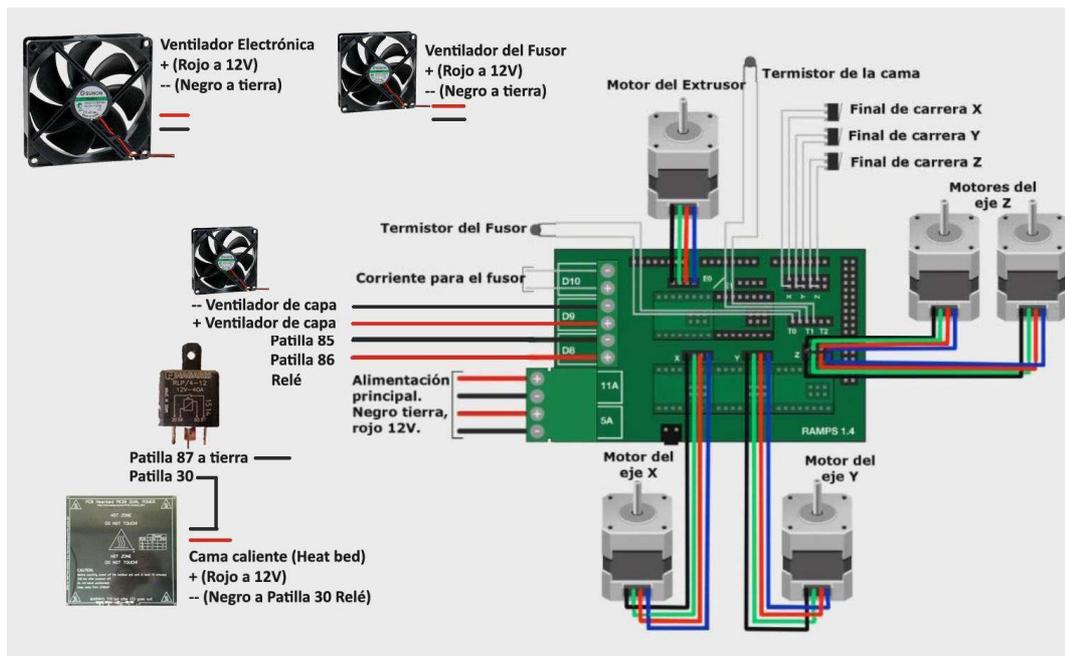


Figura 90. Conexiones de los elementos de la impresora (Rep-Rap Project, 2017)

El funcionamiento del equipo se basa en el movimiento de los motores paso a paso que desplazan el cabezal extrusor hasta la posición indicada y hacen girar el mecanismo extrusor para depositar la cantidad de material necesaria siguiendo las instrucciones establecidas en el *G-code*.

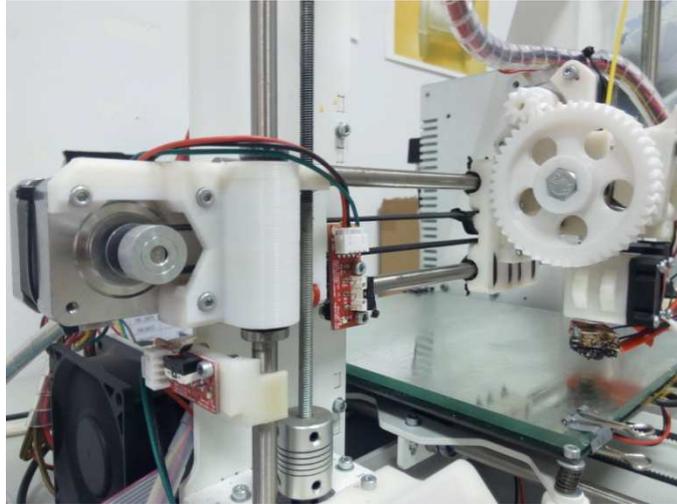


Figura 91. Carro del cabezal extrusor

Además una resistencia eléctrica calienta el filamento hasta fundirlo para que pueda ser extruido y permite mantener la *Heat Bed* a una temperatura elevada para que la primera capa se adhiera a la base de cristal. Estas resistencias se activan y desactivan mediante transistores MOSFET de la placa RAMPS (la del fusor) y mediante un relé (la de la *Heat Bed*). Por último los ventiladores enfrían tanto la parte del filamento que sale del *Cold End*, para que permanezca en estado sólido y pueda ser presionado hacia el fusor, como la capa de material que se está depositando, para que solidifique y se pueda depositar la siguiente encima.

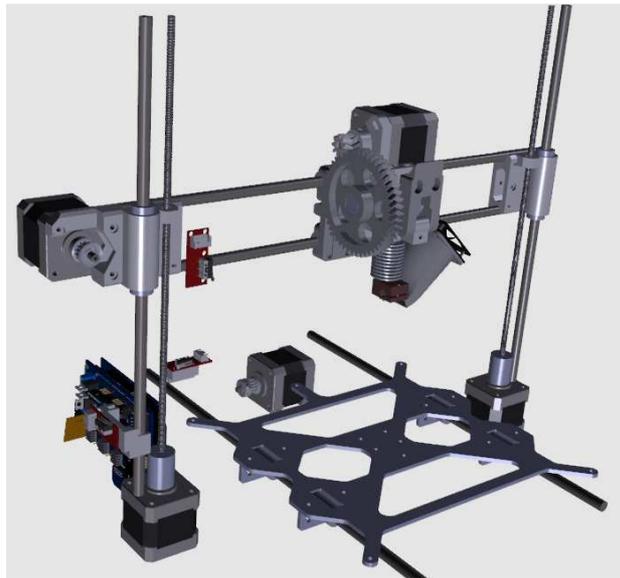


Figura 92. Elementos básicos de la impresora Prusa i3

Estas órdenes de control provienen de la placa Arduino, que funciona como “cerebro” de la impresora. Esta placa se conecta al resto de los componentes a través de la placa RAMPS y lleva instalado el firmware Marlin que traduce el *G-code* con la información sobre trayectorias y extrusión en órdenes para los motores, resistencias y ventiladores.

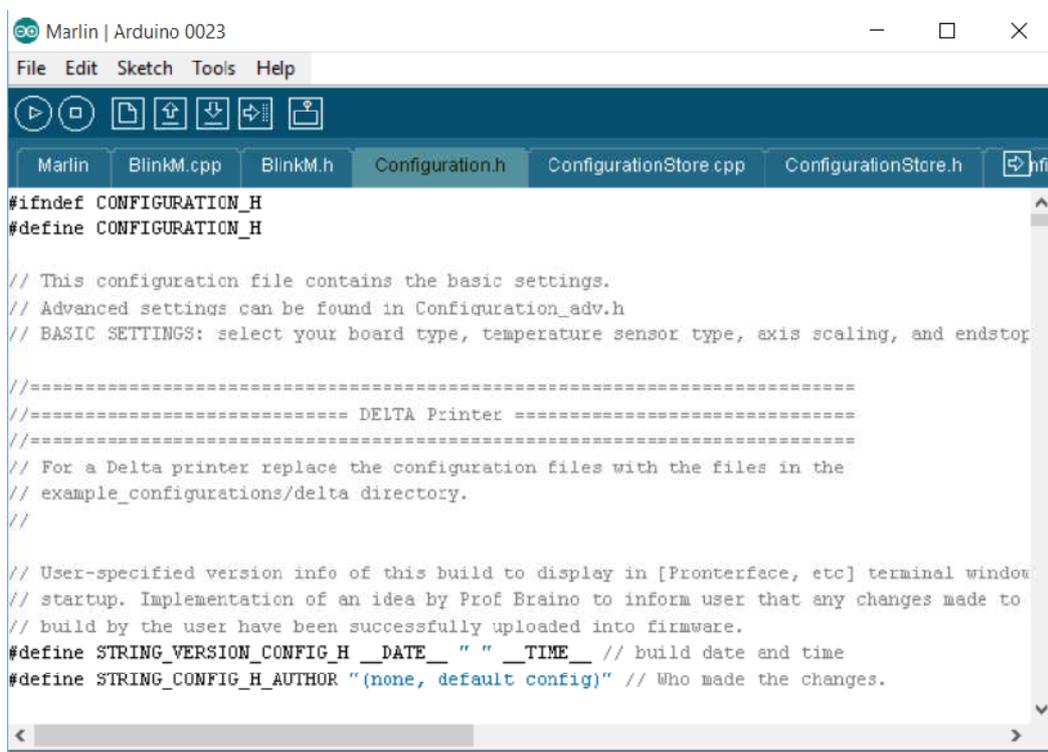
Por otro lado la placa recibe información de los finales de carrera y los termistores, que le permiten conocer la posición y temperatura del proceso y ajustar las órdenes de control que se envían a los dispositivos según la lógica y los parámetros establecidos en el *firmware* Marlin.

4.2.2. Calibración y ajustes del *firmware* Marlin/Sprinter

Como se ha explicado el *firmware* contiene la lógica que permite traducir las instrucciones del *G-code* generadas a partir de la geometría de la pieza en órdenes de control para los motores, resistencias y ventiladores.

Este equipo utiliza el *firmware* Marlin, que se instala en la memoria interna de la placa Arduino, pero antes de cargar este programa en la placa es necesario ajustar los parámetros de configuración y calibración para que el equipo funcione correctamente.

Para ello se conecta la placa al ordenador mediante el puerto serial-USB, se abre el software de Arduino y se abre en él el programa Marlin, que se puede descargar gratuitamente de GitHub (GitHub, 2015). Una vez realizados estos pasos se fijan los parámetros de configuración referidos al tipo de placa, número de extrusores, calibración de los ejes, control de la temperatura, etc. y se carga el *firmware* en la placa (StaticBoards, 2016).

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "Marlin | Arduino 0023". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for running, saving, and other functions. The main workspace shows several tabs: "Marlin", "BlinkM.cpp", "BlinkM.h", "Configuration.h", "ConfigurationStore.cpp", and "ConfigurationStore.h". The "Configuration.h" tab is active, displaying the following code:

```
#ifndef CONFIGURATION_H
#define CONFIGURATION_H

// This configuration file contains the basic settings.
// Advanced settings can be found in Configuration_adv.h
// BASIC SETTINGS: select your board type, temperature sensor type, axis scaling, and endstop

//=====
//===== DELTA Printer =====
//=====
// For a Delta printer replace the configuration files with the files in the
// example_configurations/delta directory.
//
//
// User-specified version info of this build to display in [Pronterface, etc] terminal window
// startup. Implementation of an idea by Prof Braino to inform user that any changes made to
// build by the user have been successfully uploaded into firmware.
#define STRING_VERSION_CONFIG_H __DATE__ " " __TIME__ // build date and time
#define STRING_CONFIG_H_AUTHOR "(none, default config)" // Who made the changes.
```

Figura 93. Configuración de Marlin

Para realizar comprobaciones sobre el funcionamiento de la impresora con los parámetros introducidos, se puede cargar el *firmware* en la placa y conectar el equipo al *software-host* Pronterface, que permite enviar órdenes de movimiento o calentamiento a la impresora.

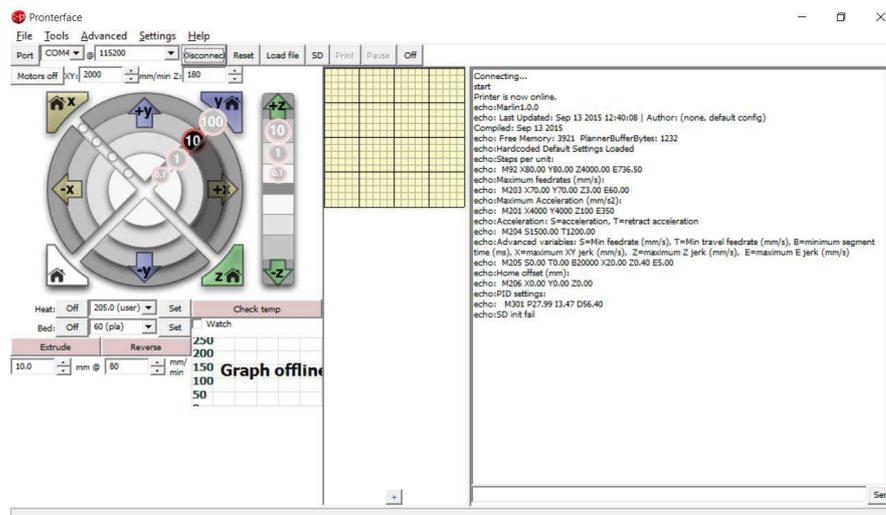


Figura 94. Interfaz Pronterface

Entre las opciones de configuración se encuentran los parámetros que definen las temperaturas máximas del *Hot End* y de la *Heat Bed*. Como el fusor del equipo es de tipo “*All-Metal*” se fija una temperatura máxima de 285°C ya que el fabricante recomienda no pasar de los 300°C. Para la plataforma se fija un límite de 150°C.

```
// This feature exists to protect your hotend from overheating accidentally
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 285
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150
```

Figura 95. Opciones de temperatura de Marlin

Otro elemento que se debe configurar es el PID del *Hot End* y de la *Heat Bed*. Para calibrar el PID es necesario establecer los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa Kp, Ki y Kd. Estos valores se obtienen conectando la impresora con software host Pronterface, que cuenta con una utilidad que permite establecer los valores óptimos para dichas constantes. Para controlar la temperatura de la plataforma, no se utiliza el PID del firmware, sino que se emplea un relé. Debido a esto hay que cambiar la el valor de MAX_BED_POWER y ponerle 256. Con esto se evita que el relé cambie de estado muchas veces por minuto, haciendo que pueda “estropearse” antes de lo debido.

```

// PID settings:
// Comment the following line to disable PID and enable bang-bang.
#define PIDTEMP
#define BANG_MAX 255 // limits current to nozzle while in bang-bang mode; 255=full current
#define PID_MAX 255 // limits current to nozzle while PID is active (see PID_FUNCTIONAL_RANGE)
#ifdef PIDTEMP
  //#define PID_DEBUG // Sends debug data to the serial port.
  //#define PID_OPENLOOP 1 // Puts PID in open loop. M104/M140 sets the output power from 0 to 1
  #define PID_FUNCTIONAL_RANGE 10 // If the temperature difference between the target temperature and the current temperature
  // is more than PID_FUNCTIONAL_RANGE then the PID will be disabled until it reaches the target temperature
  #define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 255 //limit for the integral term
  #define K1 0.95 //smoothing factor within the PID
  #define PID_dT ((OVERSAMPLING * 8.0)/(F_CPU / 64.0 / 256.0)) //sampling period of the temperature

// If you are using a pre-configured hotend then you can use one of the value sets by uncommenting the line below
// Ultimaker
  #define DEFAULT_Kp 27.99
  #define DEFAULT_Ki 3.47
  #define DEFAULT_Kd 56.40

```

Figura 96. Opciones de regulación PID de la temperatura de Marlin

En cuanto a los límites de impresión se establece 200x200x170 mm.

```

// Travel limits after homing
#define X_MAX_POS 200
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MAX_POS 200
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MAX_POS 170
#define Z_MIN_POS 0

```

Figura 97. Definición de límites de impresión

A continuación se establecen los parámetros de calibración de cada eje, la parte más crítica de la configuración, ya que marcará la precisión dimensional de las piezas realizadas.

Para llevar a cabo dicha calibración se deben fijar los valores de los pasos de los motores por unidad de longitud. En concreto son cuatro valores que corresponden a los ejes X, Y y Z y al extrusor(E).

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80, 80, 4000, 736.5}
```

Para seleccionar los valores adecuados se ordena a la impresora desplazarse una distancia determinada en un eje y se mide la distancia real que avanza. A partir de estos datos, usando una regla de tres con el valor establecido por defecto en el programa, se puede obtener el valor correcto para el eje considerado. Se recomienda poner el mismo valor en los ejes X e Y para obtener círculos perfectos. La calibración del extrusor se realiza sin el *HotEnd* instalado; se ordena extruir una longitud de filamento y se mide lo que ha avanzado el filamento realmente. Una vez establecidos unos parámetros de calibración aproximados se imprime un cubo de calibración de 20mmx20mmx10mm, se miden sus dimensiones reales y con estos datos se afina la calibración si es necesario.

Por último, se debe determinar la velocidad máxima a la que se moverán el cabezal y la plataforma de la impresora (mm/s), así como los valores de aceleración máxima (mm/s²).

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {70, 70, 3, 60}
```

```
// default settings

#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,4000,736.5} // default steps per unit for Ultimaker
// #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {78.7402,78.7402,200.0*8/3,760*1.1} // default steps per unit for Prusa i3
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {70, 70, 3, 60} // (mm/sec)
// #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {30, 30, 5, 45} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {4000,4000,100,350} // X, Y, Z, E maximum start speed acceleration
// #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {9000,9000,100,10000} // X, Y, Z, E maximum start speed acceleration

#define DEFAULT_ACCELERATION 1500 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for Prusa i3
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 1200 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for Prusa i3
```

Figura 98. Opciones de calibración, velocidad y aceleración de Marlin

4.2.3. Procedimiento de impresión. Uso del software Cura

El procedimiento de impresión implica una serie de pasos que incluyen ajustes y comprobaciones de la impresora, la creación de la geometría de la pieza mediante programas CAD y la descomposición en capas de la geometría, selección de los parámetros de impresión y generación del *G-code* mediante un software de impresión 3D (ver sección 3.2.4), en este caso Cura.

El primer paso que se debe llevar a cabo antes de la primera impresión es la nivelación y ajuste de la superficie de impresión y del carro del cabezal. Además es recomendable comprobar que la nivelación de la plataforma sigue siendo correcta cada cierto tiempo.

La nivelación del carro del cabezal extrusor se lleva a cabo mediante un nivel o un metro y la altura de sus extremos se regula mediante las tuercas que sostienen el carro sobre las varillas roscadas del eje Z.



Figura 99. Nivelación del carro del cabezal extrusor (Trainnova, 2016)

Una vez realizado este paso se debe nivelar la plataforma de construcción. Para ello se utilizan los tres tornillos con muelles sobre los que se apoya dicha plataforma. La forma más sencilla de realizar la nivelación es mover el cabezal (usando el control de la pantalla LCD) hasta la posición de cada tornillo y ajustar la altura roscándolo o desroscándolo de modo que la

boquilla toque la base en la posición $Z=0,00$ mm. Se debe repetir varias veces este proceso para asegurar que la base está totalmente plana y a una distancia adecuada.

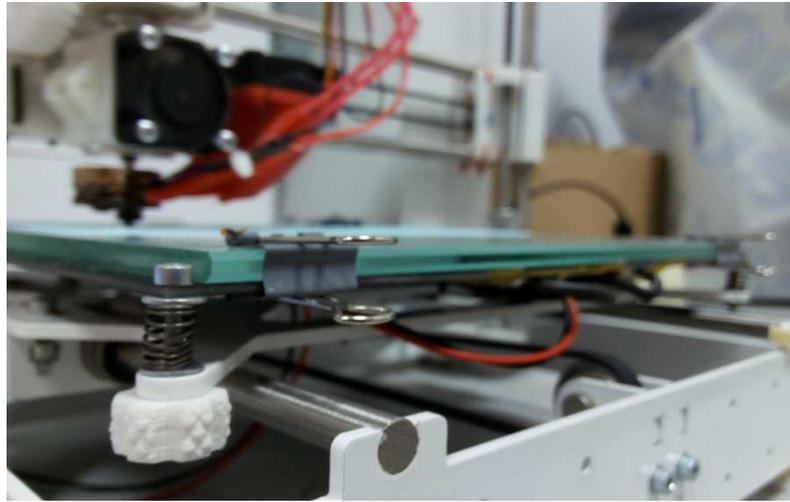


Figura 100. Tornillos que permiten nivelar la base

Un defecto en la planitud ocasiona problemas de mala adherencia a la base y curvado de la base inferior. En función de la distancia inicial se conseguirán distintos acabados de la base y se modificará la adherencia de la misma; una distancia insuficiente (Z inicial $< 0,00$ mm) ocasionará mala calidad de la base inferior, medidas mayores de las esperadas en el eje Z y mala adherencia y curvado de la base inferior de la pieza, mientras que si se fija un juego negativo entre la boquilla y la plataforma (Z inicial $> 0,00$ mm) se conseguirá buena adherencia (incluso excesiva para materiales como PLA o PETG) y un aspecto pulido de la base, pero las medidas en Z serán menores de lo esperado e incluso, si se fija un apriete excesivo (Z inicial $< - 0,60$ mm), se pueden tener problemas debidos a que no se extruye material al comienzo. Se han obtenido buenos resultados estableciendo una distancia inicial de la boquilla tal que roce la base en $Z = 0,02$ mm y la toque totalmente en $Z = 0,00$ mm.

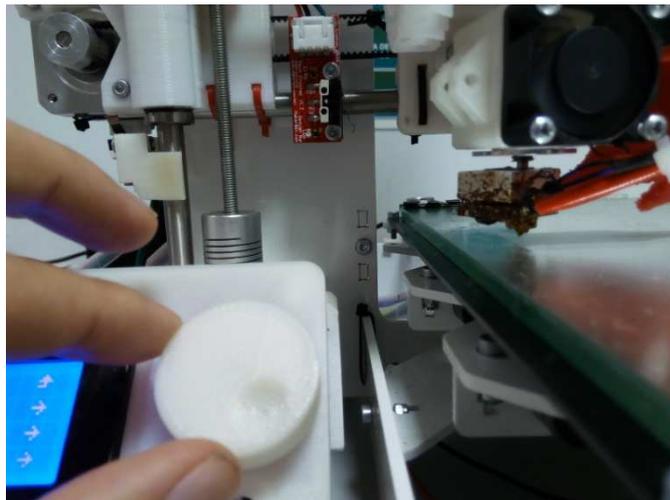


Figura 101. Control de la altura y nivelación de la base mediante la pantalla LCD

Una vez realizadas estas comprobaciones y ajustes iniciales se abre el programa Cura y se realizan los siguientes pasos:

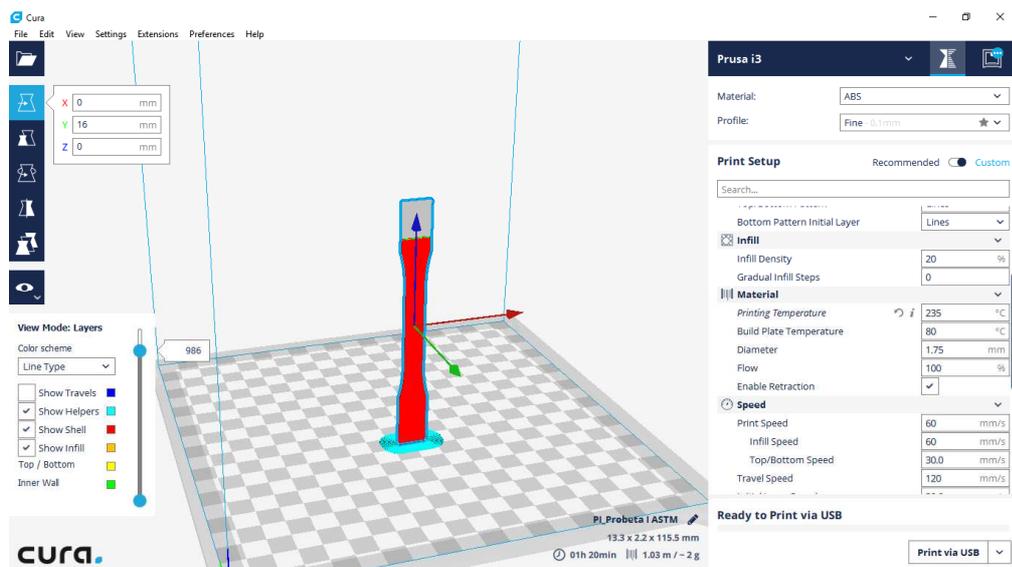


Figura 102. Interfaz del programa Cura

1. Cargar el archivo en formato .stl. (“Load model file” del menú “File”).
2. Escalar/rotar el modelo hasta que esté adecuadamente posicionado en la plataforma de impresión.
3. Especificar los parámetros necesarios para realizar la impresión. Estos se agrupan en las categorías Máquina, Calidad, Bordes, Relleno, Material, Velocidad impresión/desplazamiento, Enfriamiento, Soporte y Adhesión a la plataforma. Los parámetros básicos que se deben fijar son: tipo de máquina, tipo de material, diámetro del filamento, diámetro de la boquilla, altura de capa, altura de capa inicial, espesor de la pared y bases, densidad de relleno, temperatura de extrusión, temperatura de la plataforma, porcentaje de flujo, retracción, velocidad de impresión (pared, bases relleno y desplazamientos en vacío), flujo del ventilador de capa, opciones de plataforma de adhesión y opciones del soporte estructural.
4. A continuación se enciende la impresora y se conecta mediante USB al ordenador, de forma que el programa Cura la reconozca.
5. Se coloca el cristal/espejo en la cama caliente y se sujeta con los clips de sujeción.
6. Es recomendable, como se ha explicado anteriormente, comprobar la nivelación y altura de la plataforma antes de cada impresión.
7. Se rocía el cristal con laca para favorecer la adhesión de la pieza en las primeras capas. Esto es especialmente importante para materiales como el ABS.
8. El siguiente paso consiste en colocar el filamento dentro del extrusor. Para ello se aflojan los dos tornillos que sujetan el guía del filamento y se calienta el fusor a la temperatura necesaria (usando el control mediante la pantalla LCD). Para el PLA se fijan 200°C y para el ABS 235 °C. A continuación se introduce el filamento por el carro extrusor y se empuja hasta que salga por la punta del fusor. Por último se vuelven a apretar los tornillos de forma que el rodamiento presione el filamento contra el tornillo extrusor.



Figura 103. Filamento introducido en el extrusor

9. Una vez realizados todos estos ajustes se selecciona "Print via USB" en Cura, con lo que comienza la impresión.

10. Antes de retirar la pieza se debe esperar hasta que se enfríe un poco el cristal. Es recomendable utilizar una espátula para separarla del cristal con mayor facilidad.

4.3. Equipo utilizado para el ensayo de materiales poliméricos

4.3.1. Descripción del equipo. Máquina HOYTOM HM-D.

El equipo de ensayo que se va a utilizar es la máquina HOYTOM modelo HM-D-100 kN.



Figura 104. Máquina HOYTOM modelo HM-D

Las características técnicas especificadas por el fabricante son las siguientes:

HOYTOM Modelo HM-D					
Capacidad de carga	10 kN	20 kN	50 kN	100 kN	200 kN
Recorrido husillo	1000mm Motorizado			1500mm Motorizado	
Capacidad entre amarres	1000mm Sin Mordazas			1500mm Sin Mordazas	
Columnas	2				
Husillos a bolas	2				
Luz entre columnas	430mm.			475 mm.	
Velocidades controladas	0.1-500mm/min.				
Transductor de fuerzas Tracción/Compresión					
Capacidad	1.000 kp	2.000 kp	5.000 kp	10.000 kp	20.000 kp
Capacidad sobre-carga	150%.				
Linealidad	0,02%.				
Precisión en fuerzas	Clase 0,5 desde el 5% f.e.				
Transductor recorridos Encoder Incremental					
Resolución	0.005 mm. en todo el recorrido.				
Precisión en recorrido	Mejor del 0,2%.				
Transductor velocidades Dinamo Tacométrica					
Precisión en velocidad	0,5% de la lectura.				
Placa Base Ranurada					
	Opción con tres ranuras				
Dimensiones (mm)	1700 alto x 1065 ancho x 550 ..	1850 alto x1100 ancho x550 ..	2630 alto x1200 ancho x700 ..	2700 alto x1200 ancho x700 ..	
Alimentación	220 V Monofásico			380 V Trifásico	
Consumo	400 VA.			500 VA.	

Las partes de las que consta el Bastidor de la máquina son las siguientes:

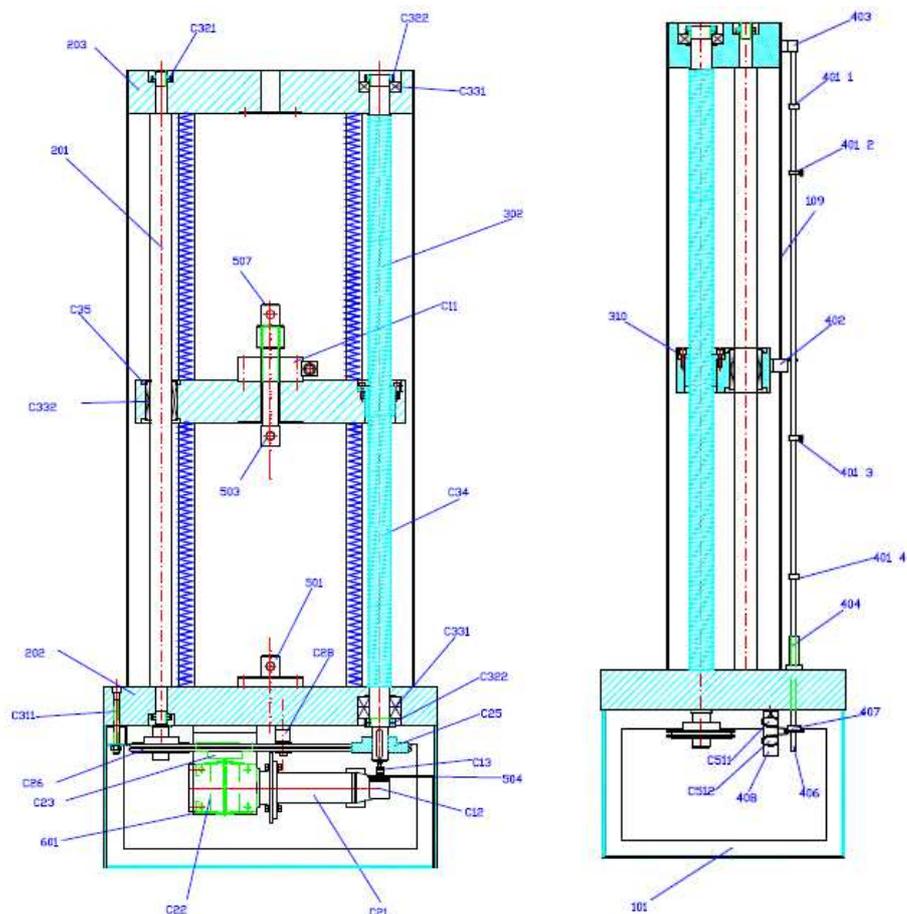


Figura 105. Alzado y perfil bastidor de la máquina HOYTOM

Legenda

<i>Denominación Pieza</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>
101	1	Caja base
301	2	Columnas
203	1	Puente superior
201	1	Travesaño móvil
C321	4	Tuercas amarre columnas
C322	4	Tuercas amarre husillos
C331	8	Rodamientos husillos en placas
302	2	Husillo
310	2	Guía husillo - travesaño móvil
C34	4	Fuelles protección husillo
C11	1	Célula de carga
507	1	Acoplamiento célula - mordaza
503	1	Tornillo para célula 20.000kg
501	1	Amarre célula - útil
C13	1	Acoplamiento encoder
C12	1	Encoder incremental
504	1	SopORTE encoder
C22	1	Reductor
C21	1	Motor
601	1	SopORTE motor - reductor
C23	1	Piñón

C26	2	Cadena
C25	2	Corona dentada
C28	1	Tensor
C311	12	Tornillo amarre placa - caja base
202	1	Placa base
C332	2	Rodamiento lineal
C35	4	Anillo elástico
109	2	Defensas
403	1	Guía tubo finales de carrera
401 1 1	1	Tope final de carrera superior fijo
401 2 1	1	Tope final de carrera superior móvil
402	1	Final de carrera
401 3 1	1	Tope final de carrera inferior móvil
401 4 1	1	Tope final de carrera inferior fijo
404	1	Casquillo barra final de carrera
406	1	Tubo finales de carrera
407	1	Pisador finales de carrera
408	1	Placa sujeción final de carrera
C511	1	Final de carrera superior
C512	1	Final de carrera inferior

Las Mordazas son los elementos de la máquina que permiten la fijación de la pieza durante el ensayo. Estas mordazas sirven para ensayar probetas planas o cilíndricas de diferentes espesores y diámetros según la capacidad de la maquina.

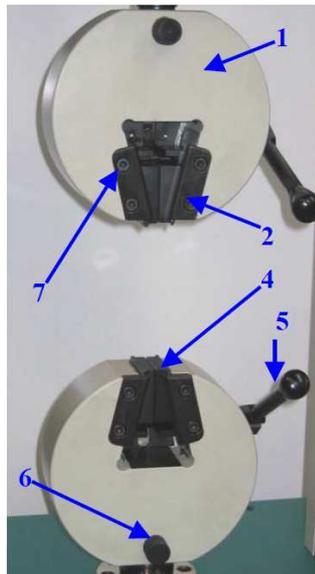


Figura 106. Mordazas MO-CP

Leyenda

- | | |
|----------------------|--------------|
| 1. Cuerpo de mordaza | 5. Palanca |
| 2. Guías exteriores | 6. Pasador |
| 3. Guía interior | 7. Tornillos |
| 4. Cuñas | |

Sus especificaciones son las siguientes:

Mordazas MO-CP			
Capacidad	10-20 kN	50-100 kN	200-300 kN
Altura mordaza	67 mm	200 mm	200 mm

Anchura mordaza	126 mm	215 mm	230 mm
Espesor mordaza	50 mm	75 mm	105 mm
Rango de espesores para probetas planas	0-8	0-12	0-16
Rango de diámetros para probetas cilíndricas.	4-10	6-16	8-20

Las mordazas se componen básicamente de un cuerpo principal donde van alojadas dos cuñas que se deslizan a través de dos guías exteriores y una interior. Son de accionamiento manual y disponen de una palanca para la apertura y cierre. Las cuñas pueden ser intercambiadas según la probeta a ensayar, para ello es necesario extraer las guías exteriores.

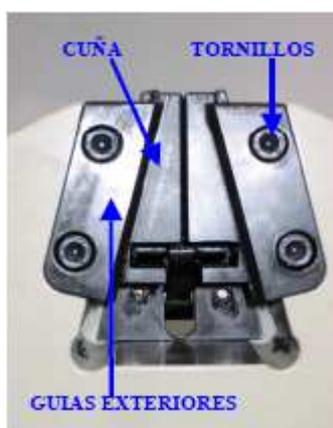


Figura 107. Cuñas de las mordazas MO-CP

Las mordazas MO-CP disponen de un agujero de fijación al bastidor de la máquina de ensayos, y se instalan de forma sencilla insertándose en el macho disponible en el bastidor de la máquina, fijándose mediante un pasador. Su instalación se debe realizar preferentemente en la zona alta del bastidor, aunque también sería posible, en casos excepcionales, realizar los ensayos en la zona baja.

La máquina cuenta con sistemas de control y medida; el control de la máquina puede realizarse de manera manual mediante el control de velocidad CV/PC, o mediante el programa HOYWIN desde el ordenador.

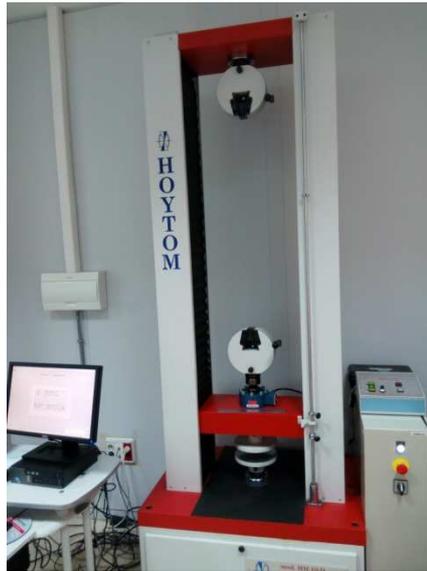


Figura 108. Equipo de ensayo

El esquema del control de velocidad CV/PC es el siguiente:

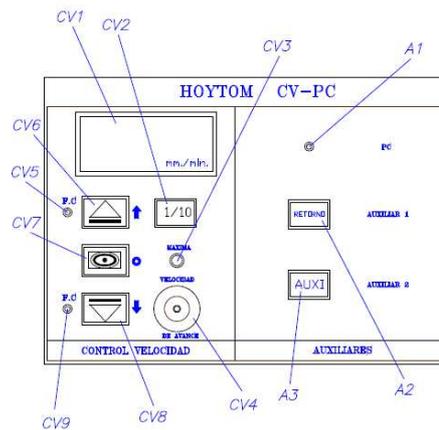


Figura 109. Control de velocidad CV/PC

Leyenda

- Cv1.- Digital para lectura de la velocidad (mm/min.)*
- Cv2.- Pulsador luminoso escala 1/10 (1:10)*
- Cv3.- Pulsador rojo - velocidad máxima.*
- Cv4.- Potenciómetro selector de velocidades.*
- Cv5.- Led rojo final carrera "superior"*

- Cv6.- Pulsador luminoso "subir"*
- Cv7.- Pulsador luminoso "parar"*
- Cv8.- Pulsador luminoso "bajar"*
- Cv9.- Led rojo final carrera "inferior"*
- A1.- Led verde pc.*
- A2.- Pulsador luminoso auxiliar 1 "ret"*
- A3.- Pulsador luminoso auxiliar 2 "ext"*

Para el control mediante el PC se usa el programa de control HOYWIN. Su interfaz básica es la siguiente:

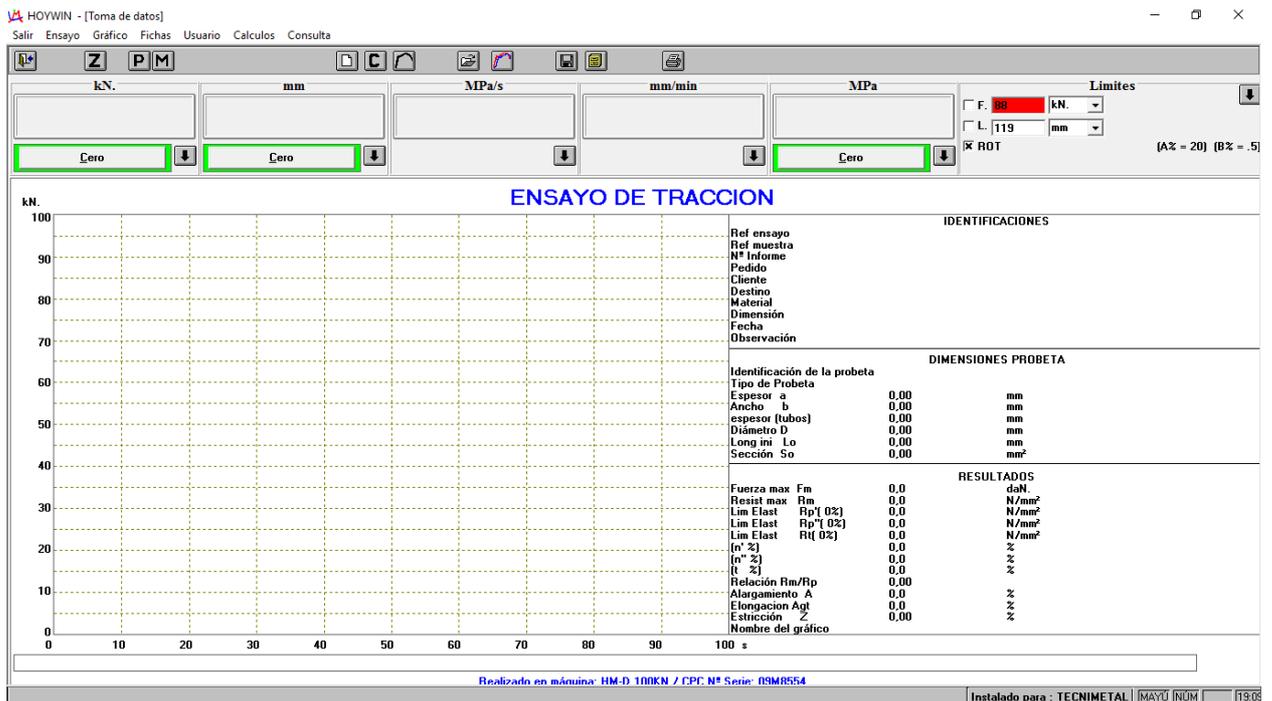


Figura 110. Interfaz del programa HOWIN para ensayos de tracción

En cuanto a los sistemas de medida, la máquina dispone de sistemas de medida de esfuerzos y deformaciones cuyas características y precisión se detallan en las especificaciones del equipo.

Por otro lado este equipo de ensayo ofrece la opción de registrar los valores de desplazamiento mediante un extensómetro; el extensómetro que se va a utilizar en este caso es el modelo EPS-5025/3542 de la marca Epsilon.



Figura 111. Extensómetro Epsilon modelo EPS-5025/3542

Este aparato tiene una longitud inicial entre cuchillas de 50mm, que se puede alargar hasta un 50% (+25mm) y reducir hasta un 10% (-5mm). Además puede permanecer fijado hasta la rotura de la probeta. Este equipo cumple los requisitos de precisión de la clase B-1 de ASTM y la clase 0,5 de ISO 9513.

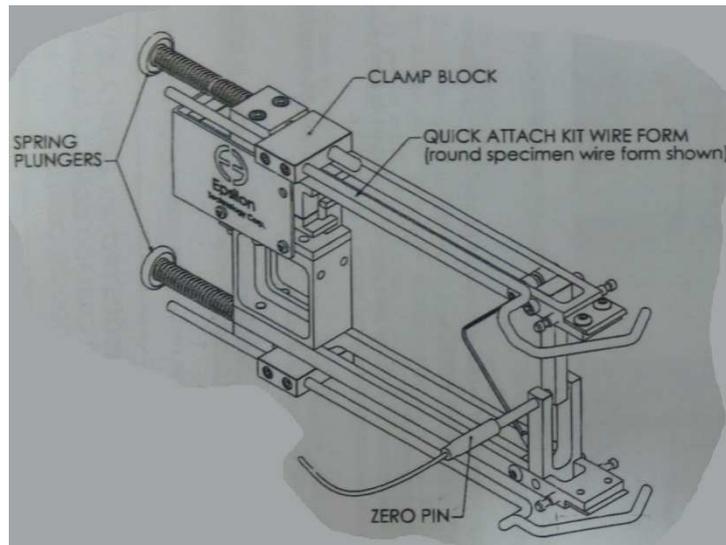


Figura 112. Esquema del extensómetro Epsilon modelo EPS-5025/3542

4.3.2. Procedimiento de ensayo a tracción. Control mediante software HOYWIN

El procedimiento de ensayo a seguir utilizando este equipo es el establecido en las Normas (ver apartado 4.1.1). Los pasos principales son los siguientes:

1. Se determinan las dimensiones de la probeta mediante un aparato de medida adecuado; se registran los valores mínimos y máximos para la anchura y espesor de cada probeta en el centro y a al menos 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y se comprueba que están dentro de la tolerancia de la normativa de ensayo. Se utilizan las medias para calcular la sección transversal.
2. Se trazan las marcas para la posición de las mordazas y la longitud de referencia en las probetas utilizando un rotulador que no provoque daños en el material.



Figura 113. Medida de las probetas y trazado de las marcas de referencia

3. Se fija la probeta en las mordazas alineando su eje longitudinal con el eje de la máquina de ensayo. Se fija primero la mordaza inferior, se abre la superior y se controla la separación con el control CV-PC para que la mordaza superior sujete la probeta en la posición

indicada por la marca. Se deben apretar las cuñas lo suficiente para evitar el deslizamiento de la probeta pero sin provocar su aplastamiento.

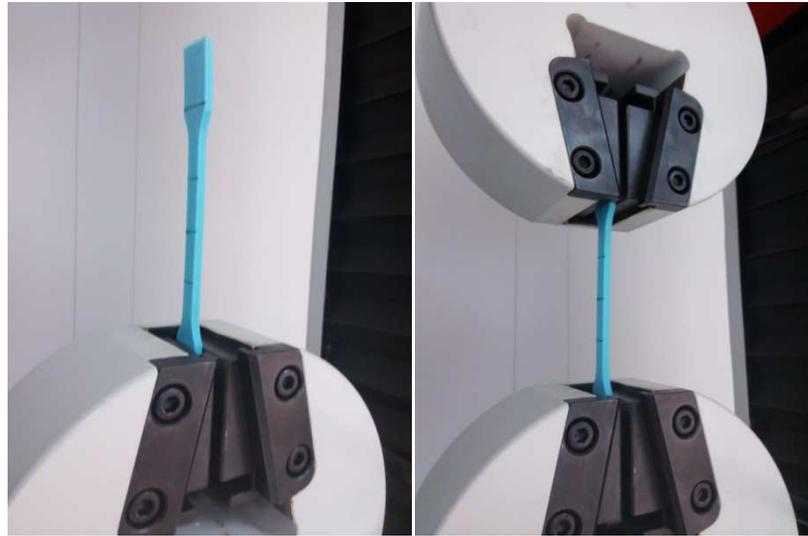


Figura 114. Colocación de la probeta en las mordazas

4. Se monta el extensómetro calibrado a la longitud de referencia de la probeta de forma simétrica respecto al medio de la parte paralela y sobre la línea central de la probeta. Para medir el coeficiente de Poisson se utiliza otro extensómetro en dirección transversal.



Figura 115. Colocación del extensómetro

Se utiliza el software HOWIN para controlar el ensayo, fijar los parámetros y recoger los valores obtenidos del mismo. Tras ejecutar este programa de debe seleccionar el módulo de tracción en zona alta. A continuación se deben fijar los parámetros del ensayo agrupados en tres categorías: Cabecera (identificación del ensayo y la probeta), Máquina (selección de los parámetros de velocidad o fuerza del ensayo) y Probeta (se fijan las dimensiones de la probeta).

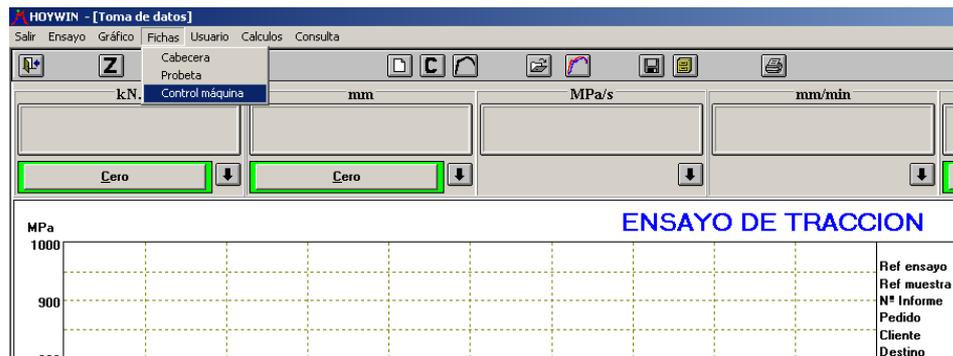


Figura 116. Definición del ensayo mediante el software HOWIN

5. Se identifica el ensayo en el menú Cabecera.
6. Se utiliza el menú Máquina para fijar las condiciones de ensayo. La velocidad de ensayo debe ser de 1mm/min, lo que corresponde aproximadamente al 1% de deformación longitud por minuto para estas probetas según la norma ISO y de 5mm/min según la ASTM (mínimo valor de los establecidos en la Norma que provoque la rotura entre 0,5-5 min).

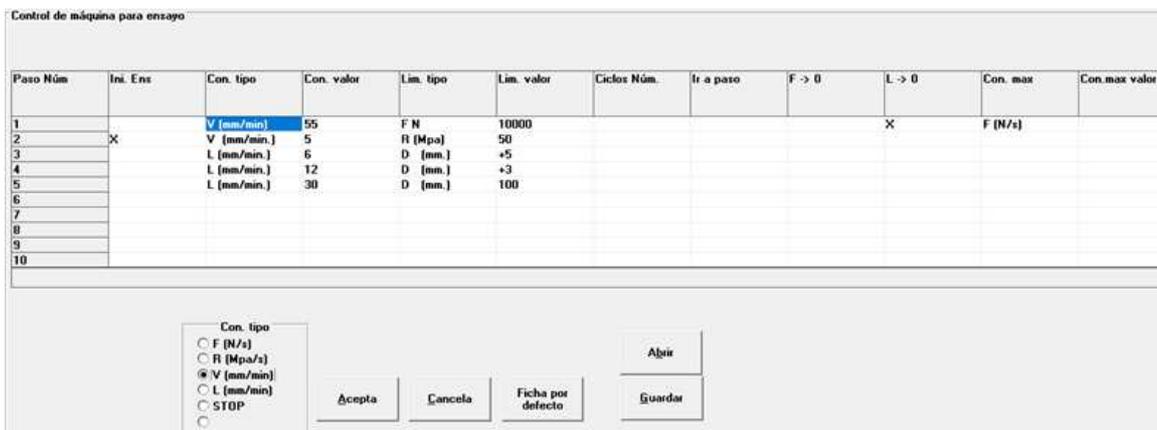


Figura 117. Definición de las condiciones de ensayo mediante el software HOWIN

Se pueden seleccionar varias velocidades de ensayo, de forma que varíen después del punto de fluencia. Para ello se debe seleccionar el límite hasta el que se va a aplicar cada condición de ensayo. Se puede aplicar un esfuerzo de precarga para evitar la zona inicial irregular en el diagrama de deformación. Las variables para las condiciones y límites de ensayo que permite fijar el programa son: F Fuerza (N/s), R Resistencia (N/mm²/s), V Velocidad desplazamiento (mm/min) en lazo abierto (sin control del PC).L Velocidad desplazamiento (mm/min) en lazo cerrado (El PC regulará la velocidad).

7. Se introducen los datos de las probetas utilizando el menú Probeta. Estos datos son las medias de los valores resultantes de las medidas realizadas en el punto 1.

Datos de la probeta

Tracción → Zona Alta 100 kN

GESTION - CONSULTA DE FICHAS DE PROBETA

Datos de la probeta

Tipo:

Identificación:

Esesor (A): Iniciales: Finales:

Ancho (B):

Sección (So):

Longitud (Lo):

Lon. Exten. (Le):

4 D 5 D 10 D

EXT Exten. ROT

F → 0 L → 0

Selec. Control máquina: C:\HOYWIN 32 RS\MAQ\CONTROL TRACCION POL PLANA 4 V5.MAQ

Figura 118. Definición de las dimensiones de la probeta

- Se resetean todos los valores poniéndolos a cero y se comienza el ensayo. Se registra la fuerza, incremento de longitud de referencia y distancia entre mordazas (3 entradas de datos). Además se deben recoger los valores de estas variables en el límite elástico, en el punto de resistencia máxima y en la rotura.

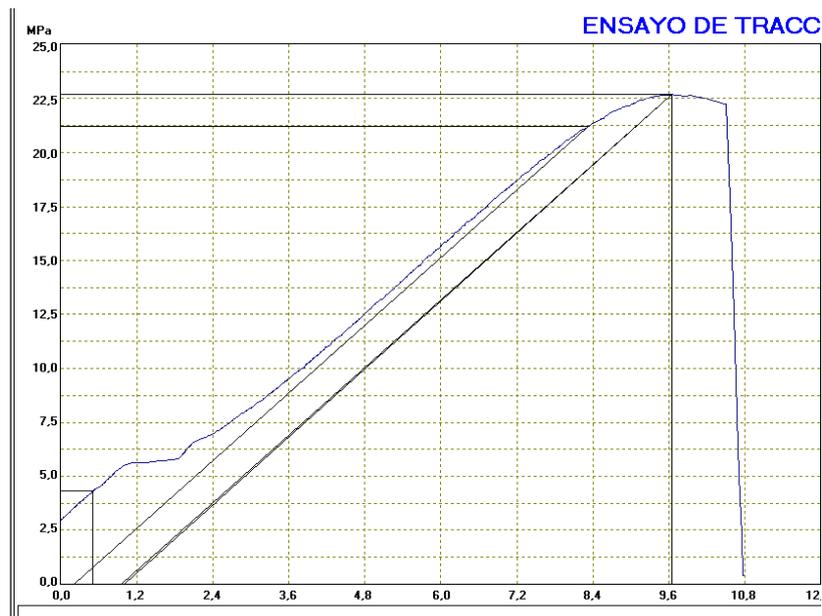


Figura 119. Gráfica tensión-deformación resultante del ensayo

Se pueden modificar los datos que se muestran, cambiando las variables y las unidades de los ejes (tensión, fuerza.. - deformación, desplazamiento, tiempo...).

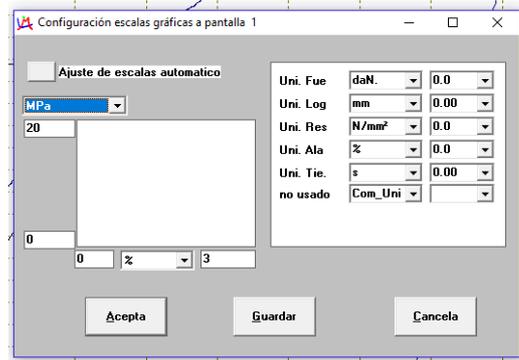


Figura 120. Selección de variables de la gráfica de resultados

- Se retira la probeta, se recompone y se mide la longitud de referencia y el espesor de la sección finales tras la deformación y ruptura. Estos datos se deben introducir en el programa HOWIN dado que son necesarios si se quieren obtener resultados de alargamiento y tensión real en la rotura.

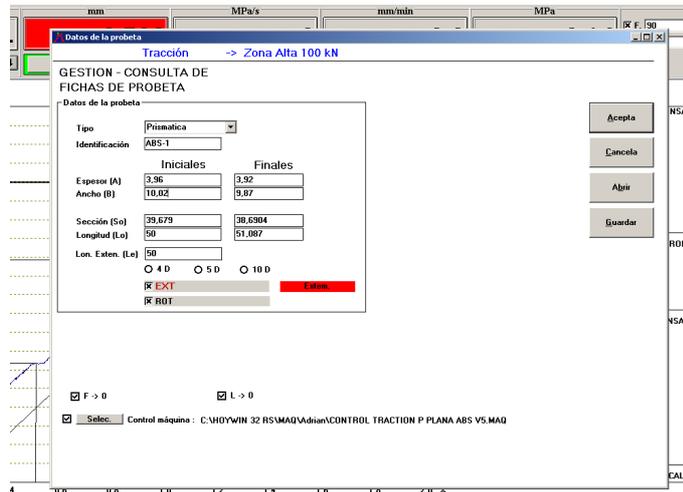


Figura 121. Dimensiones finales de la probeta

- Se realiza el cálculo de los resultados de ensayo. Esfuerzos (resistencia a tracción,...), deformaciones (en el límite elástico y en la rotura) y módulo elástico según lo indicado en las Normas.

Todos estos datos se encuentran en forma de base de datos y se pueden consultar mediante el archivo .mbd que crea el programa.

HOYWIN - [C:\HOYWIN 32 RS\dat\09M8554-TRAC.MDB]
Salir Grafico Criterios (Filtrado)

	Fuerza max Fm	Resist max	Lim Elast	Rp'	Lim Elast	Rp''	Lim Elast	Rt	(n' %)	(n'' %)	(t %)	Fm / Rp	Alargamiento A	Alargam	Agf	Estricción	Z/N
	1159,733	29,2862	17,18396	0,3616111				0	0,2	1	0,5	1,704275	0,2200012		-0,5697094		-3,275765
*																	

Figura 122. Base de datos de resultados

5. PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS

5.1. Proceso de fabricación aditiva

5.1.1. Pruebas de fabricación. Definición de parámetros. Problemas encontrados.

Antes de fabricar las probetas que se van a usar en ensayos es necesario realizar una serie de pruebas para conseguir producir piezas de calidad suficiente con el equipo del que se dispone y ajustar los valores de los parámetros que se van a comparar.

Se pretende comprobar que las medidas y formas son correctas y que la calidad de las superficies es suficientemente buena para realizar los ensayos.

Además, con estas pruebas se tratará de solucionar cualquier problema en la impresión como defectos superficiales o deformaciones, mala adherencia a la plataforma, problemas de extrusión, dificultades para imprimir con soportes o mala calidad de la capa inicial. Para ello se ajustarán elementos como la calibración, la alineación de la plataforma, la alineación del eje X, la posición inicial de la boquilla (origen eje Z) y ciertos parámetros como los que afectan a la temperatura, flujo de material, soportes, o características de la capa inicial (velocidad, espesor...).

También se van a realizar pruebas con los distintos materiales para ajustar parámetros propios de cada uno como temperatura de extrusión, temperatura de la plataforma o enfriamiento y comprobar que se pueden obtener buenos resultados utilizando los parámetros definidos para los ensayos con cualquier tipo de filamento.

Por último se comprobará la influencia de parámetros como la velocidad de impresión, la altura de capa, la posición de la pieza o la cantidad de relleno en el resultado de la impresión (calidad, precisión, tiempo de fabricación...) para ajustar los valores que se van a comparar en los ensayos.

Se comienza a imprimir utilizando la calibración existente en el firmware (DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80, 80, 4000, 736.5}), que se modificará si es necesario. Las primeras pruebas se realizan con ABS, ya que es el material del que se dispone inicialmente.

Se siguen los pasos previos a la impresión indicados en el apartado 4.2.3; se comprueba la nivelación de la plataforma de impresión, se introduce el filamento en el extrusor, se rocía laca sobre la base de cristal, se conecta la impresora al PC, se abre el programa Cura y se carga la pieza. En cuanto a los parámetros de impresión, el software que se está utilizando (Cura) permite ajustar una serie de parámetros que se clasifican en las siguientes categorías:

- Máquina
- Calidad
- Pared
- Relleno
- Material
- Velocidad impresión/desplazamiento
- Enfriamiento
- Soporte
- Adhesión a la plataforma.

En la primera prueba se imprime un cubo con una ranura que permitirá comprobar la precisión de las medidas, la resolución y la presencia de defectos en la impresión. Además se utilizan los parámetros establecidos por defecto por el programa, que se modificarán si es necesario según los resultados obtenidos. Los principales parámetros que se van a controlar son altura inicial y nivelación de la plataforma, altura de capa, altura de capa inicial, espesor de la pared y bases, densidad de relleno, temperatura de extrusión, temperatura de la plataforma, porcentaje de flujo, retracción, velocidad de impresión (pared, bases relleno y desplazamientos en vacío), flujo del ventilador de capa, opciones de plataforma de adhesión y opciones del soporte estructural.

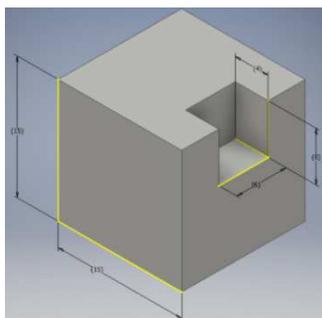


Figura 123. Cubo de prueba

En la primera prueba se obtiene buena precisión en las medidas (excepto en las del eje Z), muy buen acabado en laterales, base superior demasiado fina (se nota la forma del relleno que la sustenta) y muy mal acabado de la base; se aprecian las líneas de los filamentos, las esquinas están deformadas por el despegue de la plataforma y se han producido defectos al retirar la plataforma de adhesión. Por último en la parte no apoyada de la ranura se resbala el plástico.



Figura 124. Resultado de la primera impresión

Para solucionar estos problemas se realizan cambios en parámetros que puedan afectar a la calidad de la base y la primera capa y que permitan evitar el despegue de la pieza (ver apartado 3.2.6.). Se pulveriza más laca sobre la superficie de impresión y se modifican algunos parámetros del software, incluyendo algunos avanzados que por defecto no son visibles; se aumenta el espesor de la bases (1,2 mm), se reduce el espesor de capa de la capa inicial(0,1 mm), se disminuye la velocidad de impresión de las bases y de la primera capa(30 mm/min) y se elimina la superficie de adhesión (*Plate Adhesion = None*). Además se gira la pieza para evitar partes en voladizo

Tras estos cambios se imprime un nuevo cubo. El resultado es mejor que en el caso anterior; el aumento del número de capas de las bases (mayor espesor de la base y capas más finas) ha conseguido que la base superior tenga buena calidad (ya no se aprecian las líneas del relleno). Al eliminar la plataforma de adhesión se ha evitado la rotura producida en la base al retirarla y el

giro de la pieza ha conseguido que la ranura no tenga defectos debidos a partes no apoyadas. No obstante se sigue produciendo despegue y la base inferior, aunque de mejor calidad, sigue siendo defectuosa.

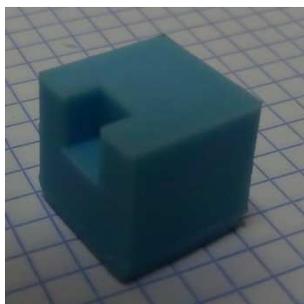


Figura 125. Resultado de la segunda impresión

Debido a la importancia de la posición de la plataforma se trata de ajustar de nuevo la altura y nivelación de la misma. Como se ha explicado en el apartado 4.2.3, un defecto en la planitud ocasiona problemas de mala adherencia a la base y curvado de la base inferior. En función de la distancia inicial se conseguirán distintos acabados de la base y se modificará la adherencia de la misma; una distancia insuficiente (Z inicial $< 0,00\text{mm}$) ocasionará mala calidad de la base inferior, medidas mayores de las esperadas en el eje Z y mala adherencia y curvado de la base inferior de la pieza, mientras que si se fija un juego negativo entre la boquilla y la plataforma (Z inicial $> 0,00\text{mm}$) se conseguirá buena adherencia (incluso excesiva para materiales como PLA o PETG) y un aspecto pulido de la base, pero las medidas en Z serán menores de lo esperado e incluso, si se fija un apriete excesivo (Z inicial $< - 0,60\text{ mm}$), se pueden tener problemas debidos a que no se extruye material al comienzo.

Tras ajustar la plataforma, se imprime una probeta simétrica que abarca casi toda la longitud del eje X , manteniendo los parámetros de la anterior prueba, que permitirá comprobar si la nivelación de la cama se ha realizado correctamente o está influyendo en el resultado.

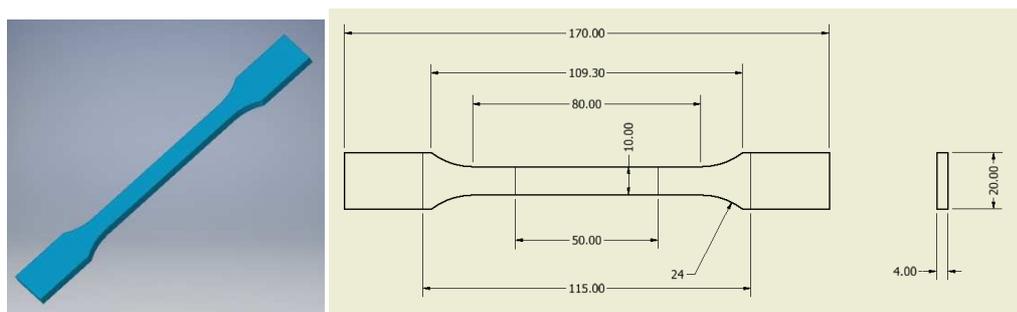


Figura 126. Geometría utilizada en las impresiones de prueba (Probeta ISO tipo A1)

Los resultados obtenidos en esta prueba indican que la nivelación de la base no es suficientemente buena puesto que una parte de la pieza se despega más que otra.

Para solucionar estos problemas se va a comprobar por separado el efecto de la distancia inicial de la boquilla, la correcta nivelación de la plataforma y el carro de extrusión y la influencia de los parámetros de espesor y número de capas de la base, velocidad de impresión de la base y plataforma de impresión.

Para comprobar por separado el efecto de la distancia inicial de la boquilla se imprimen tres piezas pequeñas en el centro de la plataforma con los parámetros de impresión constantes para las tres y utilizando distintos juegos entre la boquilla y la cama caliente. De estas experiencias se

concluye que los mejores resultados se obtienen estableciendo una distancia inicial de la boquilla tal que roce la base en $Z = 0,02$ mm y la toque totalmente en $Z = 0,00$ mm. Esta corrección ocasiona que la base mida entre 0,1 y 0,2 mm menos de altura, por lo que habrá que tener en cuenta esta corrección en el diseño.



Figura 127. Distintos resultados de la base en función del juego inicial boquilla-plataforma

A continuación se nivela el carro del cabezal girando las tuercas que lo unen a las varillas del eje Z y se comprueba que situando la boquilla al lado de cada tornillo de la plataforma el juego boquilla-base es el óptimo y por tanto está nivelada. Una vez realizadas estas comprobaciones se imprime una probeta, esta vez usando plataforma de adhesión, la cual presenta muy buenos resultados en la base, por lo que se comprueba el gran efecto de estos parámetros en el despegue y acabado de la primera capa.

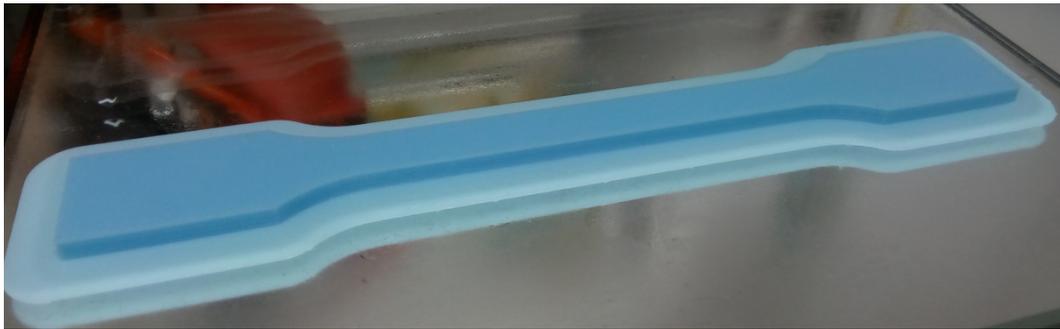


Figura 128. Resultado obtenido tras varias pruebas (Probeta+plataforma adhesión)

Una vez solucionado este problema se realizan nuevas impresiones para determinar los valores óptimos de parámetros como el espesor de las bases y se prueban distintos valores de las variables cuya influencia en el comportamiento mecánico del material se pretende estudiar; altura y anchura de capa, velocidad de impresión, porcentaje de relleno, patrón y ángulo de las líneas del relleno y la pared para comprobar si producen resultados adecuados para su ensayo adecuados o hay que modificarlos por motivos de defectos, excesivo tiempo o imposibilidad de fabricación. También se prueban distintas orientaciones de fabricación.

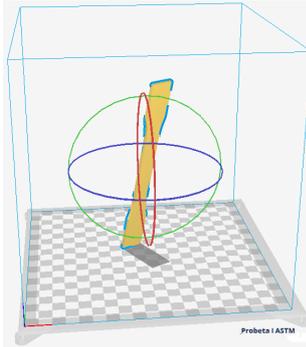


Figura 129. Orientación de la probeta en el volumen de impresión en el programa Cura

Por último, se utilizan distintos materiales para comprobar si se pueden obtener buenos resultados con los parámetros definidos en las pruebas anteriores y seleccionar los valores óptimos para las variables propias del material como son la temperatura del fusor, temperatura de la plataforma, distancia de retracción, uso de plataforma de adhesión o flujo del ventilador de capa.



Figura 130. Distintos filamentos para impresión FFF/FDM (PrintedDreams, 2017)

En la imagen se muestran los principales parámetros de estudio:

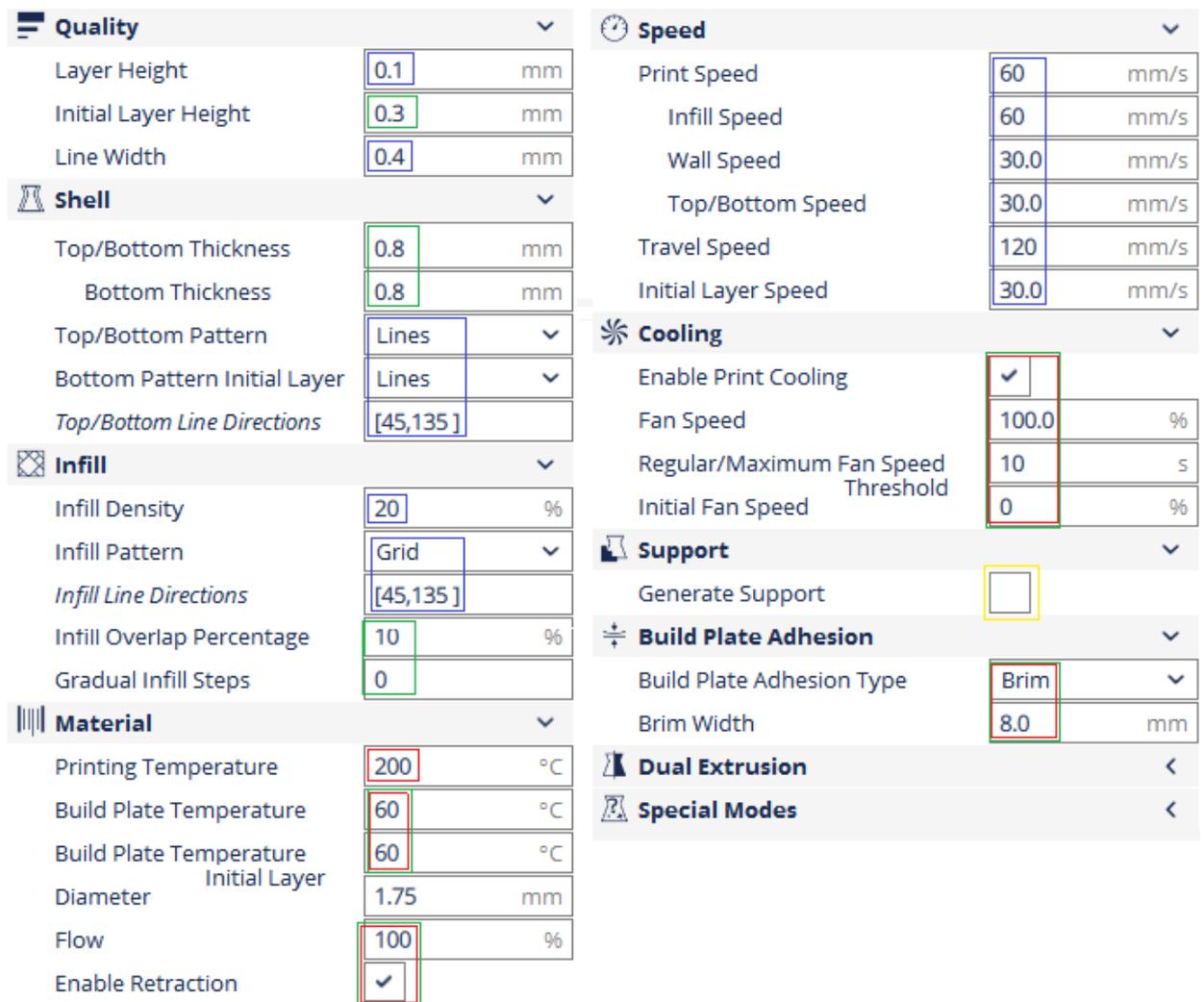


Figura 131. Opciones de impresión de Cura

Leyenda

- Rojo: Parámetros dependientes del material
- Verde: Parámetros generales de fabricación
- Amarillo: Parámetros de soporte relacionados con la posición de construcción
- Azul: Variables propuestas para estudiar su influencia en el comportamiento mecánico

En cuanto a la orientación de fabricación de las probetas se van a fabricar piezas con capas paralelas a la dirección de la fuerza de tracción y perpendiculares a la misma.

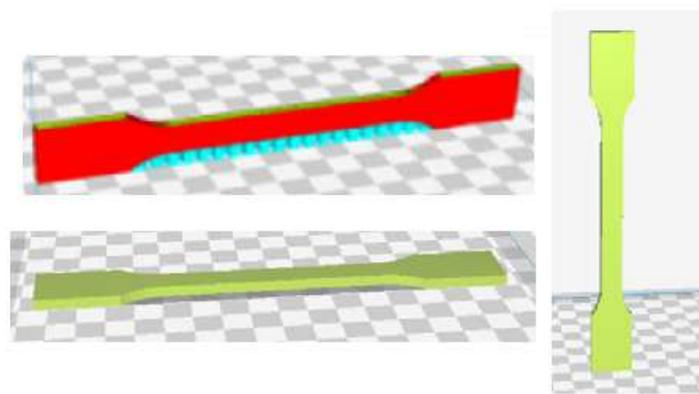


Figura 132. Distintas orientaciones de fabricación de las probetas

Para una de las orientaciones se usan soportes, lo que ocasiona cierta rugosidad de la superficie en voladizo al retirarlos, pero los resultados son aceptables para los ensayos.



Figura 133. Uso de soportes para la orientación de fabricación 2

Al imprimir con Filaflex surgen varios problemas debido a su carácter elástico; este comportamiento provoca que el filamento no se extruya correctamente y se den fenómenos debidos a extrusión insuficiente o incluso fracase totalmente la impresión.

Se comienza a imprimir utilizando los parámetros recomendados por el fabricante: T° Fusor: 210-230C°, T° Plataforma: fría o 30C°-40C°. No se requiere plataforma de adhesión ni laca. Tras varias pruebas se fija la temperatura del fusor en 230 °C, ya que mejora el flujo (aunque aparecen más hilillos) y la de la plataforma en 30°C. En cuanto a la velocidad, el fabricante recomienda velocidades entre 30 y 90 mm/s pero las pruebas indican que es necesario mantenerla en valores de 30 o 40 mm/s como máximo. El fabricante indica reducir la retracción a 3,8 mm, pero consultando en foros de impresión y tras las pruebas se concluye que es preferible desactivarla, pues aunque esto conlleva hilillos su activación provoca el atasco del filamento en el extrusor, ocasionando el fallo de la impresión. Por último se aumenta el flujo de material a valores de hasta el 120% para prevenir la impresión insuficiente debida a este comportamiento elástico. Otro elemento fundamental para la impresión con este material es la altura de la plataforma. Si la boquilla roza con la base en la posición inicial el plástico no se extruye y la impresión fracasa ya desde la primera capa.



Figura 134. Probeta impresa con material flexible Filaflex

En cuanto a la impresión con nylon, todas las pruebas realizadas han resultado fallidas, por lo que no se va a incluir este material en el estudio. El problema con este material es la mala adherencia entre capas. Se ha probado a variar la velocidad a 40mm/s y aumentar la temperatura de la cama caliente. Algunas recomendaciones que se han encontrado en páginas y foros de impresión 3D son aislar térmicamente la impresora, precalentar material en horno 80-100°C durante 4h o secarlo con arroz. Debido a la falta de medios y tiempo se deja la impresión con nylon como línea futura.



Figura 135. Intentos fallidos de impresión con nylon

5.1.1.1 Parámetros y variables seleccionados para el estudio

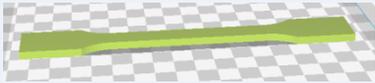
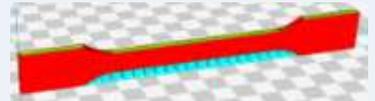
A continuación se recopilan los valores de los parámetros y variables seleccionados. Los parámetros de la base y la capa inicial son los siguientes:

Parámetros de la base y capa inicial	Valores (mm)
Juego Boquilla/plataforma	-0,2
Espesor Pared	0,8
Espesor Bases	0,8
Espesor Capa Inicial	0,3

Parámetros propios del material:

Material	T° Fusor (°C)	T° Base (°C)	Plat. Adhesión	Vent. Capa (%)	Dist. / Vel. Retración (mm / mm/s)	Otros Ajustes
ABS	235	80	SI	100	6,5 / 25	-
PLA	200	50	NO	100	6,5 / 25	-
NYLON	235	85	SI	100	8 / 25	<i>Problemas de mala adherencia entre capas. Velocidad 40mm/s Precalentar material en horno 80-100°C 4h.</i>
PLA+LATÓN	220	50	NO	100	6,5 / 25	-
PETG+FIBRAC	245	60	NO	100	6,5 / 25	-
FILAFLEX (TPE-U)	230	50	NO	100	NO	<i>Problemas de extrusión insuficiente. Desactivar retracción, flujo 120%, velocidad 30mm/s, Z inicial boquilla >=0,0mm</i>

Valores de las variables cuya influencia en el comportamiento mecánico se va a estudiar:

Altura de capa (mm)	Ancho de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/min)	Patrón de pared/relleno y su ángulo (°)	Porcentaje Relleno (%)	Orientación de fabricación
0.1	0,4	60 (30 pared y bases)	Líneas / cuadrícula [45,135]	20	
0.2				50	
					

5.2. Ensayos a tracción

5.2.1. Pruebas iniciales con las distintas normas y tipos de probeta

Una vez ajustado el equipo de fabricación aditiva se van a producir y ensayar probetas para comprobar que los resultados obtenidos con el equipo de ensayo del que se dispone son válidos y

comparables. Se van a probar varios tipos de probeta y se van a realizar ensayos con y sin extensómetro utilizando también ABS como material.

Probeta tipo A1 según la Norma ISO 527-2	
Probeta tipo I según la Norma ASTM 638-14	
Probeta tipo II según la Norma ASTM 638-14	

Los primeros ensayos se realizan con la probeta A1 de la norma ISO 527-2. El problema con estos especímenes es que no rompen por la zona estrecha, sino por el radio de acuerdo entre las dos zonas de la probeta. Según la norma se deben descartar los ensayos en los que sucede esto o indicar las causas por las que se incluye. Se realizan varios ensayos, y en todos se repite este fenómeno (figura 136).

Para solucionar este problema se utilizan las probetas de tipo II de la norma ASTM indicadas para casos en los que la probeta no rompe por la zona media. Con este tipo de probeta se obtienen mejores resultados, ya que rompe por la zona estrecha, aunque no dentro de las marcas

de referencia. Otro problema con este espécimen es que debido a su pequeña anchura el extensómetro no se sujeta bien.

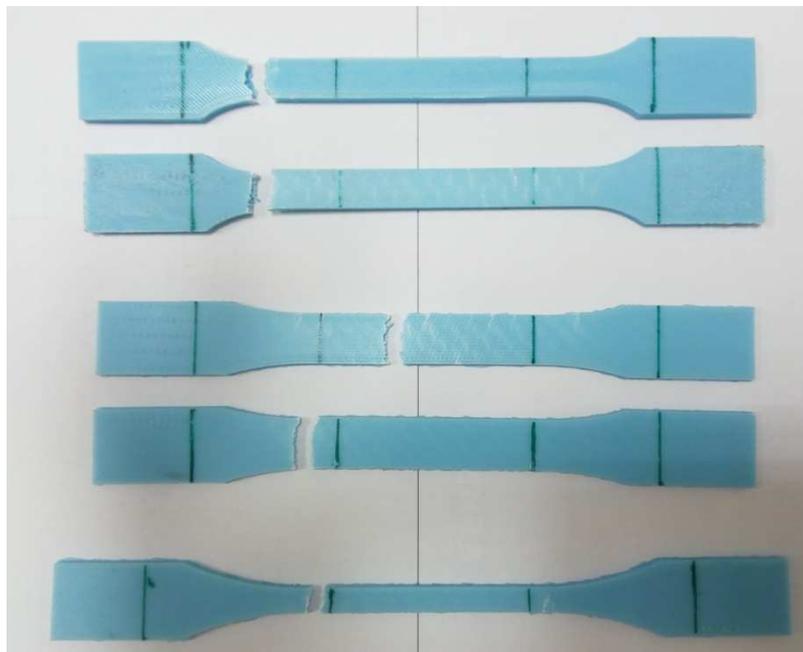


Figura 136. Distintos tipos de probetas según las normas ISO 527-2 y ASTM 628-14.

Por último se prueba la probeta tipo I, la recomendada para uso general por la norma ASTM. Se realizan dos ensayos, el primero usando extensómetro y el segundo sin él. En este caso la rotura también se produce por la zona estrecha, y en uno de los dos ensayos se da entre las marcas de referencia. Debido a esto esta es la probeta que se va a utilizar y por lo tanto se va a seguir el procedimiento de ensayo indicado por la Norma ASTM 628-14.

Por otro lado, en cuanto al uso de extensómetro, se ha decidido no emplearlo, dado que en los casos en los que la probeta rompe por la zona estrecha, pero fuera de las marcas de referencia, no se registra bien la evolución de la deformación en el momento final del ensayo y se obtienen gráficas defectuosas. Por lo tanto, los datos obtenidos en cuanto a alargamientos, módulo de elasticidad y los límites elásticos proporcional y convencional estarán referidos a la variación de la distancia entre mordazas y no a la variación de la longitud de referencia medida con extensómetro.

Los resultados obtenidos en los ensayos utilizando cada una de las probetas descritas se muestran en la siguiente gráfica (se muestra Tensión - Tiempo para poder compararlas, ya que las gráficas Tensión -Deformación obtenidas mediante extensómetro muestran defectos en la parte final del ensayo, como se ha indicado):

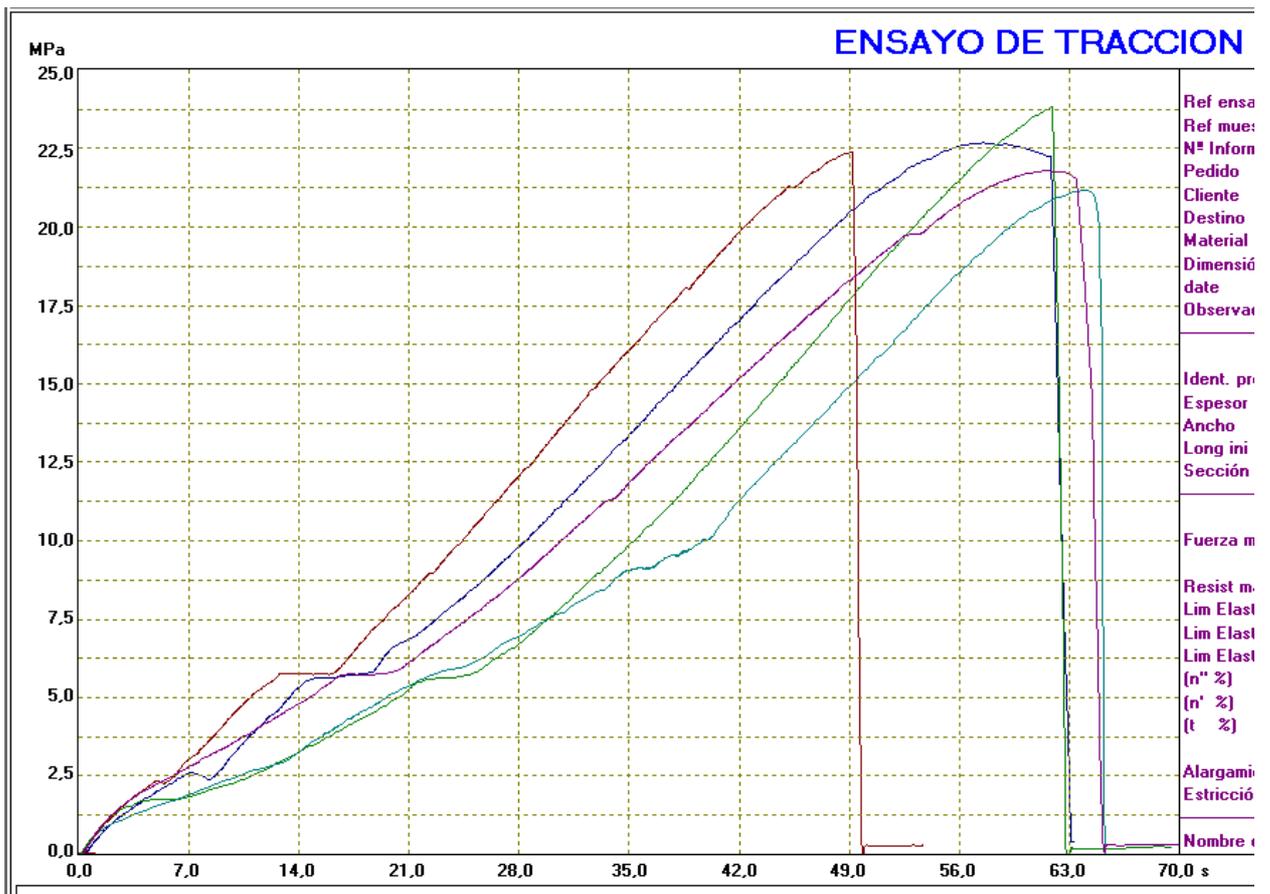


Figura 137. Comparativa de resultados obtenidos con distintas probetas

Leyenda

- Rojo: Probeta A1 ISO (sin EXT)
- Azul oscuro: Probeta I ASTM (sin EXT)
- Morado: Probeta A1 ISO (con EXT)
- Verde: Probeta I ASTM (con EXT)
- Azul claro: Probeta II ASTM (sin EXT)

Como se puede observar tienen un comportamiento frágil, aunque la mayoría de los ensayos con ABS muestran una pequeña zona plástica.

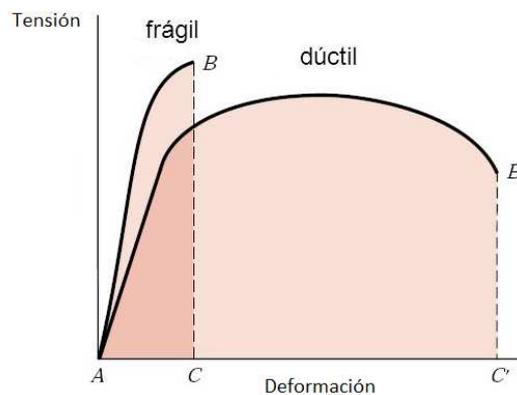


Figura 138. Comportamiento frágil y dúctil (Areatecnología, 2015)

Gráfica Tensión-Deformación con una probeta de ABS ASTM I sin extensómetro con una pequeña zona plástica:

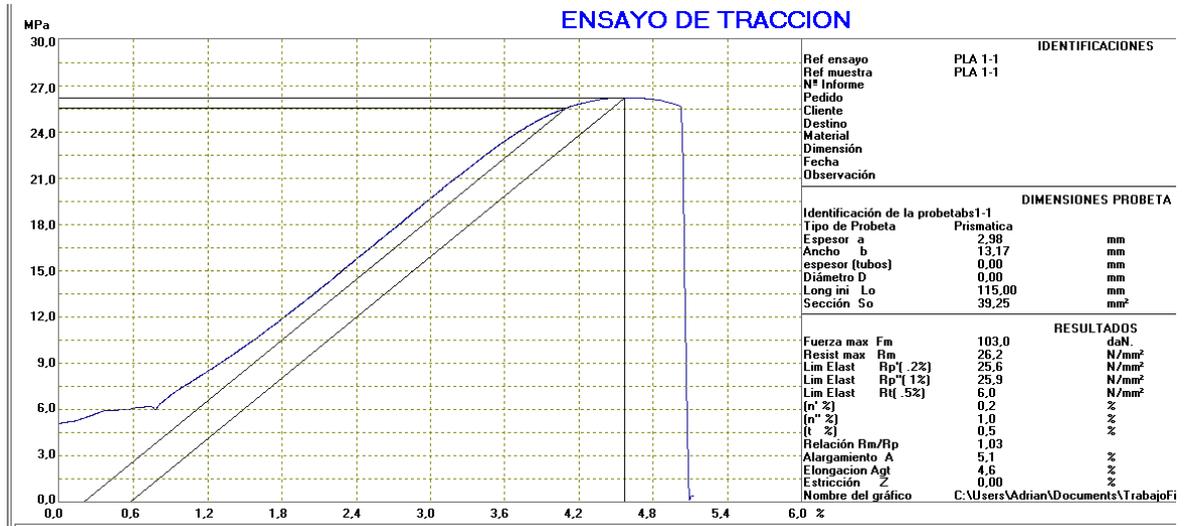


Figura 139. Material con una pequeña zona plástica

En la gráfica aparece representado el límite elástico convencional ($R_p(0.2\%)=25,6\text{MPa}$), obtenido como el punto que corta la recta paralela a la zona elástica lineal (ley de Hooke) trazada desde el 0,2% de deformación, y la resistencia máxima a tracción ($R_m=26,27\text{MPa}$). También se puede distinguir el límite de proporcionalidad, el decir el punto en el que la curva deja de ser lineal, localizado aproximadamente en el 3,4% de deformación (22,5MPa) y se puede obtener el módulo de elasticidad a tracción utilizando la pendiente de la recta paralela a la zona lineal. Por último también se proporcionan los datos de alargamiento a la rotura ($\epsilon_t= 5,1\%$) y la elongación en el punto de resistencia máxima (4,6 %).

Al probar otros materiales como el PLA se obtienen algunas curvas con comportamiento totalmente rígido:

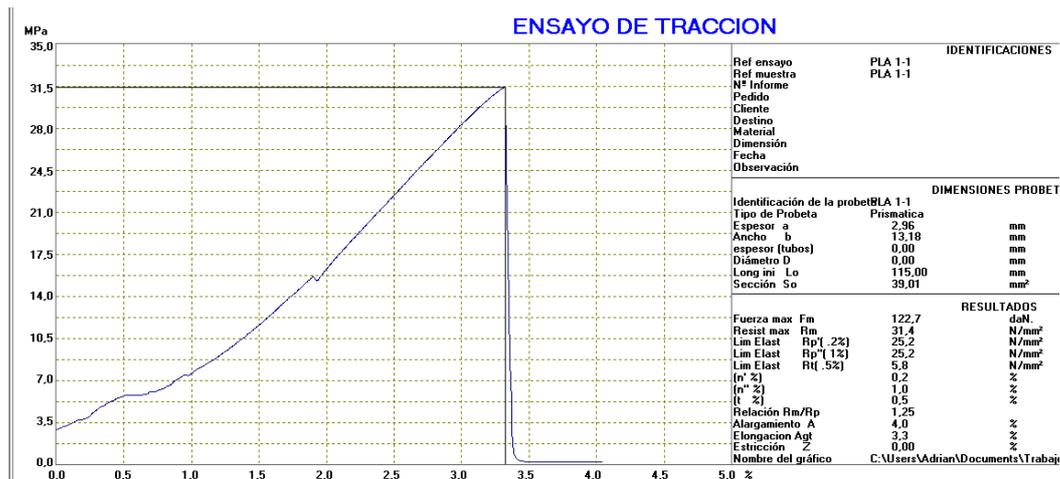


Figura 140. Material con comportamiento rígido (PLA)

5.2.2. Definición de los ensayos y parámetros a analizar

Se van a realizar dos grupos de ensayos con diferentes propósitos. En el primero se van a comparar una serie de parámetros utilizando los materiales más comunes en este tipo de

fabricación: PLA y ABS; y en el segundo se va a comparar el comportamiento de diferentes materiales.

5.2.2.1 Definición de casos a analizar

➤ Caso1 - ABS-PLA

Se va a estudiar la influencia de ciertos parámetros geométricos de fabricación, como son el espesor de capa, el porcentaje de relleno y la orientación de construcción de la probeta, en las propiedades mecánicas a tracción de piezas de ABS y PLA fabricadas mediante tecnologías aditivas (FDM/FFF).

Las piezas fabricadas mediante esta tecnología (FDM/FFF) se suelen construir con una piel densa y un relleno con huecos vacíos para ahorrar tiempo. Este relleno se caracteriza por su patrón y su porcentaje. La variación del relleno (del 20% al 50%) dará lugar a una pieza más maciza, lo que se debería traducir en un aumento de la resistencia mecánica. Resulta de gran interés comprobar cuánto mejora el comportamiento mecánico con esta variación, por ello se ha incluido este parámetro en el estudio.

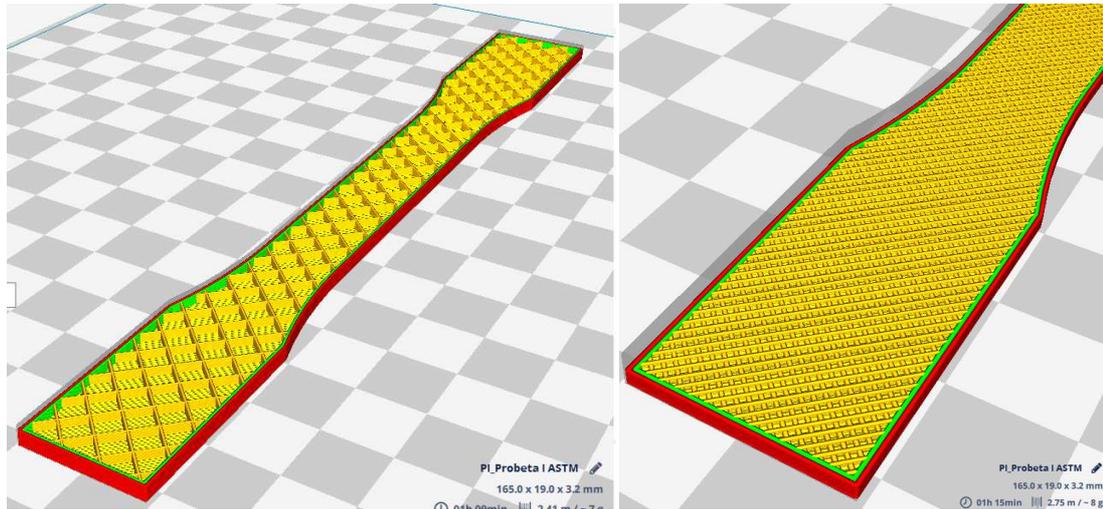


Figura 141. Distintas opciones de relleno

El espesor de capa es otro parámetro que también influye en el tiempo de fabricación. La precisión en los detalles y el acabado mejoran sustancialmente con capas más finas, pero en este estudio se quiere analizar también la influencia de este parámetro en la resistencia mecánica.

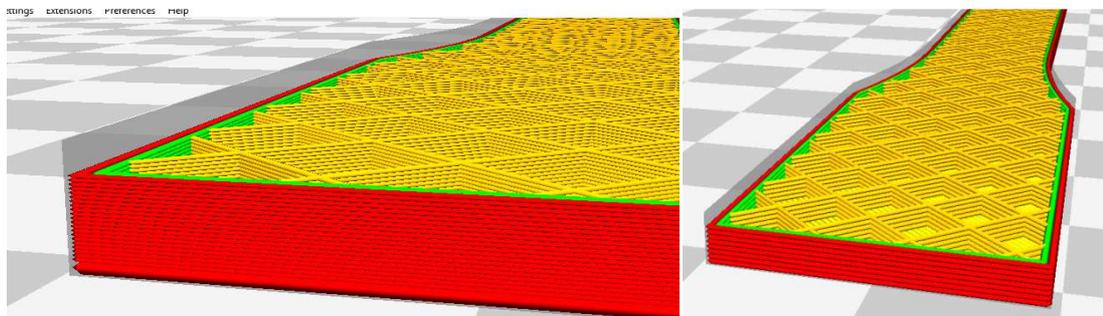


Figura 142. Distintos espesores de capa

Por último se va a comparar cómo varía la resistencia mecánica en función de la orientación de la pieza en su construcción. Tanto en el caso de usar la orientación inicial como en el de la

segunda orientación las capas resultan paralelas al esfuerzo, pero varía la orientación de la trama de relleno respecto a la fuerza de tracción. En el caso de la tercera orientación, la superposición de capas en sentido perpendicular al esfuerzo debería ocasionar una disminución de la resistencia mecánica.

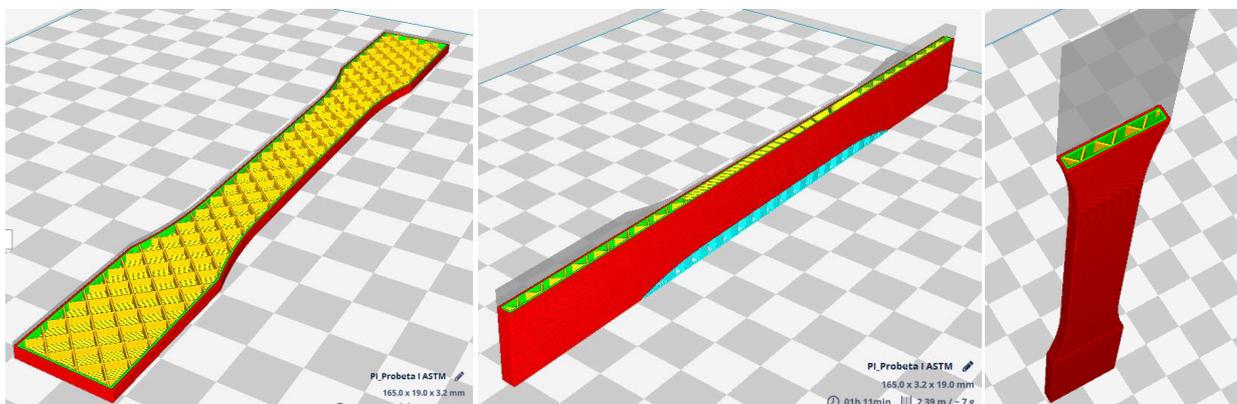
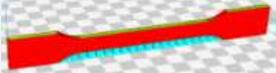


Figura 143. Distintas orientaciones de construcción

Los valores que se van a comparar se recogen en la siguiente tabla:

Material	Altura de capa (mm)	Relleno (%)	Orientación de fabricación
ABS	0.1	20	Orientación 1: 
PLA	0.2	50	Orientación 2: 
			Orientación 3: 

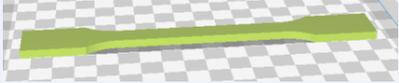
Otros parámetros cuya influencia se puede estudiar son la velocidad de impresión de las paredes, bases y relleno, el ancho de capa, el patrón de la pared y el relleno y su ángulo y el espesor de las paredes y las bases respecto al del relleno.

Además se podría analizar la influencia de la geometría de la pieza que se ensaya en el comportamiento mecánico (espesor, forma...).

Por último, se propone también como línea futura analizar la interacción de estas variables, para lo que será necesario realizar un diseño de experimentos con un programa estadístico que indique el número de casos que se deben estudiar para analizar dicha interacción.

➤ **Caso 2 - Otros Materiales**

Se van a ensayar a tracción probetas fabricadas mediante técnicas FDM/FFF utilizando distintos materiales, lo que va a permitir comparar su comportamiento mecánico a tracción.

Material	Altura de Capa (mm)	Relleno (%)	Orientación de fabricación
ABS	0.1	20	Orientación 1: 
PLA			
PLA+LATÓN			
PETG+FIBRA CARBONO			
FILAFLEX			

5.2.2.2 Materiales utilizados

A continuación se recopilan los datos proporcionados por los fabricantes (en el caso del PLA+Latón no se han encontrado datos de resistencia mecánica).

Material	R _m tracción (MPa)	Deformación a rotura (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (g/cm ³)
ABS (ABS Azul - PrintedDreams)	41-45	20	2,1	1,05
PLA (PLA Amarillo - BQ)	51	6	3,5	1,25
PLA+ LATÓN (Brass Filament -TechnologyOutlet)	-	-	-	3,1
PETG+ FIBRAC (Carbonfill -Formfutura)	52,5	8	3,8	1,19
TPE FLEXIBLE (Filaflex - Recreus)	39	700	-	1,21

Como se puede observar, el PLA es más rígido y resistente a la tracción mientras que el ABS resulta ser más dúctil. Además la resistencia al impacto del ABS es mucho mayor (320 J/m frente a 220 J/m (*Notched Izod Impact*)), una de las principales propiedades que lo destacan entre otros plásticos.



Figura 144. Algunos de los filamentos utilizados

Por otra parte se han realizado pruebas en el laboratorio con los filamentos en bruto para compararlos con estos datos. En la gráfica se muestran los resultados (excepto para el Filaflex, cuyo comportamiento es totalmente distinto al resto de materiales y es imposible representarlo en un mismo gráfico).

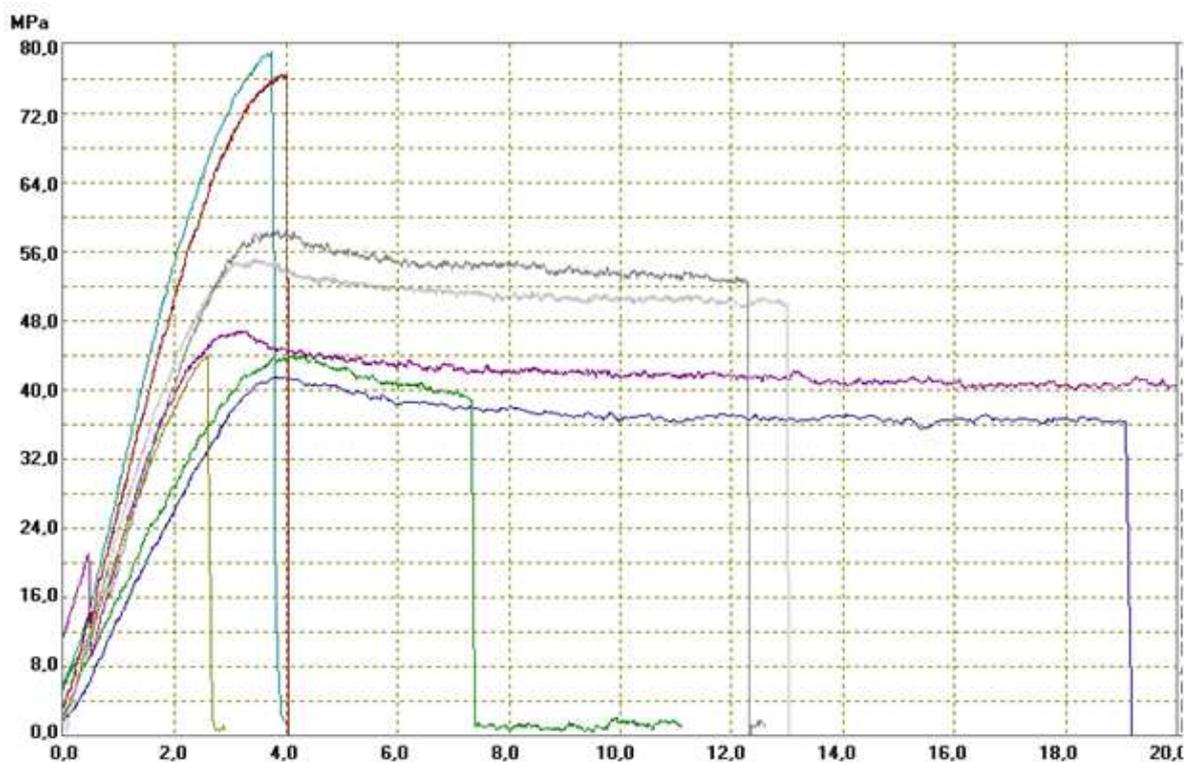


Figura 145. Ensayos con los filamentos en bruto

Leyenda

- Azul claro y rojo: PETG + Fibra
- Morado y amarillo: PLA+LATÓN
- Carbono
- Azul oscuro y verde oscuro: ABS
- Grises: PLA

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Material	R _m tracción (MPa)	Deformación rotura (%)	Módulo de elasticidad (GPa)
ABS (ABS Azul - PrintedDreams)	41,5 - 44	19,1 - 11	1,40 - 1,54
PLA (PLA Amarillo - BQ)	54,7 - 56,9	13,1 - 12,4	1,90 - 1,98
PLA+ LATÓN (Brass Filament -TechnologyOutlet)	46,2 - 44,0	29,4 - 2,6	2,21 - 2,36
PETG+ FIBRAC (Carbonfill -Formfutura)	79,1 - 76,5	3,8 - 4,1	2,98 - 2,62
TPE FLEXIBLE (Filaflex - Recreus)	17,8 - 18,6	330 - 370	-

A continuación se muestra la comparativa de los resultados obtenidos para la resistencia mecánica frente a los ofrecidos por el fabricante:

Material	R _m tracción media (MPa)	R _m tracción fabricante (MPa)	Variación (MPa)
ABS (ABS Azul - PrintedDreams)	42,75	42,5	+1
PLA (PLA Amarillo - BQ)	55,8	51	+9
PLA+ LATÓN (Brass Filament - TechnologyOutlet)	45,1	-	-
PETG+ FIBRAC (Carbonfill - Formfutura)	77,8	52,5	+48
TPE FLEXIBLE (Filaflex -Recreus)	17,8	39	-54

Como se puede observar los datos obtenidos para el ABS y el PLA resultan bastante congruentes con los proporcionados por el fabricante, mientras que los del resto de materiales difieren mucho.

Debido a la dificultad para encontrar datos fiables de propiedades mecánicas para materiales exóticos sólo se van a utilizar los datos de resistencia del material en bruto proporcionados por el fabricante para establecer comparaciones con el ABS y el PLA.

5.2.2.3 Definición del resto de parámetros de fabricación

Parámetros geométricos de la base, paredes y capa inicial:

Parámetros de la base y capa inicial	Valores (mm)
Juego Boquilla/plataforma	-0,2
Espesor Pared	0,8
Espesor Bases	0,8
Espesor Capa Inicial	0,3

Parámetros para cada material:

Material	T° Fusor (°C)	T° Base (°C)	Vel. pared /relleno (mm/s)	Ancho de capa	Plat. Adhesión	Vent. Capa	Dist. / Vel. Retracción (mm / mm/s)	Patrón de pared/relleno y ángulo (°)
ABS	235	80			SI (8mm)			
PLA	200	50	60 / 30	0,4		100%	6,5 / 25	Líneas / cuadrícula
PLA+ LATÓN	220	50			NO			[45,135]
PETG+ FIBRAC	245	60						
FILA FLEX	230	50	30/15				NO	

5.2.2.4 Geometría de las probetas

Las dimensiones se toman de la Norma ASTM 638-14. Se va a utilizar la probeta de uso general tipo I.

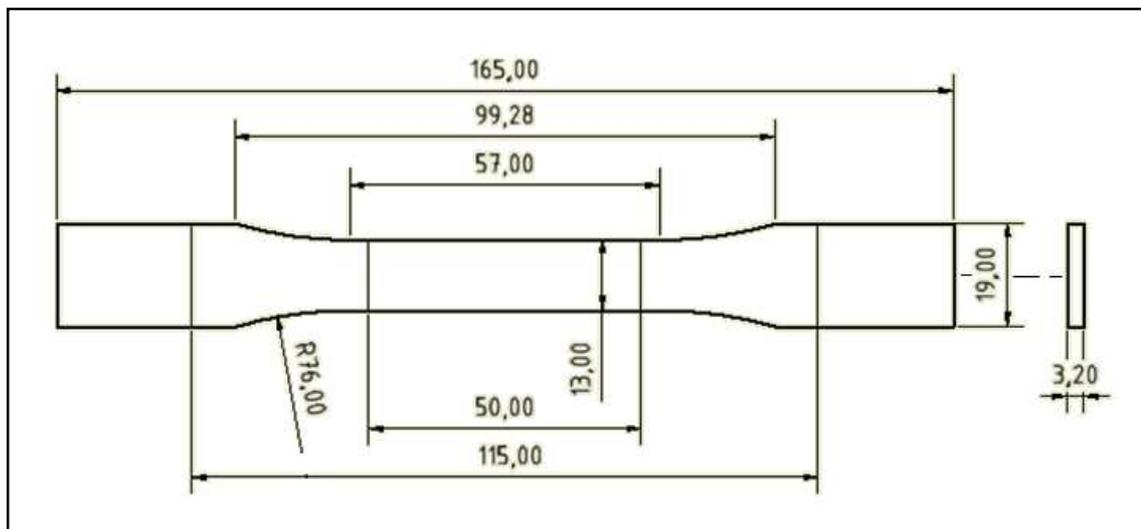


Figura 146. Geometría de la probeta de uso general tipo I según ASTM 638-14

5.2.2.5 Condiciones de los ensayos

Se sigue la Norma ASTM 638-14, con varias salvedades. En primer lugar no se va a usar extensómetro, ya que las probetas, aunque rompan por la zona estrecha no siempre rompen dentro de la longitud de referencia, de forma que no se registra correctamente la deformación en el momento de la rotura con este dispositivo.

Por lo tanto, los datos obtenidos en cuanto a alargamientos, módulo de elasticidad y los límites elástico proporcional y convencional están referidos a la variación de la distancia entre mordazas (ver sección 4.1.1) y no a la variación de la longitud de referencia medida con extensómetro.

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L}$$

En cuanto al número de probetas, a pesar de que la norma especifica que se ensayen cinco probetas iguales, por limitaciones de tiempo de fabricación y dado que se están ensayando diversos parámetros para obtener una primera aproximación a su influencia en las características mecánicas, se van a fabricar dos probetas iguales de cada tipo y en caso de que los resultados varíen significativamente se realizará un tercer ensayo.

Por último se va a fijar una velocidad de 5mm/min según lo establecido en la Norma ASTM. Esta velocidad se va a variar en el ensayo con Filaflex, en el que se alcanzan deformaciones de entre el 400% y el 600%, por lo que se requiere una velocidad de 50mm/min para que la rotura suceda entre 0,5 y 5 min.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Ensayo a tracción ABS

6.1.1. Dimensiones de las probetas

Según las Normas consultadas (apartado 4.1.1.) se registran los valores mínimos y máximos para la anchura y espesor de cada probeta en el centro y a al menos 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y se comprueba que están dentro de la tolerancia de la normativa de ensayo. Se utilizan las medias para calcular la sección transversal.

Para el espesor, la Norma ASTM establece una medida de 3.2mm con una tolerancia de ± 0.4 mm. Para la anchura la tolerancia es de $\pm 0,5$ mm. En cuanto a las marcas para el ensayo establece una tolerancia de $\pm 0,25$ mm para la longitud de referencia y ± 5 mm para las marcas para la colocación de las mordazas.

Debido a que se ha establecido un juego negativo de -0,2mm en Z para mejorar la adherencia a la base y el acabado de la superficie inferior, las medidas de la piezas impresas con orientación 1 en este eje están desviadas esta distancia respecto a la longitud definida, pero sigue estando dentro de la tolerancia indicada por la Norma (± 0.4 mm). En cuanto a la anchura, las piezas impresas con orientación 1 presentan medidas del orden de +0,15 mm, debido a que algunas capas sobresalen ligeramente sobre el resto y a que la plataforma de adhesión utilizada en la construcción crea un reborde en la superficie inferior que aumenta esta medida. Las piezas con orientación 2 presentan irregularidades en la anchura del orden 0,1mm debido a que se ha retirado el soporte necesario para su fabricación. En estos casos estas dimensiones también están dentro de lo establecido por la Norma ($\pm 0,5$ mm). En la siguiente tabla se resumen los datos de partida de cada ensayo.

Caso	Nº 1	Nº2	Nº3
1 e=0,1 re=20 or=1	A: 13,16-13,17-13,18=13,17 E: 2,99 - 2,97 - 3=2,987 S=39,33 Peso:6	A: 13,15-13,17-13,16=13,16 E: 3,03 - 2,96 - 2,99=2,993 S=39,39 Peso:5,9	A: 13,28-13,26-13,30=13,28 E: 2,95 - 2,92 - 2,96=2,943 S=39,08 Peso:5,9
2 e=0,2 re=20 or=1	A: 13,16-13,19-13,18=13,18 E: 3,04 - 3,04 - 3,06=3,046 S=40,15 Peso:5,9	A: 13,21-13,20-13,18=13,20 E: 3,04 - 3,05 - 3,05=3,047 S=40,22 Peso:5,9	
3 e=0,1 re=50 or=1	A: 13,26-13,23-13,24=13,24 E: 2,89 - 2,91 - 2,93=2,91 S=38,53 Peso:7	A: 13,21-13,24-13,23=13,23 E: 2,94 - 2,93 - 2,93=2,93 S=38,81 Peso:7	
4 e=0,1 re=20 or=2	A: 13,02-13,04-13,09=13,05 E: 3,34 - 3,29 - 3,32=3,32 S=43,28 Peso:5,7	A: 13,09-13,11-13,06=13,09 E: 3,36 - 3,32 - 3,31=3,33 S=43,59 Peso:5,8	
5			

e=0,1	A: 13,06-13,09-13,06=13,07	A: 13,11-13,06-13,09=13,09
re=20	E: 3,29 - 3,30 - 3,28=3,29	E: 3,28 - 3,30 - 3,31=3,30
or=3	S=43,00	S=43,20
	Peso:5,8	Peso:5,7

Leyenda

- *e*: espesor (mm)
- *re*: relleno (%)
- *or*: orientación de fabricación (1,2,3)(ver apartado 5.2.2.1.)
- *A*: ancho (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)
- *E*: espesor (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)
- *S*: área transversal de la sección estrecha ($A_{medio} \times E_{medio}$) (mm²)
- *Peso*: peso de la probeta (g)
- *N*^o: número del ensayo dentro de cada caso

A partir de estos datos se puede observar que el peso no varía significativamente en los distintos casos excepto en el del relleno al 50%, en el que el peso aumenta un 18,5% de media.

En la siguiente imagen se muestran las probetas ordenadas tal y como aparecen en la tabla anterior (caso 1(x3), caso 2(x2), caso 3(x2), caso 4(x2) y caso 5(x2)).

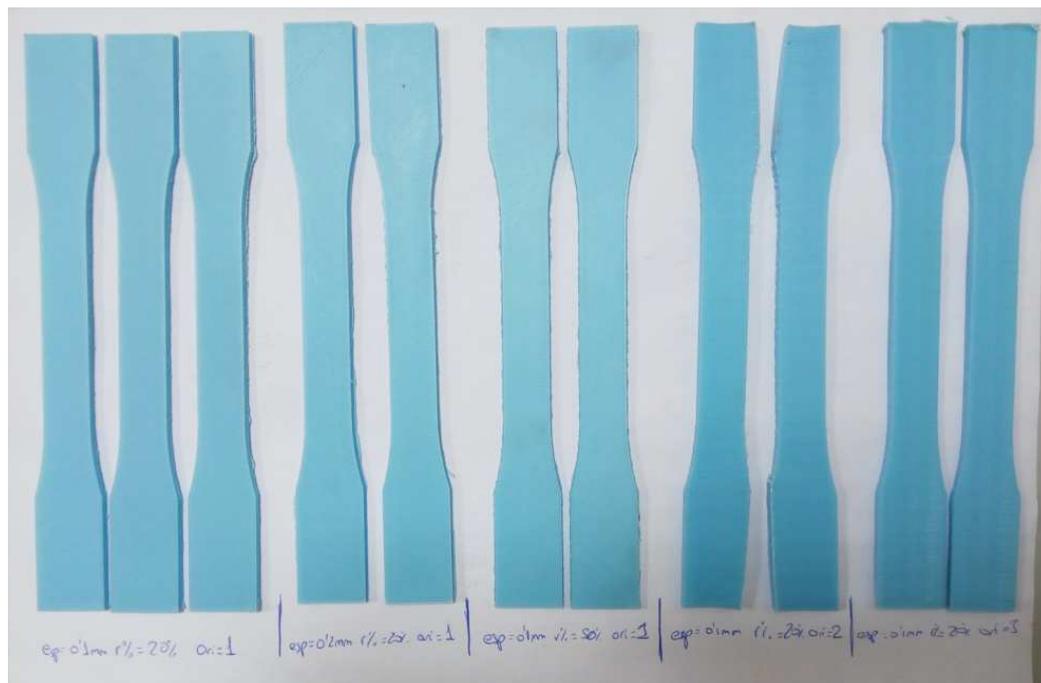


Figura 147. Probetas fabricadas con ABS

6.1.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos

En la siguiente imagen se muestran las probetas tras el ensayo. Se ha incluido un espécimen de cada tipo, ordenados de arriba abajo desde el caso 1 hasta el caso 5, con el objetivo de que se puedan apreciar los distintos tipos de rotura. Se puede observar que todas rompen por la zona estrecha (alguna de ellas fuera de la longitud de referencia) excepto la que se ha fabricado con la orientación 3 (capas perpendiculares al esfuerzo), que ha roto con una tensión muy baja por separación de capas en la zona del radio de acuerdo.

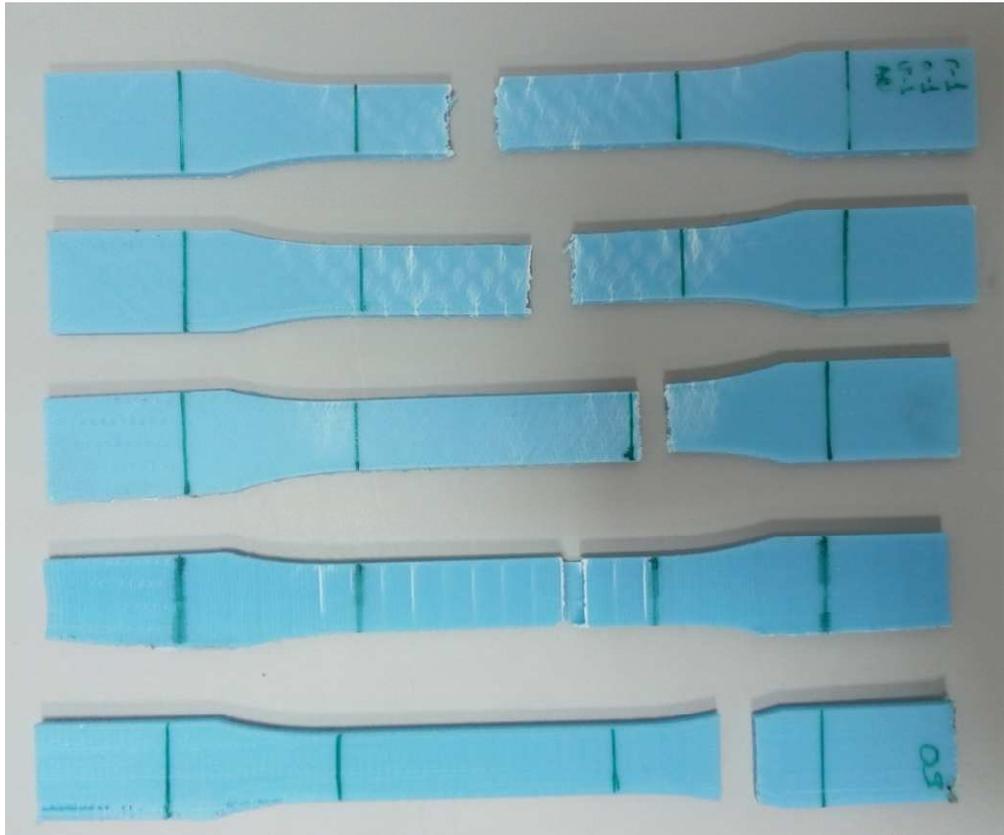


Figura 148. Probetas de ABS tras el ensayo (una de cada tipo)

En los dos primeros casos se observa que la rotura se da según una línea quebrada debido a la orientación de las capas en dirección al esfuerzo y a la trama a 45° del relleno.

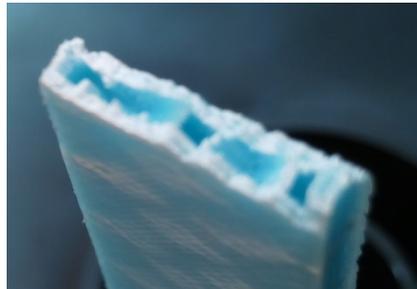


Figura 149. Sección de fractura. Probeta 20% relleno y orientación 1

En el tercer caso, al tener un 50% de relleno la probeta es casi maciza, por lo que la deformación aparece de forma más homogénea.

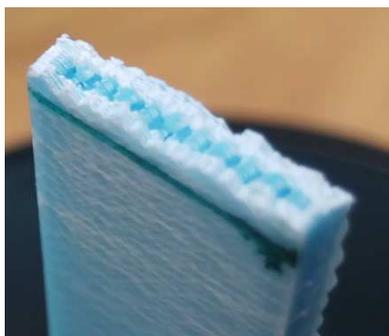


Figura 150. Sección de fractura. Probeta 50% relleno

En el cuarto caso la fractura sucede según una rectas perpendiculares al esfuerzo, localizadas en los puntos de unión del relleno con las paredes.

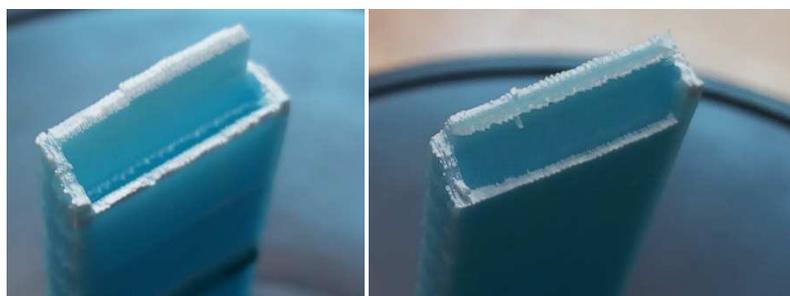


Figura 151. Sección de fractura. Probeta orientación 2

En el último caso la fractura se produce a baja tensión como consecuencia de la separación de capas, ya que debido a la orientación de construcción estas se apilan de forma perpendicular al esfuerzo, lo que hace que la probeta rompa prematuramente porque la interfase entre capas en este material resulta ser muy débil.



Figura 152. Sección de fractura. Probeta orientación 3

La gráfica que se muestra a continuación corresponde a un ensayo con ABS del caso 1, con los parámetros espesor de capa: 0,1, porcentaje de relleno: 20% y orientación: 1. El comportamiento es frágil aunque se aprecia una pequeña zona plástica.

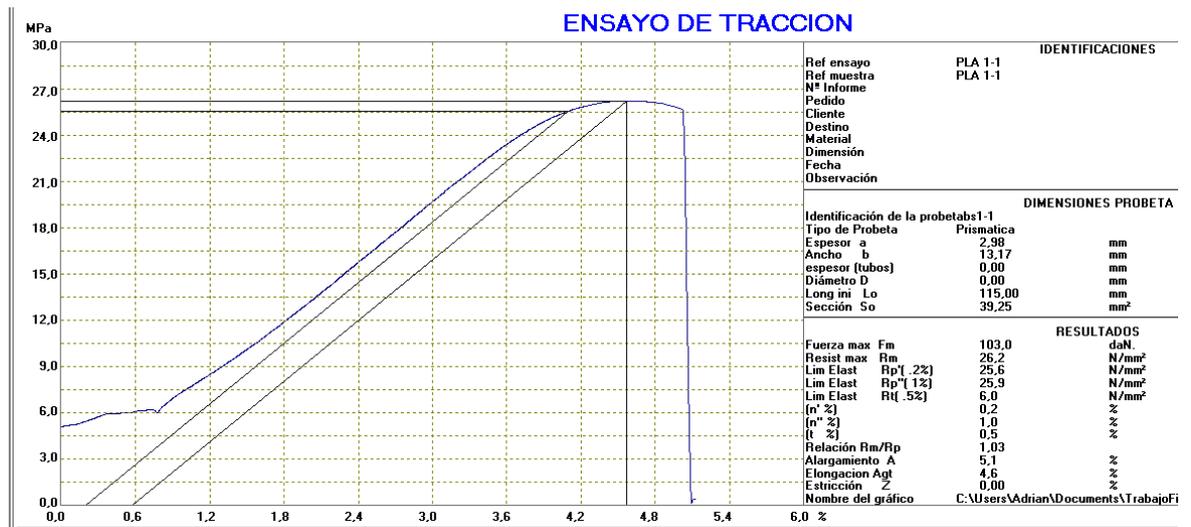


Figura 153. Gráfico tensión-deformación probeta ABS

En el gráfico aparece representado el límite elástico convencional ($R_p(0.2\%)=25,6\text{MPa}$), obtenido como el punto que corta la recta paralela a la zona elástica lineal (ley de Hooke) trazada desde el 0,2% de deformación y la resistencia máxima a tracción ($R_m=26,27\text{MPa}$). También se puede distinguir el límite de proporcionalidad, localizado aproximadamente en el 3,4% de deformación (22,5MPa) y se puede obtener el módulo de elasticidad a tracción utilizando la pendiente de la recta paralela a la zona lineal. Por último también se proporcionan los datos de alargamiento a la rotura ($\epsilon_r=5,1\%$) y la elongación en el punto de resistencia máxima (4,6 %).

El siguiente gráfico corresponde a los resultados agrupados de los ensayos a tracción con ABS.

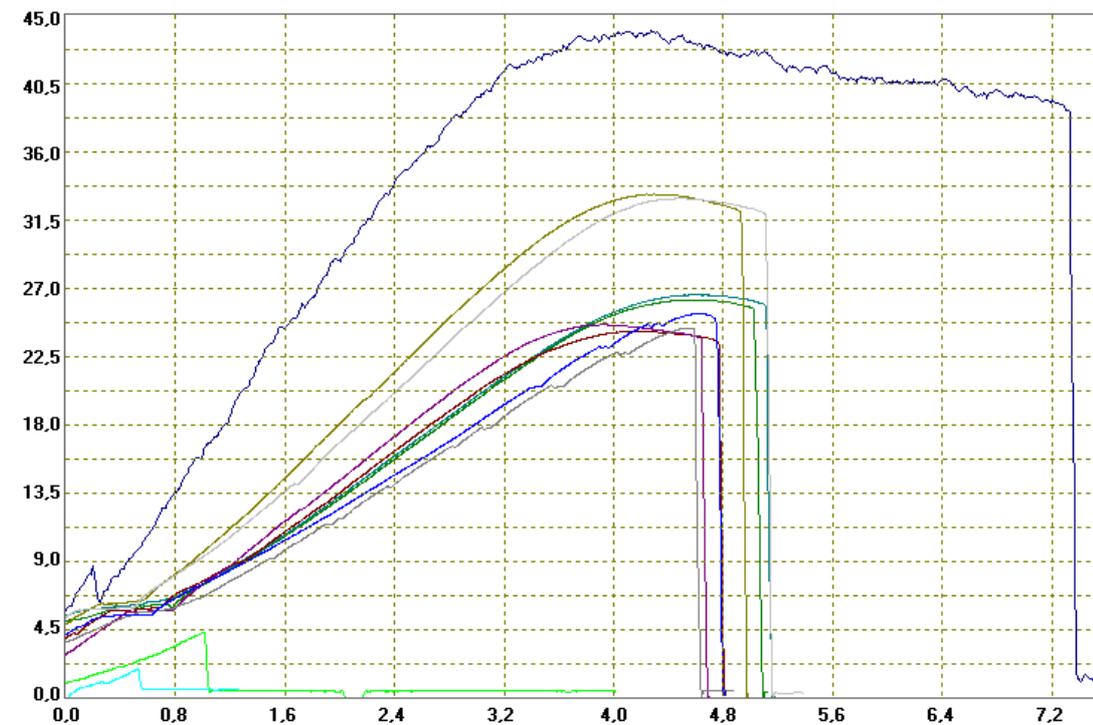


Figura 154. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con ABS

Leyenda

- Azul oscuro: filamento ABS
- Amarillo verdoso y gris: caso 3
- Verde claro y azul claro: caso 1
- Rojo y morado: caso 2
- Azul oscuro y gris: caso 4
- Verde y azul brillante: caso 5

Se puede observar cómo el cambio de parámetros provoca una variación en el comportamiento a tracción de la probeta; en todos los casos las modificaciones de parámetros provocan una disminución de la deformación a la rotura con respecto al caso 1. La pendiente de la zona elástica disminuye y se reduce la ductilidad en el caso de utilizar la orientación 2 (caso 4), mientras que dicha pendiente (y por lo tanto el módulo de Young) aumenta para los casos de espesor de capa de 0,2 mm (caso 2) y relleno del 50% (caso 3). En el caso de la orientación 3 la rotura de la probeta es tan prematura que apenas se pueden sacar conclusiones de su comportamiento a tracción, salvo que su capacidad de deformación es prácticamente nula. En todos los casos el módulo de Young, la ductilidad y deformación a la rotura son menores que en el filamento.

Por otro lado, exceptuando los casos de orientación 3 y aumento de relleno, las diferencias en cuanto a resistencia máxima no son demasiado pronunciadas; tanto el uso de capas de mayor espesor como el cambio de orientación de las capas reducen la resistencia máxima, pero de forma leve, por lo que haría falta un estudio estadístico con muchos más ensayos para concluir que dicha variación es significativa. Otras conclusiones que se extraen del gráfico son las grandes diferencias respecto al material en bruto y la escasa resistencia de las piezas con capas orientadas de forma perpendicular al esfuerzo, lo que apunta a una resistencia de la interfase entre capas mucho menor que la del material en bruto.

En la siguiente tabla se recogen los datos correspondientes al Límite elástico convencional - R_p (MPa) y a la Resistencia máxima a tracción - R_m (MPa) con las deformaciones a las que se producen, así como la Deformación nominal a rotura - ϵ_t (%) y el Módulo de elasticidad - E_t (MPa). Como se ha indicado en la definición de las condiciones de ensayo, los alargamientos están referidos a la variación de la distancia entre mordazas en vez de a la variación de la longitud de referencia medida con extensómetro.

ABS	Lím. elástico convencional R_p (MPa) - ϵ_{Rp} (%)	Resistencia máxima a tracción R_m (MPa) - ϵ_{Rm} (%)	Deformación nominal rotura - ϵ_t (%)	Módulo de elasticidad - E_t (MPa)
Caso 1 e=0,1 re=20 or=1	22,4 (3,1) - 25,6 (4,1) - 25,6 (4,1)	24,5 (3,7) - 26,2 (4,6) - 26,6 (4,6)	4,1 - 5,1 - 5,1	700 - 660 - 645
Caso 2 e=0,2 re=20 or=1	23,2 (3,6) - 23,7 (3,4)	24,2 (4,2) - 24,6 (3,9)	4,8 - 4,7	745 - 720
Caso 3 e=0,1 re=50 or=1	31,9 (3,8) - 32 (4)	33,2 (4,2) - 32,9 (4,5)	5,0 - 5,3	1020 - 867
Caso 4 e=0,1 re=20	22,7 (4) - 24,5 (4,2)	24,4 (4,6) - 25,3 (4,7)	4,8 - 4,8	580 - 620

or=2

Caso 5

e=0,1

re=20

or=3

-

4,4 - 1,9

1 - 0,5

-

Leyenda

- e: espesor (mm)
- re: relleno (%)
- or: orientación de fabricación (1,2,3)
(ver apartado 5.2.2.1.)
- Los resultados de cada ensayo dentro de cada caso se presentan separados por guiones: Resultado ensayo 1 - Resultado ensayo 2 ...

En la gráfica siguiente se reflejan los datos de Resistencia mecánica máxima obtenidos en los ensayos con los distintos parámetros.

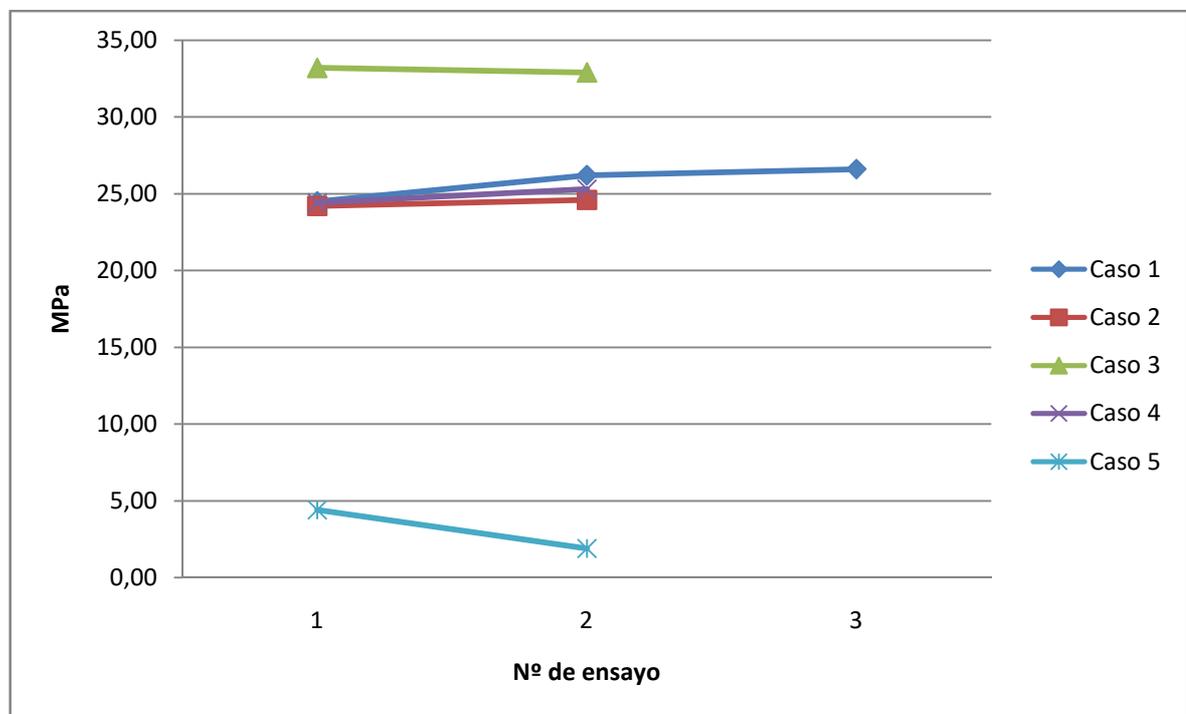


Figura 155. Comparativa de resistencia máxima de probetas de ABS

Como ya se ha explicado a partir de los gráficos tensión-deformación, en estos resultados se puede observar cómo apenas varían los resultados de Resistencia mecánica en función de los parámetros, exceptuando el porcentaje de relleno y la orientación de las capas de forma perpendicular al esfuerzo (orientación 3).

El cambio de relleno provoca que la probeta sea más maciza y se reduzcan los huecos, lo que obviamente conlleva un aumento de la resistencia mecánica.

En cuanto a la orientación de las capas, su orientación de forma perpendicular al esfuerzo provoca que la tensión recaiga en la interfase entre capas, la zona más débil en las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva y especialmente en el caso del ABS. En la gráfica se puede observar la debilidad de esta interfase ya que la pieza rompe con una tensión mucho más baja que las fabricadas con otras orientaciones debido a la separación de capas.

Estos datos se resumen en la siguiente tabla, en la que se muestra la variación porcentual de la resistencia en función de los parámetros utilizados y la variación respecto del material en bruto (datos proporcionados por el fabricante).

ABS	R _m media (MPa)	Desviación típica	Diferencia con Caso 1	Diferencia con material en bruto (fabricante)
Caso 1 e=0,1 re=20 or=1	25,77	1,12	-	-39%
Caso 2 e=0,2 re=20 or=1	24,40	0,28	-5,30%	-43%
Caso 3 e=0,1 re=50 or=1	33,05	0,21	+ 28,27%	-22%
Caso 4 e=0,1 re=20 or=2	24,85	0,64	-3,56%	-42%
Caso 5 e=0,1 re=20 or=3	3,15	1,77	-87,77%	-93%

Los datos numéricos corroboran las apreciaciones realizadas observando las gráficas anteriores; el uso de un espesor de capa mayor conlleva una pequeña disminución de resistencia del 5,3% mientras que eligiendo la orientación de construcción 2 (capas paralelas al esfuerzo pero perpendiculares a la orientación 1) se obtiene también una leve disminución de resistencia (-3,5%). Como se ha explicado, estas variaciones son demasiado pequeñas como para confirmarse con tan pocos casos estudiados, por lo que sería conveniente utilizar un número mayor de probetas para cuantificar la influencia negativa de estos parámetros mediante un estudio estadístico.

En los datos numéricos también se observa que la influencia de los otros dos parámetros es clara; el aumento del relleno hasta el 50% (con un aumento del 18,5% de peso) provoca un aumento del 28,7% en la resistencia a tracción, mientras que orientar las capas de forma perpendicular al esfuerzo provoca la rotura prematura de la probeta con una reducción de la resistencia del 93%. Otro dato interesante que se extrae de la tabla es que con las diferentes combinaciones de parámetros los mejores resultados que se pueden obtener son un 22% peores que los del material en bruto.

6.2. Ensayo a tracción PLA

6.2.1. Dimensiones de las probetas

Las consideraciones que se exponen en el ensayo con ABS sobre las dimensiones resultantes de las probetas son las mismas para el ensayo con PLA.

Caso	Nº 1	Nº2	Nº3
1 e=0,1 re=20 or=1	A: 13,17-13,16-13,15=13,16 E: 2,98 - 2,97 - 3,00=2,983 S=39,26 Peso:7,6	A: 13,18-13,17-13,19=13,18 E: 3,00 - 2,96 - 2,98=2,98 S=39,28 Peso:7,7	A: 13,24-13,26-13,29=13,26 E: 2,94 - 2,95 - 2,96=2,95 S=39,12 Peso:7,7
2 e=0,2 re=20 or=1	A: 13,29-13,27-13,26=13,27 E: 3,03 - 3,05 - 3,06=3,046 S=40,42 Peso:7,6	A: 13,28-13,31-13,32=13,30 E: 3,04 - 3,04 - 3,05=3,043 S=40,47 Peso:7,7	A: 13,27-13,29-13,28=13,28 E: 3,03 - 3,04 - 3,06=3,043 S=40,41 Peso:7,6
3 e=0,1 re=50 or=1	A: 13,26-13,28-13,25=13,26 E: 2,93 - 2,89 - 2,92=2,913 S=38,63 Peso:8,9	A: 13,22-13,26-13,23=13,24 E: 2,92 - 2,91 - 2,93=2,92 S=40,47 Peso:8,8	A: 13,26-13,27-13,24=13,26 E: 2,93 - 2,92 - 2,93=2,93 S=38,85 Peso:8,9
4 e=0,1 re=20 or=2	A: 13,06-13,04-13,07=13,06 E: 3,35 - 3,38 - 3,36=3,36 S=43,88 Peso:7,5	A: 13,11-13,09-13,08=13,09 E: 3,36 - 3,37 - 3,38=3,37 S=44,11 Peso:7,5	A: 13,07-13,05-13,06=13,06 E: 3,33 - 3,37 - 3,35=3,35 S=43,75 Peso:7,5
5 e=0,1 re=20 or=3	A: 13,06-13,04-13,05=13,05 E: 3,29 - 3,31 - 3,28=3,29 S=42,93 Peso:7,5	A: 13,02-13,00-13,03=13,02 E: 3,33 - 3,30 - 3,32=3,32 S=43,23 Peso:7,4	A: 13,07-13,08-13,06=13,07 E: 3,27 - 3,29 - 3,28=2,28 S=29,80 Peso:7,5

Leyenda

- e: espesor (mm)
- re: relleno (%)
- or: orientación de fabricación (1,2,3)(ver apartado 5.2.2.1.)
- A: ancho (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)
- E: espesor (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)
- S: área transversal de la sección estrecha ($A_{media} \times E_{medio}$) (mm²)
- Peso: peso de la probeta (g)
- N°: número del ensayo dentro de cada caso

A partir de estos datos se puede observar que el peso no varía significativamente en los distintos casos, excepto en el del relleno al 50%, en el que el peso aumenta un 16% de media.

En la siguiente imagen se muestran algunas de las probetas de PLA utilizadas en los ensayos ordenadas tal y como aparecen en la tabla anterior (caso 1(x3), caso 2(x2), caso 3(x2), caso 4(x2) y caso 5(x2)).

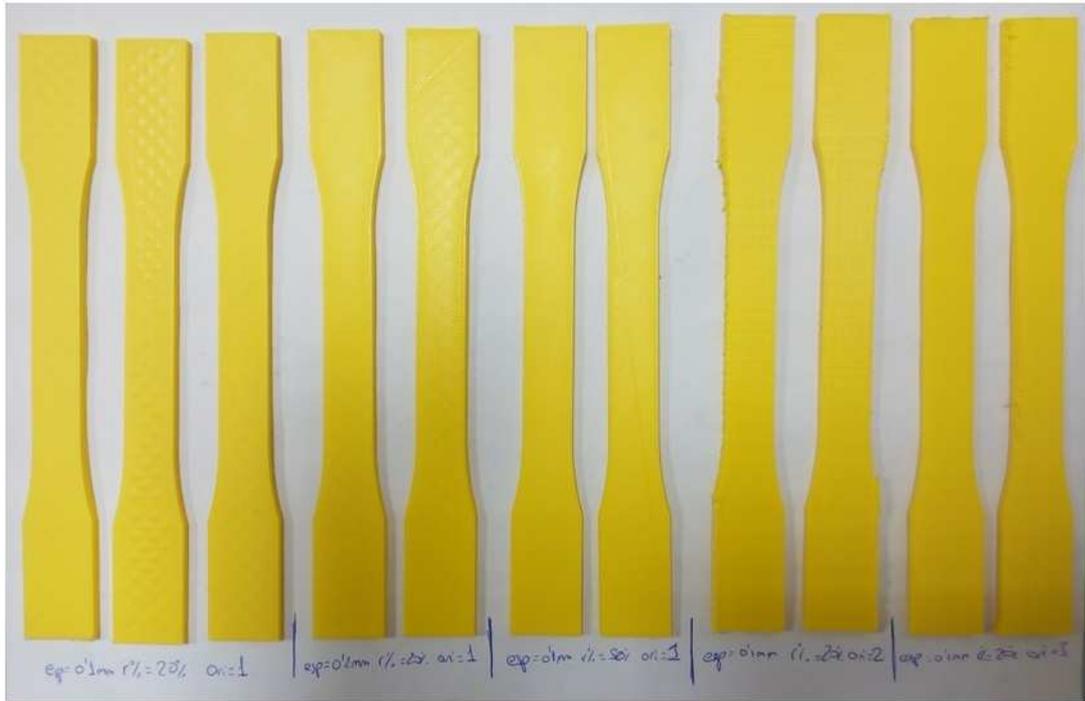


Figura 156. Probetas fabricadas con PLA

6.2.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos

En la siguiente imagen se muestran las probetas de PLA tras el ensayo. Se ha incluido un espécimen de cada tipo, ordenados de arriba abajo desde el caso 1 hasta el caso 5. Se puede observar cómo, aunque todas rompen por la zona estrecha, algunas lo hacen fuera de la longitud de referencia.

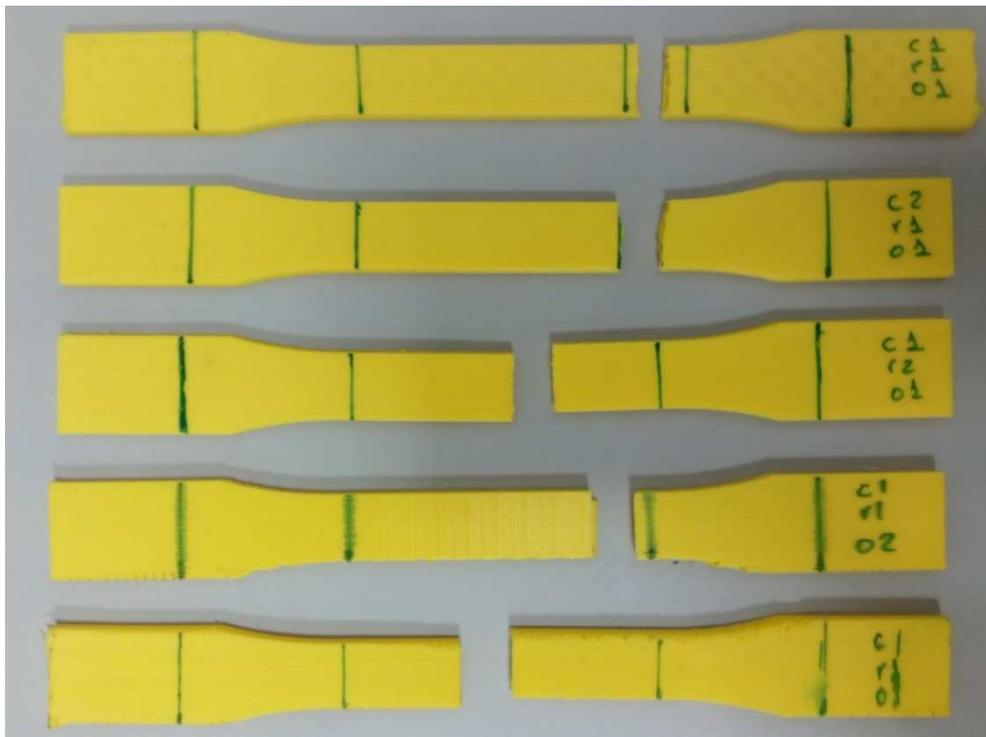


Figura 157. Probetas ensayadas de PLA (una de cada tipo)

En los dos primeros casos se observa una rotura según una línea irregular debido a la orientación de las capas en dirección al esfuerzo y a la trama a 45° del relleno.

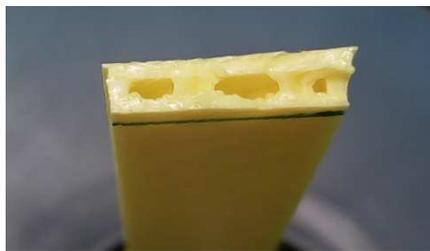


Figura 158. Sección de fractura. Probeta de referencia

En el tercer caso (50% de relleno), la probeta es casi maciza como se puede observar en su sección transversal.

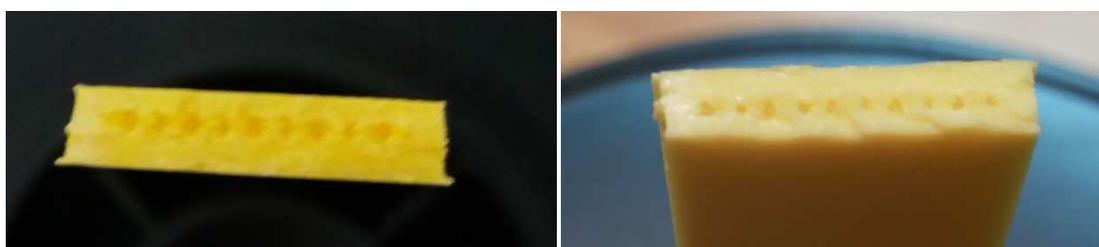


Figura 159. Sección de fractura. Probeta relleno 50%

En el cuarto caso la línea de fractura se produce según una recta perpendicular al esfuerzo, localizada en un punto de unión del relleno con las paredes.

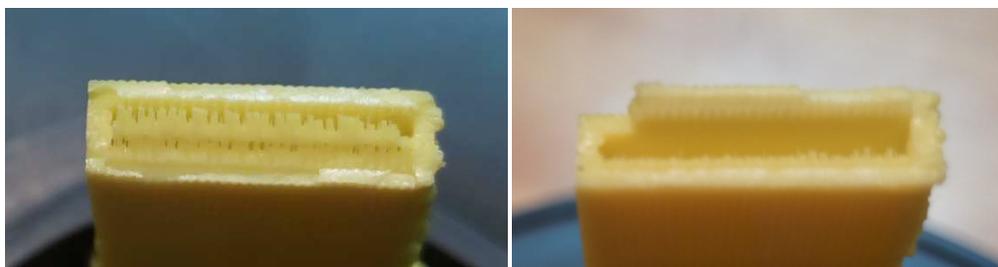


Figura 160. Sección de fractura. Probeta orientación 2

En el último caso la fractura se produce debido a la separación de capas, ya que debido a la orientación de construcción estas se apilan de forma perpendicular al esfuerzo.



Figura 161. Sección de fractura. Probeta orientación 3

La gráfica que se muestra a continuación corresponde a un ensayo del caso 1 con PLA con los parámetros espesor de capa: 0,1, relleno 20% y orientación 1. Se puede observar que el comportamiento es más rígido que el del ABS.

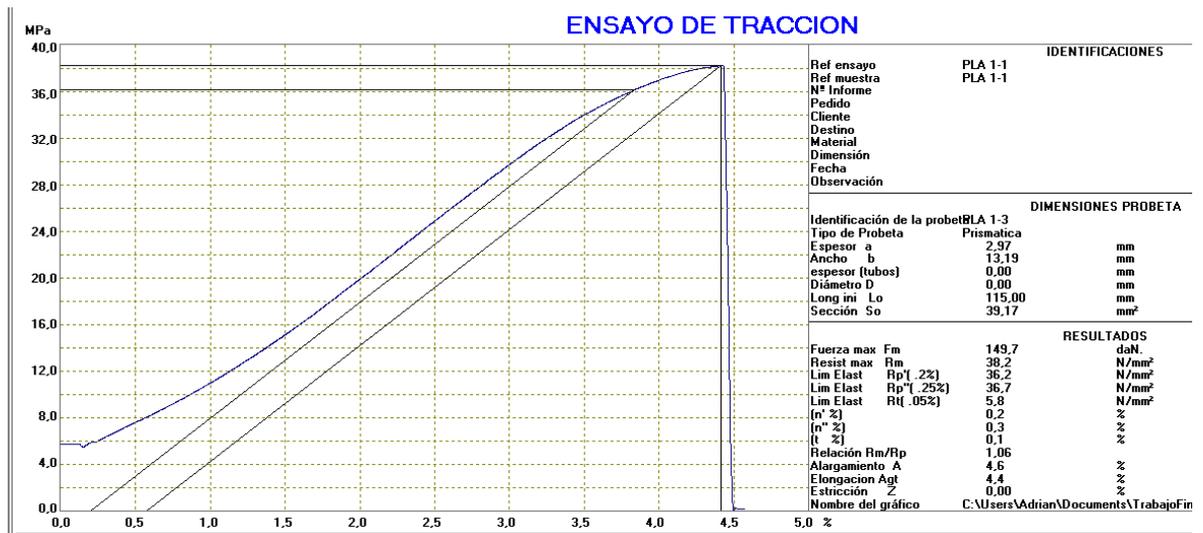


Figura 162. Gráfico tensión-deformación probeta PLA

En el gráfico aparece representado el límite elástico convencional ($R_p(0.2\%)=36,2\text{MPa}$), obtenido como el punto que corta la recta paralela a la zona elástica lineal (ley de Hooke) trazada desde el 0,2% de deformación y la resistencia máxima a tracción ($R_m=38,2\text{MPa}$). También se puede distinguir el límite de proporcionalidad, localizado aproximadamente en el 3,4% de deformación ($33,2\text{MPa}$) y se puede obtener el módulo de elasticidad a tracción utilizando la pendiente de la recta paralela a la zona lineal. Por último también se proporcionan los datos de alargamiento a la rotura ($\epsilon_t=4,5\%$) y la elongación en el punto de resistencia máxima (4,4 %).

El siguiente gráfico corresponde a los resultados agrupados de los ensayos a tracción con PLA.

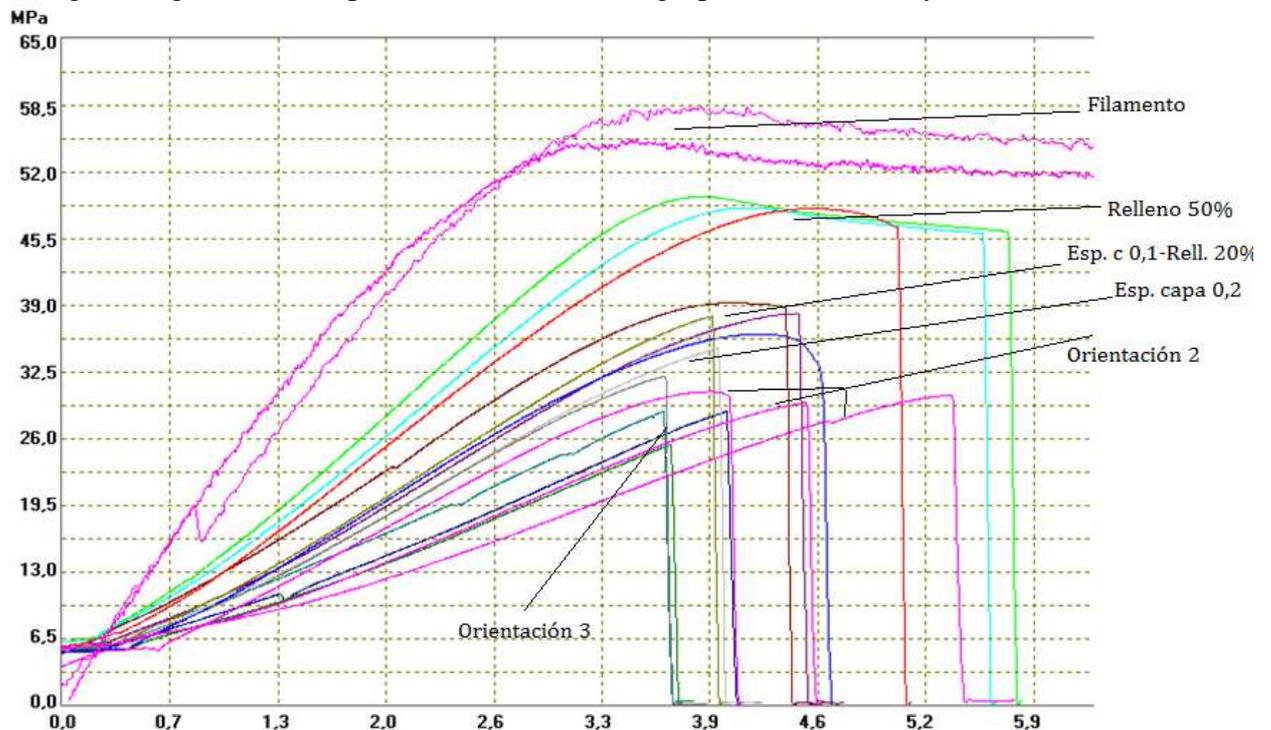


Figura 163. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con PLA

En las siguientes gráficas se muestran los resultados de los ensayos con los distintos parámetros:

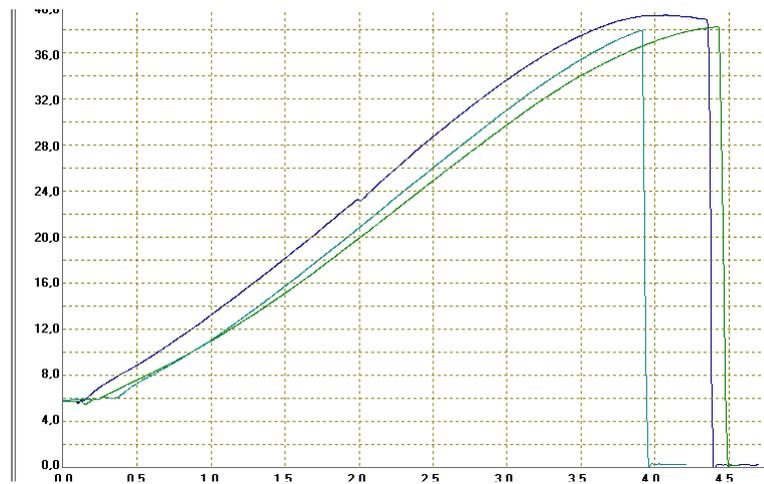


Figura 164. Gráficas tensión-deformación Caso 1

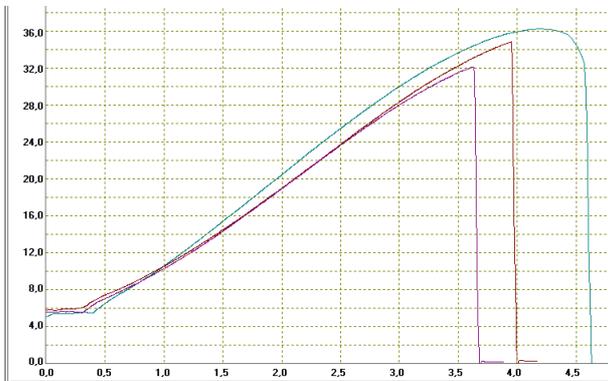


Figura 165. Gráficas tensión-deformación Caso 2

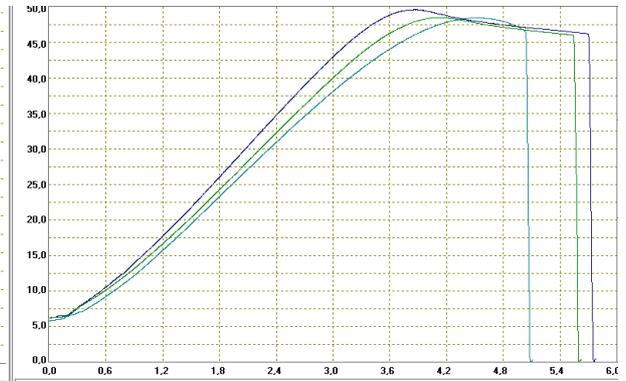


Figura 166. Gráficas tensión-deformación Caso 3

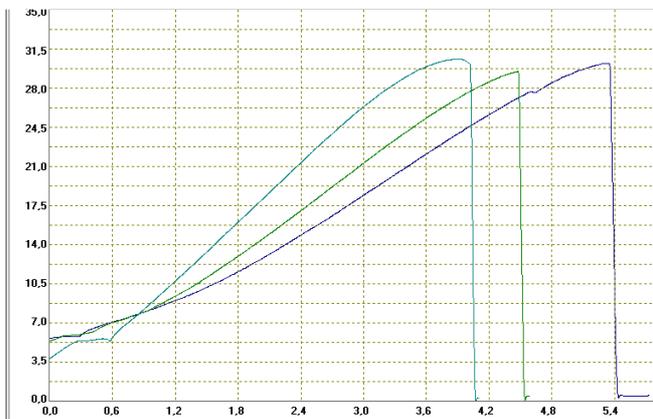


Figura 167. Gráficas tensión-deformación Caso 4

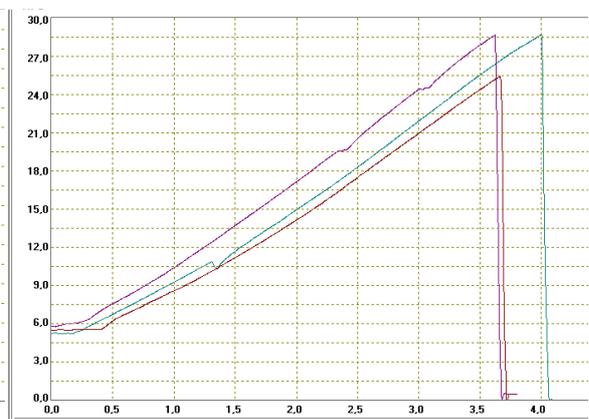


Figura 168. Gráficas tensión-deformación Caso 5

Para poder analizar estos datos de forma más clara a continuación se muestra un gráfico con los datos agrupados de un ensayo con cada tipo de probeta. Se han elegido en cada caso los resultados con valores intermedios de cada serie de probetas.

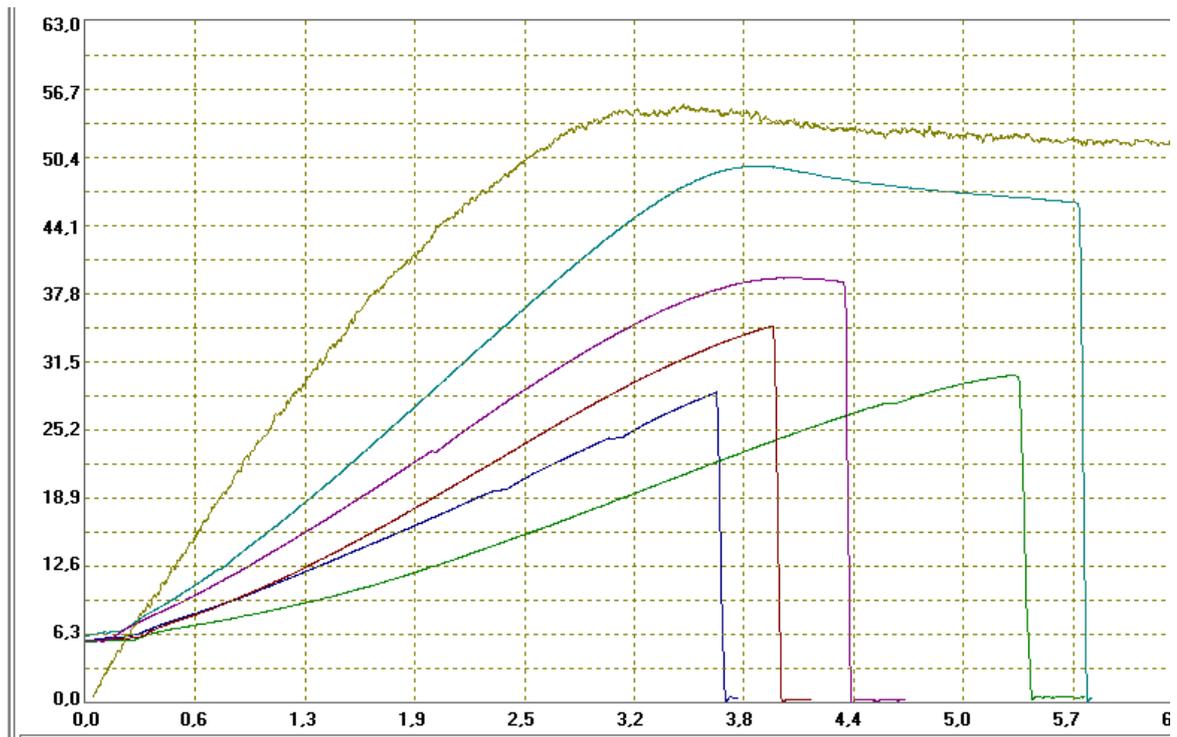


Figura 169. Gráfica tensión-deformación agrupada de cada tipo de probeta

Leyenda

- Verde claro: filamento PLA
- Azul claro: caso 3
- Morado: caso 1
- Rojo: caso 2
- Azul oscuro: caso 5
- Verde oscuro: caso 4

En primer lugar se observa que la variación de los parámetros de fabricación provoca una variación en el comportamiento a tracción de la probeta; la pendiente de la zona elástica (y en consecuencia el módulo de Young) y la ductilidad disminuyen en todos los casos respecto al caso 1 excepto en el caso 3 con relleno del 50%. La deformación a la rotura también disminuye excepto en los casos del aumento de relleno (caso 3) y en el de la orientación 2 (caso 4), en los que sobrepasa el 5%. En todos los casos el módulo de Young, la ductilidad y deformación a la rotura son menores que en el filamento.

En cuanto a la resistencia mecánica se observan variaciones más significativas entre los distintos tipos de probetas que en el caso del ABS. Además, la reducción de la diferencia con el material en bruto y la menor caída de propiedades en caso de orientación de las capas perpendiculares al esfuerzo respecto a los ensayos con ABS parece indicar una unión más fuerte de las capas. Por otro lado, igual que sucedía en el caso del ABS, se observa una reducción de la resistencia mecánica en todos los casos excepto en el del aumento de relleno.

En la siguiente tabla se recogen los datos correspondientes al Límite elástico convencional - R_p (MPa) y a la Resistencia máxima a tracción - R_m (MPa) con las deformaciones a las que se producen, así como la Deformación nominal a rotura - ϵ_t (%) y el Módulo de elasticidad - E_t (MPa). Como se ha indicado en la definición de las condiciones de ensayo, los alargamientos están referidos a la variación de la distancia entre mordazas en vez de a la variación de la longitud de referencia medida con extensómetro.

PLA	Lim. elástico convencional R_p	Resistencia máxima a	Deformación nominal rotura -	Módulo de elasticidad a
-----	----------------------------------	----------------------	------------------------------	-------------------------

	(MPa) - ϵ_{Rp} (%)	tracción Rm (MPa) - ϵ_{Rm} (%)	ϵ_t (%)	tracción - E_t (MPa)
Caso 1 e=0,1 re=20 or=1	39,2 (4,1) - 38,2 (3,8) - 37,9 (3,8)	39,3 (4,1) - 38,2 (4,4) - 37,9 (3,9)	4,2 - 4,5 - 3,9	1000 - 980 - 1020
Caso 2 e=0,2 re=20 or=1	34,1 (3,8) - 31,8 (3,5) - 33,5 (3,5)	34,8 (3,9) - 32,1 (3,6) - 36,2 (4,2)	4 - 3,6 - 4,6	960 - 980 - 1020
Caso 3 e=0,1 re=50 or=1	48,6 (3,6) - 46,9 (3,7) - 44,1 (3,6)	49,6 (3,9) - 48,5 (4,1) - 48,5 (4,5)	5,7 - 5,6 - 5,1	1430 - 1316 - 1283
Caso 4 e=0,1 re=20 or=2	29,1 (4,9) - 28,3 (4,3) - 29,7 (3,5)	30,2 (5,3) - 29,5 (4,5) - 30,6 (3,9)	5,5 - 4,5 - 4,1	680 - 720 - 880
Caso 5 e=0,1 re=20 or=3	28,7(3,6) - 25,5(3,7) - 28,7(4)	28,7(3,6) - 25,5(3,7) - 28,7(4)	3,6 - 3,7 - 4	760 - 725 - 720

Leyenda

- *e: espesor (mm)*
- *re: relleno (%)*
- *or: orientación de fabricación (1,2,3)
(ver apartado 5.2.2.1.)*
- *Los resultados de cada ensayo dentro de cada caso se presentan separados por guiones: Resultado ensayo 1 - Resultado ensayo 2 ...*

En la gráfica siguiente se reflejan los datos de Resistencia mecánica máxima obtenidos en los ensayos con los distintos parámetros.

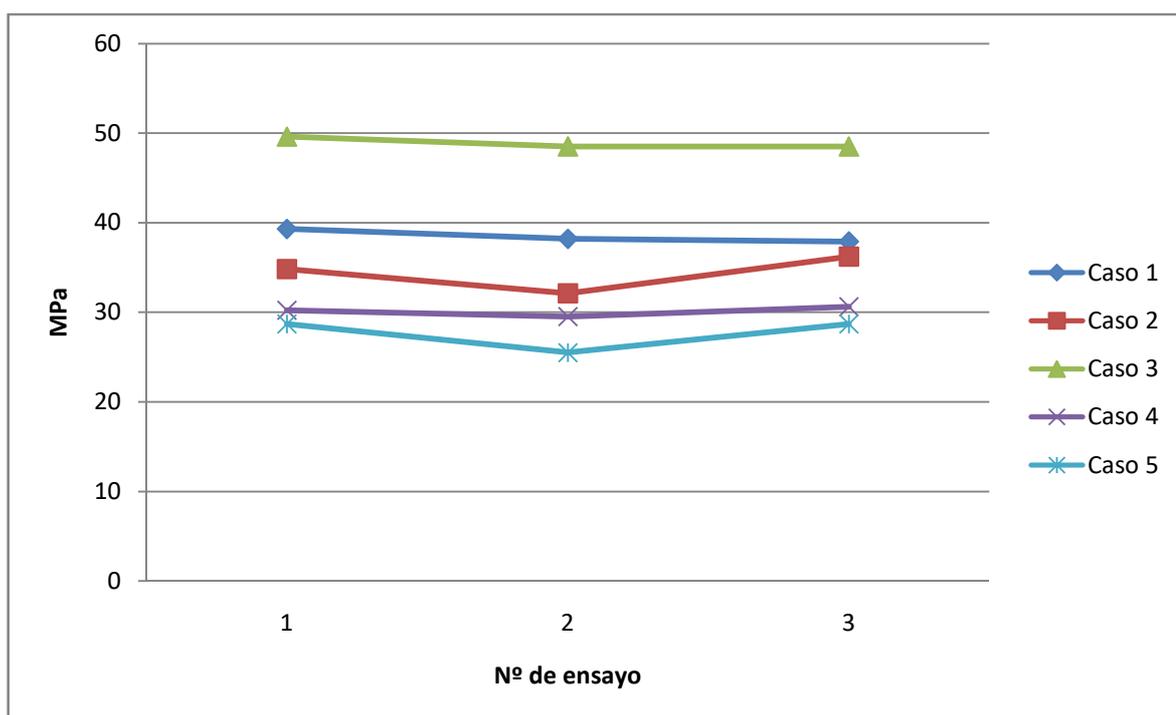


Figura 170. Comparativa de resistencia máxima de probetas de PLA

Estos datos se resumen en la siguiente tabla, en la que se muestra la variación porcentual de la resistencia mecánica media en función de los parámetros utilizados y la variación respecto del material en bruto (datos proporcionados por el fabricante).

PLA	R _m media (MPa)	Desviación típica	Variación respecto Caso 1	Diferencia con material en bruto (fabricante)
Caso 1 e=0,1 re=20 or=1	38,47	0,74	-	-25%
Caso 2 e=0,2 re=20 or=1	34,37	2,08	-11%	-33%
Caso 3 e=0,1 re=50 or=1	48,87	0,64	+ 27%	-4%
Caso 4 e=0,1 re=20 or=2	30,10	0,56	-22%	-41%
Caso 5 e=0,1 re=20 or=3	27,63	1,85	-28%	-46%

A partir de estos datos se puede observar que el aumento del relleno hasta el 50% provoca un gran aumento en la resistencia mecánica (27%), igual que sucedía en el caso del ABS (28,27%), ya que la pieza es más maciza y tiene menos huecos (su peso aumenta un 16%).

La variación del espesor de capa provoca una disminución del 11% en la resistencia a la tracción. En el caso del ABS era más leve, tan solo del 5,3%. Por tanto se observa que capas más finas conducen a mejores resultados tanto en acabado como en propiedades mecánicas, aunque el efecto es más claro en el PLA que en el ABS.

En cuanto a las orientaciones de fabricación, la orientación 2 con las capas en dirección paralela al esfuerzo pero perpendiculares a las de la orientación 1 reduce un 22% la resistencia a la tracción. Si se observa la pieza rota se puede observar que este comportamiento puede deberse a la distinta orientación del relleno respecto a la dirección de la fuerza, lo que provoca que la pieza rompa por el punto de unión entre el relleno y la pared.

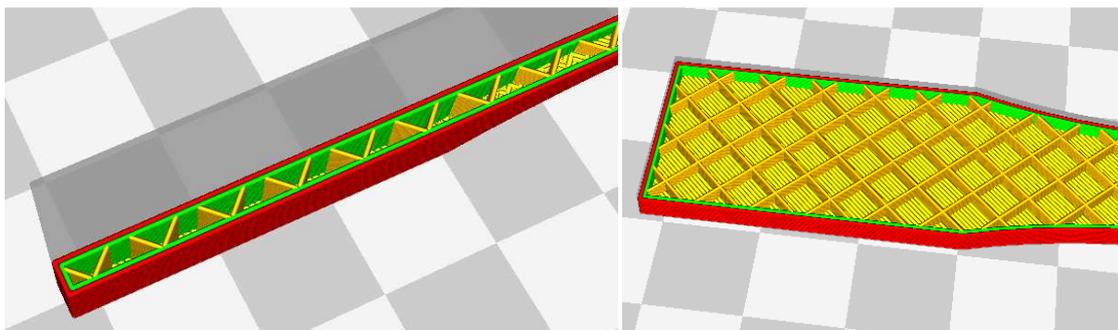


Figura 171. Detalle del relleno con la orientación 2 **Figura 172.** Detalle del relleno con la orientación 1

En el caso de la orientación 3, la superposición de capas perpendiculares al sentido de la fuerza de tracción provoca una disminución del 28% de la resistencia a tracción, una cifra mucho menor que en el caso del ABS, que rompía prematuramente (con una reducción del 87,7% de la resistencia máxima) debido a su débil unión entre capas.

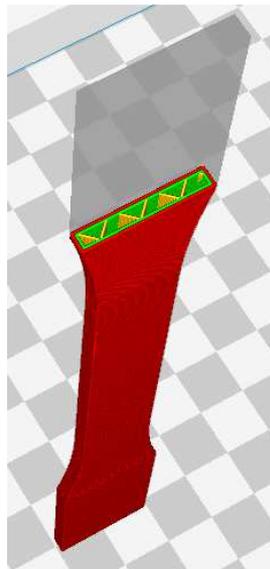


Figura 173. Detalle orientación 3

Por último, en la tabla se observa que con la mejor de las combinaciones de parámetros se puede conseguir una resistencia tan solo un 4% menor que la especificada por el fabricante para

el material, unos datos mucho mejores que los del ABS (-22%). Esto indica que la unión entre capas en este material es mucho mejor que en el ABS, al menos con los parámetros de fabricación utilizados en este estudio, y que con una combinación óptima de parámetros (relleno 100%, alineación de las capas con el esfuerzo, espesor fino de capa de 0,1 mm y parámetros de ángulo y patrón de trama, temperatura y velocidad óptimos) se podrían conseguir unos resultados de resistencia muy similares a los del filamento en bruto o piezas moldeadas por inyección o compresión.

6.3. Ensayo a tracción otros materiales

6.3.1. Dimensiones de las probetas

Como en los casos anteriores, se registran los valores de anchura y espesor de cada probeta en el centro y a al menos 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y se comprueba que están dentro de la tolerancia de la normativa de ensayo y se utilizan las medias para calcular la sección transversal.

Como sucedía en los anteriores ensayos, debido a que se ha establecido un juego negativo de -0, en Z para mejorar la adherencia a la base y el acabado de la superficie inferior, las medidas de la piezas en este eje están desviadas esta distancia respecto a la longitud definida, pero sigue estando dentro de la tolerancia indicada por la Norma (± 0.4 mm). En cuanto a la anchura presentan medidas del orden de +0,15 mm, debido a que algunas capas sobresalen ligeramente sobre el resto y a que la plataforma de adhesión utilizada en la construcción crea un reborde en la superficie inferior que aumenta esta medida. Estas dimensiones también están dentro de las tolerancias admitidas (± 0.5 mm).

Caso	Nº 1	Nº2	Nº3
ABS	A: 13,16-13,17-13,18=13,17 E: 2,99 - 2,97 - 3=2,987 S=39,33 Peso:6	A: 13,15-13,17-13,16=13,16 E: 3,03 - 2,96 - 2,99=2,993 S=39,39 Peso:5,9	A: 13,28-13,26-13,30=13,28 E: 2,95 - 2,92 - 2,96=2,94 S=39,08 Peso:5,9
PLA	A: 13,17-13,16-13,15=13,16 E: 2,98 - 2,97 - 3,00=2,983 S=39,26 Peso:7,6	A: 13,18-13,17-13,19=13,18 E: 3,00 - 2,96 - 2,98=2,98 S=39,28 Peso:7,7	A: 13,24-13,26-13,29=13,26 E: 2,94 - 2,95 - 2,96=2,95 S=39,12 Peso:7,7
PLA + LATÓN	A: 13,15-13,16-13,17=13,16 E: 2,91 - 2,89 - 2,92=2,907 S=38,26 Peso:7,4	A: 13,19-13,17-13,18=13,17 E: 2,94 - 2,89 - 2,91=2,913 S=38,36 Peso:7,4	
PETG + FIB. C.	A: 13,23-13,19-13,22=13,21 E: 2,98 - 2,99 - 3,01=2,993 S=39,54 Peso:6,6	A: 13,16-13,17-13,14=13,16 E: 2,97 - 2,95 - 2,97=2,97 S=39,09 Peso:6,7	

	A: 13,08-13,05-13,04=13,06	A: 13,06-13,04-13,01=13,04	
FILAFL	E: 3,12 - 3,14 - 3,13=3,13	E: 3,15 - 3,13 - 3,14=3,14	
EX	S=40,88	S=40,95	
	Peso:5,1	Peso:5,1	

Leyenda

- *A: ancho (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)*
- *E: espesor (en el centro y a 5mm de cada extremo de la longitud de referencia y su media)(mm)*
- *S: área transversal de la sección estrecha (AmediaxEmedio) (mm²)*
- *Peso: peso de la probeta (g)*
- *Nº: número del ensayo dentro de cada caso*

En la imagen se muestran las probetas de los nuevos materiales que se han introducido en este caso, de arriba a abajo PETG + Fibra Carbono, PLA + Latón y Filaflex.

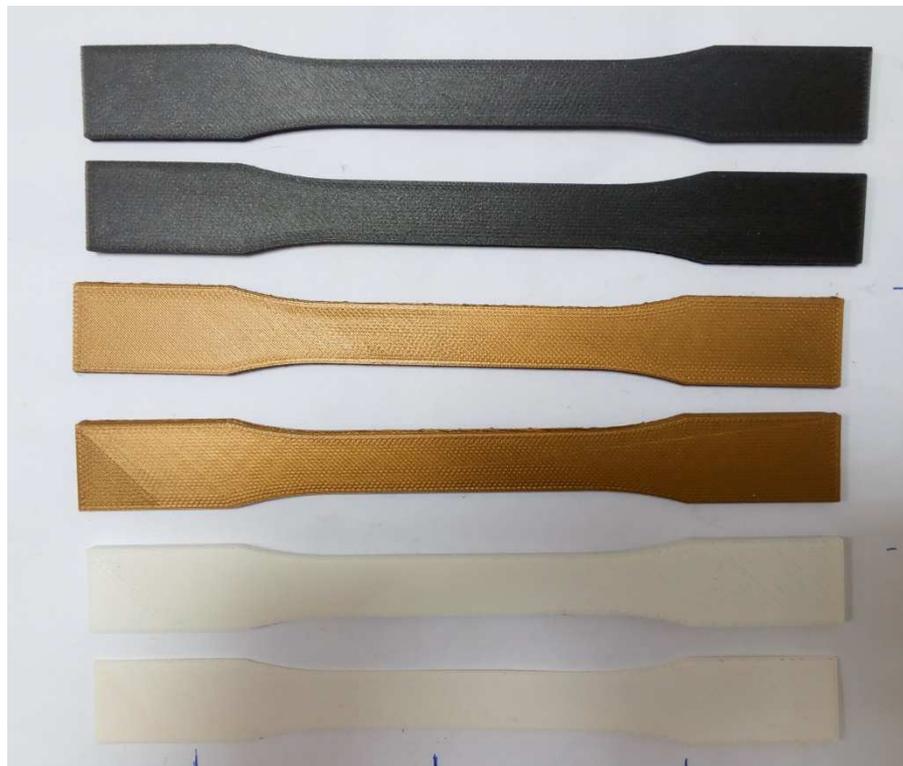


Figura 174. Probetas fabricadas en PETG+Fibra Carbono, PLA+Latón y Filaflex

6.3.2. Resultados y cálculos. Esfuerzos, deformaciones y módulos

En la imagen se muestra una probeta ensayada de cada uno de los nuevos materiales que se han introducido en el estudio (de arriba a abajo, PETG + Fibra Carbono, PLA + Latón y Filaflex). Se puede observar cómo aunque todas rompen por la zona estrecha, algunas lo hacen fuera de la longitud de referencia.

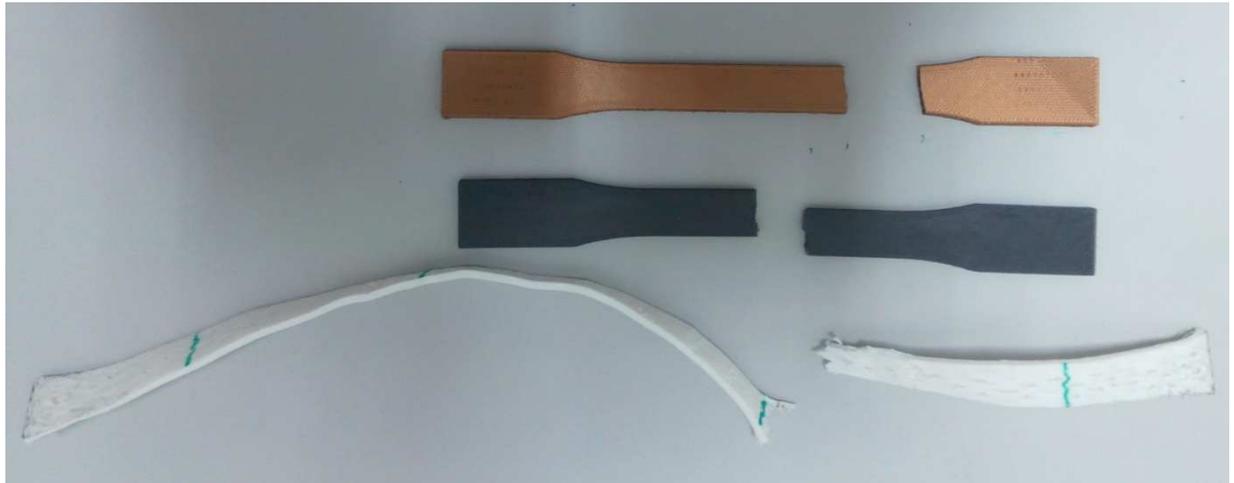


Figura 175. Probetas rotas de PETG+Fibra Carbono, PLA+Latón y Filaflex

Las siguientes imágenes muestran la sección de fractura de los distintos materiales.

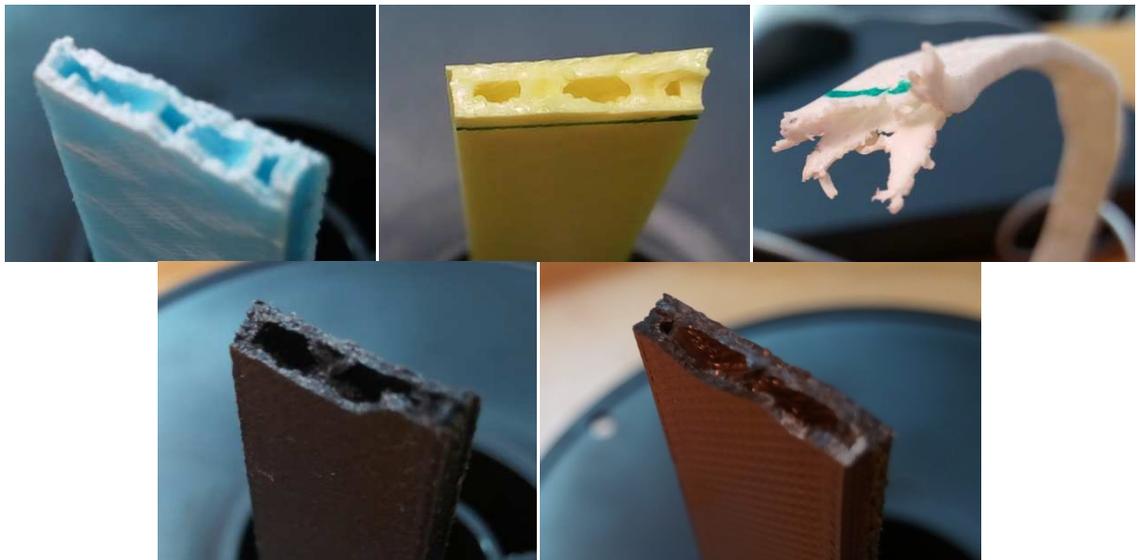


Figura 176. Sección de fractura de los distintos materiales

Leyenda

- Azul: ABS
- Amarillo: PLA
- Blanco: Filaflex
- Gris: PETG + Fibra de Carbono
- Latón: PLA + Latón

En la gráfica tensión-deformación se puede observar el comportamiento a tracción de los distintos materiales exceptuando el Filaflex, que se muestra en una gráfica aparte, ya que no muestra un comportamiento rígido como los anteriores y resultaría poco visual representarlo en la misma gráfica.

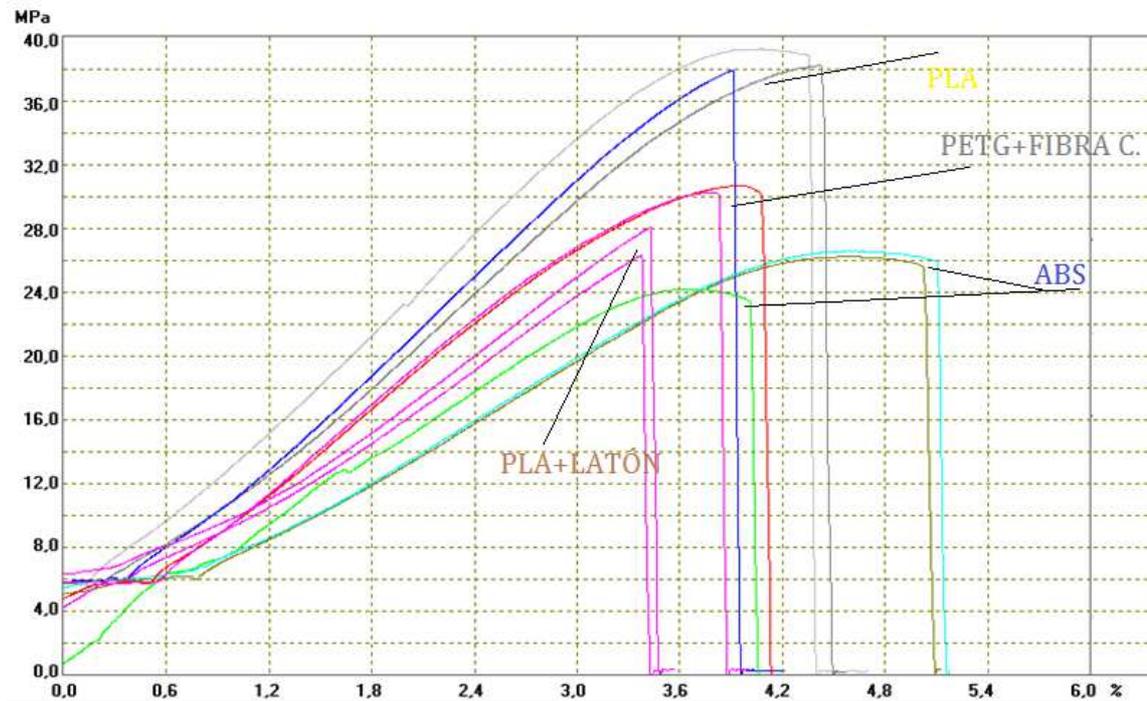


Figura 177. Resultados agrupados de los ensayos a tracción con los distintos materiales

En la figura se observa que la mayor ductilidad corresponde al ABS, mientras que los materiales con matriz de PLA resultan ser los de comportamiento más frágil

Por otro lado el PLA resulta ser el material más resistente a tracción, seguido del PETG reforzado con fibra, el PLA con LATÓN y el ABS en último lugar.

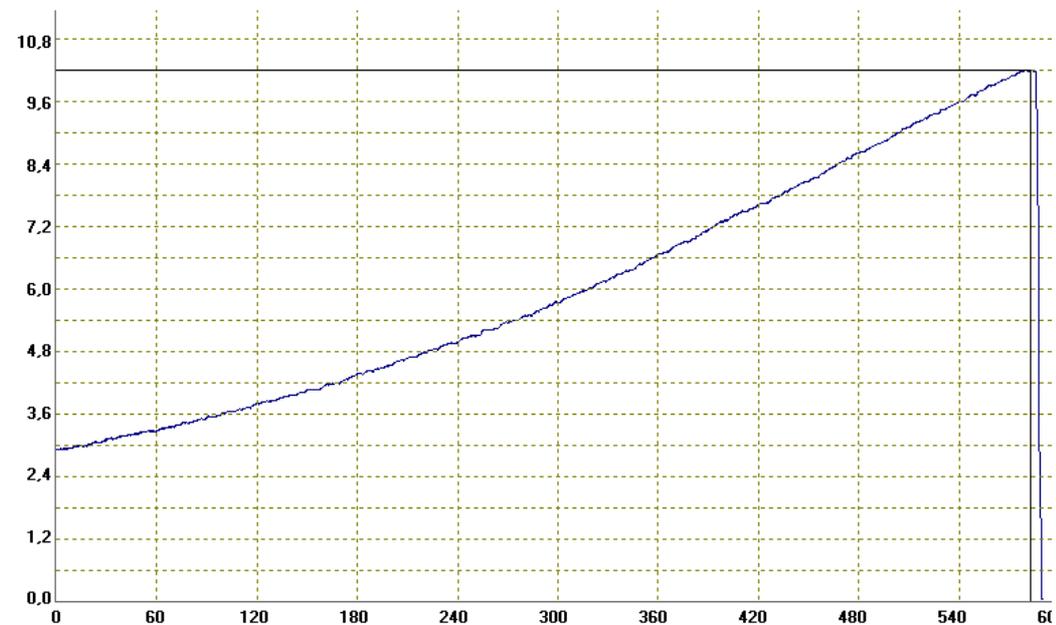


Figura 178. Gráfico tensión-deformación Filaflex

En cuanto al Filaflex, se puede observar que alcanza una deformación mayor del 600% antes de romperse y que su resistencia máxima no supera los 10 MPa. También resulta llamativo que parece sufrir endurecimiento por deformación, ya que la tensión sigue aumentando cuando aumenta la deformación plástica.



Figura 179. Probeta de Filaflex sometida a ensayo de tracción

En la tabla se recogen los datos correspondientes al Límite elástico convencional - R_p (MPa) y a la Resistencia máxima a tracción - R_m (MPa) con las deformaciones a las que se producen, así como la Deformación nominal en la rotura - ϵ_t (%) y el Módulo de elasticidad - E_t (MPa) resultantes de los ensayos para los distintos materiales.

Material	Lím. elástico convencional R_p (MPa) - ϵ_{Rp} (%)	Resistencia máxima a tracción R_m (MPa) - ϵ_{Rm} (%)	Deformación nominal rotura - ϵ_t (%)	Módulo de elasticidad - E_t (MPa)
ABS	22,4 (3,1) - 25,6 (4,1) - 25,6 (4,1)	24,5 (3,7) - 26,2 (4,6) - 26,6 (4,6)	4,1 - 5,1 - 5,1	700 - 660 - 645
PLA	39,2 (4,1) - 38,2 (3,8) - 37,9 (3,8)	39,3 (4,1) - 38,2 (4,4) - 37,9 (3,9)	4,2 - 4,5 - 3,9	1000 - 980 - 1020
PLA + LATÓN	26,3(3,4) - 28,1 (3,5)	26,3(3,4) - 28,1 (3,5)	3,4 - 3,5	775 - 825
PETG + FIBRAC	28,1 (3) -27,7 (3,1)	30,7 (3,9) - 30,3 (3,8)	4,1 - 3,9	920 - 940
FILAFLEX	-	10,2 - 10,4	587,5 - 540	-

Nota: Los resultados de cada ensayo dentro de cada caso se presentan separados por guiones: Resultado ensayo 1 - Resultado ensayo 2 ...

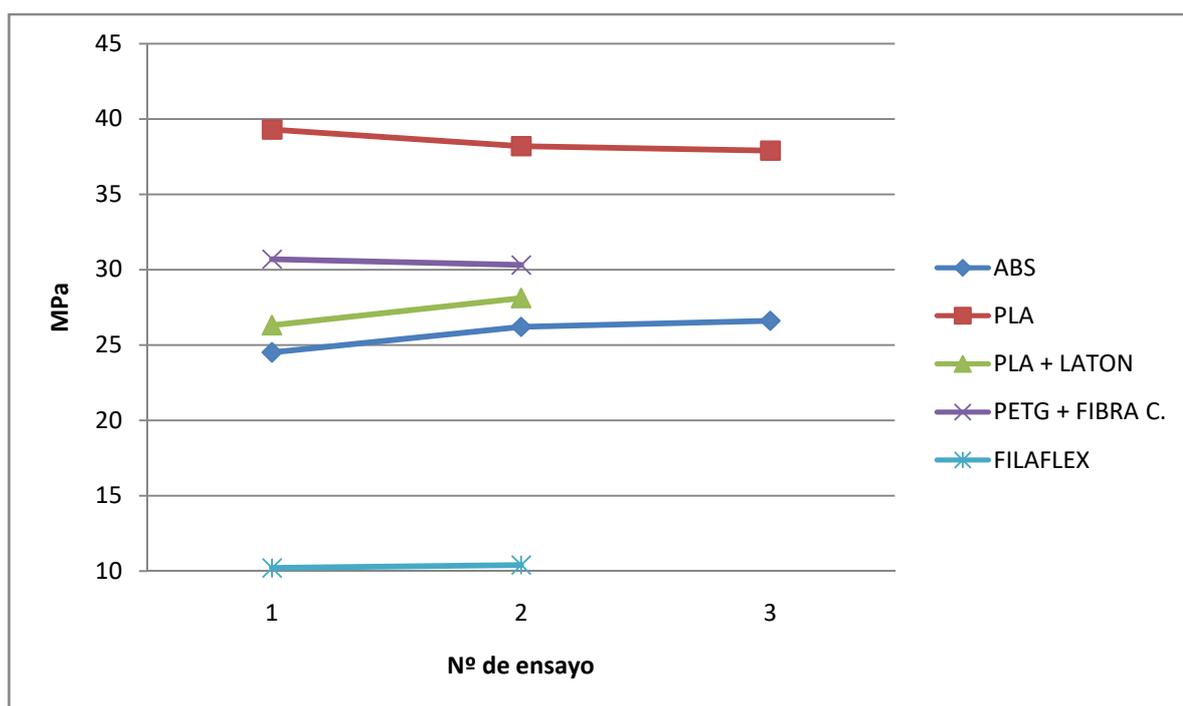


Figura 180. Comparativa de resistencia a la tracción de los distintos materiales

En la figura se observa cómo el PLA es el material más resistente a tracción, seguido del PETG reforzado con fibra de carbono, el PLA con LATÓN y el ABS. Muy lejos se encuentra el Filaflex, cuya propiedad más interesante es poder alcanzar deformaciones de más del 600% hasta la rotura, pero no destaca por su resistencia mecánica.

Material	R _m media (MPa)	Desviación típica	Variación respecto al ABS	R _m filamento (MPa)	Variación respecto filamento
ABS	25,77	1,12	0%	42,5	-39%
PLA	38,47	0,74	49%	51	-25%
PLA+LATÓN	27,20	1,27	6%	45,1	-40%
PETG+FIBRAC	30,50	0,28	+18%	77,8	-61%
FILAFLEX	10,30	0,14	-60%	18,2	-43%

Las variaciones respecto al filamento en bruto permiten concluir que el material que sufre un menor deterioro de sus propiedades en el proceso de fabricación aditiva (al menos usando estos parámetros de fabricación) es el PLA (tan solo un 25% frente al 39% del ABS), lo que parece indicar que su unión entre capas es mejor que la de otros materiales y que por tanto resulta un termoplástico idóneo para su uso en tecnologías FFF/FDM.

En cuanto al resto de materiales, para su comparación con el filamento se usan los datos obtenidos en el laboratorio dada la ausencia de datos del fabricante.

El caso que más llama la atención es el del material reforzado con fibra de carbono, cuyo filamento presenta una gran resistencia mecánica pero pierde más de la mitad de su resistencia en el proceso de fabricación. Esto se puede deber a que las fibras cortas de carbono se orientan según la dirección del esfuerzo en el filamento mientras que en la pieza, al no estar orientadas, no mejoran el comportamiento a tracción e incluso es probable que debiliten el material, pues suponen irregularidades en la matriz termoplástica. Esto mismo puede estar sucediendo con el PLA+LATÓN, cuya resistencia máxima a tracción disminuye un 12% respecto a la del material original.

Estos fenómenos se podrían confirmar comparando el comportamiento del compuesto reforzado con fibra con el PETG sin reforzar, e incluso, como línea futura, se podría extender este estudio a varios materiales y comparar el termoplástico original con compuestos de la misma matriz reforzados con distintos elementos.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1. Conclusiones

Con este trabajo se ha tratado de proporcionar una visión general de la situación actual de las tecnologías 3D emergentes y de más reciente implantación, clasificándolas y analizando su evolución, características, ventajas y desventajas de los distintos procesos, aplicaciones y marcas, equipos y materiales disponibles en el mercado. Además se ha profundizado en las tecnologías de Extrusión de Material FDM y FFF.

Este estudio y clasificación de procesos permite aclarar ciertos aspectos, características y términos de estas tecnologías que resultan confusos y todavía no son muy conocidos debido a que este campo es relativamente nuevo frente a tecnologías convencionales y está en pleno desarrollo. También puede servir como punto de partida para análisis e investigaciones posteriores que se centren en alguna de las tecnologías descritas en este trabajo.

Por otro lado se ha descrito el funcionamiento y los elementos que componen una impresora DIY fabricada a partir del proyecto RepRap, algo que puede resultar de gran interés para cualquiera que pretenda iniciarse en el mundo de la impresión 3D por extrusión de polímero.

Otro aspecto importante del trabajo es la investigación sobre el proceso de impresión con tecnologías FFF/FDM; se han realizado una serie de consideraciones generales a tener en cuenta en cuanto a parámetros como velocidad de impresión, nivelación de la plataforma, temperaturas, etc., además se han descrito las condiciones óptimas de impresión para distintos materiales, se han analizado distintos problemas que pueden surgir en el proceso de impresión para los que se han proporcionado ciertas soluciones y se han realizado múltiples pruebas en las que se han obtenido distintos resultados en función de los parámetros de impresión utilizados.

Como se expone en la introducción, con este trabajo se ha perseguido un segundo objetivo a través de una aplicación práctica de estos métodos de fabricación aditiva, tratando de llevar a cabo una primera aproximación al comportamiento mecánico de las piezas producidas mediante técnicas aditivas FDM/FFF en función de los parámetros de fabricación.

Para lograr este propósito, en primer lugar se ha realizado un estudio de la normativa sobre ensayos con polímeros obtenidos mediante fabricación aditiva, que ha permitido identificar las normas aplicables en este caso y desarrollar una metodología de ensayo.

También se ha realizado una búsqueda de literatura científica relativa a este tema, en la que se han encontrado diversos estudios sobre ensayo y caracterización de piezas obtenidas mediante estas tecnologías aditivas, en los que se argumenta sobre las limitaciones de las normas existentes en este campo, ya que no son específicas para estas tecnologías y no consideran los distintos parámetros de construcción propios de los procesos aditivos, que tienen gran influencia en el comportamiento mecánico de las piezas. Además, en alguno de estos artículos se analiza la influencia de ciertos parámetros en las características mecánicas, por lo que han sido un buen punto de partida para elegir los parámetros de estudio y la metodología a emplear.

Por último se han realizado distintas pruebas de fabricación y ensayo para elegir el método que mejor se adaptara a este caso y comprobar que las especificaciones establecidas por las Normas se cumplieran.

Siguiendo estos pasos se ha desarrollado un método de fabricación de probetas y ensayo de las mismas para materiales polímeros obtenidos mediante técnicas FFF/FDM que puede ser

utilizado en trabajos posteriores o al menos servir como punto de partida para otros estudios sobre propiedades mecánicas de polímeros obtenidos mediante estas tecnologías.

Una vez realizados los análisis e investigaciones descritos se ha procedido a seleccionar los parámetros cuya influencia se iba a estudiar; se ha elegido en primer lugar el porcentaje de relleno ya que en FFF/FDM las piezas se suelen fabricar con huecos vacíos para ahorrar tiempo, y resulta de gran interés comprobar cuánto mejora el comportamiento mecánico en función de la variación del porcentaje de dicho relleno. En cuanto al espesor de capa, es conocida su influencia en el acabado superficial, el tiempo de fabricación y la precisión de los detalles, pero no existen demasiados estudios que cuantifiquen su efecto en la resistencia mecánica, por lo que resulta de interés abordarlo en este trabajo. Por último se ha estudiado cómo varía la resistencia mecánica en función de la orientación de fabricación, ya que las propiedades a tracción dependen en gran medida de si las capas se alinean paralelas o perpendiculares al esfuerzo. Estos experimentos se han realizado para el ABS y el PLA, los dos materiales más utilizados en impresión 3D, y también se ha realizado una comparación de las propiedades de distintos materiales obtenidos con los mismos parámetros de fabricación

Las conclusiones obtenidas en estos experimentos son, para el ABS, que apenas varían los resultados de resistencia mecánica en función del espesor de capa (tan solo se reduce un 5,3% la resistencia máxima pasando de capas de 0,1 a 0,2 mm) y del uso de otra orientación en la que las capas sigan siendo paralelas al esfuerzo (reducción de la resistencia a tracción de un 3,5% de media). Sin embargo el aumento del relleno hasta el 50% (con un aumento del 18,5% de peso) provoca un aumento del 28,7% en la resistencia a tracción, algo lógico ya que la probeta resulta más maciza y se reducen los huecos.

Por otro lado la orientación de las capas de forma perpendicular al esfuerzo provoca la rotura prematura de la probeta, con una reducción de la resistencia del 87,7%. Esto se debe a que la tensión recae en la interfase entre capas, la zona más débil en las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva y especialmente en el caso del ABS. Otro dato interesante que se extrae de este estudio es que con las diferentes combinaciones de parámetros elegidos, los mejores resultados que se pueden obtener son un 22% peores que los del material en bruto, esto unido a la escasa resistencia de las probetas con capas orientadas perpendicularmente al esfuerzo, confirma que las piezas de ABS fabricadas con esta tecnología y estos parámetros presentan una unión entre capas muy débil comparada con la resistencia del material.

En el caso del PLA, se observa que el aumento del relleno hasta el 50% (con un aumento de peso del 16%) provoca un gran aumento en la resistencia mecánica (27%), muy similar al del ABS (28,27%). El aumento del espesor de capa provoca una disminución del 11% en la resistencia a la tracción, bastante mayor que en el caso del ABS, por lo que se puede concluir que capas más finas conducen a mejores resultados tanto en acabado como en propiedades mecánicas, aunque el efecto es más claro en el PLA que en el ABS.

En cuanto a las orientaciones de construcción, la orientación con las capas en dirección paralela al esfuerzo pero perpendiculares a las de la orientación inicial reduce un 22% la resistencia a la tracción. Este comportamiento puede deberse a la distinta orientación del relleno respecto a la dirección de la fuerza, lo que provoca que la pieza rompa por el punto de unión entre el relleno y la pared. En el caso de la orientación con superposición de capas perpendiculares a la fuerza de tracción provoca una disminución del 28% de la resistencia máxima, una cifra mucho menor que en el caso del ABS, que rompía prematuramente (con una reducción del 87,7% de la resistencia máxima) debido a su débil unión entre capas.

Por último, se observa que con la mejor de las combinaciones de parámetros se puede conseguir una resistencia tan solo un 4% menor que la especificada por el fabricante para el material, unos datos mucho mejores que los del ABS (-22%). Esto indica que la unión entre capas en este material resulta muy resistente y es por tanto muy adecuado para su uso en tecnologías aditivas ya que con una combinación óptima de parámetros se pueden conseguir unos resultados de resistencia muy similares a los de piezas moldeadas por inyección o compresión.

En cuanto a la comparación de los distintos materiales se concluye que la mayor ductilidad corresponde al ABS, mientras que los materiales con matriz de PLA resultan ser los de comportamiento más frágil. Por otro lado el PLA es el material más resistente a tracción, seguido del PETG reforzado con fibra de carbono, el PLA con LATÓN y el ABS. Muy lejos se encuentra el Filaflex, cuya propiedad más interesante es poder alcanzar deformaciones de más del 600% hasta la rotura, pero no destaca por su resistencia mecánica.

Por último, también cabe destacar los resultados obtenidos con el material reforzado con fibra de carbono, cuyo filamento resulta de una gran resistencia mecánica, que pierde más de la mitad de su resistencia en el proceso de fabricación. En el caso de la combinación de PLA+LATÓN, la resistencia máxima a tracción disminuye un 12% respecto a la del material original. Esto puede deberse a que las partículas metálicas debilitan el material, pues suponen irregularidades en la matriz termoplástica.

Estos resultados pueden ser de gran utilidad para la selección de materiales y parámetros adecuados en procesos de diseño y fabricación mediante tecnologías aditivas.

7.2. Líneas futuras

En cuanto a las líneas futuras, se han mencionado múltiples opciones para continuar, ampliar o darle un nuevo enfoque al estudio planteado en este trabajo. Algunas de ellas son abordar otros modos de carga (compresión, flexión, torsión...), incluir la resistencia a la fatiga y estudiar la energía de fractura en los tres modos propuestos en el apartado 4.1.1. También se podrían incluir en los experimentos factores como la dirección de la trama y la velocidad de fabricación, así como la influencia de la combinación de estos factores o incluso la influencia en las propiedades mecánicas de las variables geométricas de diseño de la pieza.

Para el estudio de las interacciones entre variables sería necesario realizar un diseño de experimentos con un programa estadístico que indique el número de casos que se deben estudiar. Siguiendo esta línea también se podría ampliar el número de especímenes empleados en este trabajo y realizar un estudio estadístico de los resultados para determinar con más precisión si la influencia de las variables en la resistencia mecánica es significativa u obtener las ecuaciones de regresión que relacionan las propiedades mecánicas con los parámetros de fabricación.

Otra posibilidad sería incluir más materiales en los experimentos, por ejemplo el PETG o realizar nuevos intentos de imprimir con nylon. También se podría centrar el estudio en materiales compuestos, comparando el termoplástico original con compuestos de la misma matriz reforzados con distintos elementos.

Por último se podría extender la investigación a otros equipos de extrusión de polímero o incluso a otras tecnologías aditivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BusinessWire. (December de 2012). *Stratasys and Objet Complete Merger*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de BusinessWire: <http://www.businesswire.com/news/home/20121203005480/en/Stratasys-Objet-Complete-Merger>
- 3D Systems. (2016). *About Us 3D Systems*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, de 3D Systems: <https://es.3dsystems.com/>
- 3DNatives. (2017). *¿Qué es la impresión 3D?* Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de 3DNatives: <https://www.3dnatives.com/es/tecnologias-3d/>
- 3DNatives. (2016). *Plásticos para impresión*. Recuperado el 4 de Agosto de 2017, de 3DNatives: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>
- 3DNatives. (2016). *Top 12 impresoras 3D para montar en casa*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2017, de 3DNatives: <https://www.3dnatives.com/es/top-12-impresoras-3d-montar-14042016/>
- 3DPrint. (2015). *PEEK FDM Printing Filament*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de 3DPrint: <https://3dprint.com/52713/indmatec-peek-fdm-printing-filament/>
- 3DPrinterPro. (2014). *Digital Light Processing*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2017, de 3DPrinterPro: <http://www.3dprinterpro.com/digital-light-processing/>
- 3DPrinting. (2017). *3D printing materials*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de 3DPrinting: <https://3dprinting.com/materials/>
- Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping Journal* , 8 (4), 248–257.
- All3DP. (2017). *3D printer filaments types*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de All3DP: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament>
- All3DP. (2017). *Las 18 mejores impresoras 3D de 2017*. Recuperado el 5 de Agosto de 2017, de All3DP: <https://all3dp.com/es/1/mejor-impresora-3d-calidad-precio-comprar/>
- All3DP. (2017). *Los 20 mejores programas/software para impresoras 3D*. Recuperado el 28 de Agosto de 2017, de All3DP: <https://all3dp.com/es/1/programas-software-impresora-3d-printer-software-3d-gratis/>
- All3DP. (2017). *PETG filament 3d printing*. Recuperado el 25 de Agosto de 2017, de All3DP: <https://all3dp.com/petg-filament-3d-printing/>
- Anderson, I. (2017). Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. *3D Printing and Additive Manufacturing* , 4 (2), 110-115.
- Arcam EBM - A GE Company. (2017). *Additive Manufacturing – a new paradigm for industrial manufacturing*. Recuperado el 15 de Julio de 2017, de Arcam EBM Additive Manufacturing: <http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing/>
- Arcam. (2014). *EBM - Built Materials*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de Arcam: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
- Areatecnología. (2015). *Ensayo de Tracción*. Recuperado el 23 de Julio de 2017, de Areatecnología: <http://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>
- ASTM D638 - 14 . (s.f.). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

- Ballesteros-García, C. (2015). Construcción de una impresora 3D basada en el proyecto RepRap: tendencias en las impresoras 3D, vías de investigación y desarrollo. *Proyecto fin de carrera*. Madrid: UNED.
- BCN3D Technologies. (2017). *BCN3D Technologies*. Recuperado el 23 de Julio de 2017, de BCN3D Technologies: <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/>
- Bellini, A., & Selcuk, G. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9 (4), 252–264.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante.
- BQ. (2017). *BQ Impresión 3D*. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de BQ: <https://www.bq.com/es/mundo-3d>
- Bull, G., Hariri, H. H., Atkins, R., & Moran, P. (2015). An Educational Framework for Digital Manufacturing in Schools. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2 (2), 42-49.
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2016). *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications Fifth Edition of Rapid Prototyping Fifth Edition*. World Scientific Publishing Company.
- Cruz-Robles, J. C., & Dutta, B. (2015). Hard Surfacing on a Steel Punch Using Direct Metal Deposition. *Aerospace & Defense Manufacturing*.
- Cubic Technologies. (2007). *LOM Rapid Prototyping*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de Cubic Technologies: <http://www.cubicttechnologies.com/Helisy.htm>
- Custompart.net. (2017). *Jetted Photopolymer*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Custompart.net: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- Deckard, C. (1989). *Patente n° USPTO n° 4863538*.
- Deezmaker. (2016). *Deezmaker Bukobot*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de Deezmaker: <http://deezmaker.com/products/bukobot-3d-printer/>
- Dima3D. (2015). *Aplicaciones de la impresión 3D. Sector textil*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Dima3D: <http://www.dima3d.com/aplicaciones-de-la-impresion-3d-iii-textil-joyeria-y-arte/>
- Dima3D. (2017). *Blog Dima 3D*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Dima3D: <http://www.dima3d.com/blog/>
- Dima3D. (2015). *Nivelación y calibración de la base de impresión*. Recuperado el 29 de Julio de 2017, de Dima3D: <http://www.dima3d.com/nivelacion-y-calibracion-de-la-base-de-impresion/>
- EOS. (2017). *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*. Recuperado el 1 de Agosto de 2017, de EOS: https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment
- Es-Said, O., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregar, B. (2000). Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15 (1), 107–122.
- Exone. (2017). *What is Binder Jetting*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de Exone: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
- Fabrisonic. (2017). *Fabricación Aditiva Ultrasónica. UAM*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Fabrisonic: <http://fabrisonic.com/fabrication/wp-content/uploads/2016/03/How-it-works-inforgraphic-WEB.pdf>

- Feeney, D. (2013). *FFF Vs. SLA Vs. SLS: 3D Printing*. Recuperado el 20 de Agosto de 2017, de SD3D 3D Printing: <https://www.sd3d.com/fff-vs-sla-vs-sls/>
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W. F., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing* , 3 (3), 183-192.
- Filament2Print. (2017). *Blog de filamentos de impresión*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de Filament2Print: <https://filament2print.com/es/blog>
- Filament2Print. (2016). *Taulman T-Glase*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de Filament2Print: <https://filament2print.com/es/taulman-co-poliesteres/607-taulman-t-glase.html>
- Formizable. (2014). *Guía de marcas y distribuidores de impresoras 3D y escáneres*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de Formizable - Impresoras y Escáneres 3D: <http://formizable.com/guia-de-marcas-y-distribuidores-de-impresoras-3d/>
- FormLabs. (2017). *3D Printing*. Recuperado el 9 de Agosto de 2017, de FormLabs: <https://formlabs.com/>
- Formlabs. (2016). *3D printing technology comparison SLA DLP*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de Formlabs: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- Forster, A. M. (2015). *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Freedman, D. H. (2012). Layer By Layer. *MIT Technology Review* , 115 (1), 50-53.
- García-Domínguez, A., Claver, J., & Camacho, A. M. (2017). Valuation of Strategies for the Incorporation of 3D Printing Contents in the Teaching of Subjects Linked to Productive Processes from Different Approaches. *Materials Science Forum* , 76-83.
- Gebhardt, I. (2003). *Rapid Prototyping: Industrial Rapid Prototyping System: Prototyper: Solid Ground Curing – Cubital*.
- Gibson I., R. D. (2015). *Powder Bed Fusion Processes*. In: *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Binder Jetting*. In: *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer.
- GitHub. (2015). *Firmware Marlin*. Recuperado el 3 de Julio de 2017, de GitHub: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>
- GoPrint 3D. (2016). *What is Selective Heat Sintering (SHS), and how does it work?* Recuperado el 3 de Septiembre de 2017, de GoPrint 3D: <https://www.goprint3d.co.uk/blog/selective-heat-sintering-shs-work/>
- GoPrint 3D. (2016). *What is Selective Heat Sintering (SHS), and how does it work?* Recuperado el 3 de Septiembre de 2017, de GoPrint 3D: <https://www.goprint3d.co.uk/blog/selective-heat-sintering-shs-work/>
- Groover, M. P. (2007). *Creación rápida de Prototipos*. En: *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México D.F: McWraw-Hill.
- Hill, N., & Haghi, M. (2014). Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping Journal* , 20 (3), 221–227.

- Huang, B., & Singamneni, S. (2014). Raster angle mechanics in fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 0 (1), 1–21.
- Hull, C. (1984). *Patente n° USPTO n° 4575330*. EEUU.
- HXX. (2015). *Materiales de impresión 3D*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2017, de HXX Fabricación Aditiva: <http://hxx.es/2015/>
- HXX. (2014). *Tecnologías de fabricación aditiva*. Recuperado el 14 de Agosto de 2017, de HXX Fabricación Aditiva: <http://hxx.es/2014/>
- Imaginethat-3d. (2015). *DMLS*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de Imaginethat-3d: <http://www.imaginethat-3d.com/direct-metal-laser-sintering-dmls>
- Impresoras3D. (2017). *Blog de impresoras 3D*. Recuperado el 25 de Julio de 2017, de Impresoras3D: <https://impresoras3d.com/blog>
- ISO 17296-2:2015. (s.f.). Additive manufacturing - General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock.
- ISO 17296-3:2014. (s.f.). Additive manufacturing - General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods.
- ISO 527-2:2012. (s.f.). Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.
- ISO/ASTM 52921:2013 (ASTM F2921-13). (s.f.). Standard terminology for additive manufacturing - Coordinate systems and test methodologies.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson.
- Kitprinter3d. (2016). *Piezas prusa i3*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Kitprinter3d: <https://kitprinter3d.com/en/extruder/62-piezas-impresas-prusa-i3.html>
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52 (11), 1770–1773.
- Lee, C., Kim, S., Kim, H., & Ahn, S. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 627–630.
- Loughborough University. (2015). *About Additive Manufacturing - The 7 Categories of Additive Manufacturing*. Recuperado el 26 de Julio de 2017, de Loughborough University Additive Manufacturing Research Group: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- Makeitfrom. (2017). *Termoplásticos Poliamidas-Nylon*. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de Makeitfrom: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Polyamide-Nylon-Plastic>
- Martín-Infante, R. (2012). *Fotopolimeración por Luz Ultravioleta (SGC)*. Recuperado el 20 de Agosto de 2017, de UNED Trabajo fin de máster. Prototipado Rápido: <https://tfmrimuned.wordpress.com/fotopolimerizacion-por-luz-ultravioleta-sgc/>
- Masood, S. H., Mau, K., & Song, W. (2010). Tensile properties of processed fdm polycarbonate material. *Materials Science Forum*, 654-656, 2556–2559.
- Materials & Design. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31 (1), 287–295.
- Mendoza, H. R. (2015). *Alain Le Méhauté, The Man Who Submitted Patent For SLA 3D Printing Before Chuck Hull*. Recuperado el 29 de Julio de 2017, de 3DPrint The Voice of 3D Printing - Additive Manufacturing: <https://3dprint.com/65466/reflections-alain-le-mehaute/>

- NaturalMachines. (2016). *NaturalMachines*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de NaturalMachines: <https://www.naturalmachines.com/>
- O'Connor, D. (2016). *Blueprinter files for bankruptcy*. Recuperado el 29 de Agosto de 2017, de TCT Magazine: <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/blueprinter-files-for-bankruptcy/>
- Ottanad, T., Kagerer, M., Eiler, K. L., Irlinger, F., & Lueth, T. C. (2012). Piezo inkjet drop-on-demand experimentation platform manufactured with rapid prototyping techniques enabling future technologies. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (págs. 1244-1249). Guangzhou: IEEEExplore.
- Pham, D. T., & Dimov, S. S. (2012). *Rapid Manufacturing*. Springer.
- Pham, D., & Gault, R. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (38), 1257–1287.
- POM Group. (2008). *Direct Metal Deposition Technology (DED)*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de POM Group: http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=552
- Prado-Cerqueira, J., Diéguez, J., & Camacho, A. (2017). Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM). *Procedia Manufacturing*, 13C, 895-902.
- PrintedDreams. (2017). *Filamentos FDM/FFF*. Recuperado el 4 de Julio de 2017, de PrintedDreams: <http://printeddreams.es/index.php/es/inicio/>
- Proyecto Clone Wars. (2017). *Proyecto Clone Wars*. Recuperado el 2 de Julio de 2017, de Proyecto Clone Wars: Proyecto_Clone_Wars
- Rapid Prototyping. (2015). *Rapid Prototyping Home Page*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de <http://www.rapidprototypinghomepage.com/>
- Realizer. (2015). *Selective Laser Melting (SLM)*. Recuperado el 20 de Agosto de 2017, de Realizer: http://www.realizer.com/en/?page_id=56
- Recreus. (2017). *Acerca de Filaflex*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Recreus: <https://recreus.com/blog/acerca-de-filaflex/>
- Rep-Rap Project. (2017). *Rep-Rap Project*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Rep-Rap Project: <http://reprap.org/>
- Riddick, J., Hall, A., Haile, M., Wahldt, R., Cole, D., & S.J., B. (2012). Effect of Manufacturing Parameters on Failure in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Fabricated by Fused Deposition Modeling. *Structural Dynamics and Materials Conference* (págs. 1–8). Honolulu: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Robo3d. (2017). *Robo3d*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de Robo3d: <https://robo3d.com/>
- Rodriguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2006). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (abs) fused deposition materials. experimental investigation. *Rapid Prototyping Journal*, 7 (3), 148–158.
- Sculpteo. (2017). *Aplicaciones de la impresión 3D*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2017, de Sculpteo: <https://www.sculpteo.com/es/aplicaciones/>
- Sculpteo. (2017). *SLM*. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de Sculpteo: <https://www.sculpteo.com/es/materiales/metales/slm-materiales/>

- Sharebot. (s.f.). *About Us Sharebot*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de <https://www.sharebot.it/>
- Siim. (2012). *Propiedades físicas y mecánicas materiales [RAE-1018]*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2016, de Siim: <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>
- Simplify3D. (2017). *Print Quality Troubleshooting Guide*. Recuperado el 15 de Julio de 2017, de Simplify3D: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#layer-shifting-or-misalignment>
- Simplify3D. (2017). *Simplify3D*. Recuperado el 23 de Julio de 2017, de Simplify3D: <https://www.simplify3d.com/>
- Slic3r. (2017). *Slic3r*. Recuperado el 12 de Agosto de 2017, de Slic3r: <http://slic3r.org/>
- Snyder, T. J.-S. (2014). 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1 (3), 169-176.
- Sood, A. K., Ohda, R. K., & Mahapatra, S. S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of fdm process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3 (1), 81–90.
- StaticBoards. (2016). *Marlin instalación y configuración*. Recuperado el 5 de Julio de 2017, de StaticBoards: <https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/>
- Stratasys. (2017). *FDM Technology*. Recuperado el 10 de Julio de 2017, de Stratasys 3D Printing: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>
- Stratasys. (2017). *PolyJet Technology*. Recuperado el 30 de Julio de 2017, de Stratasys Impresoras 3D: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology>
- Stratasys. (2017). *Stratasys*. Recuperado el 7 de Septiembre de 2017, de <http://www.stratasys.com/>
- Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, B., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of fdm polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14 (2), 72–80.
- Taulman3D. (2017). *Taulman3D*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2017, de Taulman3D: <http://taulman3d.com/index.html>
- Tecnología de los plásticos. (2012). *Elastómeros Termoplásticos TPE*. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de Tecnología de los plásticos: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2012/07/elastomeros-termoplasticos-tpe.html>
- Textos Científicos. (2017). *Polímeros*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de Textos Científicos: <https://www.textoscientificos.com/polimeros>
- The Solid Experts. (2014). *DMS-DLMS 3DPrinting*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2017, de The Solid Experts - Solid Works: <https://www.thesolidexperts.com/3d-printers/production-3d-printers/dmsdlms-direct-metal-sintering>
- Trainnova. (2016). *Manual impresora prusa i3*. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de Trainnova: <http://trainnova.com/manual-impresora-prusa-i3/>
- Tymrak, B., Kreiger, M., & Pearce, J. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242–246.
- UANL. (2013). *Ciencia UANL*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de Universidad Autónoma de Nuevo León: <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=386>

Ultimaker. (2017). *Ultimaker*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de Ultimaker: <https://ultimaker.com/>

UNE 17296-2:2017. (s.f.). Fabricación aditiva - Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas.

Velleman. (2016). *Proyectos DIY Velleman*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de Velleman: <http://www.vellemanprojects.eu/>

Whiteclouds. (2017). *Digital Light Processing (DLP)* . Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de Whiteclouds: <https://www.whiteclouds.com/3dpedia-index/digital-light-processing-dlp>

Wikipedia. (2017). *Fused Filament Fabrication*. Recuperado el 29 de Agosto de 2017, de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication

Wikipedia. (2017). *Impresión 3D*. Recuperado el 9 de Julio de 2017, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D

Wikipedia. (2017). *PEEK*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyether_ether_ketone

Wikipedia. (2017). *Sinterizado Selctivo por Láser*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser

Wikipedia. (2017). *Sinterizado selectivo por láser (SLS)*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser

Wikipedia. (2017). *UAM Ultrasonic Aditive Manufacturing*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_consolidation

Wikipedia. (2017). *Wikipedia 3D Printing*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

Xataka. (2014). *Éstas son las tecnologías de impresión 3D que hay sobre la mesa y lo que puedes esperar de ellas*. Recuperado el 25 de Agosto de 2017, de Xataka: <https://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>