

ÍNDICE

<i>Preámbulo</i>	17
<i>Prólogo</i>	19

PARTE 1

INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA

Capítulo I. INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS

DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

23	
1. Introducción	25
2. Principios generales	26
3. Ventajas e inconvenientes	28
4. Origen de la Fabricación Aditiva	30
5. Clasificación de las tecnologías de Fabricación Aditiva	33
5.1. Según el formato de aporte de material	33
5.2. Según la forma de consolidar el material	34
5.3. Según el proceso de obtención del modelo	35
5.4. Según la forma en la que se llevan a cabo los procesos (ASTM)	35
5.4.1. Fotopolimerización en tanque o cuba	37
5.4.2. Proyección de material (Material Jetting)	38
5.4.3. Extrusión de material (Material Extrusion)	38
5.4.4. Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion)	39
5.4.5. Proyección de aglutinante (Binder Jetting)	40
5.4.6. Laminación de hojas (Sheet Lamination)	41
5.4.7. Deposición de energía dirigida (Direct Energy Deposition)	41
6. Sector de aplicación de la Fabricación Aditiva	42
6.1. Sector sanitario	43
6.2. Sector del automóvil	44
6.3. Sector aeronáutico	44
6.4. Sector del molde y la matricería	44
6.5. Sectores intensivos en diseño	45
6.6. Industria manufacturera en general	45
7. Materiales para Fabricación Aditiva	46
<i>Bibliografía</i>	47

Capítulo II. EVOLUCIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

EN LA INDUSTRIA

49	
1. Introducción	51

2. Principales sectores de aplicación de la Fabricación Aditiva	51
2.1. Aplicaciones de la FA en el sector médico	52
2.1.1. Modelos anatómicos	53
2.1.2. Fabricación de prótesis	53
2.1.3. Fabricación de otros componentes médicos	55
2.1.4. Fabricación directa de tejidos y órganos	55
2.2. Aplicaciones de la FA en el sector aeroespacial	56
2.3. Aplicaciones de la FA en el sector de automoción	57
3. Evolución de la Fabricación Aditiva en cifras	59
3.1. Evolución del mercado de la Fabricación Aditiva	59
3.2. Principales iniciativas institucionales en el ámbito de la Fabricación Aditiva	61
4. Análisis de la difusión realizada en el ámbito de la Fabricación Aditiva ...	63
4.1. Principales eventos directamente relacionados alrededor de la Fabricación Aditiva	63
4.1.1. Feria FORMNEXT	63
4.1.2. Evento RAPID + TCT	65
4.1.3. Feria ADDIT3D	65
4.1.4. Otros eventos relacionados	65
4.2. Evolución de las publicaciones científicas sobre Fabricación Aditiva	66
4.3. Análisis de la evolución de las patentes en Fabricación Aditiva	67
5. Perspectivas de futuro	68
<i>Bibliografía</i>	69

Capítulo III. DISEÑO PARA FABRICACIÓN ADITIVA:

CONSIDERACIONES GENERALES	71
1. Introducción. Papel del diseño en la Fabricación Aditiva	73
2. Obtención de la geometría a fabricar	75
2.1. Programas CAD	76
2.2. Repositorios	77
3. Aspectos geométricos a considerar en el diseño	78
3.1. Dimensiones útiles de la impresora	78
3.2. Geometría a imprimir	81
3.3. Resolución	81
3.4. Tolerancias	82
3.5. Parámetros de impresión	83
4. Aspectos tecnológicos de la impresión a considerar en el diseño	84
4.1. Resistencia mecánica	84
4.2. Contracciones y tensiones	86
4.3. Acabado superficial	89
5. Rediseño de elementos para Fabricación Aditiva	91
6. Obtención del fichero CAM	95
6.1. Programas	95

6.2. Requisitos	98
<i>Bibliografía</i>	98

PARTE 2
PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA PARA POLÍMEROS

Capítulo IV. PROCESOS DE EXTRUSIÓN DE MATERIAL (MatEx/Mex)	103
1. Introducción	105
2. Hardware del proceso	108
2.1. Componentes de la impresora FFF	108
2.1.1. Recorrido filamento	109
2.1.2. Estructura	110
2.1.3. Mecánica	111
2.1.4. Electrónica	111
3. Funcionamiento del proceso	112
3.1. Fichero de salida CAD	113
3.2. Laminadores/slicers	114
3.2.1. Gestión de plataformas, manipulación de objetos	115
3.2.2. Configuración de impresión	115
3.2.3. Selección de material	121
3.2.4. Configuración de la impresora	123
4. Calibración y cálculo de costes	125
<i>Bibliografía</i>	126

Capítulo V. PROCESOS DE FOTOPOLIMERIZACIÓN EN CUBA (VAT)	129
1. Introducción	131
2. Funcionamiento del proceso	134
2.1. Materiales de la tecnología VAT	136
3. SLA (estereolitografía)	137
3.1. Condiciones de procesado SLA	138
3.2. Generación de la carga	140
4. DLP (procesamiento digital de luz)	142
4.1. Condiciones de procesado	142
4.2. Generación de la carga	143
<i>Bibliografía</i>	145

Capítulo VI. PROCESOS DE FUSIÓN EN LECHO DE POLVO APLICADOS A POLÍMEROS	147
1. Introducción	149
1.1. Introducción al proceso	150
1.2. Variantes del proceso	152

1.2.1. Fusión selectiva de polvo basada en láser: SLS	153
1.2.2. Fusión selectiva de polvo basada en calor: SHS	156
1.2.3. Fusión selectiva de polvo basada en un agente fusor y calor ...	156
2. Procesado mediante fusión selectiva de polvo aplicada a polímeros	159
2.1. Flujo de trabajo	159
2.1.1. Equipamiento necesario para la fabricación de piezas	160
2.1.2. Técnicas de Postproceso de piezas	163
2.2. Consideraciones para el diseño de piezas	165
2.3. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías	166
2.3.1. Ventajas	166
2.3.2. Inconvenientes	167
3. Materiales y posibles aplicaciones	167
3.1. Gama y uso de materiales	168
3.2. Casos de estudio de aplicaciones	170
3.2.1. Prototipos funcionales	171
3.2.2. Piezas finales	173
3.2.2.1. Piezas sometidas a esfuerzos	173
3.2.2.2. Piezas para la conducción de fluidos	175
<i>Bibliografía</i>	176

Capítulo VII. FABRICACIÓN ADITIVA CON MATERIALES

COMPUESTOS	179
1. Introducción	181
2. Fused Filament Fabrication (FFF)	183
2.1. Introducción	183
2.2. Proceso, parámetros, características	185
2.2.1. Tipo de deposición, porcentaje de relleno	186
2.2.2. Altura de capa	187
2.2.3. Ancho de hilo, espacio libre	187
2.2.4. Temperatura	188
2.2.5. Velocidad de deposición	188
2.2.6. Efecto de escala	188
2.3. Materiales	189
2.3.1. Matriz	189
2.3.2. Fibras de refuerzo	189
3. Laminated Object Manufacturing (LOM)	190
3.1. Introducción	190
3.2. Proceso de «unión y posterior conformado»	191
3.3. Proceso de «conformado y posterior unión»	191
3.4. Procesos	192
3.4.1. Unión adhesiva	192
3.4.2. Unión térmica	194
3.4.3. Unión por soldadura ultrasónica	194
3.5. Materiales	195

4. Selective Laser Sintering (SLS) y Selective Laser Melting (SLM)	196
4.1. Introducción	196
4.2. Materiales	197
4.3. Perspectivas futuras	200
5. Stereolithography (SL) y los procesos con material fluido	200
5.1. Introducción	200
5.2. Materiales	201
5.3. Procesado del material	203
6. Conclusiones	204
<i>Bibliografía</i>	204

PARTE 3
PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA PARA METALES

Capítulo VIII. PROCESOS DE FUSIÓN DE LECHO DE POLVO (PBF) APLICADOS A METALES	211
1. Fundamentos de la fusión selectiva de polvo metálico	213
1.1. Introducción a los procesos de fusión de lecho de polvo (PBF)	213
1.2. Tipos de fuente térmica y mecanismos de fusión	215
1.3. Procesos de fusión selectiva de polvo metálico	216
1.3.1. Materiales	216
1.3.2. Consideraciones de diseño	217
1.3.3. Parámetros de proceso	220
1.3.4. Sistemas basados en láser (LB-PBF)	223
1.3.5. Sistemas basados en haz de electrones (EB-PBF)	224
1.3.6. Equipos comerciales de LB-PBF	226
1.3.7. Aspectos económicos en procesos de fusión de lecho de polvo metálico	226
2. Aspectos metalúrgicos y microestructurales de la fusión láser de lecho de polvo metálico (LB-PBF)	227
2.1. Materiales empleados y características de las partículas de polvo	228
2.2. Técnicas de producción de polvo	230
2.3. Parámetros de proceso en la fusión láser de lecho de polvo	230
2.4. Características del baño de fusión	232
2.5. Microestructura de piezas procesadas por LB-PBF	233
2.6. Riesgos para la salud en el manejo de polvo metálico y su reutilización/reciclado	235
3. Propiedades y aplicaciones de las piezas fabricadas mediante fusión selectiva de polvo	236
3.1. Propiedades mecánicas	236
3.2. Acabado superficial y precisión dimensional	239
3.3. Aplicaciones en el sector aeroespacial	240
3.4. Aplicaciones biomédicas	240

3.5. Fabricación de herramientas	240
3.6. Otras aplicaciones	241
<i>Bibliografía</i>	241

Capítulo IX. PROCESOS DE BINDER JETTING PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS	247
1. Introducción	249
2. Desarrollo y variantes del proceso	250
2.1. Material de aporte en barra	251
2.2. Material de aporte en filamento	252
3. Flujo de trabajo y parámetros de proceso	253
3.1. Polvo de partida	254
3.2. Aglutinante	255
3.3. Fabricación	258
3.4. Post-Procesado	258
3.4.1. Ciclo de curado	258
3.4.2. Eliminación del polvo	259
3.4.3. Medición de la resistencia en verde	259
3.4.4. Eliminación del aglutinante por pirólisis o quemado	260
3.4.5. Infiltrado	260
3.4.6. Sinterizado	260
4. Tipo de material	261
5. Digitalización y simulación	265
6. Equipamiento necesario. Aplicaciones y sectores	266
<i>Bibliografía</i>	268

Capítulo X. PROCESOS DE APORTE DIRECTO DE MATERIAL PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS	271
1. Introducción	273
2. Tipos de procesos DED	275
3. Procesos DED por arco o WAAM	276
3.1. Descripción del proceso WAAM	277
3.2. Tecnologías para la aplicación del WAAM	278
3.3. Parámetros de operación	280
3.4. Aspectos de calidad	281
3.5. Ejemplos de aplicación del proceso WAAM	282
4. Procesos láser-DED	283
4.1. Proceso láser-DED	283
4.2. Variantes del proceso láser-DED	286
4.3. Parámetros de operación y aspectos de calidad del proceso láser-DED	289
4.4. Ejemplos de aplicación del láser-DED	290
5. Otras variantes del proceso DED	294

6. Conclusiones y futuro de estos procesos	295
<i>Bibliografía</i>	297

PARTE 4

PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA PARA OTROS MATERIALES

Capítulo XI. PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS CERÁMICAS	301
1. Introducción	303
2. Materiales cerámicos: aplicaciones y procesado	304
2.1. Aplicaciones de las cerámicas técnicas	306
2.2. Procesos de fabricación: descripción general	309
3. Tecnologías de Fabricación Aditiva de varias etapas para cerámicas	311
3.1. Técnica de estereolitografía para materiales cerámicos	311
3.1.1. Materiales y fotopolimerización	312
3.1.2. Descripción del proceso	315
3.1.2.1. Preparación para la impresión	316
3.1.2.2. Proceso de impresión	317
3.1.2.3. Post-proceso	319
3.2. Técnica de proyección de aglutinante	321
3.2.1. Materiales	321
3.2.2. Descripción del proceso	322
3.2.3. Post-proceso	324
3.3. Otras técnicas	326
3.3.1. Sinterización indirecta por láser para materiales cerámicos ..	326
3.3.2. Procesos de extrusión de materiales cerámicos	327
4. Tecnologías de Fabricación Aditiva de una etapa para cerámicas	328
<i>Bibliografía</i>	328

PARTE 5

SOLUCIONES TECNOLÓGICAS ENFOCADAS A LA FABRICACIÓN ADITIVA

Capítulo XII. SOFTWARE ASOCIADO A LA FABRICACIÓN ADITIVA	333
1. Introducción	335
2. Fases del proceso productivo en Fabricación Aditiva y software asociado ..	338
2.1. Problema de diseño	340
2.2. Elecciones de diseño	340
2.3. Definición del diseño	341
2.3.1. Introducción a los métodos y software de diseño	342
2.3.1.1. Diseño asistido por ordenador, CAD	342

2.3.1.2. Ingeniería asistida por ordenador, CAE	346
2.3.1.3. Diseño computacional	347
2.3.2. Ejemplos de métodos de diseño de especial interés para Fabricación Aditiva y software asociado	350
2.4. Archivo de exportación	356
2.5. Fabricación asistida por ordenador, CAM	358
2.6. Gestión de la producción	362
2.7. Datos de fabricación	363
3. Consideraciones finales	363
<i>Bibliografía</i>	364

Capítulo XIII. POST PROCESADO DE PIEZAS

DE FABRICACIÓN ADITIVA

DE FABRICACIÓN ADITIVA	367
1. Introducción	369
2. Post procesado de piezas obtenidas mediante tecnologías de extrusión de material	371
2.1. Procesos tecnológicos para la eliminación de soportes en tecnologías de extrusión de material	371
2.2. Procesos tecnológicos para la mejora del acabado superficial de las piezas en tecnologías de extrusión de material	373
3. Post procesado de piezas obtenidas mediante tecnologías de fusión en lecho de polvo	375
3.1. Limpieza de piezas obtenidas mediante fusión en lecho de polvo ...	376
3.2. Procesos tecnológicos para la mejora del acabado superficial de las piezas obtenidas mediante fusión en lecho de polvo	378
3.3. Otras operaciones de post proceso: incorporación de color y electropulido	381
4. Post procesado de piezas obtenidas mediante tecnologías de fotopolimerización en cuba	384
4.1. Procesos tecnológicos específicos de los procesos de fotopolimerización en cuba	384
4.2. Procesos tecnológicos para la mejora del acabado superficial de las piezas	387
5. Post procesado de piezas obtenidas mediante otras tecnologías	387
5.1. Tecnología de proyección de aglomerante	387
5.2. Tecnología de proyección de material	388
5.3. Tecnología de aporte directo de material metálico	389
5.4. Tecnología de laminación de hojas	390
6. Conclusiones	390
<i>Bibliografía</i>	391

Capítulo XIV. PROCESOS Y MÁQUINAS HÍBRIDAS

DE FABRICACIÓN ADITIVA	393
1. Introducción	395
1.1. Contexto industrial	399

2. Descripción de los principales tipos de hibridación	402
2.1. Principales tipos de combinación encontradas en las máquinas híbridas	402
2.1.1. Tecnología de aportación tipo «pbf» combinada con fresadora	402
2.1.2. Tecnología de aportación tipo «ded» combinada con distintas configuraciones de máquinas herramienta	403
2.2. Comparación entre técnicas de aportación de material en máquinas híbridas	404
3. Ventajas y desventajas de la fabricación híbrida	406
3.1. Ventajas de la fabricación híbrida	406
3.2. Desventajas de la fabricación híbrida	408
4. Retos de la fabricación híbrida	408
4.1. Desarrollo del hardware	409
4.1.1. Aspectos relativos al proceso aditivo	409
4.1.2. Aspectos relativos al proceso sustractivo	411
4.1.3. Aspectos relativos a la integración de procesos	412
4.1.4. Integración en el software	413
5. Otros procesos de fabricación híbrida.	414
<i>Bibliografía</i>	417

PARTE 6
NORMATIVA, CERTIFICACIÓN E INSPECCIÓN
PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Capítulo XV. INSPECCIÓN DE PRODUCTOS DE FABRICACIÓN ADITIVA: MEDICIÓN E INSTRUMENTOS	423
1. Introducción	425
1.1. Factores que afectan a la calidad de las piezas fabricadas aditivamente	425
1.2. Ensayos de caracterización y normalización	429
2. Caracterización de propiedades mecánicas	430
3. Medición y verificación de características exteriores	432
3.1. Medición por Coordenadas en Fabricación Aditiva	434
3.1.1. Medición por contacto	434
3.1.2. Medición sin contacto	435
4. Medición de características interiores, porosidad y defectos	438
4.1. Métodos destructivos	439
4.2. Métodos no destructivos	439
4.2.1. Tomografía computerizada	439
4.2.1.1. Principio de funcionamiento	440
4.2.1.2. Parámetros y factores de influencia	441

4.2.1.3. Precisión e incertidumbre de medida	443
4.2.2. Principio de Arquímedes	444
5. Caracterización metrológica de superficies	444
5.1. Factores que influyen sobre la calidad superficial	445
5.2. Patrones y superficies de interés	446
5.3. Tecnologías de medición	447
5.4. Caracterización de la calidad superficial	449
<i>Bibliografía</i>	451

Capítulo XVI. VERIFICACIÓN Y MEJORA DE LA PRECISIÓN EN MÁQUINAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

1. Análisis de la precisión de proceso y máquina en Fabricación Aditiva. Fuentes de error	457
2. Técnicas de verificación geométrica y volumétrica de máquinas de Fabri- cación Aditiva	458
2.1. Verificación geométrica	460
2.1.1. Verificación 2D	460
2.1.2. Verificación 3D	461
2.2. Verificación volumétrica	462
3. Técnicas de verificación funcional	464
4. Monitorización de procesos de Fabricación Aditiva	470
4.1. Control de parámetros de proceso	470
4.2. Monitorización <i>in situ</i> de procesos	472
4.2.1. Sistemas de monitorización <i>in situ</i> según el campo de ins- pección	473
4.2.2. Monitorización de defectos en procesos de materiales me- tálicos	474
4.2.3. Monitorización de defectos en procesos de materiales poli- méricos	475
5. Medición de piezas en máquina	476
5.1. Captura <i>in situ</i> de información geométrica y/o dimensional	478
5.1.1. Sistemas de visión	478
5.1.2. Sistemas de digitalizado	479
5.2. Procedimiento para la medición y compensación <i>in situ</i> de las des- viaciones geométricas y/o dimensionales	480
<i>Bibliografía</i>	483

Capítulo XVII. ESTANDARIZACIÓN EN FABRICACIÓN ADITIVA. APROXIMACIÓN A DOS NORMAS RELEVANTES: VOCABULARIO Y FORMATO DE ARCHIVO AMF

1. Introducción	489
2. Estructura general de comité ISO TC261. Normas publicadas	491

3. Aspectos principales de la norma básica UNE-EN-ISO/ASTM 52900:2022 Fabricación Aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario ..	495
4. Aspectos principales de la norma UNE-EN-ISO/ASTM 52915. Especificación para el formato de archivo para la Fabricación Aditiva (AMF). Versión 1.2	500
<i>Bibliografía</i>	506

**PARTE 7
MIRADA AL FUTURO**

Capítulo XVIII. CAPACITACIÓN Y DOCENCIA EN FABRICACIÓN ADITIVA	509
1. Enfoques de la Fabricación Aditiva en docencia y formación	511
2. Capacitación profesional en Fabricación Aditiva	512
2.1. Necesidades y perfiles profesionales	512
2.2. Objetivos de la formación universitaria en Fabricación Aditiva	514
3. Fabricación Aditiva en estudios de Grado y Máster	515
3.1. Competencias en estudios de Grado	516
3.2. Competencias en estudios de Máster	517
3.3. Ejemplos para el desarrollo de competencias prácticas	519
4. Otros entornos para el aprendizaje y capacitación en Fabricación Aditiva	529
4.1. Formación por empresas del sector	529
4.2. Impresión 3D en Bibliotecas	530
4.3. Fab Labs	532
<i>Bibliografía</i>	534

Capítulo XIX. EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA	535
1. Fabricación Aditiva en la industria: casos reales	537
1.1. Aeroespacial y automóvil	537
1.2. Médica	540
1.3. Arte y moda	544
2. Tendencias	545
2.1. Materiales	546
2.1.1. Polímeros	546
2.1.2. Metálicos	547
2.1.3. Cerámicos	548
2.1.4. Biológicos	550
2.1.5. Orgánicos	552
2.2. Sistemas informáticos	554
2.2.1. Generación gcode	554
2.2.2. Diseño generativo	557

2.2.3. Ingeniería inversa	559
2.3. Señales en 3D	560
2.4. ¿Cómo imaginar el FA del futuro?	560
<i>Bibliografía</i>	563

**Todas las webgrafías de los capítulos que contiene este libro,
podrán ser consultadas en el código QR de la contraportada.**

Capítulo I

Introducción y fundamentos de la Fabricación Aditiva

Sergio Martín-Béjar¹

Carolina Bermudo¹

Cristina Alía²

Francisco Javier Trujillo¹

Lorenzo Sevilla¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Málaga, 29071 Málaga, España.

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Madrid, 28012 Madrid, España.

SUMARIO

1. Introducción
 2. Principios generales
 3. Ventajas e inconvenientes
 4. Origen de la Fabricación Aditiva
 5. Clasificación de las tecnologías de Fabricación Aditiva
 - 5.1. Según el formato de aporte de material
 - 5.2. Según la forma de consolidar el material
 - 5.3. Según el proceso de obtención del modelo
 - 5.4. Según la forma en la que se llevan a cabo los procesos (ASTM)
 - 5.4.1. Fotopolimerización en tanque o cuba
 - 5.4.2. Proyección de material (Material Jetting)
 - 5.4.3. Extrusión de material (Material Extrusion)
 - 5.4.4. Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion)
 - 5.4.5. Proyección de aglutinante (Binder Jetting)
 - 5.4.6. Laminación de hojas (Sheet Lamination)
 - 5.4.7. Deposición de energía dirigida (Direct Energy Deposition)
 6. Sectores de aplicación de la Fabricación Aditiva
 - 6.1. Sector sanitario
 - 6.2. Sector del automóvil
 - 6.3. Sector aeronáutico
 - 6.4. Sector del molde y la matricería
 - 6.5. Sectores intensivos en diseño
 - 6.6. Industria manufacturera en general
 7. Materiales para Fabricación Aditiva
- Bibliografía*

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la actividad productiva ha ido evolucionando, de forma continua, hacia una mejora de los procesos de fabricación con objeto de poder solventar las necesidades de la sociedad en cada periodo de tiempo. Para ello, en su desarrollo, ha de considerarse que los procesos sean lo más eficientes posibles, mejorando las propiedades del producto, reduciendo cantidad de material utilizado y aumentando el rendimiento económico de la actividad, entre otros.

En la actualidad, dado el desarrollo industrial y el alto nivel de competitividad del mercado, cada vez se hace más necesario la generación de productos que presenten singularidades, permitiendo adaptarse a los requisitos que establece el cliente, lo que conlleva que los sistemas productivos presenten una mayor flexibilidad, frente a la elevada rigidez de los sistemas tradicionales, basados en la fabricación de productos en grandes series.

En un mercado cada vez más globalizado y exigente, la diferenciación entre los productos lanzados al mercado por organizaciones de un mismo sector productivo ha supuesto que la etapa de diseño adquiera una mayor importancia, generando modelos con geometrías cada vez más complejas y mayores requerimientos funcionales. Esto ha supuesto que, a pesar del avance tecnológico, los procesos de fabricación tradicionales, como la fundición, la deformación plástica o el mecanizado, presenten ciertas limitaciones en el cumplimiento de las especificaciones de diseño del producto. Así, la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que permitieran cubrir estos requerimientos propició la aparición de la Fabricación Aditiva.

La Fabricación Aditiva es un proceso de fabricación que se ha desarrollado con gran rapidez, integrándose en la industria e incluso generando tecnologías accesibles a la sociedad en general. Dada su evolución, sus tecnologías son conocidas con diferentes denominaciones, tales como impresión 3D, prototipado rápido y fabricación por capas. Además, el diseño asistido por ordenador (CAD), que permite la integración con estos procesos, ha facilitado la generación de piezas con nuevas geometrías imposibles de obtener mediante los procesos tradicionales. Todo esto ha permitido su aplicación en múltiples sectores productivos, ya que es posible utilizar diferentes tipos de materiales y tecnologías, y con ello la capacidad de obtener productos con variadas propiedades, ajustadas a los requisitos de servicio del producto.

2. PRINCIPIOS GENERALES

La Fabricación Aditiva es una evolución de la técnica de prototipado rápido, utilizada por la industria en las últimas décadas del siglo XX. El prototipado rápido pretendía establecer procesos rápidos para la creación de sistemas u objetos de forma ágil y, por tanto, de una forma básica, permitiendo una evaluación inicial de cómo iba a ser el producto una vez conformado. Para ello se empleaba software que representaba previamente el modelo de forma digital.

Sin embargo, el posterior desarrollo tecnológico ha permitido que se utilice no solo en la elaboración de modelos, prototipos de un producto o utilidad básica para la industria, mediante técnicas coloquialmente denominadas «impresión 3D», sino también para la obtención de productos finales con alto valor añadido.

La Fabricación Aditiva, como evolución de sistemas de prototipado rápido, está basada en la fabricación de componentes por aporte de material, partiendo del empleo de software de representación gráfica, y en ella el material es tratado con una fuente de energía. Con estas consideraciones, la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 establece la Fabricación Aditiva como «Proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y conformado».

La incorporación de la Fabricación Aditiva dentro del conjunto de procesos de fabricación ya conocidos permite establecer una nueva clasificación de estos procesos, basado en cómo se comporta el flujo de material de entrada al proceso con respecto al flujo de salida (Figura 1) (Figura 2):

- *Procesos de fabricación de conservación.* Utilizan preformas (moldes o modelos) necesarias para la obtención del producto, cumpliendo las especificaciones de diseño. En este tipo de procesos se puede considerar que la masa de la preforma (M_c) es prácticamente igual a la masa de la pieza final (M_s). A esta tipología pertenecen los procesos de fundición, pulvimetalurgia, conformado de polímeros y de deformación plástica.
- *Procesos de fabricación sustractivos.* El producto final se obtiene a partir de la sustracción (eliminación) de material sobrante de uno previo, de mayores dimensiones. En este caso, la masa del material de la preforma (M_c) es superior a la masa de la pieza final (M_s). Este tipo de procesos se corresponde con las operaciones de mecanizado.
- *Procesos de fabricación por agregación.* Existirá una o varias preformas en las que la masa final (M_s) será la suma de las masas entrantes ($M_{e1} + M_{e2} + \dots$). En esta tipología de procesos se encuentran soldadura y Fabricación Aditiva.

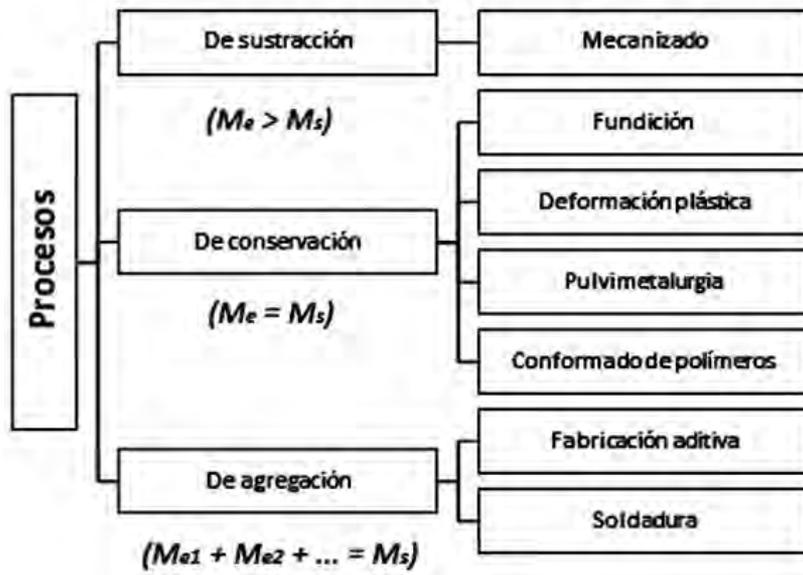


Figura 1. Clasificación de procesos de fabricación.

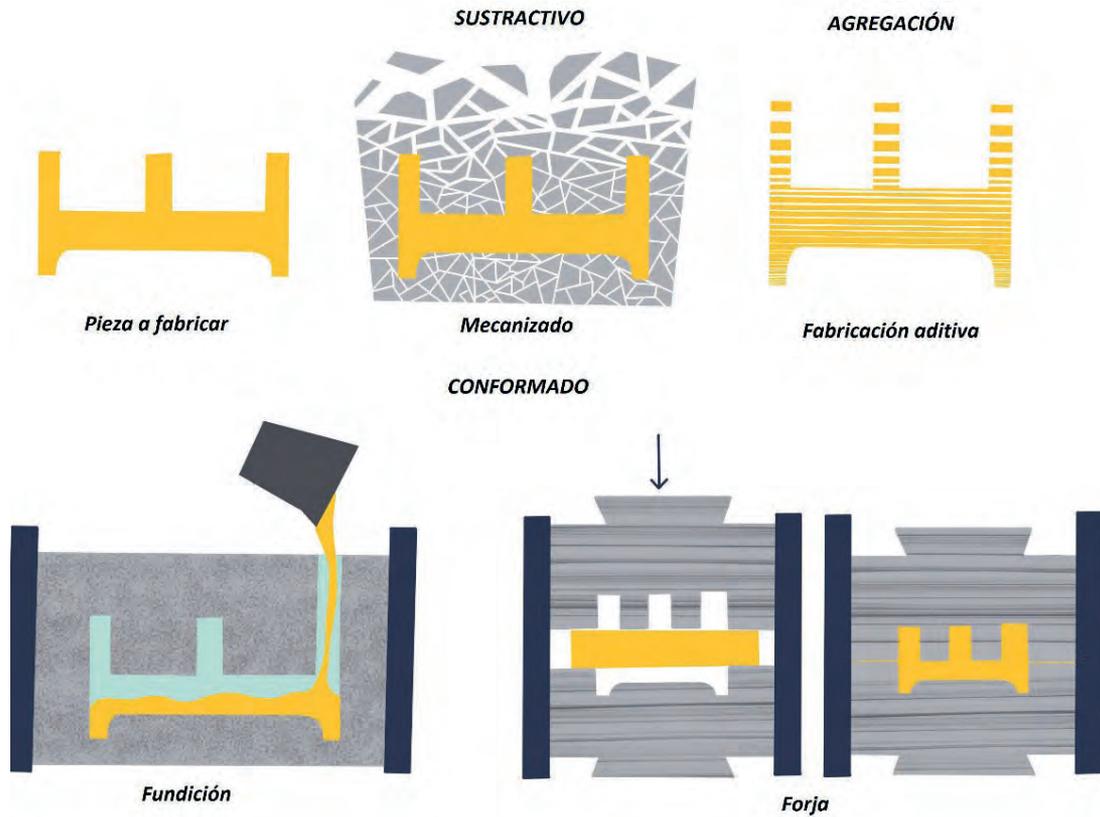


Figura 2. Tipos de procesos de fabricación.

3. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Los procesos de Fabricación Aditiva presentan un conjunto de **ventajas** que les permiten competir con procesos tradicionales de fabricación:

- *Personalización de productos.* Este tipo de procesos no requiere fabricar utillajes específicos para la personalización del producto, como ocurre en los procesos tradicionales, sino que esa personalización se realiza en la etapa inicial de diseño mediante software de diseño asistido por ordenador.
- *Flexibilidad en el diseño del producto.* No existen limitaciones en la geometría del producto diseñado, pudiendo diseñar piezas con casi cualquier forma y complejidad, a diferencia de los procesos de fabricación tradicionales, como la consideración de ángulos de salida en procesos de moldeo o la limitación de acceso de herramientas de corte en operaciones de mecanizado.
- *Ahorro de material.* Es una clara ventaja frente a métodos de fabricación sustractivos, reduciendo hasta un 40% del material de partida utilizado. Además, se puede considerar que, habitualmente el 95% del material no utilizado por Fabricación Aditiva puede ser reciclado.
- *Eliminación de moldes y utillaje.* Puesto que la pieza se obtiene directamente a partir del modelado mediante software de diseño asistido por ordenador, no es necesario elaborar previamente un molde, como ocurre en procesos de deformación plástica, de inyección o fundición en arena, ni la utilización de machos para geometrías complejas en procesos de fundición o de herramientas de corte, que se desgastan durante la operación de mecanizado.
- *Reducción de costes de fabricación en series pequeñas de producción.* En el caso de la fabricación de un número reducido de componentes, los procesos de Fabricación Aditiva permiten la obtención de piezas directamente a partir de un modelo en CAD, mientras que otros procesos de fabricación requieren la utilización de moldes o de utillaje específico para la fabricación de componentes, lo cual supone un gasto inicial, previo a la fabricación del primer componente (Figura 3).
- *Fabricación automática del producto.* No se requiere la intervención del operario durante la elaboración de la pieza, sino sólo en la fase de diseño, reduciendo la aparición de errores humanos en la fase de producción.
- *Reducción de porosidades.* En las tecnologías de Fabricación Aditiva de materiales metálicos prácticamente no se obtienen porosidades en el núcleo de las piezas, como puede ocurrir en procesos de fundición o pulvimetalurgia, alcanzándose una densidad prácticamente del 100%.
- *Fabricación de geometrías complejas.* Además de poder obtener piezas de cualquier geometría exterior, la Fabricación Aditiva permite producir elementos con huecos internos de cualquier geometría, así como estructuras

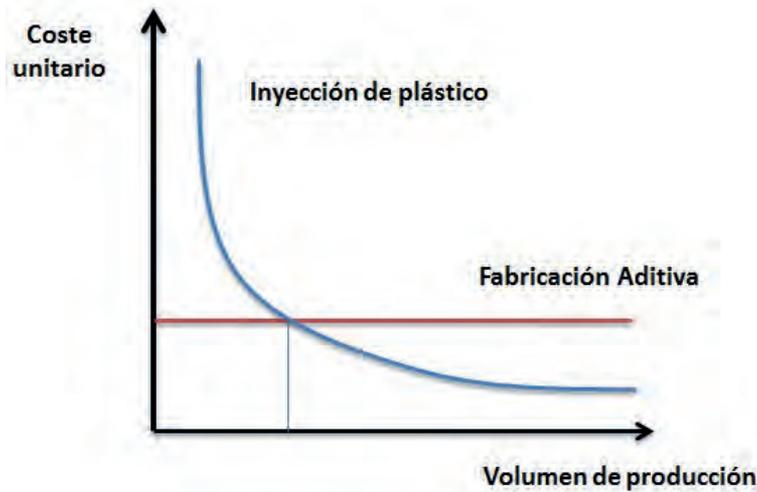


Figura 3. Relación entre el coste unitario y el volumen de producción en procesos por inyección de plásticos y de Fabricación Aditiva.

porosas, fácilmente diseñadas con sistemas CAD pero difícilmente obtenibles con procesos tradicionales de fabricación.

- *Fabricación de piezas casi netas (Near Net Shape)*. Este proceso de fabricación permite fabricar piezas complejas, más costosas o difíciles de producir con los procesos tradicionales.
- *Fabricación conectada*. La realización de modelos CAD y los sistemas de comunicación global, tales como internet, permiten que el usuario se encuentre en un lugar diferente a donde se ubique el equipo de producción y pueda ejecutar una operación de fabricación, además de que en este proceso se puede integrar en sistemas de fabricación automática con facilidad.
- *Democratización de la fabricación*. El desarrollo tecnológico de este proceso de fabricación ha permitido que esta tecnología sea accesible al consumidor, disponiendo de equipos de bajo coste, siendo cada vez más común su doméstico, produciendo sus propias piezas.

Por otro lado, se pueden considerar también un conjunto de **inconvenientes** asociados a la tecnología de Fabricación Aditiva:

- *Alto coste de la materia prima*. La necesidad de transformar previamente la materia prima que se utiliza en el proceso (polvo metálico, hilo polimérico, resina líquida, etc.) genera un incremento del coste de ésta, si bien los gastos asociados a la materia prima se han ido reduciendo, conforme se ha ido desarrollando esta tecnología.
- *Variación en las propiedades de los materiales procesados. Anisotropía*. Al tratarse de un proceso discontinuo, por su generación capa a capa, las

propiedades del material pueden verse modificadas en función de cómo se lleva a cabo el proceso de fabricación: según la dirección de la capa (obteniendo diferentes propiedades en dicha dirección o perpendicularmente a ella), el espesor de la capa o los parámetros utilizados para la realización del proceso.

- *Ausencia de software específico de diseño para tecnologías de Fabricación Aditiva.* Gran cantidad de software de diseño asistido por ordenador (CAD) utiliza operaciones básicas de mecanizado para modelar el producto, dificultando el moldeo de geometrías complejas por la necesidad de curvas o *splines* que aprovechen la capacidad de la Fabricación Aditiva.
- *Limitación en el uso de materiales.* Aunque cada vez es mayor el número de materiales que pueden utilizarse en los procesos de Fabricación Aditiva, la variedad disponible es inferior a la que se puede utilizar en los procesos de fabricación tradicional.
- *Bajos valores de acabado superficial y de velocidad de fabricación.* En los procesos de Fabricación Aditiva estas dos características muestran peores valores frente a los obtenidos en los procesos de fabricación tradicional. Estas dos características se encuentran relacionadas entre sí, de forma que un aumento de la velocidad de fabricación condiciona la calidad superficial del acabado.
- *Baja calidad del producto y repetibilidad del proceso.* Algunas tecnologías de Fabricación Aditiva presentan problemas de repetibilidad y capacidad de proceso, no pudiendo asegurar la precisión dimensional que requiere la pieza. La tolerancia de este tipo de procesos está, en el mejor de los casos, en torno a 0,1 mm.
- *Tamaño limitado de piezas.* En la actualidad, las dimensiones de la pieza a fabricar están muy limitadas por el tamaño del equipo.
- *No rentable para series elevadas de producción.* Debido principalmente a la baja capacidad productiva, este tipo de procesos no es económicamente rentable para la fabricación de series largas de fabricación de un producto, obteniéndose un menor coste con procesos tradicionales de fabricación (Figura 4).

4. ORIGEN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La idea de fabricación de productos capa a capa es anterior a la Fabricación Aditiva. El primer objeto obtenido considerando procesos aditivos (capa a capa) se atribuye a Peacock, por su patente de herraduras laminadas en 1902. En 1952, Kojima demuestra los beneficios que presentan los procesos de fabricación por capas, siendo semilla para el desarrollo de diferentes patentes entre las décadas

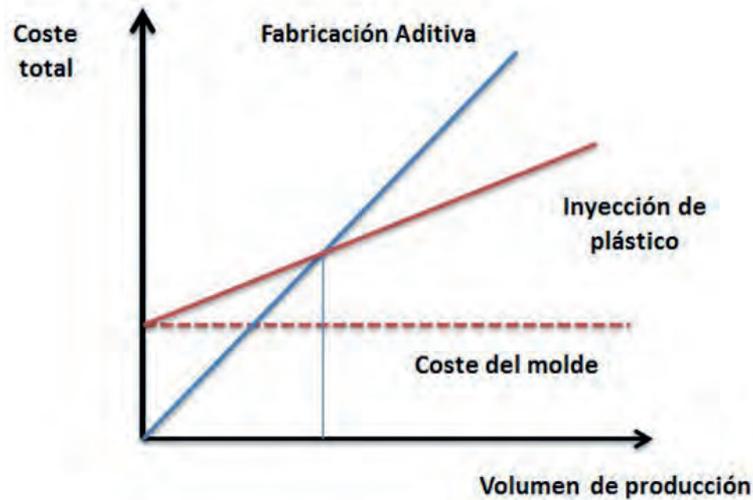


Figura 4. Relación entre el coste total y el volumen de producción en procesos por inyección de plásticos y de Fabricación Aditiva.

de los 60 y 80, que finalmente originarían la idea de la fabricación de objetos 3D usando tecnologías de capas y, con ello, el concepto inicial de prototipado rápido.

El proceso de fotopolimerización, en el que la luz provoca el endurecimiento de un material polimérico, fue la primera técnica empleada para el desarrollo de un proceso de Fabricación Aditiva, empleando resinas fotopoliméricas, que se obtuvieron en la década de los 70. Su desarrollo se inició en la década de los 80, pudiéndose reseñar los siguientes hitos:

- **1983:** Charles Hull utiliza la técnica de fotopolimerización para la generación de objetos sólidos procedentes de un diseño CAD. Esta tecnología se denominó Estereolitografía (*Stereo Litography Apparatus*, SLA) y se empleó para la fabricación de prototipos.
- **1986:** Charles Hull funda la empresa 3D SYSTEMS, donde desarrolla el formato de archivo STL. Ese mismo año, Carl Deckar y Joe Meaman desarrollan una nueva tecnología SLS (*Selective Laser Sintering*) en la Universidad de Texas.
- **1987:** 3D SYSTEMS desarrolla la primera máquina comercializada de SLA, denominada SLA-1.
- **1988:** Scott Crump desarrolla la tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*), siendo actualmente la tecnología más extendida a nivel de consumidor.
- **1990:** Se comercializan las primeras máquinas de SLS, aunque solo se fabrican 4 unidades, debido a su elevado coste. Por otro lado, HELISYS desarrolla la tecnología LOM (*Laminated Object Manufacturing*).

- **1992:** La empresa STRATASYS lanza al mercado la primera máquina FDM. Además, se lanza una segunda generación de máquinas SLS, con mejor acogida por el mercado. Nace el proceso de sinterización en lecho de polvo.
- **1993:** El Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desarrolla la tecnología 3DP (*Three Dimensional Printing*).
- **1994:** SOLIDSCAPE desarrolla un sistema denominado chorro de cera, muy similar a los sistemas de inyección de tinta.
- **1997:** La empresa Aeromet desarrolla la tecnología LAM (*Laser Additive Manufacturing*), con la que realizan procesos de sinterización en lecho de polvo de titanio.
- **1998:** Aparece la tecnología LENS (*Laser Engineered Net Shaping*) que emplearía metales en polvo, el primer proceso de depositado mediante energía dirigida (*Direct Energy Deposition*, DED) introducido por la empresa estadounidense Optomec.
- **2000:** Aparece una nueva tecnología denominada *Laser Cladding* basada en tecnología DED. Además, se comercializa la primera máquina de FDM que utiliza como material el polímero ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*).
- **2001:** SOLIDMENSION fabrica la primera impresora 3D de escritorio.
- **2002:** Se fabrica el primer riñón en miniatura mediante tecnologías de Fabricación Aditiva.
- **2006:** Se introducen los primeros procesos de fabricación con polvo de acero inoxidable y de cobalto-cromo. Además, se desarrolla la tecnología de fundido por haz de electrones (*Electron Beam Melting*, EBM).
- **2008:** Se fabrica la primera prótesis para pierna y la empresa STRATASYS produce el primer material biocompatible para su empleo en FDM.
- **2009:** Se crea el Comité F42 de ASTM, sobre Fabricación Aditiva, con el objetivo de normalizar los ensayos, los procesos, los materiales, los diseños y la terminología.
- **2010:** primer automóvil con un chasis creado por impresión 3D (Urbee, 2010).
- **2011:** Airbus desarrolla el Thor, primer avión producido por fabricación 3D.
- **2014:** Se realiza el primer exoesqueleto robótico fabricado.

La aplicación de tecnología de Fabricación Aditiva ha continuado extendiéndose en otros múltiples ámbitos, cabiendo mencionar su empleo para la fabricación de viviendas o de elementos estructurales. Los desarrollos futuros de esta tecnología están dirigidos a la mejora de los procesos actualmente generados, tales como el aumento de la velocidad de producción, de la precisión y de la capacidad productiva, así como la utilización de nuevos tipos de materiales.

5. CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Aunque inicialmente los procesos de Fabricación Aditiva estaban destinados a la obtención de prototipos, el desarrollo tecnológico ha permitido que también puedan emplearse para la obtención de piezas de producción. Para ello se pueden utilizar diferentes procesos y materiales, dependiendo de las características de la pieza, su aplicación, el sector industrial al que se destine, así como de los costes y tiempo de producción.

Estas piezas de producción pueden fabricarse según los requisitos exigidos de trazabilidad y calidad del producto final. Una clasificación inicial, atendiendo a cómo se obtiene una pieza de producción, permite considerar dos categorías:

- *Procesos de una sola etapa*: las piezas se fabrican en una sola operación, en la que se obtienen simultáneamente la forma geométrica y las propiedades finales de la pieza.
- *Procesos de varias etapas*: las piezas se fabrican en dos o más operaciones, en las que la primera proporciona habitualmente la geometría y en las siguientes se consolida la pieza con las propiedades previstas. Estas piezas, además de ser obtenidas a partir de un proceso de Fabricación Aditiva, requerirán la utilización de procesos de fabricación tradicional.

Considerando las características propias de los sistemas de Fabricación Aditiva, éstos se pueden clasificar considerando diferentes criterios: según el formato de aporte de material, según la forma de consolidar el material, según el proceso de obtención del modelo y según la forma en la que se llevan a cabo los procesos.

5.1. Según el formato de aporte de material

- *Líquido*: el material con el que se formará la pieza se encuentra en estado líquido (procesos de estereolitografía o fotopolimerización).
- *Polvo*: bien sea de material metálico o polimérico, al polvo se le aporta energía térmica para obtener la pieza (procesos de sinterizado láser o fusión por haz de electrones).
 - *Lecho*: el polvo se encuentra depositado en una bandeja y se actúa solo sobre zonas determinadas del lecho de polvo, según la geometría de la capa.
 - *Chorro*: el polvo se suministra y, a la vez, se actúa sobre él para crear la capa de material.
- *Sólido*: el material de partida se encuentra en estado sólido y posteriormente es tratado para formar la pieza. Según la forma en la que se encuentre, se pueden considerar dos tipos: