



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**



Revisión y análisis de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta

Ing. Jorge Zaragoza Siqueiros

Asesor

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ

20 de junio de 2013

**AL ING. JORGE ZARAGOZA SIQUEIROS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de junio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**"REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO,
MANUFACTURA Y HERRAMENTAL RÁPIDO."**

Introducción.

- I. Antecedentes.
- II. Revisión de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido.
- III. Clasificación y selección de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido.
- IV. Diseño para prototipado, manufactura y herramental rápido.
- V. Desarrollo e implementación de plataforma "RPMT Reviewer"

Conclusiones.

Bibliografía.

Anexos.



90
AÑOS DE
AUTONOMÍA
UASLP
Primera Universidad
Autónoma en México

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

"90 Años de Autonomía, UASLP Primera Universidad Autónoma en México"

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme realizar y concluir satisfactoriamente este proyecto.

A mi mujer, novia y mejor amiga Guadalupe Ledesma, por su cariño, comprensión, apoyo incondicional y por estar al frente junto a mí en todo momento.

A mis padres por su incondicional apoyo e impulso que me brindan a cada momento y periodo de mi vida.

A mi asesor de tesis el Dr. Hugo Iván Medellín Castillo por todas sus sugerencias, asesoría, por sus consejos, correcciones, dedicación y paciencia que junto a su calidad humana y como profesionalista es uno de los principales responsables en el desarrollo y conclusión de este proyecto.

A todos los profesores del posgrado que participaron en mi formación

A la facultad de ingeniería por ser como mi segundo hogar.

A CONACYT por el apoyo otorgado por medio de la beca otorgada.

A mis compañeros de generación: Alberto, Dora, Efraín, Julio, José Luis, Rafael, Rodolfo por su amistad, y compartir conmigo sus conocimientos y habilidades.

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a una mujer muy especial, extraordinaria e importante en mi vida, quien con su amor, comprensión e incondicional apoyo está a mi lado preocupándose porque todas mis metas y proyectos se concluyan a pesar de las posibles adversidades que se presentan. Quien me ayuda en las situaciones difíciles y celebra a mi lado los éxitos obtenidos y está conmigo ante todo y en todo.

Guadalupe Ledesma

De igual manera dedico el presente trabajo a mis padres, que con su ejemplo de trabajo, supieron forjar en mí, un espíritu de lucha, de búsqueda de mejores oportunidades y de enseñarme que el éxito, es algo que se conquista con dedicación, con perseverancia, trabajo, honestidad, y que las metas solo así son alcanzables

Ángeles Siqueiros

Rodolfo Zaragoza

Jorge

Contenido

CONTENIDO	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ABREVIACIONES	XV
RESUMEN	XXI
INTRODUCCIÓN	1
PERSPECTIVA HISTÓRICA	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	3
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	5
1.1 TECNOLOGÍAS RÁPIDAS DE FABRICACIÓN	5
1.1.1 <i>Manufactura por capas (LM)</i>	5
1.1.2 <i>Prototipado rápido (RP)</i>	6
1.1.3 <i>Manufactura rápida (RM)</i>	6
1.1.4 <i>Herramental rápido (RT)</i>	6
1.1.5 <i>Maquinado de alta velocidad (HSM)</i>	6
1.1.6 <i>Manufactura digital (DM)</i>	7
1.1.7 <i>Modelado físico de concepto (PCM)</i>	7
1.1.8 <i>Ingeniería inversa (RE)</i>	8
1.1.9 <i>Prototipado virtual (VP)</i>	10
1.2 PROTOTIPADO, MANUFACTURA Y HERRAMENTAL RÁPIDO (RPM&T)	11
1.2.1 <i>Prototipado rápido (RP)</i>	11
1.2.1.1 Características generales de las tecnologías RP	13
Materiales	13
Dimensiones	13
Costos	14
Tolerancia y espesor de capa	14
Limitantes	14
1.2.1.2 Aplicaciones de las tecnologías RP	16
1.2.2 <i>Manufactura rápida (RM)</i>	20
1.2.3 <i>Herramental rápido (RT)</i>	21
1.3 REVISIONES PREVIAS DE LAS TECNOLOGÍAS RPM&T	22
1.4 CLASIFICACIÓN Y ALGORITMOS DE SELECCIÓN DE LOS SISTEMA RPM&T	23
1.4.1 <i>Clasificaciones RPM&T</i>	23
1.4.2 <i>Metodologías de selección</i>	28
1.5 DISEÑO PARA RP	29
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO, MANUFACTURA Y HERRAMENTAL RÁPIDO	31
2.1 TECNOLOGÍAS ADITIVAS	32
2.1.1 <i>Procesos de curado</i>	33
2.1.1.1 Estereolitografía - Stereolithography (SLA)	33
2.1.1.2 Procesado directo por luz – Direct light processing (DLP)	36
2.1.1.3 Polimerización térmica de líquido – Liquid thermal polymerization (LTP)	38
2.1.1.4 Solidificación por interferencia de rayo - Beam interference solidification (BIS)	38

2.1.1.5 Curado de piso sólido - Solid ground curing (SGC)	39
2.1.1.6 Solidificación holográfica por interferencia - Holographic interference solidification (HIS)	41
2.1.1.7 Solidificación de fluido electro configurable - Solidification of electroset (Electrosetting, ES)	41
2.1.1.8 Formado espacial - Spatial forming (SF)	42
2.1.1.9 Litografía láser - Laser lithography (LL)	43
2.1.1.10 Nanoestereolitografía - Nanostereolithography (NSL)	44
2.1.1.11 Moldeado por reacción UV - UV Reaction molding (UVRM)	45
2.1.1.12 Estereolitografía térmica - Stereo thermal lithography (STLG)	45
2.1.1.13 Chorro de fotopolímero - Jetted photopolymer (JP)	46
2.1.1.14 Litografía por nanoimpresión - Nanoimprint lithography (NIL)	48
2.1.1.15 Litografía por rayo de electrones - Electron beam lithography (EBL)	49
2.1.1.16 Revelado por transferencia de películas - Film transfer imaging (FTI)	51
2.1.1.17 Estereolitografía refrigerativa - Refrigerative stereolithography (RSLA)	51
2.1.1.18 Araldite	53
2.1.1.19 Fotoformado directo - Direct photo shaping (DPS)	54
2.1.1.20 Impresión directa asistida por láser - Laser assisted direct imprint (LADI)	55
2.1.1.21 Optoform	55
2.1.1.22 Microestereolitografía – Microstereolithography (MSLA)	56
2.1.2 Procesos de apilado	58
2.1.2.1 Manufactura de objetos laminados - Laminated object manufacturing (LOM)	58
2.1.2.2 Manufactura de objetos laminados curvos - Curved laminated object manufacturing (CLOM)	60
2.1.2.3 Manufactura asistida por computadora –Ingeniería de materiales laminados - Computer aided manufacturing – Laminated engineering materials (CAM-LEM)	61
2.1.2.4 Polimerización sólida de láminas delgadas - Solid foil polymerization (SFP)	62
2.1.2.5 Hotplot	62
2.1.2.6 Laminación por deposición selectiva - Selective deposition lamination (SDL aka MCOR)	62
2.1.3 Procesos de dispensado	65
2.1.3.1 Modelado por deposición líquida - Fused deposition modeling (FDM)	66
2.1.3.2 Soldadura tridimensional - Three dimensional welding (3DW)	68
2.1.3.3 Deposición de fase gaseosa - Gas phase deposition (GPD)	68
2.1.3.4 Evaporación asistida por matriz de pulsos láser - Matrix assisted pulsed laser evaporation (MAPLE)	69
2.1.3.5 Manufactura Balística de Partículas - Ballistic particle manufacturing (BPM)	69
2.1.3.6 Fabricación electroquímica - Electrochemical fabrication (EFAB)	72
2.1.3.7 Formado final en ingeniería por láser - Laser engineered net shaping (LENS)	73
2.1.3.8 Deposición líquida de cerámicas - Fused deposition of ceramics (FDC)	76
2.1.3.9 Solidificación por chorro multifase - Multiphase jet solidification (MJS)	78
2.1.3.10 Chorro de metal - Metal jet (MJ)	79
2.1.3.11 Modelado por deposición directa con láser - Direct laser deposition modeling (DLDM)	80
2.1.3.12 Atomizado de metal - Metal spray (MS)	81
2.1.3.13 Deposición química de vapor con láser - Laser chemical vapor deposition (LCVD)	82
2.1.3.14 Prototipado rápido por congelamiento - Rapid freeze prototyping (RFP)	84
2.1.3.15 Manufactura por deposición con multibojas - Multi-nozzle deposition manufacturing (MDM)	85
2.1.3.16 Modelado por multichorro - Multi-jet modeling (MJM)	86
2.1.3.17 Inyección de alta viscosidad - High-viscosity jetting (HVJ)	88
2.1.3.18 Robocasting (RBC)	89
2.1.3.19 Extrusión y deposición de metales semisólidos - Extrusion and deposition of semi-solid metals (EDSSM)	91
2.1.3.20 Formado libre por extrusión - Extrusion freeforming (EFF)	92
2.1.3.21 Fabricación de formas libres por deposición electrofotográfica de polvos - Electrophotographic powder deposition for freeform fabrication (EPDF)	94
2.1.3.22 Manufactura por deposición de moldes de formas - Mold shape deposition manufacturing (MOLD-SDM)	95
2.1.3.23 Deposición por pulsos láser - Pulsed laser deposition (PLD)	96
2.1.3.24 Deposición selectiva de áreas por láser - Selective area laser deposition (SALD)	98
2.1.3.25 Deposición selectiva de áreas por láser e infiltración de vapor - Selective area laser deposition and vapour infiltration (SALDVI)	99
2.1.3.26 Micro moldeo capilar - Micromolding in capillaries (MIMIC)	100
2.1.3.27 Moldeado por inyección a baja presión – Low pressure injection molding (LPIM)	101
2.1.3.28 Construcción de contornos - Contour crafting (CC)	101

2.1.3.29 Impresión por chorro de tinta- Inkjet printing (IP o MM)	104
2.1.3.30 Modelado por deposición fundida de metales - Fused deposition modeling of metals (FDMm aka FDMet)	105
2.1.3.31 Manufactura de formas netas basado en goteo de alta precisión - High precision droplet based net-form manufacturing (HPDBNM)	106
2.1.3.32 Moldeo por inyección de polvo - Powder injection molding (PIM)	107
2.1.3.33 Microsoldadura 3D - 3D Micro welding (3DMW)	108
2.1.3.34 Manufactura por deposición de plasma - Plasma deposition manufacturing (PDM)	110
2.1.3.35 Manufactura por deposición plasma-láser – Plasma-laser deposition manufacturing (PLDM)	111
2.1.3.36 Consolidación láser de formas libres - Freeform laser consolidation (FLC)	112
2.1.3.37 Otros procesos de dispensado	113
2.1.4 Procesos de sinterizado	114
2.1.4.1 Sinterizado selectivo por láser - Selective laser sintering (SLS)	114
2.1.4.2 Sinterizado directo de metal por láser - Direct laser metal sintering (DLMS)	117
2.1.4.3 Fundición por haz de electrones - Electron beam melting (EBM)	120
2.1.4.4 Fundición selectiva por láser - Selective laser melting (SLM)	122
2.1.4.5 Sinterizado selectivo por plantilla - Selective masking sintering (SMS)	124
2.1.4.6 Sinterizado por inhibición selectiva - Selective inhibition sintering (SIS)	125
2.1.4.7 Manufactura electrofotográfica en capas - Electrophotographic layered manufacturing (ELM)	127
2.1.4.8 Sinterizado de alta velocidad - High-speed sintering (HSS)	128
2.1.4.9 Microsinterizado láser - Laser microsintering (LMS)	128
2.1.4.10 Sinterizado micro selectivo por láser - Micro selective laser sintering (μ -SLS)	129
2.1.4.11 Micro sinterizado selectivo por láser - Selective laser micro sintering (SLMS)	130
2.1.4.12 Sinterizado por descarga eléctrica selectiva de alta frecuencia - High frequency selective electrical discharge sintering (HFSEDS)	130
2.1.4.13 Sinterizado rápido de polvos basado en patrones - Rapid pattern based powder sintering (RPBPS)	132
2.1.4.14 Otros procesos de sinterizado	132
2.1.5 Procesos de aglutinado	133
2.1.5.1 Impresión tridimensional - Three dimensional printing (3DP)	133
2.1.5.2 Formación topográfica de formas - Topographic shape formation (TSF)	136
2.1.5.3 Moldeado de polvo de forma libre - Freeform powder molding (FPM)	136
2.1.5.4 Otros procesos de aglutinado	137
2.1.6 Procesos de ensamble	138
2.1.6.1 Rpblox- Rpblox (RPBloX)	138
2.1.6.2 OcBlox / RPNNS	139
2.1.6.3 Estratoconcepción – Stratoconception (SC)	141
2.1.7 Procesos de organismos	142
2.1.7.1 Formado por gradiente de temperatura controlada - Grading-temperature control forming (GTCF)	142
2.1.7.2 Laminado en sitio de enlaces cruzados - Layered in situ cross-linking (LISC)	142
2.1.7.3 Solidificación de materiales termo sensibles - Thermo-sensitive materials solidification (TSMS)	143
2.1.7.4 Manufactura por deposición a baja temperatura - Low-temperature deposition manufacturing (LDM)	143
2.1.7.5 Impresión de órganos - Organ printing (OP)	145
2.1.7.6 Solidificación por chorro de aire a presión - Air-pressure jet solidification (AJS)	146
2.1.7.7 Prototipado criogénico - Cryogenic prototyping (CP)	147
2.1.7.8 Manufactura por extrusión precisa - Precise extrusion manufacturing (PEM)	149
2.1.7.9 Ensamble tridimensional de células - Cell-assembly technique (3DCAT)	150
2.1.7.10 Impresión biológica por láser - Biological laser printing (Bio-LP)	151
2.2 TECNOLOGÍAS SUBSTRACTIVAS	152
2.2.1 Maquinado CNC	152
2.2.1.1 Control numérico computarizado -Prototipado rápido - Computer numerical control - Rapid prototyping (CNC-RP)	152
2.2.1.2 Maquinado de escritorio - Desktop milling (DM)	154
2.2.1.3 Maquinado de alta velocidad - High-speed milling (HSM)	156
2.2.2 Maquinado por robot	158
2.2.2.1 Sistema robótico de prototipado - Robotic prototyping system (RPS)	158
2.2.3 Maquinado láser	159
2.2.3.1 Desbastado láser - Lasercaving (LC)	159
2.2.3.2 Erosión asistida por láser - Laser assisted etching (LAE)	160
2.2.3.3 Erosión húmeda posterior inducida por láser - Laser-induced backside wet etching (LIBWE)	161

2.2.1.5 Otros procesos de maquinado láser	162
2.3 TECNOLOGÍAS FORMATIVAS	163
2.3.1 Robotyping	163
2.4 TECNOLOGÍAS HIBRIDAS	168
2.4.1 Maquinado y soldadura 3D - 3D Welding and milling (3DWM)	168
2.4.2 Manufactura por deposición de formas - Shape deposition manufacturing (SDM)	170
2.4.3 Deposición directa por láser y CNC - Direct laser deposition & CNC (DLD-CNC)	171
2.4.4 Deposición por plasma y maquinado - Hybrid plasma deposition and milling (HPDM)	172
2.4.5 Generación láser y maquinado de alta velocidad - Laser generating and high-speed milling (LGHSM)	174
2.4.6 Nano deposición de compuestos - Nano composite deposition (NCD)	175
2.4.7 Sistema de maquinado por robot - Robot machining system (RMS)	177
2.4.8 Consolidación ultrasónica - Ultrasonic consolidation (UC)	179
2.4.9 Rayo iónico enfocado - Focused ion beam (FIB)	181
2.4.10 Maquinado rápido en capas - Rapid layer milling (RLM)	183
2.4.11 Acumulación controlada de metal - Controlled metal build up (CMB)	184
2.4.12 Torneado micro químico por láser - Laser microchemical lathe (LML)	184
2.5 DISCUSIÓN	185
CAPÍTULO 3 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO, MANUFACTURA Y HERRAMENTAL RÁPIDO	195
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS RPM&T	195
3.1.1 <i>Procesos de adición</i>	195
3.1.2 <i>Procesos de sustracción</i>	196
3.1.3 <i>Procesos de formado</i>	196
3.1.4 <i>Procesos híbridos</i>	196
3.1.5 <i>Clasificación general</i>	197
3.2 METODOLOGÍAS DE SELECCIÓN	199
3.2.1 <i>Selección de acuerdo al tipo de tecnología, escala y material de la pieza</i>	199
3.2.2 <i>Selección de acuerdo el material de la pieza</i>	200
3.2.3 <i>Selección de acuerdo a resistencia</i>	200
3.2.3 <i>Selección de acuerdo al costo de la tecnología</i>	200
3.3 DISCUSIÓN	206
CAPÍTULO 4 DISEÑO PARA PROTOTIPADO, MANUFACTURA Y HERRAMENTAL RÁPIDO	209
4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO	209
4.2 DISEÑO PARA RP DE ACUERDO A LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	212
4.2.1 <i>Estructuras de soporte y voladizos</i>	212
Recomendaciones para estructuras de soporte y voladizos	213
4.2.2 <i>Tamaño de la pieza a generar</i>	213
Recomendaciones para el tamaño de la pieza a generar	215
4.2.3 <i>Cavidades y espesores de pared</i>	215
Recomendaciones para cavidades y espesores de pared	216
4.2.4 <i>Redondeos, bordes filosos y definición de detalles</i>	216
Recomendaciones para redondeos, bordes filosos y definición de detalles	217
4.2.5 <i>Orientación de la pieza</i>	217
Recomendaciones para la orientación de la pieza	218
4.2.6 <i>Orientación de la capa y planeación de la trayectoria</i>	219
Recomendaciones para la orientación de la capa y planeación de la trayectoria	220
4.3 DISEÑO PARA RP DE ACUERDO A LOS REQUERIMIENTOS DE CALIDAD	221
4.3.1 <i>Distorsión, contracción y pandeo</i>	221
Recomendaciones para contracción, distorsión y pandeo	224
4.3.2 <i>Precisión</i>	224
Recomendaciones para precisión	225
4.3.3 <i>Acabado superficial</i>	226

Recomendaciones para acabado superficial	229
4.3.4 Estabilidad	229
Recomendaciones para estabilidad	229
4.3.5 Postprocesado	230
Recomendaciones para postprocesado	230
4.4 DISEÑO PARA RP DE ACUERDO A SUSTENTABILIDAD	231
4.4.1 Costo de la parte	231
Recomendaciones para el costo de la parte	231
4.4.2 Resistencia al ambiente	232
Recomendaciones para la resistencia al ambiente	232
CAPÍTULO 5 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE PLATAFORMA “RPMT REVIEWER”	233
5.1 RPMT REVIEWER	233
5.2 INICIO Y MENÚ PRINCIPAL DE ACCESO	233
5.3 BASE DE DATOS (ACCESS TO RPMT DB)	236
5.3.1 Generación de reportes	237
5.4 CLASIFICACIÓN (RPMT CLASSIFIER)	238
5.5 SELECCIÓN (FIND YOUR RPMT TECHNOLOGY)	239
5.6 FILOSOFÍAS DE DISEÑO (DESIGN FOR RPMT)	241
CONCLUSIONES	245
BIBLIOGRAFÍA	247
ANEXOS	263
A. PROVEEDORES DE INFORMACIÓN CIENTÍFICA REFERENTE LAS TECNOLOGÍAS RPM&T	263
B. PROVEEDORES DE INFORMACIÓN REFERENTE A LAS TECNOLOGÍAS RPM&T	264
C. FABRICANTES DE EQUIPO RPM&T	265

Índice de figuras

Figura 1.1. Maquinado de alta velocidad de una superficie, [7].	7
Figura 1.2. Modelado físico del concepto: (a) modelo CAD objetivo, (b) descomposición CAD del objetivo.	8
Figura 1.3. Ingeniería inversa de un objeto 3D (Escaneo tridimensional).	9
Figura 1.4. Prototipado virtual, aplicación al diseño de equipos de asistencia humana.	10
Figura 1.5. Aplicación del prototipado virtual al diseño de dispositivos mecánicos	11
Figura 1.6. Esquema general del proceso de prototipado rápido.	12
Figura 1.7. Método aditivo de prototipado rápido.	12
Figura 1.8 Limitantes comunes en la fabricación por RP: (a) secciones delgadas, (b) distorsión, (c) vértices rotos.	15
Figura 1.9. Distribución de sistemas RP instalados en el mundo al 2007.	16
Figura 1.10. Distribución de sistemas RP instalados en la región Asia/Pacífico al 2011.	17
Figura 1.11. Aplicaciones del prototipado rápido a nivel mundial.	17
Figura 1.12. Prototipos fabricados mediante técnicas RP.	18
Figura 1.13. Prototipos de la industria automotriz.	18
Figura 1.14. Prueba efectuada a un prototipo de Fórmula 1 en túnel de viento.	19
Figura 1.15. Rotulas de rodilla fabricadas por RP.	19
Figura 1.16. Prototipado de cráneo humano, herramienta de ayuda para cirujanos.	20
Figura 1.17. Piezas fabricadas mediante manufactura rápida.	21
Figura 1.18. Moldes fabricados por prototipado rápido (herramental rápido).	22
Figura 1.19. Clasificación de los sistemas RP propuesto en 1998 [6].	23
Figura 1.20. Clasificación de tecnologías RP y RM propuesta en [37].	24
Figura 1.21. Clasificación de sistemas RP propuesta en el año 2000 [58].	24
Figura 1.22. Clasificación propuesta en 2000 de los sistemas de herramental rápido [39].	25
Figura 1.23. Clasificación de técnicas RP de acuerdo al proceso de unión entre cada capa [40].	25
Figura 1.24. Clasificación de técnicas RP propuesta en 2003 [62].	26
Figura 1.25. Clasificación de las tecnologías RP&M, publicada en 2009 [52].	27
Figura 1.26. Algoritmo de selección de las tecnologías RP propuesto en 1998 [6].	28
Figura 2.1. Organización de las tecnologías RPM&T.	31
Figura 2.2. Esquema del sistema SLA [68].	34
Figura 2.3. Piezas fabricadas empleando SLA: (a) prototipo visual, (b) molde, (c) rotula de rodilla.	35
Figura 2.4. Esquema del proceso DLP.	37
Figura 2.5. Estructura del proceso BIS [6].	39
Figura 2.6. Esquema del proceso SGC.	40
Figura 2.7. Secuencia del proceso de formado espacial [72].	42
Figura 2.8. Piezas fabricadas por la tecnología SF.	43
Figura 2.9. Piezas creadas por litografía láser: (a) microestatua de la libertad, (b) y (c) estructuras porosas.	44
Figura 2.10. Esquema del sistema de nanoestereolitografía.	45
Figura 2.11. Relieves creados por NSL.	45
Figura 2.12. Principio de curado por doble láser del proceso STLG [62].	46
Figura 2.13. Esquema del proceso de chorro de fotopolímero.	47
Figura 2.14. Piezas fabricadas con el sistema JP.	48
Figura 2.15. Esquema del proceso de nanoimpresión [79].	49
Figura 2.16. Esquema del proceso de litografía por rayo de electrones [82].	50
Figura 2.17. Surco elaborado por EBL [73].	51
Figura 2.18. Esquema del proceso de estereolitografía refrigerativa [84].	52
Figura 2.19. Estructura del proceso Araldite [86].	53
Figura 2.20. Estructura del proceso DPS.	54
Figura 2.21. Estructura del proceso LADI.	55
Figura 2.22. Diagrama esquemático del sistema Optoform.	56
Figura 2.23. Estructura del sistema MSLA	57

Figura 2.24. Estructura del proceso del sistema LOM [68].	58
Figura 2.25. Base curva del proceso CLOM (arriba), Estructura del proceso LOM (abajo) [93].	60
Figura 2.26. Secuencia del proceso CAM-LEM [96].	61
Figura 2.27. Piezas fabricadas empleando el sistema CAM-LEM.	61
Figura 2.28. Secuencia del proceso SDL-MCOR.	63
Figura 2.29. Prototios de papel elaborados por SDL-MCOR.	64
Figura 2.30. Esquema de proceso del sistema FDM [68].	66
Figura 2.31. Ejemplo de modelos generados con el sistema FDM [101].	67
Figura 2.32. Representación esquemática del proceso GPD [46].	69
Figura 2.33. Representación esquemática del proceso MAPLE [103].	69
Figura 2.34. Esquema del proceso BPM [46].	70
Figura 2.35. Estructura del proceso EFAB [72].	72
Figura 2.36. Microestructuras fabricadas por medio de EFAB.	73
Figura 2.37. Esquema del sistema LENS.	74
Figura 2.38. Ejemplo de piezas fabricadas mediante LENS.	76
Figura 2.39. Esquema del proceso FDC [115].	77
Figura 2.40. Ejemplos de piezas fabricadas por deposición líquida de cerámicas.	77
Figura 2.41. Representación esquemática del proceso MJS [116].	78
Figura 2.42. Modelos fabricados mediante la tecnología MJS [116].	79
Figura 2.43. Modelos fabricados por la tecnología chorro de metal (metal jet, MJ).	80
Figura 2.44. Esquema del proceso DLDM: (a) simulación 3D empleado para predecir la concentración de polvo según el diseño de la boquilla de inyección, (b) diagrama del proceso DLDM.	81
Figura 2.45. Esquema del proceso MS [122].	81
Figura 2.46. Esquema del sistema LCVD [124].	82
Figura 2.47. LCVD: (a) grabado directo, (b) grabado por fibra.	83
Figura 2.48. Deposición de grafito: (a) escritura directa en líneas con 20 capas, (b) escritura directa con fibras.	84
Figura 2.49. Esquema del proceso RFP [128].	84
Figura 2.50. Parte de hielo fabricada por RFP.	85
Figura 2.51. Esquema del proceso MDM: (a) extrusión, (b) inyección.	86
Figura 2.52. Representación esquemática del sistema MDM.	86
Figura 2.53. Esquema del sistema MJM [131].	87
Figura 2.54. Ejemplos de prototipos fabricados mediante MJM.	88
Figura 2.55. Principio del proceso HVJ.	89
Figura 2.56. Boquilla de inyección del sistema Robocasting; (a) fotografía del cabezal inyector; (b) esquema del proceso Robocasting.	89
Figura 2.57. Esquema del sistema EDSSM.	92
Figura 2.58. Esquema del sistema EFF.	93
Figura 2.59. Ejemplo de estructuras fabricadas empleando EFF.	94
Figura 2.60. Representación esquemática del sistema EPDF.	95
Figura 2.61. Pieza fabricada empleando EPDF, [135].	95
Figura 2.62. Secuencia del proceso MOLD-SDM.	96
Figura 2.63. Esquema del proceso PLD [139].	97
Figura 2.64. Esquema de proceso de la tecnología SALD [142].	98
Figura 2.65. Representación esquemática del proceso SALDVI [145].	99
Figura 2.66. Estructura del proceso MIMIC.	101
Figura 2.67. Estructuras fabricadas por CC.	102
Figura 2.68. Inyector de cerámicas y plásticos del proceso CC [153].	103
Figura 2.69. Sistema CC [153].	103
Figura 2.70. Representación esquemática del proceso IP.	104
Figura 2.71. Cabezal de deposición de material empleado en el proceso FDMet, [159].	105

Figura 2.72. Piezas fabricadas empleando FDMet: (a) espiral empleando una sola capa, (b) estructura 3D empleando 6 capas, [159]	106
Figura 2.73. Representación esquemática del sistema HPDBNM.	106
Figura 2.74. Diagrama de flujo del proceso PIM.	108
Figura 2.75. Aparato de 3DMW.	109
Figura 2.76. Sistema 3DMW: (a) esquema de la estación de formado, (b) proceso de conformado.	109
Figura 2.77. Pieza formada mediante 3DMW	110
Figura 2.78. Diagrama esquemático del sistema PDM.	110
Figura 2.79. Sistema PLDM.	111
Figura 2.80. Esquema del proceso FLC.	112
Figura 2.81. Ejemplo de piezas fabricadas por FLC.	113
Figura 2.82. Esquema del sistema SLS [68].	115
Figura 2.83. Múltiple de automóvil fabricado por SLS [169].	117
Figura 2.84. Ilustración esquemática del sistema DLMS [68].	118
Figura 2.85. Piezas fabricadas por DLMS.	119
Figura 2.86. Representación esquemática del sistema EBM [171].	120
Figura 2.87. Principio del sistema SLM [175].	122
Figura 2.88. Ejemplos de aplicaciones de la tecnología SLM, (arriba-izquierda: estructura de panel, arriba-derecha: prototipo visual, abajo-izquierda: implante médico, abajo-derecha: manufactura rápida).	123
Figura 2.89. Esquema del proceso SMS.	124
Figura 2.90. Secuencia del proceso SIS [180].	126
Figura 2.91. Modelos fabricados por SIS [180].	127
Figura 2.92. Esquema del proceso ELM [29].	127
Figura 2.93. Esquema del proceso LMS [182].	129
Figura 2.94. Piezas construidas por el sistema LMS [182].	129
Figura 2.95. (a) Sistema de avance de ajuste rotatorio del sistema HFSEDS, (b) Cámara flexible para el llenado de Argón.	131
Figura 2.96. Esquema del puente de aglutinante formado después de que el aglutinante se funde.	131
Figura 2.97. Pieza fabricada mediante RPBPS.	132
Figura 2.98. Representación del sistema 3DP [68].	133
Figura 2.99. Ejemplos de modelos de visualización generados por 3DP [190]: (a) salida de datos de análisis de elementos finitos, (b) prototipo de visualización arquitectónica, (c) prototipo de ensamble.	135
Figura 2.100. Aplicaciones médicas empleando 3DP: (a) modelado de un implante de cráneo mediante 3DP [191], (b) mandíbula artificial generada por 3DP [192].	135
Figura 2.101. Modelo de visualización y verificación de ensamble en ingeniería [19].	135
Figura 2.102. Concepto de materiales de la tecnología FPM.	137
Figura 2.103. Secuencia del proceso FPM.	137
Figura 2.104. Vista esquemática del proceso RPBloX.	138
Figura 2.105. Sistema RPNNS.	139
Figura 2.106. Sistema real RPNNS.	140
Figura 2.107. Representación esquemática del proceso de Estratoconcepción.	141
Figura 2.108. Sistema LDM: (a) Estructura del sistema LDM, (b) Ilustración del esquema de formado de andamios en LDM, [197].	144
Figura 2.109. Tejido poroso compuesto de PLLA/TCP fabricado mediante LDM: (a) baja magnificación, (b) alta magnificación, [197].	144
Figura 2.110. Impresora de células e imágenes de células impresas: (a) modelo CAD de un sistema OP, (b) células endoteliales bovinas impresas en gotas de 50 μm de tamaño en una línea, (c) sección transversal de un gel impreso, (d) fotografía de una impresora real de células, (e) inyectores de células, [198].	145
Figura 2.111. Ilustración esquemática del sistema AIS.	146
Figura 2.112. Molde de estructura ósea creada por el sistema AIS.	147

Figura 2.113. Sistema de prototipado criogénico: (a) representación esquemática del sistema CP, (b) secuencia del proceso CP [200].	148
Figura 2.114. Funciones básicas del software CAM para el proceso CP [200].	148
Figura 2.115. Estructuras fabricadas por prototipado criogénico: (a) fibras fabricadas por CP, (b) estructura macroporosa, (c) estructura microporosa, [200].	149
Figura 2.116. Pulverizador del sistema PEM: (a) imagen real del pulverizador para la extrusión de PLLA, (b) diagrama esquemático del pulverizador empleado en PEM, [201]	150
Figura 2.117. Sección transversal de un andamio tisular formado mediante PEM: (a) dirección horizontal, (b) dirección vertical, [201]	150
Figura 2.118. Estructura del sistema BIO-LP [204].	151
Figura 2.119. Ilustración esquemática del maquinado de una esfera mediante CNC-RP, [205]	153
Figura 2.120. Esquema de un modelo cualquiera con un cilindro añadido a la superficie, [205]	153
Figura 2.121. Prototipo de una pieza de matatena fabricado por CNC-RP: (a) simulación CAM, (b) Prototipo después de ser rotado en dos ocasiones, (c) pieza fina, [205].	154
Figura 2.122. Secuencia del proceso DM [206].	155
Figura 2.123. Prototipo generándose en el sistema DM [206].	155
Figura 2.124. Sistema RPS.	158
Figura 2.125. Grabado y mecanizado de rosca por medio de LC.	160
Figura 2.126. Proceso de erosión asistida por láser: (a) esquema del proceso LAE, (b) microestructura 3D fabricada por medio de la tecnología LAE.	161
Figura 2.127. Diagrama esquemático del método LIBWE.	162
Figura 2.128. Zanjas fabricadas mediante el método LIBWE.	162
Figura 2.129. Representación esquemática de los conceptos de Robotyping: (a) concepto 1: aplicación de capas delgadas de forma libre, (b) concepto 2: sumersión de herramientas para la consolidación de la forma sobre el material.	163
Figura 2.130. Clasificación de rodillos para el concepto de modelado de capas de forma libre del sistema Robotyping.	164
Figura 2.131. Ajuste de los rodillos según la superficie a formar.	164
Figura 2.132. Modelado de arena según el concepto de modelado de capas de forma libre, sistema Robotyping.	165
Figura 2.133. Representación esquemática del concepto de sumersión de herramientas del sistema Robotyping en el caso de consolidación química.	166
Figura 2.134. Fases de oscilación del concepto de sumersión de herramientas en el caso de consolidación física.	166
Figura 2.135. Modelado de arena según el concepto de sumersión de herramientas en el caso de consolidación física.	167
Figura 2.136. Principio del proceso 3DWM.	169
Figura 2.137. Sistema experimental 3DWM.	169
Figura 2.138. Modelo fabricado por 3DMW.	170
Figura 2.139. Esquema del principio de funcionamiento del sistema SDM.	171
Figura 2.140. Proceso de fabricación de una pieza mediante DLD-CNC: (a) deposición de material, (b) fresado del contorno de la capa, (c) fresado de la superficie superior de la capa, (d) pieza final, [119].	171
Figura 2.141. Diagrama del proceso HPDM.	172
Figura 2.142. Sistema HPDM: (a) diagrama esquemático del equipo, (b) esquema del principio del proceso de fresado de contornos [212].	173
Figura 2.143. Alabe fabricada por medio de HPDM [212].	174
Figura 2.144. Hardware del sistema NCD.	175
Figura 2.145. Inyector de deposición empleado en NCD (izquierda), vista ampliada de una microfresa empleada en NCD (derecha).	176
Figura 2.146. Secuencia esquemática del proceso NCD.	176
Figura 2.147. Fabricación de microengrane por tres procesos distintos.	177
Figura 2.148. Comparativa entre procesos en la fabricación de un microengrane: a) proceso de deposición, (b) proceso de fundición, (c) proceso híbrido NCD.	177
Figura 2.149. Sistema robótico para maquinado.	178
Figura 2.150. Mecanizado basado en capas.	179
Figura 2.151. Proceso de maquinado y pieza final.	179

Figura 2.152. Esquema del proceso UC.	180
Figura 2.153. Sistema FIB: (a) componentes del equipo FIB, (b) esquema de la columna de iones empleada en FIB.	181
Figura 2.154. Principios de FIB: (a) imagen, (b) maquinado, (c) deposición.	182
Figura 2.155. Geometrías 3D formadas por la tecnología FIB.	183
Figura 2.156. Esquema del proceso LML.	185
Figura 3.1. Clasificación general de los sistemas RPM&T	198
Figura 3.2. Selección de las tecnologías RP, RM y RT según el tipo de tecnología, escala y material de la pieza.	201
Figura 3.3. Selección de acuerdo el material de construcción de la pieza.	202
Figura 3.4. Selección de acuerdo con la resistencia mecánica del material, (esfuerzo último a la tensión, MPa).	204
Figura 3.5. Selección de acuerdo al costo de la tecnología (en dólares americanos, USD).	205
Figura 4.1. Estructuras de soporte: (a) estructura de soporte para unir el prototipo a la plataforma de construcción, (b) estructura de soporte empleada para sostener voladizos.	212
Figura 4.2. Remoción de las estructuras de soporte de un proceso de apilado.	213
Figura 4.3. Espesor de pared recomendado para los procesos de dispensado.	216
Figura 4.4. Bordes filosos.	217
Figura 4.5. Trayectorias de relleno de espacios huecos.	219
Figura 4.6. Porcentaje de contracción vs espesor de la capa: (a) láser con una potencia de 100 mW, (b) láser con una potencia de 150 mW, (c) láser con una potencia de 200 mW, (d) láser con una potencia de 250 mW [243].	221
Figura 4.7. Contracción de la parte en los sistemas de sinterizado de acuerdo a distintos parámetros: (a) eje X, (b) eje Y, (c) eje Z.	223
Figura 4.8. Efecto de escalera o escalonamiento de las tecnologías aditivas.	226
Figura 4.9. Parámetros empleados para calcular la rugosidad media de una superficie empleando RP [255].	226
Figura 4.10. Variación del efecto escalera según el ángulo de la superficie.	227
Figura 4.11. Distribución de la rugosidad superficial media (teórica) en los procesos aditivos: (a) distribución de rugosidad según la variación del ángulo de superficie y el ángulo del perfil de la superficie, (b) distribución de rugosidad superficial según la variación del ángulo de la superficie y el espesor de la capa.	227
Figura 5.1. Ventana “Splash screen” de RPMT Reviewer.	233
Figura 5.2. Selección de idioma.	234
Figura 5.3. Aviso de conexión exitosa.	234
Figura 5.4. Menú principal: (a) interfaz gráfica y barra de herramientas, (b) barra de menús, pestaña Start, (c) barra de menús, pestaña Help.	235
Figura 5.5. Interfaz gráfica de la base de datos.	236
Figura 5.6. Reporte generado.	238
Figura 5.7. Barra de navegación: (a) configuración de la página, (b) formatos disponibles para exportar el reporte.	238
Figura 5.8. Interfaz gráfica del apartado de clasificación: (a) menú de clasificación, (b) clasificación de tecnologías aditivas, (c) clasificación de tecnologías substractivas, (d) procesos de aglutinado.	239
Figura 5.9. Interfaz gráfica del apartado de selección: (a) menú correspondiente al apartado de selección, (b) selección de acuerdo al material que se desea emplear, (c) selección de acuerdo a la resistencia mecánica del material, (d) tecnologías comerciales que emplean materiales con una resistencia mecánica >1000 MPa, (e) selección de acuerdo al costo de la tecnología.	240
Figura 5.10. Menú del apartado de DFRPM&T.	241
Figura 5.11. Grupo de directrices de diseño para RPM&T: (a) diseño según las características geométricas, (b) diseño de acuerdo a los requerimientos de calidad, (c) diseño de acuerdo a costo y sustentabilidad.	242
Figura 5.12. Documento que contiene los lineamientos requeridos para efectuar un diseño óptimo de acuerdo al grupo de filosofías seleccionado.	243

Índice de tablas

Tabla 1.1. Espacio de trabajo disponible de algunos sistemas RP comerciales.	13
Tabla 1.2. Limitantes de forma en los sistemas de prototipado rápido.	15
Tabla 2.1. Parámetros característicos de las tecnologías RPM&T.	32
Tabla 2.2. Parámetros técnicos del sistema SLA.	34
Tabla 2.3. Materiales empleados en SLA, disponibilidad según [19].	34
Tabla 2.4. Costos y frecuencia de mantenimiento para los sistemas SLA.	36
Tabla 2.5. Parámetros técnicos del sistema DLP.	37
Tabla 2.6. Características técnicas del sistema SGC.	40
Tabla 2.7. Parámetros técnicos disponibles para la litografía láser.	43
Tabla 2.8. Características técnicas disponibles del sistema JP.	47
Tabla 2.9. Características técnicas de RSLA.	52
Tabla 2.10. Características técnicas disponibles del proceso Araldite.	53
Tabla 2.11. Características técnicas disponibles de los sistemas LOM.	59
Tabla 2.12. Datos técnicos disponibles de la tecnología MCOR.	63
Tabla 2.13. Características técnicas disponibles del sistema FDM.	67
Tabla 2.14. Características técnicas disponibles para los sistemas BPM.	71
Tabla 2.15. Datos técnicos disponibles de la tecnología LENS.	75
Tabla 2.16. Características técnicas disponibles del sistema MJM.	87
Tabla 2.17. Datos técnicos disponibles de la tecnología CC.	102
Tabla 2.18. Características técnicas disponibles de los sistemas IP.	104
Tabla 2.19. Parámetros técnicos de sistemas SLS.	115
Tabla 2.20. Datos técnicos de la tecnología DLMS.	118
Tabla 2.21. Datos técnicos disponibles de la tecnología EBM.	121
Tabla 2.22. Datos técnicos disponibles de la tecnología SLM.	122
Tabla 2.23. Información técnica de la tecnología SMS.	124
Tabla 2.24. Parámetros técnicos de la tecnología 3DP.	134
Tabla 2.25. Datos técnicos disponibles para la tecnología OcBlox.	140
Tabla 2.26. Características técnicas del sistema DM.	155
Tabla 2.27. Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas.	186
Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de las metodologías de selección propuestas en comparación con las metodologías publicadas en la literatura.	207
Tabla 4.1. Ventajas y desventajas generales de los sistemas RP.	210
Tabla 4.2. Espacio de construcción de algunos sistemas RP disponibles comercialmente.	214
Tabla 4.3. Recomendación general de espesores de pared según el espesor de la capa.	215
Tabla 4.4. Niveles de variación de parámetros.	222
Tabla 4.5. Precisión de equipos comerciales.	225
Tabla 4.6. Valores típicos de rugosidad superficial [222].	228
Tabla 5.1. Descripción de iconos que contiene el menú principal de “RPMT Reviewer”.	234
Tabla 5.2. Información contenida en el formulario.	236

Abreviaciones

Termino	Español	Inglés
μm	Micrómetro	Micrometer
μ -SLS	Sinterizado micro selectivo por láser	Micro selective laser sintering
ϕ	Ángulo del perfil de la superficie	Angle of the surface profile
θ	Ángulo de la superficie	Surface angle
3DCAT	Posicionamiento tridimensional de células	3D Cell-assembly technique
3DMW	Microsoldadura 3D	3D Micro welding
3DP	Impresión tridimensional	3D printing
3DW	Soldadura tridimensional	Three dimensional welding
3DWM	Maquinado y soldadura 3D	3D Welding and milling
ABS	Acrlonitrilo butadieno estireno	Acrylonitrile butadiene styrene
AHP	Proceso de análisis jerárquico	Analytic hierarchy process
Al	Aluminio	Aluminum
Al_2O_3	Oxido de aluminio	Aluminum oxide
AlN	Nitruro de aluminio	Aluminum nitride
AJS	Solidificación por chorro de aire a presión	Air-pressure jet solidification
AM	Manufactura aditiva	Additive manufacturing
B	Parte posterior	Back
BIO-LP	Impresión biológica por láser	Biological laser printing
BIS	Solidificación por interferencia de rayo	Beam interference solidification
BPM	Manufactura balística de partículas	Ballistic particle manufacturing
$C_4H_8O_2$	Dioxano	Dioxane
CA	Corriente alterna	Alternate current
CAD	Diseño asistido por computadora	Computer assisted design
CAM	Manufactura asistida por computadora	Computer aided manufacture
CAM-LEM	Manufactura asistida por computadora – Ingeniería de materiales laminados	Computer Aided Manufacturing – Laminated Engineering Materials
CATS	Entramado de tejidos asistido por computadora	Computer aided tissue scaffolds
CC	Construcción de contornos	Contour crafting
CCD	Dispositivo de carga acoplada	Charge-coupled device
CIJ	Impresoras de chorro continuo	Continuous inject
CLOM	Manufactura de objetos laminados curvos	Curved laminated object manufacturing
cm	Centímetro	Centimeter
CM	Modelado por compresión	Compression molding
cm^3	Centímetro cubico	Cubic centimeter
CMB	Acumulación controlada de metal	Controlled metal build up
CNC	Control numérico computarizado	Computer numerical control
CNC-RP	Control numérico computarizado-Prototipado rápido	Computer numerical control-Rapid prototyping
Co	Cobalto	Cobalt
CP	Prototipado criogénico	Cryogenic prototyping
Cr	Cromo	Chrome
Cr-Co	Cromo cobalto	Cobalt chromium
CT	Tomografía computarizada	Computed tomography
Cu	Cobre	Copper
CVD	Deposición química de vapor	Chemical vapour deposition
CVI	Infiltración de vapor químico	Chemical vapour infiltration
CW	Onda continua	Continuous wave
D	Abajo	Down
DARPA	Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa	Defense Advanced Research Projects Agency
DBM	Fabricación a base de gotas	Droplet based manufacturing
DFRP	Diseño para prototipado rápido	Design for Rapid Prototyping
DFRPM&T	Diseño para prototipado, manufactura y herramental rápido	Design for rapid prototyping, manufacture and tooling
DL-D-CNC	Deposición directa por láser y CNC	Direct laser deposition & CNC

Termino	Español	Inglés
<i>DLDM</i>	Modelado por deposición directa con láser	Direct laser deposition modeling
<i>DLMS</i>	Sinterizado directo de metal por láser	Direct laser metal sintering
<i>DLP</i>	Procesado directo por luz	Direct light processing
<i>DM</i>	Maquinado de escritorio	Desktop milling
<i>DM</i>	Manufactura digital	Digital manufacturing
<i>DM</i>	Manufactura directa	Direct manufacturing
<i>DMD</i>	Dispositivo digital de microespejos	Digital micro-mirrors device
<i>DPS</i>	Fotoformado directo	Direct photo shaping
<i>DS</i>	Sacarosa desnaturalizada	Denatured sucrose
<i>EBL</i>	Litografía por rayo de electrones	Electron beam lithography
<i>EBM</i>	Fundición por haz de electrones	Electron beam melting
<i>EDM</i>	Maquinado por descarga eléctrica	Electrical discharge machining
<i>EDSSM</i>	Extrusión y deposición de metales semisólidos	Extrusion and deposition of semi-solids metals
<i>EFAB</i>	Fabricación electroquímica	Electrochemical fabrication
<i>EFF</i>	Extrusión de forma libre	Extrusion freeforming
<i>ELM</i>	Manufactura en capas electrofotográficas	Electrophotographic layered manufacturing
<i>EPDFF</i>	Deposición electrofotográfica de polvos para la fabricación de libre forma	Electrophotographic powder deposition for free form Fabrication
<i>ES</i>	Solidificación de fluido electroconfigurable	Solidification of electroset Electrosetting,
<i>EUA</i>	Estados unidos de américa	Unites states of America
<i>F</i>	Delantera	Front
<i>FDC</i>	Deposición líquida de cerámicas	Fused deposition of ceramics
<i>FDM</i>	Modelado por deposición líquida	Fused deposition modeling
<i>FDMet o FDMm</i>	Modelado por deposición fundida de metales	Fused deposition modeling of metals
<i>Fe</i>	Hierro	Iron
<i>FFF</i>	Fabricación de forma libre	Freeform fabrication
<i>FF-TLOM</i>	Manufactura de objetos libres de forma por capas delgadas	Free-form thick layered object manufacturing
<i>FIB</i>	Enfocado de rayo iónico	Focused ion beam
<i>FLC</i>	Consolidación láser de formas libres	Freeform laser consolidation
<i>FPM</i>	Modelado de polvo de formas libres	Freeform powder molding
<i>FRU</i>	Delantera-derecha y arriba	Front-right and up
<i>FTI</i>	Revelado por transferencia de películas	Film transfer imaging
<i>g</i>	Gramo	Gram
<i>GMAW</i>	Soldadura de gas por arco metálico	Gas metal arc welding
<i>GPD</i>	Deposición de fase gaseosa	Gas phase deposition
<i>GTCF</i>	Formado por gradiente de temperatura controlada	Grading-temperature control forming
<i>Hf</i>	Hafnio	Hafnium
<i>HFSEDS</i>	Sinterizado selectivo por descarga eléctrica de alta frecuencia	High frequency selective electrical discharge sintering
<i>HIS</i>	Solidificación holográfica por interferencia	Holographic interference solidification
<i>HPDBNFM</i>	Manufactura de formas netas basado en goteo de alta precisión	High precision droplet based net-form manufacturing
<i>HPDM</i>	Deposición por plasma y maquinado	Hybrid plasma deposition and milling
<i>hrs</i>	Horas	Hours
<i>HSC</i>	Corte de alta velocidad	High speed cut
<i>HSM</i>	Maquinado de alta velocidad	High-speed milling
<i>HSM</i>	Maquinado de alta velocidad	High-speed machining
<i>HSS</i>	Sinterizado de alta velocidad	High-speed sintering
<i>HVJ</i>	Inyección de alta viscosidad	High viscosity jetting
<i>IH</i>	Proceso de IH	IH process
<i>IP</i>	Impresión por chorro de tinta	Inkjet printing
<i>IPT</i>	Instituto Fraunhofer de Tecnología de Producción	Fraunhofer Institute for Production Technology
<i>IR</i>	Rayos infrarrojos	Infrared
<i>JP</i>	Chorro de fotopolímero	Jetted photopolymer

Termino	Español	Inglés
<i>L</i>	Izquierda	Left
<i>LADI</i>	Impresión directa asistida por láser	Laser assisted direct imprint
<i>LAE</i>	Erosión asistida por láser	Laser assisted etching
<i>LC</i>	Desbastado láser	Lasercaving
<i>LC</i>	Revestimiento láser	Laser cladding
<i>LCRHLS</i>	Calentamiento por reacción química local a través de escaneo láser	Local chemical reaction heat by laser scanning
<i>LCVD</i>	Deposición química de vapor con láser	Laser chemical vapor deposition
<i>LCVE</i>	Erosionado químico de vapor por láser	Laser chemical vapor etching
<i>LDB</i>	Izquierda, debajo y detrás	Left-under and behind
<i>LDF</i>	Izquierda, debajo y delante	Left, below and front
<i>LDM</i>	Manufactura por láser de diodo	Laser diode manufacturing
<i>LENS</i>	Formado final en ingeniería por láser	Laser engineered net shaping
<i>LGHSM</i>	Generación láser y maquinado de alta velocidad	Laser generating and high-speed milling
<i>LIBWE</i>	Erosión húmeda inducida por láser	Laser Induced backside wet etching
<i>LIF</i>	Fluorescencia inducida por láser	laser induced fluorecense
<i>LIM</i>	Instituto láser de Mittelsachsen	Laser Institute of Mittelsachsen
<i>LISC</i>	Laminado en sitio de enlaces cruzados	Layered in situ cross-linking
<i>LL</i>	Litografía láser	Laser lithography
<i>LLNL</i>	Laboratorio Nacional Lawrence Livermore	Lawrence Livermore National Laboratory
<i>LM</i>	Manufactura por capas	Layered manufacturing
<i>LMC</i>	Centro de fresado en capas	Layer milling center
<i>LML</i>	Torneado microquímico por láser	Laser micro-chemical lathe
<i>LMS</i>	Microsinterizado por láser	Laser microsintering
<i>LOM</i>	Manufactura de objetos laminados	Laminated object manufacturing
<i>LPF</i>	Formado por láser y polvo	Laser powder forming
<i>LPIM</i>	Moldeado por inyección a baja presión	Low pressure injection molding
<i>LPS</i>	Sinterizado en fase líquida	Liquid Phase Sintering
<i>LTP</i>	Polimerización térmica de líquido	Liquid thermal polimerization
<i>LUB</i>	Izquierda, arriba y detrás	Left, up and back
<i>LUF</i>	Izquierda, arriba y al frente	Left, up and front
<i>m</i>	Metro	Meter
<i>MAPLE</i>	Evaporación asistida por matriz de pulsos	Matrix assisted pulsed laser evaporation
<i>MBS</i>	Atomizado por plantilla	Mask based spraying
<i>MDM</i>	Manufactura por deposición con multibojas	Multi-nozzle deposition Manufacturing
<i>MEMS</i>	Sistemas micro electro mecánicos	Micro electro mechanical systems
<i>MESO-SDM</i>	Deposición mesoscópica de formas	Mesoscopic Shape deposition Manufacturing
<i>MIMIC</i>	Micromoldeo capilar	Micromolding in capillaries
<i>min</i>	Minuto	Minute
<i>MJ</i>	Chorro de metal	Metal jet
<i>MJM</i>	Modelado por multichorro	Multi-jet modeling
<i>MJS</i>	Solidificación por chorro multifase	Multiphase jet solidification
<i>MLDM</i>	Modelado por deposición directa con láser	Direct laser deposition modeling
<i>MMSLS</i>	Sinterizado multimaterial selectivo por láser	Multimaterial selective laser sintering
<i>MOLD-SDM</i>	Manufactura por deposición de moldes de formas	Mold Shape deposition Manufacturing
<i>MPa</i>	Mega Pascal	Mega Pascal
<i>MRI</i>	Resonancias magnéticas	Magnetic resonance imaging
<i>MS</i>	Atomizado de metal	Metal spray
<i>MSLA</i>	Microestereolitografía	Microstereolithography
<i>mW</i>	Miliwatt	Milliwatt
<i>N</i>	Newton	Newton
<i>N.A</i>	No disponible	Not available
<i>NCD</i>	Nanodeposición de compuestos	Nano composite deposition

Termino	Español	Inglés
<i>Ni</i>	Níquel	Nickel
<i>NIL</i>	Litografía de nanoimpresión	Nanoimprint lithography
<i>NIR</i>	Cercanos al infrarojo	Near infrared
<i>NNS</i>	Cercano a su forma final	Near net shape
<i>no.</i>	Número	Number
<i>NSF</i>	Fundación Nacional De Ciencia	National Science Foundation
<i>NSL</i>	Nanoestereolitografía	Nanoestereolithography
<i>OcBlox/RPNNS</i>	Producción rápida de formas cercanas a la real	Rapid prototyping of near net shape
<i>OME</i>	Ingeniería de Manufactura de Organismos	Organism manufacturing engineering
<i>ONR</i>	Oficina De Investigación Naval	Office Of Naval Research
<i>OP</i>	Impresión de órganos	Organ printing
<i>Pa</i>	Pascal	Pascal
<i>PC</i>	Policarbonato	Polycarbonate
<i>PCM</i>	Modelado físico de concepto	Physical concept modelling
<i>PDM</i>	Manufactura por deposición por plasma	Plasma deposition manufacturing
<i>PDMS</i>	Polidimetilsiloxano	Polydimethylsiloxane
<i>PEM</i>	Manufactura por extrusión precisa	Precise extrusion manufacturing
<i>PES</i>	Polietersulfona	Polietersulfona
<i>PIM</i>	Moldeo por inyección de polvo	Powder injection molding
<i>PLD</i>	Deposición por pulsos láser	Pulsed laser deposition
<i>PLDM</i>	Manufactura por deposición por plasma y láser	Plasma-laser deposition manufacturing
<i>PLLA</i>	Poli ácido L-láctico	Poly L-lactic acid
<i>PMMA</i>	Acrílico polimetilmetracrilato	Acrylic polimetilmetracrilato
<i>PP</i>	Polipropileno	Polypropylene
<i>PPD</i>	Deposición inteligente de polvos en pulsos	Pointwise powder deposition
<i>PS</i>	Poliestireno	Polystyrene
<i>Psi</i>	Libras por pulgada cuadrada	Pounds per square inch
<i>pulg.</i>	Pulgada	Inches
<i>PUR</i>	Poliuretano	Polyurethane
<i>PVC</i>	Policloruro de vinilo	Polyvinyl chloride
<i>R</i>	Derecha	Right
<i>RAM</i>	Material absorbente de radiación	Radiation Absorment Material
<i>RBC</i>	Robocasting	Robocasting
<i>RDB</i>	Derecha, debajo y detrás	Right, down and back
<i>RDF</i>	Derecha, debajo y al frente	Right, down and front
<i>RE</i>	Ingeniería inversa	Reverse engineering
<i>Ref.</i>	Referencia	Reference
<i>RFP</i>	Prototipado por congelamiento rápido	Rapid freeze prototyping
<i>RIE</i>	Grabado por iones reactivos	Reactive ion etching
<i>RLM</i>	Maquinado rápido en capas	Rapid layer manufacturing
<i>RM</i>	Manufactura rápida	Rapid manufacturing
<i>RMS</i>	Sistema de robot para maquinado	Robot machining system
<i>RP</i>	Prototipado rápido	Rapid prototyping
<i>RPBloX</i>	Rpblox	Rpblox
<i>RPBPS</i>	Sinterizado rápido de patrones basado en polvos	Rapid pattern based powder sintering
<i>rpm</i>	Revoluciones por minuto	Revolutions per minute
<i>RPM&T</i>	Prototipado, manufactura y herramental rápido	Rapid prototyping, manufacturing and tooling
<i>RPNNS</i>	Producción rápida de formas cercanas a la real	Rapid prototyping of near net shape
<i>RPS</i>	Sistema robótico de prototipado	Robotic prototyping system
<i>RSLA</i>	Estereolitografía refrigerativa	Refrigerative Stereolithography
<i>RT</i>	Herramental rápido	Rapid tooling
<i>RUB</i>	Derecha, arriba y detrás	Right, up and down
<i>SALD</i>	Deposición selectiva de áreas por láser	Selective area laser deposition
<i>SALDVI</i>	Deposición selectiva de áreas por láser e infiltración de vapor	Selective area laser deposition and vapour infiltration
<i>SC</i>	Estratoconcepción	Stratoconception

Termino	Español	Inglés
<i>SDL</i>	Laminación por deposición selectiva	Selective deposition lamination
<i>SDM</i>	Manufactura por deposición de formas	Shape deposition manufacturing
<i>seg.</i>	Segundo	Second
<i>SF</i>	Formado espacial	Spatial forming
<i>SFF</i>	Sólidos de forma libre	Solid freeform
<i>SFP</i>	Polimerización sólida de láminas delgadas	Solid foil polymerization
<i>SGC</i>	Curado de piso sólido	Solid ground curing
<i>Si</i>	Silicio	Silicon
<i>SiO₂</i>	Dióxido de silicio	Silicon dioxide
<i>Si₃N₄</i>	Nitruro de silicio	Silicon nitride
<i>SiC</i>	Carburo de silicio	Silicon carbide
<i>SiCl₂</i>	Dicloruro de silicio	Silicon dichloride
<i>SiCl₄</i>	Tetraclorosilano	Tetrachlorosilane
<i>SIS</i>	Sinterizado selectivo por inhibición	Selective inhibition sintering
<i>SLA</i>	Estereolitografía	Stereolithography
<i>SLM</i>	Fundición selectiva por láser	Selective laser melting
<i>SLMS</i>	Microsinterizado selectivo por láser	Selective laser micro sintering
<i>SLPR</i>	Refundido selectivo de polvo por láser	Selective laser powder remelting
<i>SLRS</i>	Sinterizado selectivo por reacción laser	Selective laser reactive sintering
<i>SLS</i>	Sinterizado selectivo por láser	Selective laser sintering
<i>SMS</i>	Sinterizado selectivo por plantilla	Selective masking sintering
<i>SPS</i>	Sinterización en fase sólida	Solid phase sintering
<i>SSM</i>	Solidificación de metales semisólidos	Semisolid metal solidification
<i>STLG</i>	Estereolitografía térmica	Stereo thermal lithography
<i>TCP</i>	Fosfato tricalcico	Tricalcium phosphate
<i>TE</i>	Ingeniería de Tejidos	Tissue Engineering
<i>Ti</i>	Titanio	Titanium
<i>TiO₂</i>	Dióxido de titanio	Titanium dioxide
<i>TIG</i>	Soldadura tungsteno y gas inerte	Tungsten inert gas welding
<i>TSF</i>	Formación topográfica de formas	Topographic Shape formation
<i>TSLR</i>	Atomizado térmico y refundido por láser	Thermal spraying and laser remelting
<i>TSMS</i>	Solidificación de materiales termosensibles	Thermo-sensitive materials solidification
<i>U</i>	Arriba	Up
<i>UC</i>	Consolidación ultrasónica	Ultrasonic consolidation
<i>USC</i>	Universidad del Sur de California	University of Southern California
<i>UVRM</i>	Moldeado por reacción UV	UV Reaction molding
<i>V</i>	Volt	Volt
<i>Vol.</i>	Volumen	Volume
<i>VP</i>	Prototipado virtual	Virtual prototyping
<i>vs.</i>	Contra	Versus
<i>W</i>	Wolframio	Wolfram
<i>Zr</i>	Circonio	Zirconium
<i>ZrO₂</i>	Dióxido de circonio	Zirconium dioxide

Resumen

La industria automotriz fue la encargada de iniciar el desarrollo de procesos de fabricación capaces de producir rápidamente componentes físicos sin la necesidad de herramental. A principios de la década de 1980, un cambio decisivo ocurrió con la aparición del diseño tridimensional asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés). El objetivo inicial del CAD fue desarrollar nuevas técnicas de fabricación para disminuir el tiempo de entrega de los productos. Posteriormente para lograr alcanzar este objetivo se propuso también la fabricación libre de forma (FFF por sus siglas en inglés) o prototipado rápido (RP por sus siglas en inglés). De esta manera los sistemas comerciales RP comenzaron a aparecer en Estados Unidos (EU) a finales de 1980. Los sistemas RP permiten a los diseñadores detectar errores y efectuar cambios oportunos en el diseño de partes, siendo de suma importancia en la reducción de tiempos para el desarrollo de nuevos productos. Aunado al éxito y desarrollo de nuevas tecnologías RP, se comenzó a emplear los sistemas RP como tecnologías para la manufactura de piezas funcionales y en la producción de herramental que permite obtener nuevos prototipos y/o piezas. De esta manera surgen los sistemas de manufactura rápida (rapid manufacturing, RM) y herramental rápido (rapid tooling, RT).

Hoy en día, a casi 30 años de su surgimiento, los sistemas de prototipado, manufactura y herramental rápido, son empleados por investigadores e industrias, en áreas como la automotriz, naval, militar, de bienes de consumo, educación e incluso en aplicaciones médicas, entre otras. Debido a la importancia de estas tecnologías, los sistemas RP son utilizados en la mayoría de los países de primer mundo, más notablemente en Japón, Alemania, Rusia, Israel y China. Adicionalmente se han propuesto una gran cantidad de tecnologías RP. Por lo anterior, se identifica la necesidad de contar con una revisión actualizada de los sistemas RP.

El presente trabajo presenta una revisión y análisis de las tecnologías de prototipado, herramental y manufactura rápida (RPM&T). El objetivo es conocer el estado actual que guardan estas tecnologías, identificando sus características, limitantes y fortalezas. Con base en la información obtenida, se proponen sistemas de clasificación y selección basados en diferentes criterios. También se plantean filosofías de diseño para manufactura en RPM&T debido a que se observa que no existen trabajos de investigación en la literatura que involucren filosofías de diseño para RPM&T, siendo estas de gran importancia para diseñadores y personal de manufactura. Se considera que el presente trabajo puede servir como una referencia para trabajos de investigación futuros en el área de tecnologías rápidas. También se considera como una herramienta útil a profesionistas e industriales para la selección de un proceso, para el diseño y construcción de una pieza específica o para la adquisición de un sistema RPM&T.

Introducción

Perspectiva histórica

El mundo está sujeto a una presión comercial competitiva debido a la globalización del mercado y de las cadenas de suministro de los mismos. Las compañías deben ser competitivas e innovadoras de nuevos productos para permanecer en el mercado. De esta manera, la industria automotriz americana propuso el desarrollo de procesos de fabricación capaces de producir de manera rápida componentes físicos sin la necesidad de herramental. Tales demandas habían sido difíciles de alcanzar anteriormente debido a la carencia de capacidades en los sistemas de cómputo; sin embargo a principios de la década de 1980, un cambio decisivo ocurrió con la aparición del diseño tridimensional asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés). El objetivo inicial del CAD fue desarrollar nuevas técnicas de fabricación para disminuir el tiempo de entrega de los productos. Para lograr alcanzar este objetivo se propuso la fabricación libre de forma (FFF por sus siglas en inglés) o prototipado rápido (RP por sus siglas en inglés) [1].

Los sistemas comerciales RP comenzaron a aparecer en Estados Unidos de América (EUA) a finales de 1980. Después de más de 20 años, EUA sigue siendo el país que encabeza la lista de producción del mercado del prototipado y manufactura rápida (RP y RM) [2]. Hoy en día los sistemas RP se han desarrollado en la mayoría de los países de primer mundo, más notablemente en Japón, Alemania, Rusia, Israel y China. Sin embargo, debido a que la patente de estas tecnologías se encontraba inicialmente en EUA, fueron ellos quienes iniciaron con la producción en serie de los equipos de RP y RM, y hasta la fecha han mantenido su posición dominante.

El concepto inicial de RP fue la fabricación exclusiva de prototipos, pero con los avances en esta tecnología sus aplicaciones se han extendido a la fabricación de piezas funcionales. Dando lugar a la manufactura rápida (RM) y el herramental rápido (RT). Como un resultado de estos avances, se han realizado esfuerzos para integrar las tecnologías RP como una herramienta más en el proceso de diseño y fabricación, que es donde la industria se beneficia de estos desarrollos [3].

La primera tecnología de prototipado rápido desarrollada fue la estereolitografía (SLA). Sin embargo, con la llegada del láser a la industria, a finales de la década de 1980 aparece otra tecnología RP llamada sinterizado selectivo por láser (selective laser sintering, SLS). Más tarde a principios de la década de 1990 surgen nuevas tecnologías como el modelado por deposición líquida (fused deposition modelling, FDM), manufactura de objetos laminados (laminated object manufacturing, LOM) e impresión tridimensional (3D printing, 3DP). En los últimos veinte años se han aplicado estas tecnologías en las áreas automotrices, aeroespaciales, biomédicas, bienes de consumo, entre otras [3].

Planteamiento del problema

La comunidad científica ha contribuido en la investigación, desarrollo e innovación de nuevas tecnologías RP, así como de las ya existentes. Hoy en día son numerosos los sistemas RPM&T que han sido desarrollados y nuevos materiales han sido incorporados para la fabricación de piezas mediante prototipado rápido. Del numeroso grupo de tecnologías de prototipado rápido existentes, algunas se encuentran comercialmente disponibles, algunas otras se han desarrollado pero no comercializado y otras no han tenido éxito comercial o resultan obsoletas en la actualidad. Se han publicado en la literatura científica revisiones del estado del arte de las tecnologías RP existentes, siendo la última reportada en el 2009.

Puesto que el principio de funcionamiento de las tecnologías de prototipado rápido varía de una técnica a otra, se han propuesto clasificaciones de los sistemas RP. Las clasificaciones propuestas se basan en criterios como el estado del material empleado, el tipo de proceso, el tipo de pieza generada, entre otros. Las clasificaciones reportadas en la literatura resultan limitadas debido a que los criterios de clasificación son confusos y limitados. Lo anterior origina que una cierta tecnología pueda clasificarse en dos o más campos bajo el mismo criterio de clasificación empleado. De igual manera existen clasificaciones de los sistemas RP que solo involucran un pequeño número de técnicas, implicando que sean limitadas.

Al igual que se han propuesto clasificaciones de las tecnologías RP, también se han publicado sistemas de selección que permiten al usuario elegir la tecnología RP que mejor se adapte a sus necesidades. Dentro de los sistemas de selección propuestos, se observa que en su mayoría se basan en percepciones que el usuario adopta de acuerdo a su experiencia y apreciación del principio de funcionamiento del sistema RP, resultando en una elección errónea de la tecnología RP por parte del usuario. Más aun, debido a que los costos de las tecnologías han disminuido con el paso de los años, el acceso a las tecnologías RP es actualmente posible para el usuario doméstico.

Justificación del proyecto

Se observa la necesidad de contar con una revisión actualizada de las técnicas de prototipado, manufactura y herramental rápido (RPM&T) la cual sirva como referencia para trabajos de investigación futuros, así como para el análisis y desarrollo de sistemas de clasificación y selección de estas tecnologías. Debido a que no existen trabajos de investigación en la literatura que reporten filosofías de diseño para RPM&T, también se identifica la necesidad de introducir filosofías de diseño que provean lineamientos que se deben tomar en cuenta en el diseño o desarrollo de un componente que se pretenda fabricar por tecnologías RPM&T.

Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto es realizar una revisión y análisis completo de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido (RPM&T), así como sus implicaciones y/o limitantes en el diseño y manufactura.

El proyecto comprende la revisión, análisis y clasificación de las tecnologías de prototipado rápido, manufactura rápida y herramienta rápida (RPM&T) desde sus orígenes, hace más de 25 años, hasta el día de hoy, involucrando todos los sistemas comerciales, en desarrollo y/o sistemas propuestos con anterioridad. También se contempla el desarrollo de métodos de selección y filosofías orientadas hacia el “Diseño para Prototipado, Manufactura y Herramiental Rápido”, DFRPM&T.

Los objetivos particulares del proyecto de tesis son:

- Revisión de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramienta rápida.
- Identificar características de cada tecnología.
- Identificar ventajas y desventajas de cada tecnología.
- Clasificar las tecnologías con base a diversos criterios.
- Desarrollar metodologías de selección de las tecnologías RPM&T con base en diversos criterios.
- Desarrollar filosofías de diseño para prototipado, manufactura y herramienta rápida (DFRPM&T).
- Desarrollar una aplicación computacional que permita el acceso a la información de las tecnologías RPM&T, así como a la clasificación, metodologías de selección y filosofías de diseño desarrolladas.

Organización de la tesis

En el capítulo 1 se presentan una introducción a las tecnologías rápidas de fabricación, detallándose el prototipado, herramienta y manufactura rápida. También se presentan y discuten trabajos de investigación reportados en la literatura en relación a revisiones previas de las tecnologías RPM&T, sistemas de clasificación y metodologías de selección. La revisión completa de todas las técnicas de prototipado y manufactura rápida, desarrolladas y en desarrollo, se presentan en el capítulo 2. En el capítulo 3, se propone un sistema de clasificación y metodologías de selección de acuerdo a diversos criterios. Las filosofías de diseño para RPM&T se presentan en el capítulo 4. El capítulo 5 presenta el desarrollo e implementación de la plataforma “RPMT Reviewer”. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del proyecto de tesis.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Tecnologías rápidas de fabricación

El constante interés de reducir tiempos de diseño y desarrollo, costos de producción y aumento de la calidad de los productos, ha conducido a la necesidad de producir modelos físicos en un tiempo más corto (en relación a los métodos tradicionales) antes de la producción en serie del producto [1]. Para lograr esto, las tecnologías rápidas han emergido con dos características básicas:

1. La fabricación de objetos es independiente de la forma de éstos, y
2. La fabricación depende de los principios físicos, materiales y propósitos específicos de cada tecnología.

Las tecnologías rápidas abarcan [4]:

- Manufactura por capas (layered manufacturing, LM).
- Prototipado rápido (rapid prototyping, RP).
- Manufactura rápida (rapid manufacturing, RM).
- Herramental rápido (rapid tooling, RT).
- Maquinado de alta velocidad (high-speed machining, HSM).
- Manufactura digital (digital manufacturing, DM).
- Modelado físico de concepto (physical concept modelling, PCM).
- Ingeniería inversa (reverse engineering, RE).
- Prototipado virtual (virtual prototyping, VP).

A continuación se describen brevemente las tecnologías rápidas mencionadas.

1.1.1 Manufactura por capas (LM)

Los procesos LM (layered manufacturing) comprenden un conjunto de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad que permiten la obtención de piezas sólidas a partir de modelos virtuales CAD. El desarrollo de la manufactura por capas (LM) inició con el desarrollo de tecnologías de prototipado rápido, las cuales fueron creadas para permitir a los diseñadores interactuar en un tiempo más corto (en comparación con los demás procesos de fabricación) y a bajo costo, con prototipos físicos de los productos que diseñan. Hoy en día el gran crecimiento tecnológica ha permitido que ya no solo se fabriquen prototipos sino también productos terminados [5].

Las principales aplicaciones de LM pueden clasificarse en tres grandes grupos:

1. Prototipado rápido (rapid prototyping, RP)
2. Manufactura rápida (rapid manufacturing, RM)
3. Herramental rápido (rapid tooling, RT)

El proceso de la manufactura por capas (LM) inicia con un prototipo virtual (modelo CAD) y termina en la fabricación de un prototipo real (RP), en un modelo o molde (RT), o en un bien de consumo (RM), y es semejante para todas las tecnologías.

1.1.2 Prototipado rápido (RP)

El prototipado rápido (rapid prototyping, RP) se define como un grupo de tecnologías capaces de fabricar piezas o componentes sin la necesidad de tener herramientas y/o personal capacitado partiendo de la información CAD de un modelo tridimensional de una pieza. Los sistemas RP pueden producir de manera rápida y directa un modelo físico sin requerir intervención humana o algún tipo de herramental [1].

1.1.3 Manufactura rápida (RM)

La manufactura rápida (rapid manufacturing, RM), se refiere a la fabricación rápida de partes funcionales por cualquier método de manufactura, involucrando el uso de un proceso aditivo o prototipado rápido, en alguna etapa de la cadena de producción [6].

1.1.4 Herramental rápido (RT)

El herramental rápido (rapid tooling, RT) describe un proceso que utiliza una creación rápida de prototipos (RP) como modelo o patrón para crear un molde, o utiliza el proceso RP para fabricar directamente un herramental para un volumen limitado de prototipos [4].

1.1.5 Maquinado de alta velocidad (HSM)

El maquinado de alta velocidad (high speed machining, HSM) consiste en mejorar el corte de metal utilizando tecnologías actualizadas que permitan a los centros de maquinado realizar el trabajo en un tiempo más corto. El HSM utiliza herramientas de diámetros pequeños para realizar cortes múltiples, rápidos y ligeros, Figura 1.1.

Muchos son los elementos que pueden hacer más eficiente el maquinado de alta velocidad. Algunos de estos elementos incluyen: la herramienta que corta, la máquina CNC (control numérico computarizado), el material que está siendo cortado, y el uso del sistemas de manufactura asistida por computadora (computer aided manufacture, CAM) [7]. Los avances tecnológicos incluyen herramientas especializadas las cuales son totalmente diferentes a las tradicionales. Las herramientas tradicionales usan métodos que mecanizan las partes comenzando en la parte superior de la pieza y finalizan en la parte inferior de la misma, las herramientas modernas pueden preferir a veces, cortar de abajo hacia arriba.



Figura 1.1. Maquinado de alta velocidad de una superficie, [7].

1.1.6 Manufactura digital (DM)

La implementación de tecnologías para el diseño y manufactura asistidos por computadora ha renovado los lazos entre diseño, proyecto y fabricación. Las herramientas de hardware y software disponibles, cada vez más potentes, económicas y fáciles de emplear, han empujado el paso del croquis y el collage manual al fotomontaje digital, de los lápices de colores al trazo de texturas digitales y, por supuesto, del tablero de dibujo al uso de la computadora.

La llegada de máquinas de corte CNC, de prototipado rápido y digitalización tridimensional, ha permitido la creación de laboratorios de modelado sólido, en los cuales se hacen las representaciones y simulaciones digitales del proceso de manufactura, que son la clave de la manufactura digital. Las tecnologías de manufactura digital han sido intensamente usadas por la industria automotriz, aeronáutica, naval y de fabricación de mobiliarios, como una herramienta fundamental en los procesos de producción constructiva y de ensamblaje. Las últimas metodologías de manufactura digital implican la concentración en un proceso exploratorio e iterativo, el cual conlleva un trabajo de manipulación formal con herramientas CAD y la representación física automatizada del proceso de fabricación, incorporando herramientas de control numérico y prototipado rápido [8].

1.1.7 Modelado físico de concepto (PCM)

El modelado físico de concepto (physical concept modelling, PCM) consiste en la creación física de partes en un intervalo corto de tiempo, con el mínimo costo. La técnica PCM emergió como una rama de prototipado rápido en la década de 1990. Hoy en día el PCM está en desarrollo, ofreciendo nuevos métodos y enfocándose en las tecnologías computacionales. PCM ha sido dirigido a la fabricación y uso de modelos de dispositivos en las primeras fases del diseño del producto (ejemplo: conceptualización funcional y de forma). Los modelos físicos de concepto tienen significados interactivos para los diseñadores, con lo que mejoran la calidad de los conceptos, acortando el tiempo total de fabricación y disminuyendo los costos globales.

Una de las tecnologías PCM, conocida como manufactura por capas gruesas de objetos libres de forma (free-form thick layered object manufacturing, FF-TLOM), permite la fabricación de modelos conceptuales a partir de espuma de plástico de alta densidad. El modelo es descompuesto en segmentos, capas y sectores. Una navaja flexible calentada eléctricamente se encarga de cortar el material de construcción en capas gruesas, para que posteriormente sea formado el modelo. La tecnología FF-TLOM permite la modificación de la forma así como de la funcionalidad del modelo físico [9].

El remodelado de un concepto durante el diseño conceptual se logra a través de:

- a. Descomposición parcial del modelo físico.
- b. Sustitución de formas incorrectas como segmentos o capas.
- c. Aplicación de modificaciones locales por adición o substracción.
- d. Re-acabado del modelo físico.

En la Figura 1.2, se muestra un ejemplo computacional del modelado concepto de una forma aleatoria.

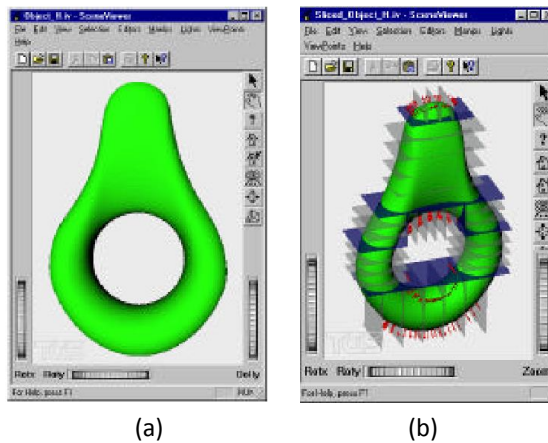


Figura 1.2. Modelado físico del concepto: (a) modelo CAD objetivo, (b) descomposición CAD del objetivo.

1.1.8 Ingeniería inversa (RE)

La Ingeniería Inversa (reverse engineering, RE) consiste en tomar un dispositivo mecánico o electrónico, un software de computadora, etc. para analizar y mejorar su funcionamiento. La RE tiene como objetivo obtener información a partir de un producto con el fin de determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y cómo fue fabricado [10]. La ingeniería inversa nace en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial, cuando los ejércitos examinaban los transportes e insumos de guerra enemigos con el fin de mejorar los propios. La ingeniería inversa debe de ser capaz de abstraer, a partir del código fuente, información significativa del procesamiento que se realiza. La Figura 1.3, presenta un sistema de escaneo tridimensional empleado para digitalizar un modelo físico [11].



Figura 1.3. Ingeniería inversa de un objeto 3D (Escaneo tridimensional).

La finalidad de utilizar la Ingeniería Inversa es:

- Ampliar o completar la documentación sobre el proceso para fabricar un producto o material.
- Descubrir fallas sobre el sistema.
- Verificar que el producto en estudio cumple las especificaciones de diseño estándar.
- Mejorar un producto o material a partir de los existentes.
- Facilitar la reutilización: por medio de la ingeniería inversa se pueden detectar componentes de posible reutilización de sistemas existentes, pudiendo aumentar la productividad, reducir los costos y los riesgos de mantenimiento.

Los productos más comunes sometidos a la ingeniería inversa son los programas computacionales y componentes electrónicos. Sin embargo, casi cualquier proceso o producto puede ser sometido a un análisis de ingeniería inversa. Así pues, también se considera ingeniería inversa al estudio de todo tipo de elementos o procesos siempre y cuando el resultado de dicho estudio repercuta en el entendimiento de su funcionamiento.

De la misma forma, pueden fabricarse y distribuirse, legalmente, los productos genéricos creados a partir de la información obtenida de la ingeniería inversa, como es el caso de algunos proyectos de software libre (ejemplo: programa Samba el cual es una implementación libre del protocolo de archivos compartidos de Microsoft Windows para sistemas operativos de tipo UNIX, el cual permite que ordenadores con GNU/Linux, Mac OS X o Unix en general se vean como servidores o actúen como clientes en redes de Windows) [12].

1.1.9 Prototipado virtual (VP)

El prototipado virtual (virtual prototyping, VP) es el diseño y generación de un producto digital con las características necesarias que permitan su evaluación frente a requerimientos. El objeto generado tiene aproximadamente el mismo comportamiento que el modelo físico, excepto que está disponible en un ambiente virtual generado en una computadora. Con un prototipo virtual el usuario tiene la capacidad de diseñar, evaluar y depurar un producto antes de que este sea construido.

Tradicionalmente, los prototipos físicos de un diseño se han hecho para investigar beneficios tales como ergonomía, estética, ensambles, operación y mantenimiento. Sin embargo, los prototipos físicos son costosos y demandan mucho tiempo en su construcción, además de ser difíciles de modificar. Una solución es reemplazar los prototipos físicos por virtuales, pudiendo ser introducidos en el proceso de diseño mientras el diseño está aún evolucionando. La introducción temprana de prototipos virtuales brinda a los diseñadores y equipos multidisciplinarios mayor libertad para explorar cambios y variaciones en el prototipo. En su forma más básica, un prototipo virtual provee una visualización tridimensional que permite a los diseñadores establecer una visión común del diseño e identificar potenciales conflictos. Si al prototipo virtual se le adiciona razonamiento geométrico inteligente, manejo de restricciones y técnicas de simulación dinámica, el prototipado virtual se convierte en una herramienta importante e interactiva de análisis [13].

Las aplicaciones típicas del prototipado virtual incluyen:

Aparatos (equipos) para asistir a humanos. En este tipo de aplicaciones se modela el cuerpo humano de tal manera que sea apropiado para aplicaciones interactivas, Figura 1.4. En estas aplicaciones también se consideran diferentes tipos de rasgos, tales como apariencia y movimiento, acción autónoma, y destrezas tales como gestos, atención y locomoción [13].



Figura 1.4. Prototipado virtual, aplicación al diseño de equipos de asistencia humana.

Diseño de dispositivos Mecánicos y Mecatrónicos. El campo en donde más ha incursionado hasta ahora el prototipado virtual es la industria de elementos mecánicos (automotriz, aviación, etc.). Desde un mismo programa se puedan realizar análisis que van desde simulaciones dinámicas para interferencias o cálculos de fuerzas y velocidades hasta análisis de esfuerzos por elementos finitos para comprobar la validez del diseño. En la Figura 1.5 se muestran diseños generados por técnicas de VP [14].

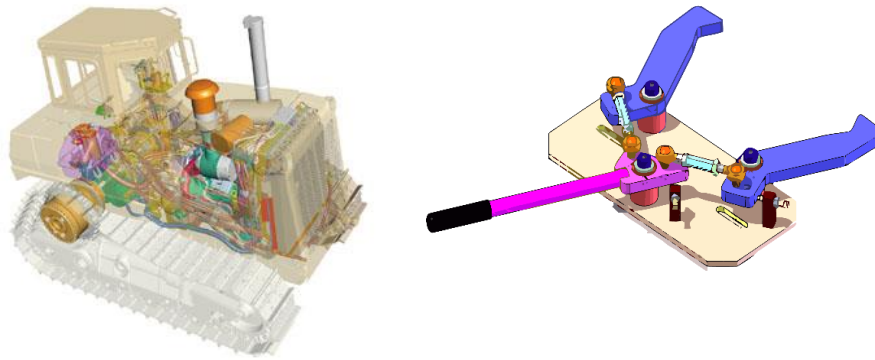


Figura 1.5. Aplicación del prototipado virtual al diseño de dispositivos mecánicos

1.2 Prototipado, manufactura y herramiental rápido (RPM&T)

El prototipado, herramiental y manufactura rápida son tecnologías rápidas de fabricación que han sido objeto de estudio y aplicación desde 1980, década donde comenzó su desarrollo.

1.2.1 Prototipado rápido (RP)

El prototipado rápido (RP) se define como un grupo de tecnologías capaces de fabricar piezas o componentes utilizando únicamente la información CAD del modelo tridimensional de una pieza sin la necesidad de herramientas y/o personal capacitado. Los sistemas RP pueden producir de manera rápida y directa un modelo físico de la pieza o modelo CAD sin requerir intervención humana o algún tipo de herramiental [1]. A diferencia de los procesos tradicionales de manufactura en donde se remueve material para fabricar la pieza, la mayoría de las tecnologías RP están basadas en un proceso aditivo en donde la pieza se va creando mediante la adición gradual de material hasta completar la pieza [6].

La metodología utilizada por los sistemas de prototipado rápido se resume de la siguiente manera:

1. El modelo virtual 3D es dividido matemáticamente en una serie de capas paralelas (rebanadas) de espesor muy pequeño.
2. Empleando la información de cada capa el sistema RP genera las instrucciones para que la máquina produzca la pieza “capa por capa” (layer-by-layer) desde el fondo hasta la parte superior.
3. Una vez que la pieza está terminada, esta se retira junto con las estructuras de soporte que pudieran haber sido creadas automáticamente por el mismo sistema RP.

La Figura 1.6, muestra de manera esquemática estas etapas [15]. Así, los sistemas RP producen piezas tridimensionales utilizando el método aditivo de capa por capa como el presentado en la Figura 1.7 [6], razón por la cual también son conocidos como procesos de manufactura por capas (layered manufacturing). Como se puede observar, es un proceso de impresión 2D progresivo en donde generalmente se van apilando capas de material hasta formar un bloque 3D. Los sistemas RP prácticamente pueden generar una pieza de cualquier forma siempre y cuando se tenga el modelo

CAD tridimensional, razón por la cual a los sistemas RP también se les conoce como sistemas de manufactura de formas libres (free-form manufacturing o free-form fabrication, FFM o FFF) [1].

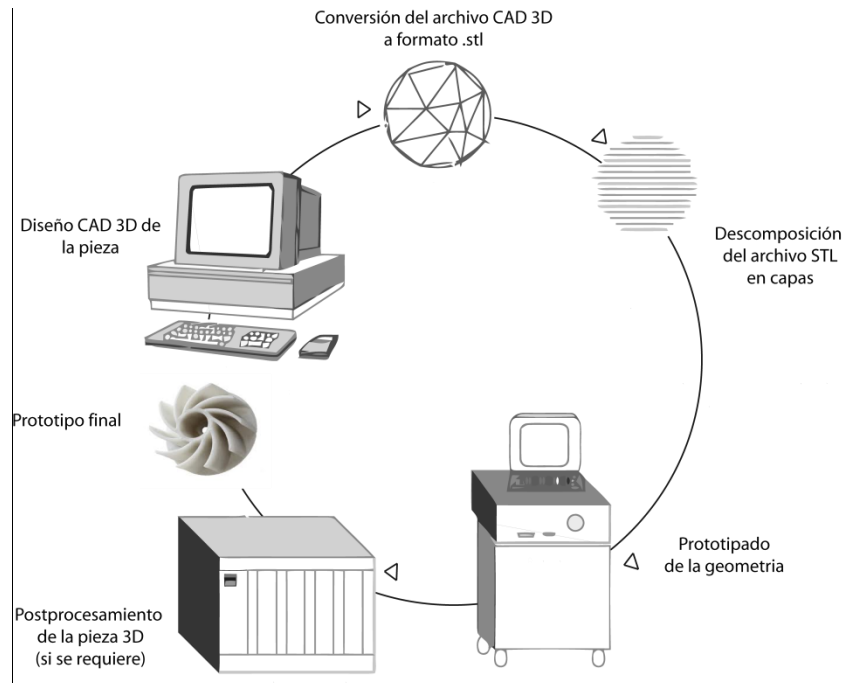


Figura 1.6. Esquema general del proceso de prototipado rápido.

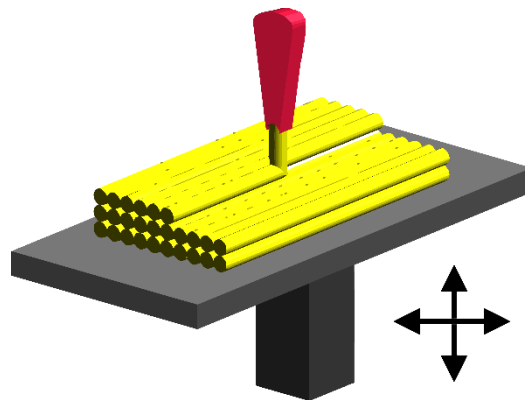


Figura 1.7. Método aditivo de prototipado rápido.

Entre las tecnologías RP más importantes se encuentran [16]:

- Impresión tridimensional (tridimensional printing, 3DP).
- Estereolitografía (stereolithography, SLA).
- Sinterizado selectivo por láser (selective laser sintering, SLS).
- Manufactura de objetos laminados (laminated object manufacturing, LOM).
- Modelado por deposición de líquido (fused deposition modeling, FDM).

- Chorro de fotopolímero (jetted photopolimer, JP)
- Modelado por multi chorro (multi jet modelling, MJM)

1.2.1.1 Características generales de las tecnologías RP

Los sistemas RP surgieron con un gran número de limitantes tales como precisión baja, acabado superficial malo, materiales limitados, costos elevados, etc. Sin embargo, a lo largo de más de 20 años desde su nacimiento, se han logrado avances importantes en sus capacidades y aplicaciones. A continuación se presentan algunas características generales de los sistemas de prototipado rápido.

Materiales

Los materiales utilizados por los sistemas RP son limitados y dependen del tipo de tecnología o proceso. Al inicio de los sistemas RP solo se podía utilizar un material para fabricar los prototipos. Hoy en día existe un gran número de materiales disponibles debido a las diversas técnicas existentes. Los materiales disponibles actualmente incluyen plásticos ABS, acrílico, polipropileno, poliestireno, elastómeros, cera, PVC, papel, policarbonato, almidón, vidrio, aluminio, acero y aleaciones de acero inoxidable, aleaciones de bronce, aleaciones cromo-cobalto, titanio e incluso biomateriales incluyendo organismos vivos para la fabricación y/o reconstrucción de órganos y tejidos. Sin embargo el costo de los materiales para los sistemas RP sigue siendo elevado debido a que la mayoría son materiales especiales que solo pueden ser comprados directamente con los fabricantes de los sistemas RP. Los costos de los materiales pueden variar desde \$40 USD por kilogramo hasta \$440 USD por kilogramo, dependiendo del tipo de material y tecnología. Además, hoy en día también existen equipos de prototipado rápido que pueden hacer piezas a colores, es decir sistemas RP a color [17].

Dimensiones

El tamaño de los sistemas RP se mide de acuerdo al tamaño del espacio de trabajo disponible para la fabricación de prototipos. Los espacios de trabajo disponibles en los sistemas RP comerciales varían desde 140 mm x 140 mm x 140 mm (5.5 pulg x 5.5 pulg x 5.5 pulg) (FDM 3D Systems®) hasta 914 mm x 610 mm x 914 mm (36 pulg x 24 pulg x 36 pulg) (Stratasys® FDM). La Tabla 1.1, muestra algunos tamaños típicos de sistemas RP comerciales.

Tabla 1.1. Espacio de trabajo disponible de algunos sistemas RP comerciales.

Sistema RP	Tamaño de construcción	Ref.
Z Corp (Z850 Printer)	508x381x229 mm	[18,19]
Stratasys (Objet 30)	294x192x148 mm	[20]
3D Systems (iPro 9000 XL)	650x750x550 mm	[19]
3D Systems (ProJet 3500)	298x185x203 mm	[19]
EOS Systems (EOSINT M280)	250x250x325 mm	[21]

Costos

Los sistemas RP tienen costos muy elevados por ser tecnologías relativamente nuevas. Sin embargo, cada vez los costos son más bajos debido al incremento de fabricantes de sistemas RP. El costo de un equipo RP puede variar desde los \$1,300 USD para los más económicos (FDM Cube de 3D Systems®) hasta sistemas de más de un millón de dólares (SLS de EOS GMBH®). El costo depende del tipo de tecnología y del tamaño de la máquina, es decir, del tamaño del espacio de trabajo.

Tolerancia y espesor de capa

Una de las características principales de los sistemas RP es la tolerancia o precisión con la que éstos pueden construir las piezas. En general las tolerancias que se pueden lograr en los sistemas RP están por debajo de las que se pueden lograr con técnicas tales como el maquinado CNC. Sin embargo, cada vez son más pequeñas las tolerancias alcanzadas y actualmente varían en un rango desde ± 0.0508 mm hasta ± 0.254 mm (± 0.002 pulg hasta ± 0.010 pulg). El espesor de las capas de material para hacer un prototipo es también una medida de la precisión del sistema. El espesor de capa de los sistemas RP comerciales varía desde 0.0508 mm hasta 0.4064 mm (0.002 pulg hasta 0.016 pulg) [17].

Limitantes

Aunque las tecnologías RP o de fabricación de sólidos de forma libre (SFF) tienen una flexibilidad sin precedente, tienen limitaciones que evitan que los diseñadores creen fácilmente cualquier forma. Mientras que las capacidades de precisión de los sistemas de fabricación por capas varían, ciertas clases genéricas de problema son comunes para todos los procesos. Por ejemplo, debido a que la fabricación del prototipo se realiza mediante la deposición de capas de espesor muy pequeño de material, el tiempo de fabricación de las piezas es relativamente alto. Una pieza pequeña de aproximadamente 100 mm x 100 mm x 100 mm puede llegar a tardar un par de horas sin importar su forma y complejidad geométrica. Esto pudiera parecer muy elevado, sin embargo si tomamos en cuenta que no se requiere herramental de ningún tipo, este tiempo puede llegar a ser mucho menor que algún otro método de fabricación en donde se requiera herramental.

Entre otras limitantes de los sistemas RP se encuentra: la necesidad de dar un acabado final a la pieza, la necesidad de construir estructuras de soporte cuando se tienen piezas con salientes o voladizos, el acabado superficial por lo general no es tan bueno como el acabado que se logra con una máquina CNC, la resistencia mecánica que se tiene con algunos de los materiales es baja, los tamaños limitados de las piezas a fabricar, la dificultad de fabricar piezas de pared delgada o con cantos muy agudos, y los costos del equipo y material.

La Tabla 1.2, resume las limitantes de forma de los sistemas RP, y algunas de estas limitantes se ilustran en la Figura 1.8 [22]. Por lo tanto el desafío del “Diseño para Prototipado Rápido” (Design for Rapid Prototyping, DFRP) es satisfacer la necesidad funcional de las piezas con la condición de formas y estructuras óptimas, asegurando su manufacturabilidad en sistemas RP [16].

Tabla 1.2. Limitantes de forma en los sistemas de prototipado rápido.

Cuestión	Descripción
Cavidades	Las cavidades internas son difíciles de formar debido a que se requieren estructuras de soporte internas que son difíciles de remover.
Distorsión, contracción y combado	Los procesos RP que involucran solidificación pueden dar lugar a tensiones residuales. El tamaño, magnitud y efecto de las tensiones asociadas están relacionadas con la geometría de los componentes.
Daño de las características	El proceso de remoción de la estructura de soporte puede causar daño a pequeñas características de la pieza; por ejemplo: los vértices pueden distorsionarse o romperse durante el proceso o postprocesado de la pieza, debido a que carecen de resistencia.
Tamaño de las características	Las características no deben ser demasiado pequeñas, el espacio entre ellas debe ser apropiado y no deben de requerir exactitud más allá de las capacidades de la tecnología (por ejemplo 0.05 mm en una máquina Stratasys 1650).
Salientes o voladizos	Las salientes o voladizos pueden afectar la planicidad superficial (distorsión). Las salientes o voladizos grandes pueden requerir soportes, los cuales pueden afectar la calidad de la pieza.
Acabado superficial	El acabado superficial está definido mediante la rugosidad superficial, planicidad superficial y la cantidad de estructuras de soporte. Los factores que afectan la calidad superficial son: material, orientación de construcción, grosor de capa, superficies inclinadas y superficies curvas, así como el post proceso, las tolerancias y funcionalidad de las piezas.
Volumen	El tamaño máximo del componente es definido por la capacidad de la máquina RP (véase la Tabla 1.1).

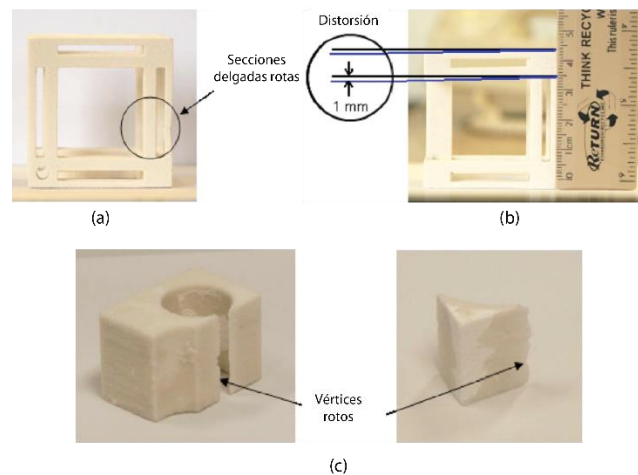


Figura 1.8 Limitantes comunes en la fabricación por RP: (a) secciones delgadas, (b) distorsión, (c) vértices rotos.

1.2.1.2 Aplicaciones de las tecnologías RP

Los productos obtenidos por métodos RP pueden ser empleados como prototipos destinados a la inspección visual y conceptual del diseño generado en computadora, así como herramientas de verificación y detección de posibles oportunidades de optimización. Empleando RP también es posible generar prototipos funcionales los cuales pueden comportarse y emplearse como producto final, permitiendo realizar pruebas y evaluar el desempeño del producto; en este caso se denomina manufactura rápida (rapid manufacturing, RM) o manufactura directa (direct manufacturing, DM). Por otro lado, también es posible generar prototipos para asistir la planeación del proceso de fabricación del producto, e incluso en la fabricación de herramental como dados y moldes de fundición; en este caso se denomina herramental rápido (rapid tooling, RT).

Los sistemas de prototipado rápido se han desarrollado y comercializado en gran parte del mundo, sin embargo países con gran desarrollo tecnológico como Estados Unidos, Japón, Alemania, China y Reino Unido encabezan los países con mayor número de sistemas RP instalados. En 2007 se reportó el porcentaje de sistemas RP instalados a nivel mundial, Figura 1.9, [23]. En 2011 [24] los sistemas RP instalados aumento al 26.9% en la región de Asia y el Pacifico en comparación con el 25.7% reportado al 2007, siendo China, Japón y Taiwán los países con mayor desarrollo en sistemas RP instalados en esta región, Figura 1.10. Europa reportó en 2011 el 28.2% y Estados Unidos el 40.8% de equipos RP instalados, distribuyéndose el 4.1% en Canadá, América Central, Sudamérica, Medio Oriente y África [24].

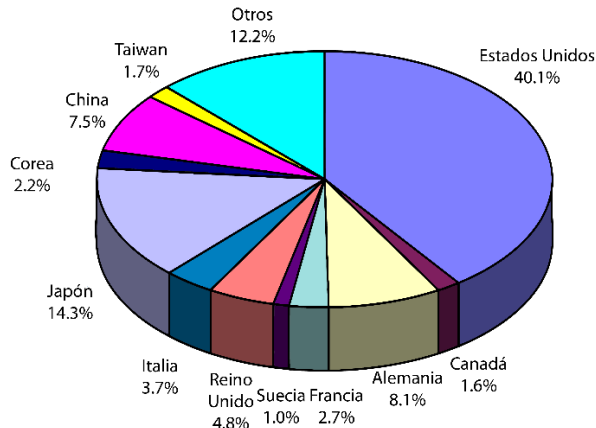


Figura 1.9. Distribución de sistemas RP instalados en el mundo al 2007.

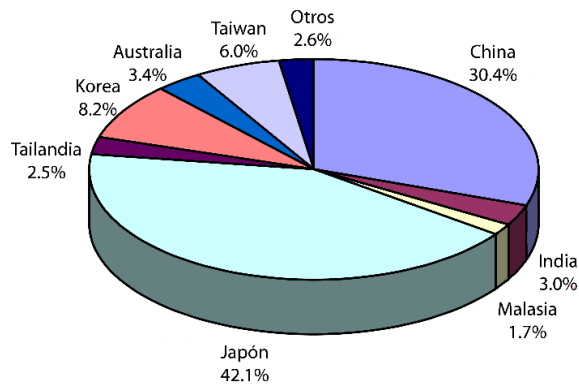


Figura 1.10. Distribución de sistemas RP instalados en la región Asia/Pacífico al 2011.

Prácticamente, las técnicas RP pueden ser utilizadas por cualquier tipo de industria. La Figura 1.11, muestra al 2011 el uso de las técnicas de prototipado rápido a nivel mundial de acuerdo a su área de aplicación, siendo la industria de productos de consumo/electrónicos y la industria automotriz las de mayor aplicación [25]. La Figura 1.12, muestra algunos modelos de diversas áreas hechos con tecnologías de prototipado rápido.

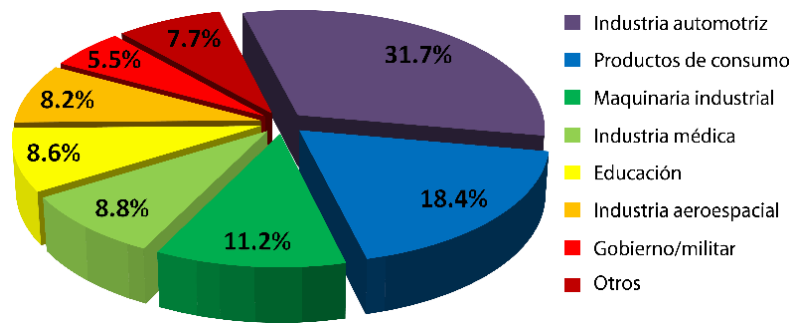


Figura 1.11. Aplicaciones del prototipado rápido a nivel mundial.



Figura 1.12. Prototipos fabricados mediante técnicas RP.

Dentro de las áreas de aplicación de mayor impacto de los sistemas RP se encuentra la industria automotriz, donde se realizan prototipos rápidos de casi todas las piezas del automóvil, Figura 1.13 [20]. En general todos los departamentos de diseño de las empresas automotrices tienen sistemas de prototipado rápido con los que evalúan el diseño antes de su aceptación y comienza con su producción. En la Figura 1.14 se puede apreciar un prototipo desarrollado para validar la aerodinámica de un automóvil de Fórmula 1 en un túnel de viento [26].

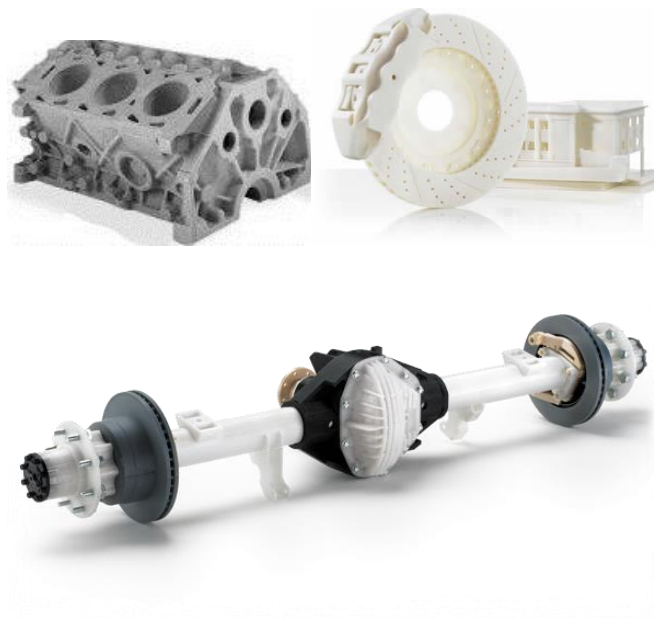


Figura 1.13. Prototipos de la industria automotriz.

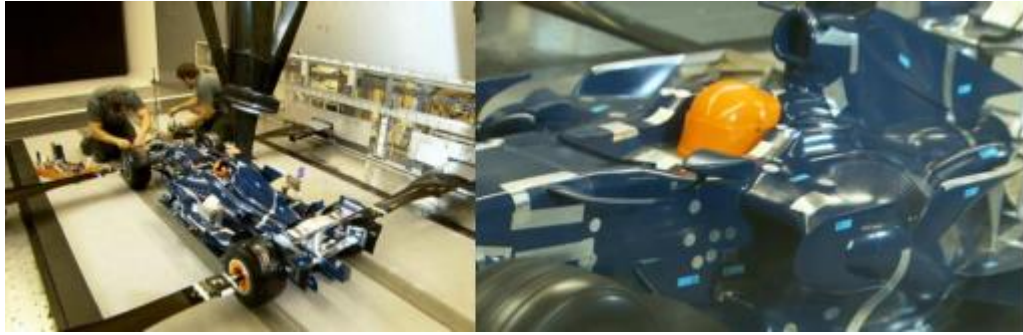


Figura 1.14. Prueba efectuada a un prototipo de Fórmula 1 en túnel de viento.

Otra de las aplicaciones más importantes e interesantes del prototipado rápido se encuentra en el área de la medicina, en donde se ha logrado la fabricación de prótesis e implantes personalizados, instrumentos quirúrgicos, prototipos para la planeación quirúrgica, etc. La Figura 1.15, presenta un ejemplo de rotulas de rodilla fabricadas a partir de un molde realizado por técnicas de prototipado rápido. La Figura 1.16 [27], muestra una foto de un prototipo del cráneo de siameses el cual fue producido en un sistema RP para planear la trayectoria de corte más conveniente para la separación de las siameses.

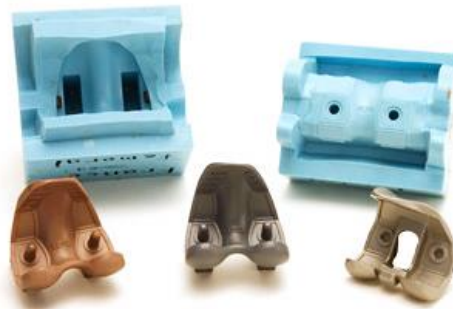


Figura 1.15. Rotulas de rodilla fabricadas por RP.



Figura 1.16. Prototipado de cráneo humano, herramienta de ayuda para cirujanos.

Entre las investigaciones más destacadas en el área médica se encuentra la Ingeniería de Manufactura de Organismos (Organism Manufacturing Engineering, OME). La OME tiene como objetivo la construcción de órganos y tejidos vivos mediante la integración del prototipado rápido, biomateriales, biología molecular y medicina [28]

1.2.2 Manufactura rápida (RM)

La manufactura rápida se define como “el uso de diseño asistido por computadora (CAD) y un proceso de manufactura basado en adición, sustracción, aditivo o híbrido para construir partes que pueden ser usadas directamente como productos o componentes terminados” [6]. Las piezas manufacturadas pueden ser post procesadas con técnicas como infiltración, pintado, enchapado, etc. Aunque los procesos RP actuales son usados para generar piezas funcionales y prototipos, estos sistemas no han sido diseñados para la manufactura por lo tanto quedan problemas por resolver. Estos problemas incluyen el acabado superficial, precisión y repetitibilidad, entre otros. Hoy en día los sistemas RP están en una etapa de transición, en donde están siendo usados para la producción de pocas piezas hechas bajo especificaciones. Sin embargo todavía no existe un sistema que ofrezca un tiempo de fabricación bajo, calidad y costo que pueda ser aceptado por el consumidor.

El campo de la manufactura rápida está creciendo continuamente, ofreciendo potenciales importantes que pueden lograr el considerarla como una disciplina independiente de su predecesor el prototipado rápido y no como una parte del mismo. Esta nueva disciplina, la cual elimina el herramental, tiene profundas implicaciones con varios aspectos del diseño, manufactura y venta de nuevos productos [29]. Es difícil pensar en una disciplina tecnológica que tenga una gran aplicación potencial como la manufactura rápida. La libertad de diseño permitida por las técnicas RM son inmensas, los procesos son capaces de crear piezas con geometrías complicadas. A pesar de la vida tan corta de las tecnologías aditivas, éstas han dejado atrás las capacidades del CAD, en muchos casos el cuello de botella en la producción de partes es su diseño, mientras que la parte fácil es la fabricación de la pieza.

La Figura 1.17 [30], muestra piezas diseñadas y producidas como concepto mediante el empleo de manufactura rápida, dichas piezas son funcionales y son elementos de diversos dispositivos.

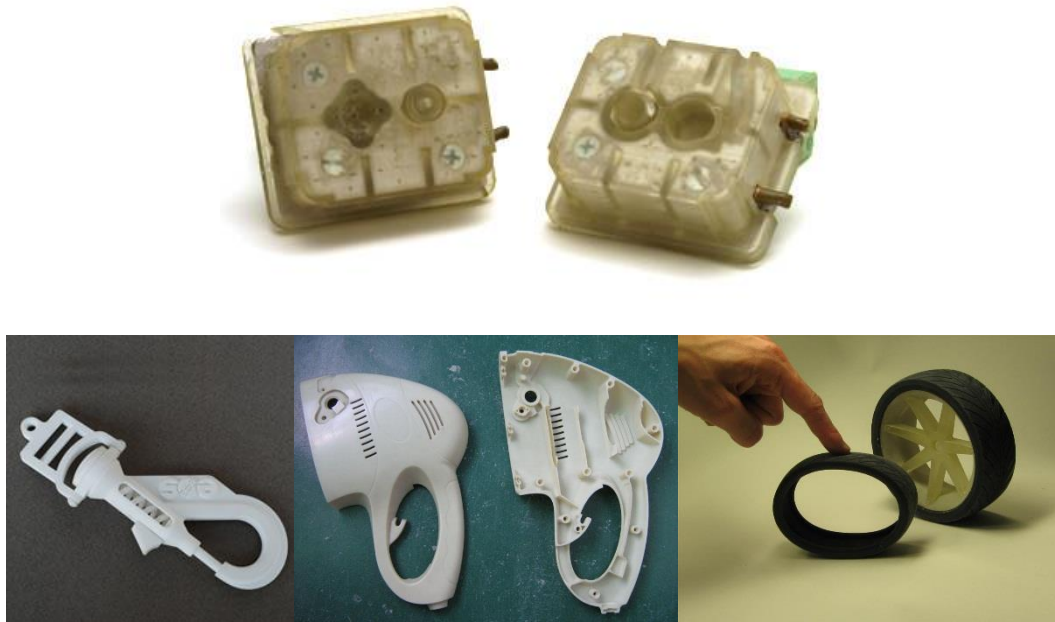


Figura 1.17. Piezas fabricadas mediante manufactura rápida.

1.2.3 Herramental rápido (RT)

El concepto de RT (rapid tooling, RT) describe un proceso que emplea técnicas de prototipado rápido para generar un modelo de patrón que permite crear rápidamente un molde, o emplear el proceso RP para fabricar directamente un herramental para un volumen limitado de prototipos [4]. La tecnología RT esencialmente adopta técnicas RP y las aplica para generar un herramental. La tecnología de herramental rápido ha tenido cada vez una mayor aceptación y está planteando una grave amenaza para la fabricación de herramentales convencionales. Los fabricantes están mirando cada vez más hacia la RT, no sólo como una alternativa al prototipado rápido, pero especialmente para cortos lapsos y lotes de producción que no justifican la inversión en herramental necesario de manera convencional [31].

Varias tecnologías RT están disponibles en la industria. Algunas de estas tecnologías producen la herramienta directamente desde el proceso RP. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías RT usan el modelo creado por el proceso RP como un patrón para un proceso secundario en donde se produce el herramental. Además, a pesar de los importantes avances en RP, el material disponible para la producción de piezas prototipo todavía se limita a los materiales de los procesos RP.

Hoy en día debido a la globalización de los mercados y al constante aumento en el número de competidores que enfrenta cualquier fabricante, cada vez es más importante para los fabricantes ser el primero en el mercado. Diversos estudios de casos exitosos han demostrado que es posible reducir el tiempo de desarrollo de productos por lo menos a la mitad utilizando tecnologías RT [32].

La Figura 1.18 [33], presenta moldes metálicos de inyección fabricados por técnicas de herramental rápido; estos moldes son empleados como herramientas para producir piezas finales o prototipos.

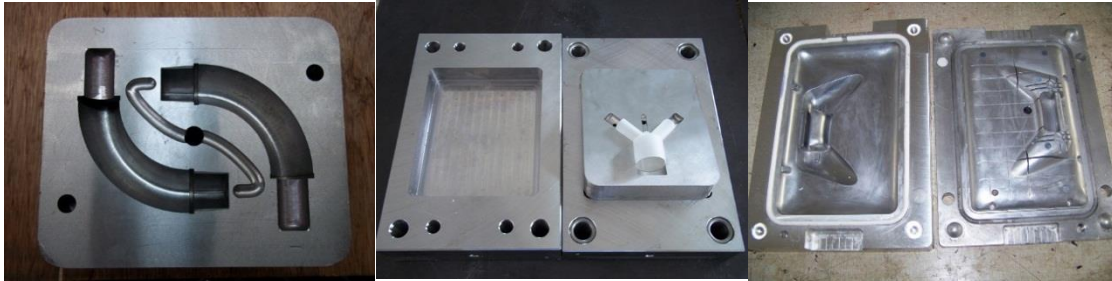


Figura 1.18. Moldes fabricados por prototipado rápido (herramental rápido).

El RT es la técnica más adecuada para la producción de pequeños lotes. Esto implica la fabricación del producto en su material final y por el proceso de fabricación previsto, pero en pequeñas cantidades (alrededor de 500 piezas). Preproducción de series suele ser la prueba de producción de equipos y herramientas para evaluar la introducción en el mercado de un producto [34]

1.3 Revisiones previas de las tecnologías RPM&T

Los trabajos de investigación relacionados a las técnicas RP involucran diversos aspectos basados en el conformado del material para construir el modelo, su principio de funcionamiento y ciertos parámetros característicos como su velocidad, espesor de capa, espacio de trabajo, entre otros. En 1994 se reportó una revisión de las tecnologías RP la cual consideraba 19 distintas técnicas [35]. Posteriormente en 1996 se reportan 7 tecnologías de prototipado rápido, describiendo para cada una de ellas su proceso de funcionamiento y materiales empleados [36]. Esta revisión resulta limitada en comparación con [35] ya que se reportaron un menor número de tecnologías. En 1998, 20 técnicas RP fueron reportadas en [6], mientras que en el mismo año se publicó una revisión de técnicas de prototipado encaminadas al herramental y manufactura rápida [37].

En los años subsecuentes de 1999 a 2003, las revisiones de los sistemas RP [38]-[46] reportan menos de 25 técnicas distintas RP disponibles, las cuales resultan limitadas en comparación con la revisión reportada en [1], donde se reportan 43 técnicas de prototipado disponibles al 2003. Subsecuentemente del 2003 a 2008 se reportan revisiones en [47]-[51] que resultan redundantes debido a que reportan la mayoría de las técnicas RP presentadas en [1]. Sin embargo en 2009, [52], se hace mención y se describe el principio de funcionamiento de 104 distintas técnicas en las que se incluye el prototipado. Revisiones posteriores al 2009 se han reportado en [53], [54], siendo las más recientes [55] y [56] que corresponden al año 2012 y que en comparación con [52] son limitadas debido a que solo describen cerca de 20 sistemas RPM&T.

Dentro de las revisiones reportadas, la revisión [52] resulta ser la que involucra un mayor número de sistemas RP, mientras que la publicación anual elaborada en [57], ofrece un panorama en la manufactura aditiva (AM), presentando novedades y tendencias en el desarrollo rápido de productos.

1.4 Clasificación y algoritmos de selección de los sistema RPM&T

Actualmente existe un gran número de tecnologías de prototipado rápido. Cada tecnología RP varía en su principio de operación. Debido a esto y, a diversas características como materiales empleados, aplicaciones, entre otras, se han propuesto diversas clasificaciones y metodologías de selección que permiten al usuario final tener la capacidad de seleccionar una tecnología RP que se adapte a los requerimientos de acuerdo a lo que se desea obtener.

1.4.1 Clasificaciones RPM&T

En 1998 se propuso en [6] un sistema de clasificación de las tecnologías RPM&T basado en el proceso de conformado final de la pieza, Figura 1.19. El proceso de conformado incluye los procesos de adición o remoción de material. Además, la clasificación toma en cuenta si el material añadido se encuentra en estado líquido, en partículas o en lámina sólida. Esta clasificación resulta limitada hoy en día debido a que se han propuesto un gran número de sistemas RP híbridos [54] y procesos de organismos [56]. Sin embargo el criterio de discriminar los sistemas RP en procesos de adición y remoción de material resulta ser de utilidad debido a que no admite que las tecnologías puedan caer en diversas categorías a la vez, permitiendo tener una idea clara del tipo y número de tecnologías existentes.

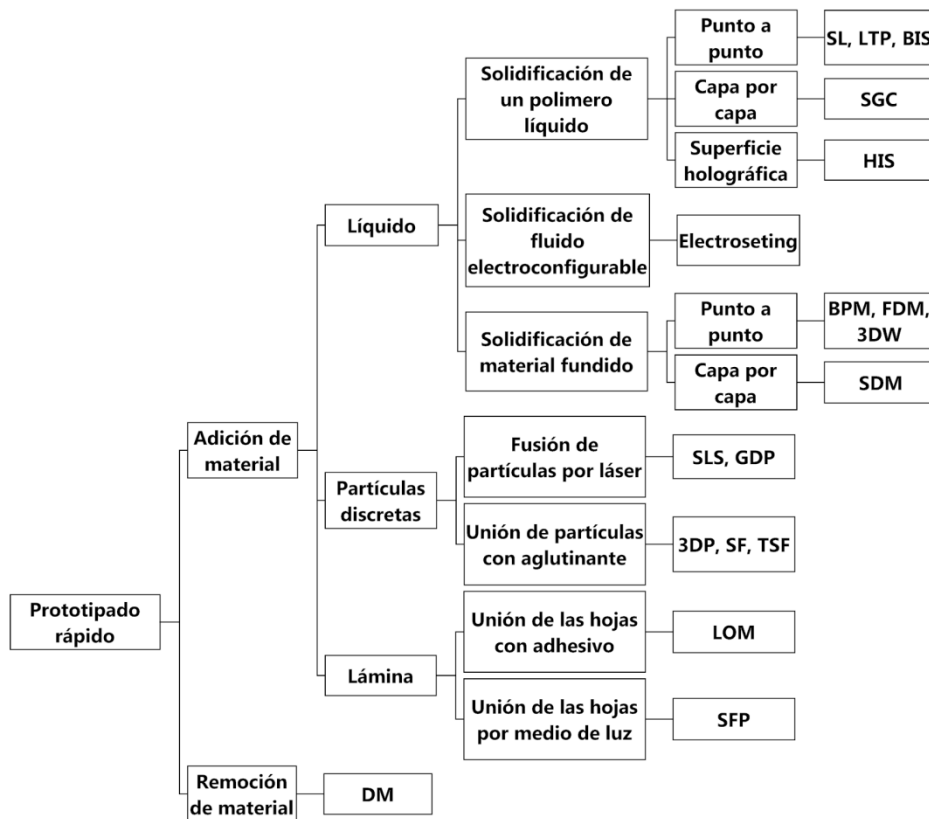


Figura 1.19. Clasificación de los sistemas RP propuesto en 1998 [6].

Posteriormente en [37] se propone una clasificación que divide los sistemas RP en procesos químicos, termofísicos, inyección de material y procesos combinados, Figura 1.20. Esta clasificación resulta limitada a la fecha debido a que existen tecnologías RP que pueden ocupar varias categorías a la vez. Se puede observar que la técnica de revestimiento láser (laser cladding, LC) se ubica en dos categorías a la vez, procesos termofísicos y de inyección de material, lo que resulta confuso pues no se establece un criterio sólido que evite ambigüedades.

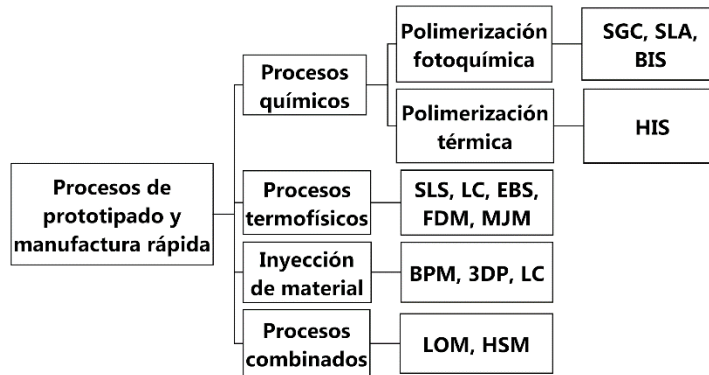


Figura 1.20. Clasificación de tecnologías RP y RM propuesta en [37].

En el año 2000 en [58] se propone una clasificación con muchas similitudes a [6]. Esta clasificación cataloga a los sistemas RP en substractivos, aditivos y de formado, Figura 1.21. Esta clasificación resulta limitada debido a la poca cantidad de sistemas RP que son tomados en cuenta.

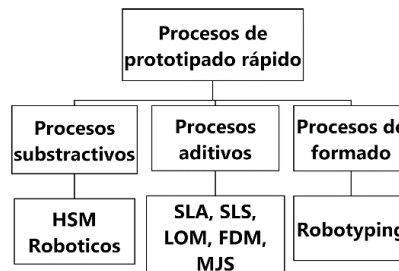


Figura 1.21. Clasificación de sistemas RP propuesta en el año 2000 [58].

Ese mismo año 2000, en [39] se propone una clasificación de los sistemas de herramienta rápida la cual distingue entre los sistemas directos, indirectos y patrones para fundición, Figura 1.22. Esta clasificación resulta limitada debido a que solo se hace mención a los tipos de herramientas que se pueden generar. La clasificación [39] al igual que las propuestas en [59], [54], [55], [60], y [61], catalogan los procesos RP en directos e indirectos. Donde se describen como sistemas directos a todas aquellas tecnologías capaces de generar un prototipo, herramienta o pieza de uso final sin incorporar un proceso adicional. Por otro lado, las tecnologías indirectas son aquellas en las que se concibe un modelo que es empleado como patrón para generar otro prototipo o aquellas en donde la pieza producida por RP requiere un proceso de manufactura subsecuente [45].

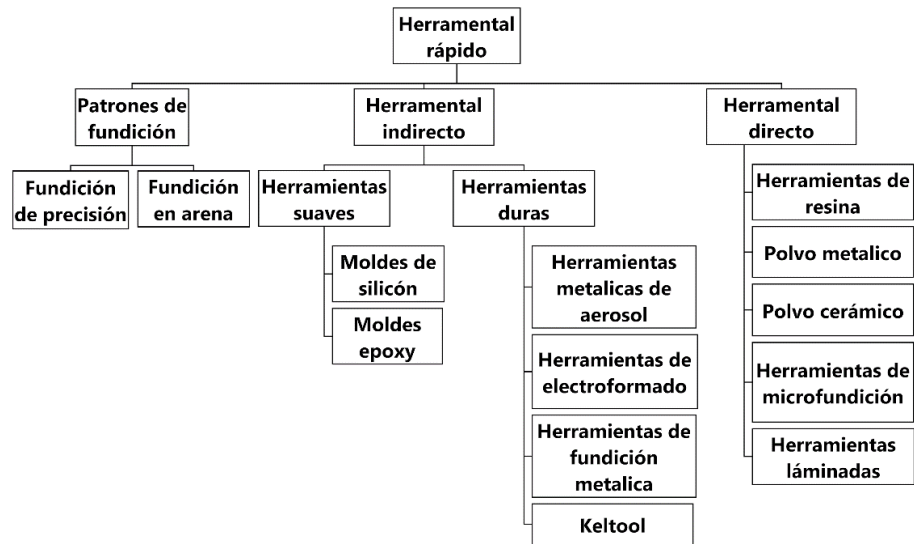


Figura 1.22. Clasificación propuesta en 2000 de los sistemas de herramental rápido [39].

Otra de las clasificaciones propuestas en 2000 es la publicada en [40] la cual toma en cuenta solo 13 procesos de prototipado rápido y divide las técnicas RP de acuerdo a la forma en que cada capa se une a la predecesora, Figura 1.23. Esta clasificación resulta escasa debido a que no todos los procesos RP añaden material sino que también existen técnicas de remoción de material, de formado e híbridas las que no son tomadas en cuenta [52].

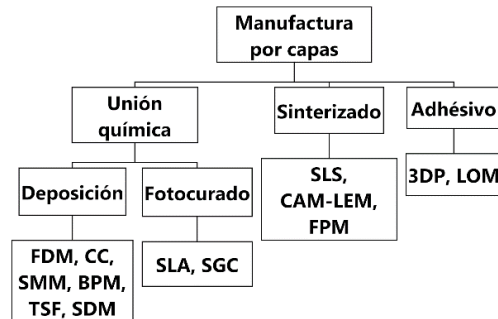


Figura 1.23. Clasificación de técnicas RP de acuerdo al proceso de unión entre cada capa [40].

En el año 2003, en [62] se propone una clasificación de los sistemas RP de acuerdo al estado en el cual el material es depositado, lo que puede ser en polvo, líquido y de manera sólida, Figura 1.24. Estas clasificaciones resultan limitadas debido a que no toman en cuenta procesos de corte de materia, formativos e híbridos existentes.

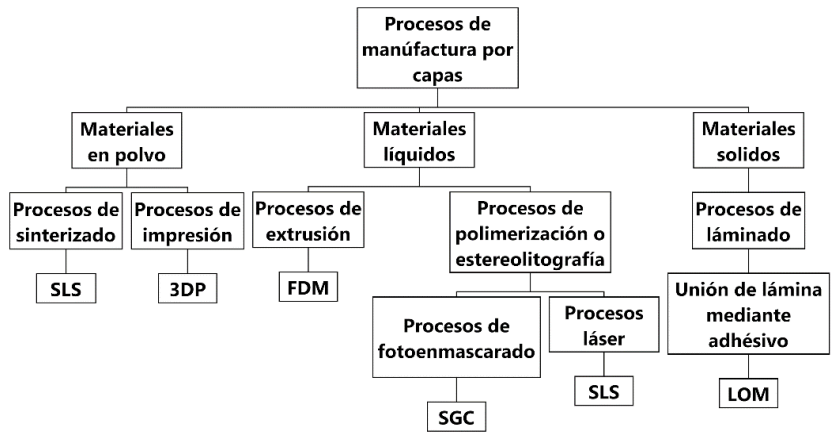


Figura 1.24. Clasificación de técnicas RP propuesta en 2003 [62].

En 2009, [52], se propuso una clasificación tomando en cuenta 104 distintas tecnologías RP&M las cuales se dividen con base a su proceso de conformado. Esta clasificación incluyen las tecnologías que añaden material, lo remueven, procesos híbridos (adición y remoción de material en un mismo dispositivo) y de formado (cambio de forma), Figura 1.25. Esta clasificación subdivide los procesos de adición en procesos de curado, dispensado, sinterizado, aglutinado, ensamble, y los procesos de remoción de material en maquinado por robot, CNC y láser. La clasificación resulta de utilidad pues toma en cuenta los procesos de organismos. Hasta el momento ninguna clasificación en la literatura toma en cuenta los procesos de organismos, por lo que es una de las clasificaciones más completas y fundamentadas debido al número de sistemas que involucra.

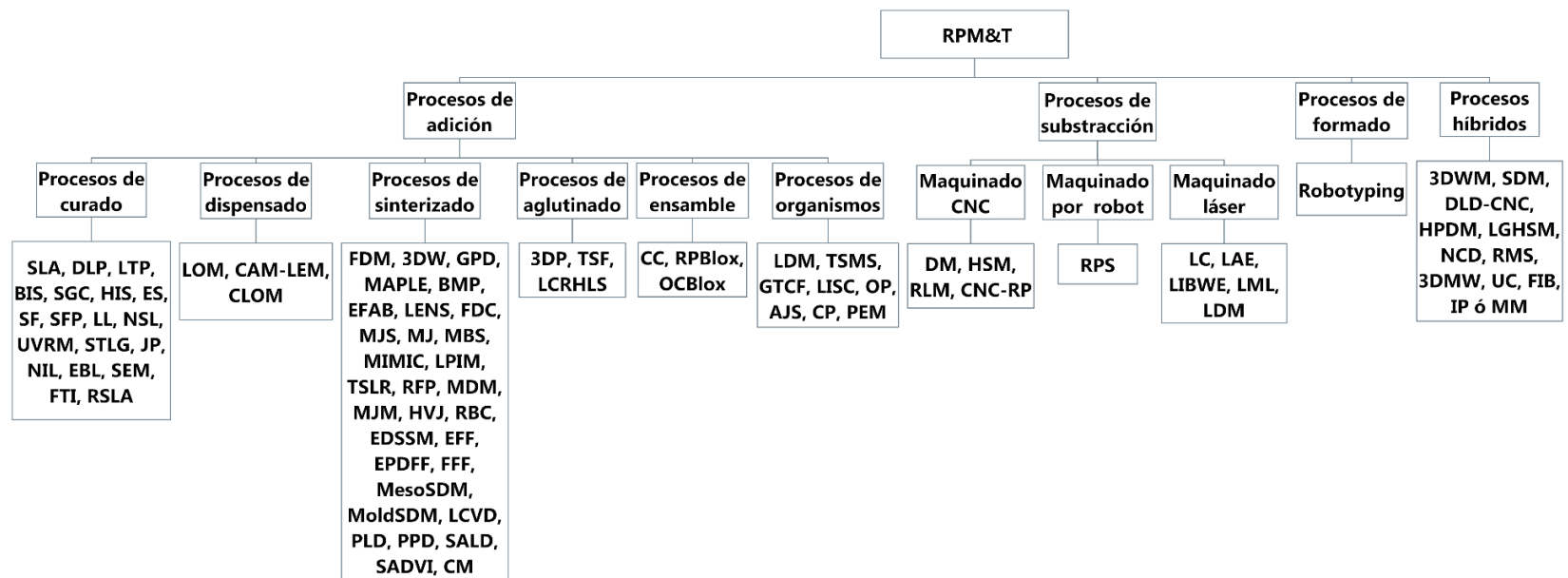


Figura 1.25. Clasificación de las tecnologías RP&M, publicada en 2009 [52].

1.4.2 Metodologías de selección

Se han reportado muy pocos trabajos en la literatura acerca de algoritmos de selección para las tecnologías RP. En 1998 se propuso un algoritmo que permite seleccionar la técnica más adecuada partiendo de la aplicación de la pieza que se desea crear, ya sea como un prototipo visual o como un patrón de manufactura, Figura 1.26, [6]. El algoritmo toma en cuenta: el tamaño de la geometría que se desea generar, si se requiere un modelo sólido o hueco, si se requiere una alta precisión y una buena resistencia de la pieza terminada. Esta propuesta de selección resulta limitada debido a que no cuenta con parámetros cuantitativos de precisión y resistencia mecánica que sirvan de referencia para la selección. De igual manera el algoritmo resulta limitado pues no involucra diversos aspectos como material de construcción, y tipo de aplicación requerida, prototipado, herramental o manufactura rápida.

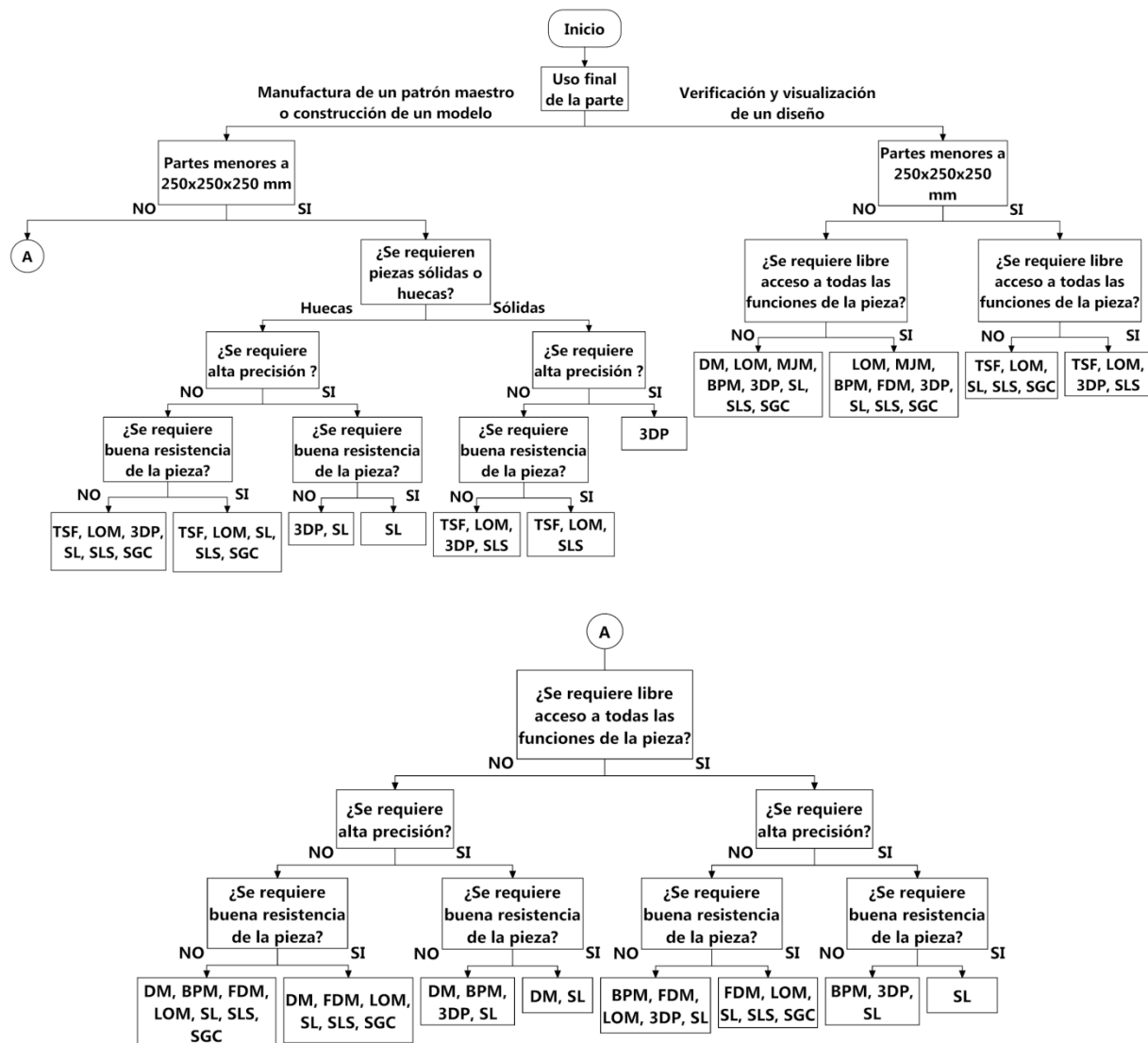


Figura 1.26. Algoritmo de selección de las tecnologías RP propuesto en 1998 [6].

Otros métodos de selección proponen emplear el proceso de análisis jerárquico (analytic hierarchy process, AHP), [63], [64]. AHP es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas en la cual primero se descomponen los requerimientos de decisión en una jerarquía donde los subrequerimientos son comprendidos más fácilmente. Los elementos de la jerarquía pueden relacionarse a cualquier aspecto de la decisión, tangible o intangible, cuidadosamente medidos o aproximadamente estimados. Subsecuentemente los elementos de la jerarquía son evaluados numéricamente como sigue: 10-muy alto, 7-alto, 5-moderado y 3-bajo, dentro de una matriz matemática empleada para la selección. Esta metodología brinda un valor numérico a las características deseadas, basándose en las impresiones, experiencia y criterio del usuario, por lo que resulta subjetivo debido a los diversos discernimientos de las tecnologías RP entre los usuarios.

1.5 Diseño para RP

Dentro del desarrollo de un nuevo producto deben tomarse en cuenta lineamientos de diseño que permitan optimizar las funciones de fabricación, montaje y prueba. Esto ayuda a resolver problemas del proceso de fabricación de manera temprana, reduciendo costos y tiempo de desarrollo. A estos lineamientos de diseño se les conoce como filosofías de diseño para la fabricación o diseño para manufactura [65].

En el caso del desarrollo de componentes que serán fabricados con sistemas RP, se deben tomar en cuenta las capacidades y limitaciones de los procesos y técnicas existentes. Sin embargo, en la literatura existen pocos reportes acerca de filosofías de diseño destinadas a RP, siendo de suma importancia el desarrollo de filosofías propias para la manufactura aditiva.

Filosofías de diseño para prototipado rápido son reportadas en [66], las cuales son exclusivas para el proceso de estereolitografía (SLA), estas filosofías son:

Bordes filosos

La tecnología de SLA, resulta limitada para generar bordes filosos.

Piezas huecas

Se recomienda fabricar piezas huecas, para el caso de piezas de gran tamaño. Con la finalidad de reducir el volumen de material empleado.

Efecto de escalonamiento

Se recomienda emplear capas delgadas con la finalidad de reducir el efecto de escalonamiento.

La propuesta de filosofías de diseño anterior resulta ser sumamente limitada ya que solo abarca una técnica de prototipado rápido y no establece límites cuantitativos que guíen al diseñador a efectuar diseños que tomen en cuenta los alcances y características que se pueden obtener empleando técnicas RP.

Por lo tanto se propone desarrollar filosofías de diseño para prototipado, manufactura y herramienta rápida (design for rapid prototyping, manufacturing and tooling, DFRPM&T), las cuales puedan ser consideradas durante el proceso de diseño de componentes que consideren la manufactura empleando técnicas RPM&T. Entre los parámetros a considerar se encuentran: espesor mínimo de pared, volumen medio de construcción, tolerancias dimensionales, distorsiones, tamaños mínimos, entre otros.

Capítulo 2

Revisión de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramienta rápido

El presente capítulo presenta una revisión de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramienta rápido. La revisión incluye sistemas comerciales, sistemas en investigación y desarrollo, sistemas propuestos en la literatura, así como sistemas obsoletos.

La revisión se organiza de acuerdo a la clasificación de las tecnologías RPM&T propuesta en [52], la cual está basada en el tipo de proceso general de conformado utilizado para obtener el modelo final. Así las tecnologías se dividen en:

- Tecnologías aditivas.
- Tecnologías substractivas.
- Tecnologías formativas.
- Tecnologías híbridas.

A su vez para cada uno de estos grupos las tecnologías son subdivididas según el tipo de proceso que emplean, Figura 2.1.

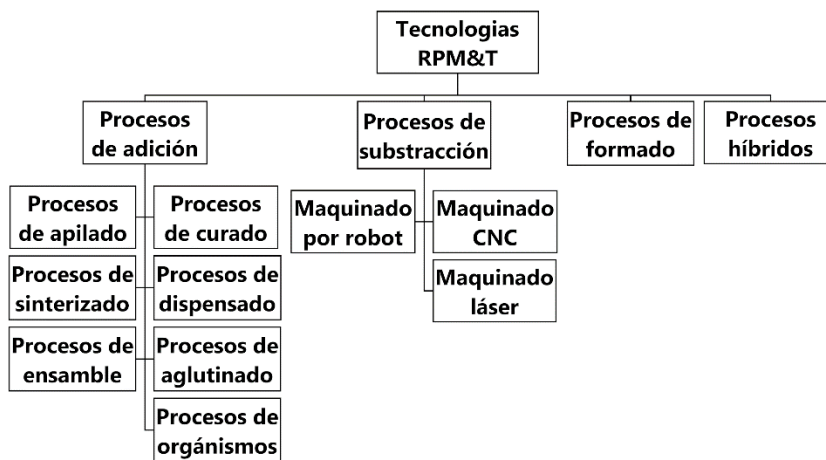


Figura 2.1. Organización de las tecnologías RPM&T.

Con el propósito de sistematizar la revisión de las tecnologías RPM&T, se definieron parámetros característicos para describir cada una de las tecnologías. Los parámetros propuestos se presentan y describen en la Tabla 2.1. Cabe hacer mención que para algunas tecnologías no fue posible obtener toda la información.

Tabla 2.1. Parámetros característicos de las tecnologías RPM&T.

No.	Parámetro	Descripción
1	Tipo de tecnología	Identifica si la tecnología es: RP (Prototipado Rápido), RM (Manufactura Rápida), y/o RT (Herramental Rápido).
2	Proceso de conformado	Identifica el proceso general para conformar el producto final, puede ser: adición, sustracción, formado, o proceso híbrido.
3	Tipo de proceso	Se refiere al proceso por el cual el material se conforma, por ejemplo: sinterizado, orgánico, dispensado, curado, etc.
4	Principio de funcionamiento	Describe el principio de funcionamiento de la tecnología.
5	Espesor mínimo de capa	Para procesos de manufactura por capas, este parámetro indica el espesor mínimo de capa que puede lograrse con la tecnología.
6	Espacio de trabajo	Indica las dimensiones nominales del espacio de trabajo disponible.
7	Velocidad máxima de trabajo	Se refiere al promedio de velocidades máximas de trabajo (mm/min).
8	Velocidad volumétrica	Se refiere al promedio de velocidad de conformado de la pieza (mm ³ /min).
9	Acabado superficial	Se refiere a la rugosidad que el sistema genera (μm).
10	Precisión	Indica la precisión del equipo (mm-μm).
11	Materiales empleados	Señala los materiales que la tecnología utiliza.
12	Costo de material	Se refiere al rango de costos de los materiales que emplea la tecnología (US dólar/kg o lb).
13	Costo del equipo	Se refiere al rango de costos comercial del sistema, tecnología o equipo (US dólar).
14	Ventajas (fortalezas)	Ventajas o fortalezas de la tecnología.
15	Desventajas (debilidades)	Desventajas o debilidades de la tecnología.
16	Aplicaciones	Se refiere a las áreas de aplicación y/o áreas de aplicación potencial de la tecnología.
17	Status	Indica el estatus de la tecnología, el cual puede ser: en desarrollo y/o investigación, disponible comercialmente, u obsoleta.
18	Fabricantes	Se enlistan los fabricantes y comercializadores de las tecnologías.

2.1 Tecnologías Aditivas

Las tecnologías aditivas construyen la pieza añadiendo material mediante varios procesos, los cuales agregan y unen el material hasta formar la pieza. Los procesos aditivos se pueden clasificar en:

- Procesos de curado.
- Procesos de apilado.
- Procesos de dispensado.
- Procesos de aglutinado.
- Procesos de ensamble.
- Procesos de organismos.

2.1.1 Procesos de curado

En los procesos de curado generalmente el material de construcción es un líquido fotosensible. Este líquido es expuesto a una fuente de luz para curar cada capa y de esta manera construir el modelo. La fuente de luz empleada puede ser UV o infrarroja, donde la finalidad de los procesos es el solidificar el material por medio de fotones.

Las técnicas que emplean procesos de curado son las siguientes:

- Estereolitografía – Stereolithography (SLS).
- Procesado directo por luz – Direct light processing (DLP).
- Polimerización térmica de líquido – Liquid thermal polymerization (LTP).
- Solidificación por interferencia de rayo – Beam interference solidification (BIS).
- Curado de piso sólido – Solid ground curing (SGC).
- Solidificación holográfica por interferencia – Holographic interference solidification (HIS).
- Solidificación de fluido electroconfigurable – Solidification of electroset (Electrosetting, ES).
- Formado espacial – Spatial forming (SF).
- Litografía láser – Laser lithography (LL).
- Nanoestereolitografía – Nanoestereolithography (NSL).
- Moldeado por reacción UV – UV Reaction molding (UVRM).
- Estereolitografía térmica – Stereo thermal lithography (STLG).
- Chorro de fotopolímero – Jetted photopolymer (JP).
- Litografía de nanoimpresión – Nanoimprint lithography (NIL).
- Litografía por rayo de electrones- Electron beam lithography (EBL).
- Revelado por transferencia de películas – Film transfer imaging (FTI).
- Estereolitografía refrigerativa – Refrigerative stereolithography (RSLA).
- Araldite.
- Fotoformado directo – Direct photo shaping (DPS).
- Impresión directa asistida por láser – Laser assisted direct imprint (LADI).
- Optoform.
- Microestereolitografía – Microstereolithography (MSLA).

2.1.1.1 Estereolitografía - Stereolithography (SLA)

La estereolitografía (SLA) es la tecnología RP más antigua, iniciando a mediados de 1980 [1]. El método comienza en una tina de polímero que contiene una plataforma sobre la cual se construye la pieza. La plataforma se mueve hasta que está justo por debajo de la superficie del polímero líquido y un láser traza la sección transversal de una sección de la parte. Cuando el láser incide en el polímero, éste se solidifica [67]. Posteriormente la plataforma se desplaza la distancia de una capa (desde 0.050 hasta 0.250 mm), y el láser dibuja el segmento siguiente en la nueva capa de polímero líquido la cual solidifica en la parte superior de la capa anterior, Figura 2.2 [68]. Cuando todos los cortes han sido trazados por el láser, la plataforma se retira de la cuba y el polímero líquido excedente se elimina de la pieza terminada la cual posteriormente se cura en un horno ultravioleta [50]. En la Tabla 2.2, se presentan algunos parámetros de este sistema.

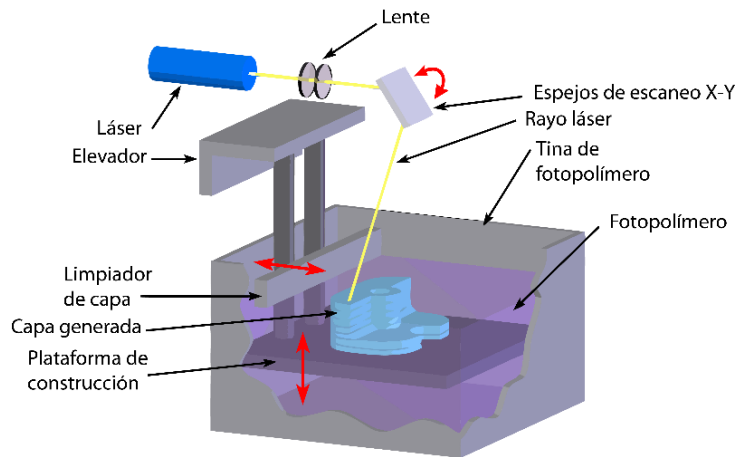


Figura 2.2. Esquema del sistema SLA [68].

Tabla 2.2. Parámetros técnicos del sistema SLA.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	Comercial	-	[19]
Espesor mínimo de capa	0.05	mm	[50]
Espacio de trabajo	737 x 635 x 533	mm	[19]
Velocidad de trabajo	210 000	mm/min	[19]
Acabado superficial	20	μm	[50]
Precisión	0.01	mm	[19]
Velocidad volumétrica	N.D	mm^3/min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

Los materiales empleados en el proceso SLA se basan en resinas fotocurables las cuales son desarrolladas por el fabricante RP. En la Tabla 2.3 se presentan algunos materiales utilizados en SLA así como sus respectivas designaciones por parte de los fabricantes [19].

Tabla 2.3. Materiales empleados en SLA, disponibilidad según [19].

Material:	Polímero fotocurable
Designación de acuerdo a 3D Systems ©	Descripción
Accura Peak	Plástico resistente a la temperatura.
Accura Xtreme	Plástico resistente a la temperatura con la estética de polipropileno.
Accura 60 Plastic	Plástico transparente con la estética del policarbonato.
Accura 48HTR Plastic	Plástico resistente a la temperatura y la humedad.
Accura e-Stone Plastic	Material para modelos dentales.
AcCura 55 Plastic	Plástico con la estética de ABS moldeado.
Accura Bluestone	Material suave con la estética de polipropileno.
Accura ClearVue	Material optimizado para la fabricación de joyas.
Accura Sapphire	Plástico que simula las propiedades y apariencia de policarbonato o ABS.

-Ventajas del proceso [67], [50]

- Amplio volumen de construcción. Las máquinas SLA pueden fabricar piezas de diversos volúmenes, desde pequeño (250 x 250 x 250 mm) a grande (737 x 635 x 533 mm) para adaptarse a las necesidades de los diferentes usuarios.
- Buena precisión.
- Buen acabado superficial.
- Amplia gama de materiales (polímeros).

-Desventajas del proceso [67] [50]

- Requiere estructuras de apoyo. Estructuras que tienen salientes y cortes deben tener soportes que están diseñados y fabricados con la estructura principal.
- Requiere postprocesamiento. Extirpación de protuberancias y otros materiales no deseados.
- Requiere postcurado. El postcurado puede ser necesario para solidificar completamente el objeto y garantizar la integridad de la estructura.

-Aplicaciones

El proceso SLA tiene diversas aplicaciones como sistema de prototipado, herramental y manufactura rápida, la Figura 2.3, presenta algunos ejemplos [19].

- Modelos de diseño (modelo visual).
- Prueba de prototipos conceptuales.
- Modelos de diseño y evaluación (Form & Fit).
- Ingeniería de prueba (verificación de Diseño).
- Aplicaciones para túnel de viento (modelos de prueba).
- Instrumentos médicos y asistenciales.
- Electrónica: empaque, conectores.
- Elementos de hardware militar.
- Insertos de moldes de inyección.
- Modelos para fundición.
- Plantillas y accesorios.

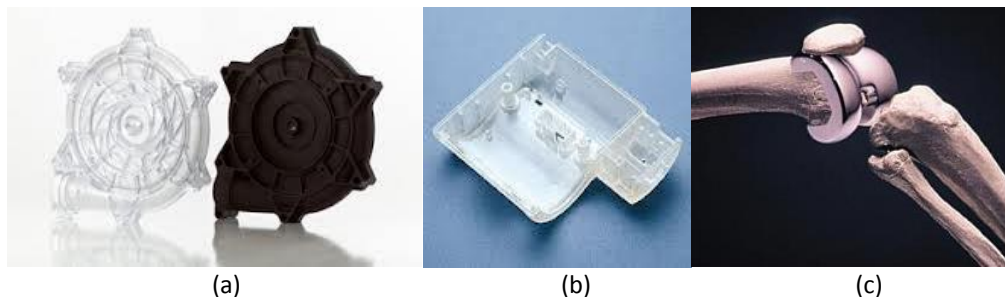


Figura 2.3. Piezas fabricadas empleando SLA: (a) prototipo visual, (b) molde, (c) rotula de rodilla.

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica 110/220 V AC 60/50 Hz [19].

-Compañías fabricantes de la tecnología [16]

- EOS (Alemania).
- 3D Systems (EUA).
- Aaroflex (EUA).
- Beijing Yinhu Co. (China).
- Chubnippon Ind. (Japón).
- CMET Inc. (Japón).
- D-MEC LTD. (Japón).
- F&S Strereolithographitechink GmbH (Alemania).
- Meiko RPS Co. (Japón).
- ReaLizer GmbH (Alemania).
- Shanghai Inion Technology Co. (China).
- Solidscape (EUA).
- Unirapid Inc. (Japón).
- Wuhan Benha Mechanical & Electrical Co. (China).

La Tabla 2.4, presenta características de costos y frecuencia de mantenimiento para los sistemas SLA, [16], [19].

Tabla 2.4. Costos y frecuencia de mantenimiento para los sistemas SLA.

Costo y/o frecuencia de mantenimiento		Rango		Unidad
Costo del Equipo	\$	45 000	- 800 000	usd
Costo del Material	\$	200	-	usd/Kg
Costo del Mantenimiento	\$	N.D		usd
Frecuencia de mantenimiento		10 000		hrs

N.D: Información no disponible

2.1.1.2 Procesado directo por luz – Direct light processing (DLP)

El proceso DLP utiliza resinas que se curan por fotopolimerización. El proceso de la fotopolimerización es creado por una tecnología de proyección de imágenes llamada tecnología de procesamiento digital de luz (DLP™) de Texas Instruments®, y requiere de la proyección de un patrón para curar cada capa de resina. En la tecnología DLP™, el elemento clave es el dispositivo digital de micro espejos (digital micro-mirrors device, DMD) que es el productor de la imagen. El DMD es un semiconductor óptico y cada chip DMD tiene cientos de miles de espejos dispuestos en una matriz rectangular en su superficie, para dirigir los fotones con gran precisión. Esto significa que cada espejo se representa como un píxel en una imagen proyectada y por lo tanto la resolución de una imagen depende del número de espejos [29].

El modelo 3D en formato STL es adquirido y rebanado en el software y cada capa se convierte en un archivo de mapa de bits con el que se generan las imágenes de la plantilla. La imagen de mapa de bits es en blanco y negro donde el blanco representa el material y el negro representa el vacío. Cuando la imagen se proyecta sobre la resina con DLP, la parte blanca del sistema de iluminación cura la resina, mientras que las zonas negras no.

A diferencia de casi todos los otros sistemas de RP que construyen el modelo de abajo hacia arriba, el sistema DLP construye el modelo de arriba hacia abajo. La plataforma de construcción se sumerge primero en un canal poco profundo de fotoresina polimérica la cual se sienta en una ventana de contacto transparente. La máscara se proyecta de debajo de la superficie construida, una vez curada la resina la plataforma de construcción se eleva el espesor de capa. Mientras la plataforma se eleva, se expone la pieza fuera de la resina, permitiendo así que la resina fresca fluya a través de la acción capilar. La siguiente capa es entonces construida de una manera similar sin la necesidad de planarización o de nivelación para cada capa. Una vez que se construye el modelo, el usuario simplemente tiene que retirar el modelo desde la plataforma. La Figura 2.4 presenta la estructura del proceso del sistema DLP y la Tabla 2.5 presenta los datos técnicos [50].

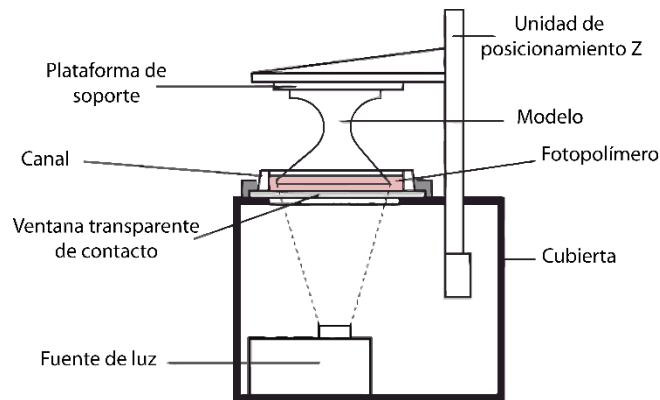


Figura 2.4. Esquema del proceso DLP.

Tabla 2.5. Parámetros técnicos del sistema DLP.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	Comercial	-	[50]
Espesor mínimo de capa	0.0075	mm	[69]
Espacio de trabajo	175x131x230	mm	[69]
Velocidad de trabajo	0.16	mm/min	[69]
Acabado superficial (Ra)	N.D	μm	-
Precisión	0.05	mm	[50]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

- Resinas fotocurables.

-Ventajas del proceso [50]

- Alta velocidad de construcción.
- El proceso DLP permite el funcionamiento en un entorno de oficina ya que el equipo es menor a 0.3 m².
- El equipo opera con bajo nivel de ruido y cero emisiones de polvo.

- El curado del fotopolímero no utiliza luz UV y no hay necesidad de instalación especial.
- La cantidad de material en uso en un momento dado es pequeña (aproximadamente 200 ml). Esto significa que si se requiere un gran número de diferentes tipos de resinas, se pueden intercambiar fácilmente con un desperdicio mínimo.
- No requiere nivelador. Cuando la plataforma de soporte se eleva con el modelo, no hay necesidad de nivelación. Esto elimina la posibilidad de causar problemas a la estabilidad de las piezas durante la construcción.
- Poca distorsión de la pieza. Debido al curado inmediato de una capa controlada hay menos contracción de la pieza durante el proceso.

-Desventajas del proceso, [50]

- Las estructuras se construyen desde la parte inferior de la cámara de construcción y son pegadas a la plataforma de soporte, lo que limita el tamaño de la construcción.
- Después de que el modelo es terminado se requiere una limpieza completa, y a veces un proceso de postcurado.

-Aplicaciones, [50]

- Modelos para la verificación del diseño, la visualización y la presentación con fines comerciales.
- Modelos maestros, modelos para moldeo simple y de fundición de cera perdida.
- Construcción y producción limitada de piezas completamente acabadas.
- Aplicaciones médicas y dentales. La creación de modelos físicos exactos de la anatomía del paciente obtenida de imágenes médicas CT (tomografía computarizada, computed tomography) y MRI (tomografía por resonancia magnética, magnetic resonance tomography).

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica 110/220 V AC 60/50 Hz.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Envision Technologies GmbH (Alemania).

2.1.1.3 Polimerización térmica de líquido – Liquid thermal polymerization (LTP)

Este proceso es similar al SLA excepto que la resina es termo sensible y se usa un láser infrarrojo para formar pequeñas unidades cúbicas que contiene la pieza (vóxeles). La naturaleza del proceso radica en afectar de manera controlada el tamaño del vóxel sin embargo, es posible causar distorsión no deseada y contracción en la parte. Este sistema está aún en investigación, [70].

2.1.1.4 Solidificación por interferencia de rayo - Beam interference solidification (BIS)

Este proceso se basa en la solidificación punto por punto de polímeros fotosensibles (contenidos en una bandeja transparente) por la intersección de dos rayos láser que tienen diferentes longitudes de onda. El primer láser excita el polímero líquido al estado metaestable, que posteriormente se polimeriza por las radiaciones del segundo láser, Figura 2.5. El proceso tiene diversas limitaciones

técnicas tales como: la absorción insuficiente de la intensidad del láser a mayores profundidades, efecto de sombreado de material ya solidificado, y difracción de luz láser que conducen a dificultades en la obtención de la intersección precisa del haz. A la fecha no se han reportado compañías que comercialicen con esta tecnología [70].

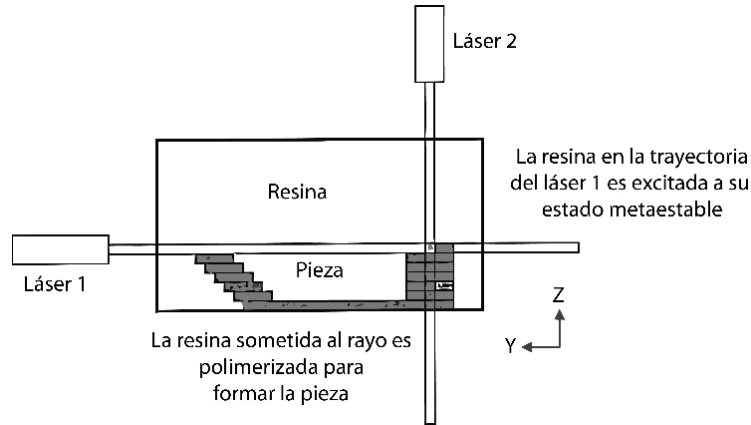


Figura 2.5. Estructura del proceso BIS [6].

2.1.1.5 Curado de piso sólido - Solid ground curing (SGC)

En el proceso SGC las piezas se construyen capa por capa a partir de un líquido de fotopolímero de resina que solidifica cuando se expone a la luz UV [50]. El proceso de fotopolimerización es similar a otros procesos, excepto que la fuente de irradiación es una lámpara UV de alta potencia, la imagen de la capa es generada por iluminación al igual que la plantilla, y toda la capa se cura en una sola exposición. Las capas se crean más gruesas de lo deseado para permitir que la capa sea fresada con precisión a su grosor exacto, dando así el control total de la exactitud vertical. Este paso también produce una superficie rugosa del fotopolímero curado, ayudando a la adherencia de la próxima capa próxima a la anterior. La siguiente capa se construye inmediatamente en la parte superior de la capa creada.

La plantilla se crea a partir de la entrada de datos CAD y es impresa en un sustrato transparente por un proceso de impresión sin impacto ionográfico, un proceso similar es la xerografía utilizada en fotocopiadoras e impresoras láser. La imagen se forma mediante el depósito de polvo negro, un tóner que se adhiere electrostáticamente al sustrato. Esto se utiliza para enmascarar la iluminación uniforme de la lámpara UV. Después de la exposición, el tóner electrostático se retira del sustrato para la reutilización y el patrón para la siguiente capa es similar "impreso" sobre el sustrato.

Se pueden fabricar múltiples partes en paralelo al agruparlas en lotes. Cada capa puede contener secciones transversales de una o varias partes, por lo que todos los segmentos en una capa se crean simultáneamente. En caso de requerirse, el proceso emplea cera para la adición de estructuras de apoyo. La Figura 2.6 muestra un esquema del proceso SGC y la Tabla 2.6 muestra sus características técnicas disponibles.

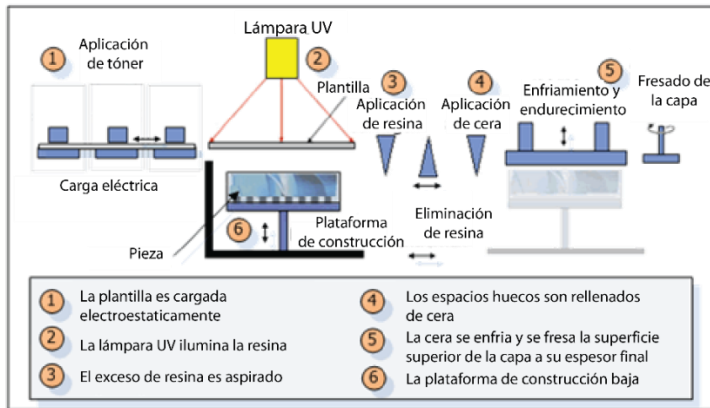


Figura 2.6. Esquema del proceso SGC.

Tabla 2.6. Características técnicas del sistema SGC.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Obsoleta		[45]
Espesor mínimo de capa	0.025	mm	[50]
Espacio de trabajo	500 x 350 x 500	mm	[50]
Velocidad de trabajo	N.D	mm/min	-
Acabado superficial (Ra)	N.D	μm	-
Precisión	N.D	mm	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramental rápido, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados, [50]

- Resinas fotocurables.

-Ventajas del proceso, [50]

- El proceso se basa en el curado instantáneo y simultáneo de toda el área de la capa de la sección transversal (en lugar de curado punto por punto).
- Es rápido y fácil de usar.
- Tiene buena tolerancia a fallas debido a que las bandejas extraíbles permiten cambiar de trabajo durante la ejecución y las capas se pueden borrar.
- Las partes que produce el sistema SGC es fiable, precisa, robusta y mecanizable.
- Mínimo efecto de contracción. Esto es debido a la pausa de curado de cada capa.
- Alta resistencia estructural y estabilidad.
- No existe la generación de olores peligrosos puesto que la resina se mantiene en estado líquido durante un tiempo muy corto y el líquido no curado se limpia inmediatamente.

-Desventajas del proceso, [50]

- Requiere espacio físico grande.
- La cera se queda atascada en las esquinas y hendiduras. Es difícil quitar la cera de piezas con geometrías complejas.

- Se generan virutas. El proceso de molienda crea virutas que tienen que ser limpiadas de la máquina.
- Alto nivel de ruido. El sistema de genera un alto nivel de ruido en comparación con otros sistemas.

-Aplicaciones, [50]

- Elaboración de modelos conceptuales, pruebas de diseño, pruebas de ingeniería, integración y análisis adecuado, funcional, exposiciones y ventas de pre-producción.
- Investigación de mercado y comunicación interprofesional.
- Herramientas y aplicaciones de calidad. Bastidor de inversión, bastidor de arena y rápida, sin necesidad de herramientas de fabricación de piezas de plástico.
- Moldes y utillaje.
- Herramientas de caucho de silicona.
- Herramientas de pulverización de metal.
- Herramientas de fundición en moldes de yeso.
- Planificación de intervenciones quirúrgicas reconstructivas y prototipos de prótesis personalizadas.

-Requerimientos de Instalación

- 110/220 V AC 50/60Hz.
- Gran espacio de instalación.
- Recipientes para recolección de virutas.

-Compañías fabricantes de la tecnología [50]

- Cubital's Ltd (Israel).

2.1.1.6 Solidificación holográfica por interferencia - Holographic interference solidification (HIS)

En el proceso HIS una imagen holográfica se proyecta dentro de la resina, causando la solidificación de una superficie completa en lugar de solidificación punto por punto. Los datos se siguen obteniendo del modelo de CAD, aunque no se requiere un rebanado del CAD [70].

2.1.1.7 Solidificación de fluido electro configurable - Solidification of electroset (Electrosetting, ES)

El electrosetting utiliza campos eléctricos para dar forma a los objetos. El proceso consta de varios pasos: en primer lugar una sección transversal del objeto se genera en el equipo. Entonces una computadora envía la imagen a la impresora donde los electrodos están formados con el perfil de la imagen y unidos a un marco (el marco es una lámina de material conductor, tal como papel de aluminio). Cuando todos los marcos están completos se intercalan en un molde que está conectado a una fuente de alimentación. El molde se sumerge en un baño de fluido de electroposicionamiento (electrosetting fluid) y es energizado. Tras la energización el fluido entre los electrodos se solidifica.

El molde se retira del baño y el exceso de líquido se drena del objeto. Tras el recorte de la elaboración del molde la parte está terminada [71].

Una característica única de esta tecnología es la posibilidad de predeterminar eléctricamente las propiedades del material del objeto curado. Las propiedades del material pueden ser programadas durante el proceso mediante el control de la corriente máxima aplicada de forma independiente a partir de la tensión máxima aplicada. Las propiedades de los materiales que son programables incluyen la densidad, compresibilidad, dureza y adherencia.

-Materiales empleados

- Caucho de silicona.
- Poliéster.
- Poliuretano.
- Epoxi.

2.1.1.8 Formado espacial - Spatial forming (SF)

La tecnología de formado espacial permite la formación de microdispositivos metálicos complejos empleando técnicas de impresión de compensado. Como en otros métodos RP el modelo CAD es dividido en capas delgadas para su construcción, las cuales son usadas para un estampado en una cinta de cromo mediante un generador de estampados de rayos UV. La cinta es unida a un plato de impresión litográfico, el cual es usado para la impresión de una tinta orgánica curable con rayos UV. Después de la impresión de una serie de capas delgadas de aproximadamente $0.5 \mu\text{m}$ de espesor, en las cuales cada capa es individualmente curada con luz UV, la estructura resultante invertida o hembra se llena con un polvo. Este material es curado también con rayos UV y la capa es aplanada, Figura 2.7[72]. El proceso es repetido completamente hasta que se logra el grosor buscado. Finalmente la pieza resultante en verde es sinterizada en una atmosfera controlada para obtener el micro dispositivo final. El proceso fue usado en la construcción de dispositivos de acero inoxidable con tamaños de $100 \times 150 \times 150 \mu\text{m}$ hasta $250 \mu\text{m} \times 1 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ y detalles de hasta $10 \mu\text{m}$ fueron logrados con un polvo de acero con un tamaño de partículas de $3 \mu\text{m}$.

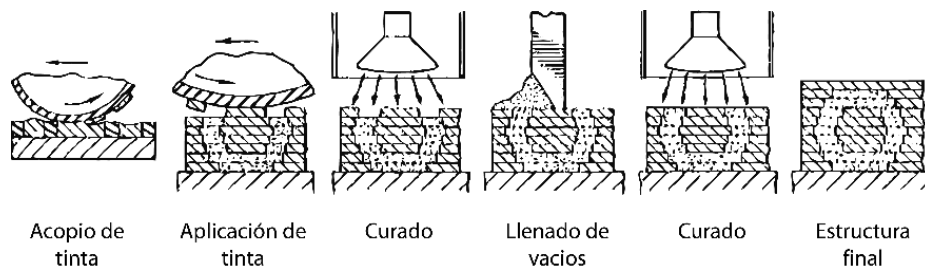


Figura 2.7. Secuencia del proceso de formado espacial [72].

-Materiales empleados.

- Metales.
- Cerámicas.
- Piezocerámicos.
- Plásticos.

La Figura 2.8, presenta algunos ejemplos de piezas fabricadas mediante la técnica de formado espacial.

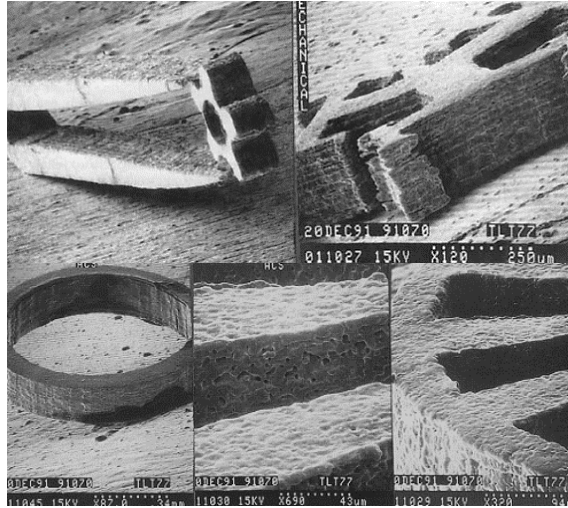


Figura 2.8. Piezas fabricadas por la tecnología SF.

2.1.1.9 Litografía láser - Laser lithography (LL)

Este proceso es la versión más aproximada a una litografía sin plantillas. El proceso de litografía permanece igual, solo que la exposición de la plantilla se remplaza por el escaneo con rayo láser enfocado. Un material fotosensible se coloca sobre el sustrato, se prehornea, se ilumina con láser, se revela y se posthornea [72]. La Tabla 2.7, presenta algunos parámetros técnicos del sistema.

Tabla 2.7. Parámetros técnicos disponibles para la litografía láser.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[73]
Espesor mínimo de capa	N.D	mm	-
Espacio de trabajo	150 x 150 x 40	mm	[74]
Velocidad de trabajo	18 000	mm/min	[74]
Acabado superficial (Ra)	0.2	μm	[74]
Precisión	0.005	mm	[74]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-
Frecuencia de mantenimiento	20 000	hrs	[74]

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados [72]

- Resinas fotocurables.

-Ventajas del proceso [72]

- No se requieren condiciones de vacío para la operación.

- No se requieren patrones para fabricar componentes.
- Directamente convierte los patrones CAD en estructuras.

-Aplicaciones

Las aplicaciones de la técnica de litografía láser están encaminadas a la fabricación de microagujas y dispositivos micro ópticos. La Figura 2.9 muestra algunas piezas que se han fabricado por litografía láser [75].

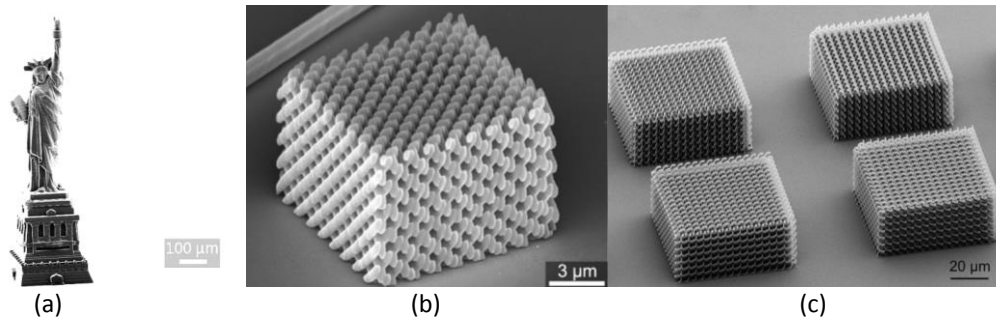


Figura 2.9. Piezas creadas por litografía láser: (a) microestatua de la libertad, (b) y (c) estructuras porosas.

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica: 220V 3F-AC 50/60Hz.

-Compañías fabricantes de la tecnología [73]

- Microtech (Italia).
- Nanoscribe (Alemania).

2.1.1.10 Nanoestereolitografía - Nanostereolithography (NSL)

El sistema NSL comienza cuando un rayo láser se enfoca dentro de una resina fotocurable con rayos UV la cual es polimerizada localmente en pequeños volúmenes llamados “voxels”. En el punto de enfoque la densidad especial del fotón llega a ser significativamente alta, por lo que el fotoiniciador sensible al UV absorbe dos fotones cercanos al infrarrojo (near infrared, NIR) a 790 nm, lo cual es energéticamente equivalente a un fotón UV. La velocidad de fotocurado es proporcional al cuadrado de la distribución de la densidad del fotón espacial. Con respecto al umbral de polimerización, la polimerización ocurre solamente en el vóxel enfocado [72], [76], [77]. Las microestructuras creadas pueden tener detalles de hasta $1\mu\text{m}$, sin embargo investigaciones recientes reportan microestructuras desarrolladas con una resolución espacial de hasta 120 nm. Se espera poder lograr la creación de cristales fotónicos orgánicos.

Usando la misma técnica de fotopolimerización se pueden crear herramientas o micromáquinas de tamaño microscópico, como engranajes, rotores y pinzas, por citar algunos ejemplos, con resolución de hasta 200nm [72]. La Figura 2.10 presenta el esquema del proceso de nanoestereolitografía, y la Figura 2.11 muestra un relieve generado por esta tecnología [76].

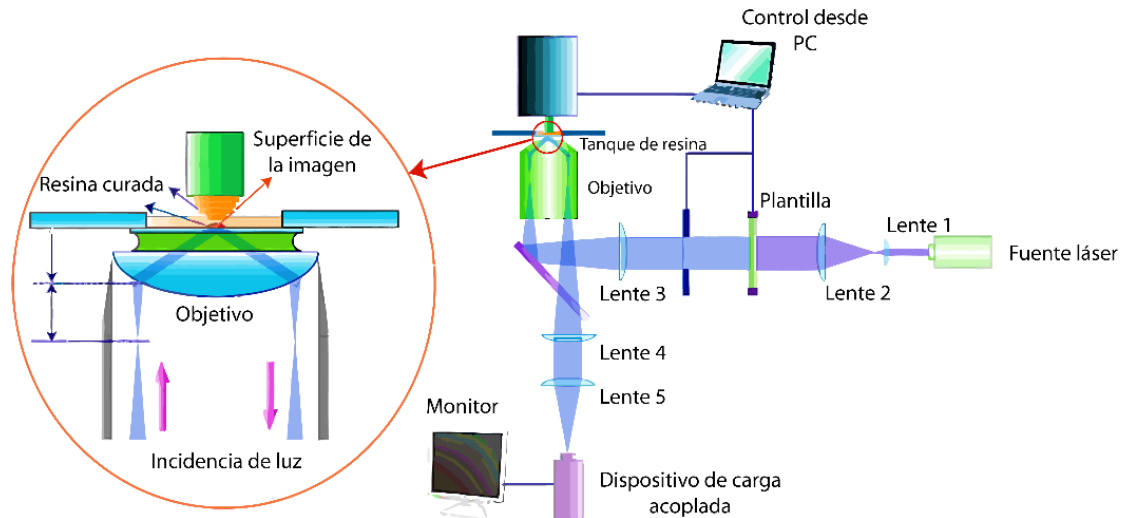


Figura 2.10. Esquema del sistema de nanoestereolitografía.

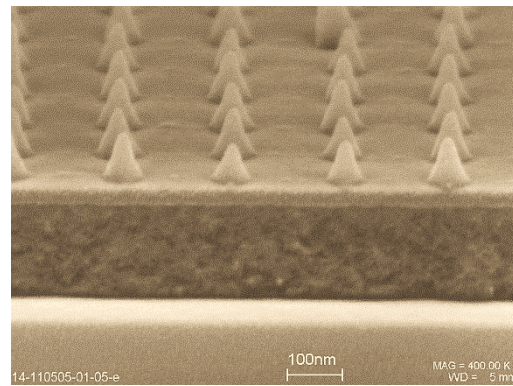


Figura 2.11 Relieves creados por NSL.

2.1.1.11 Moldeado por reacción UV - UV Reaction molding (UVRM)

El proceso de moldeado por reacción UV se puede usar para la fabricación de lentes sensitivos o prismas en sustratos de láminas de silicio mediante un alineador de plantillas modificado. Las herramientas de replicación se fabrican mediante fotolitografía o bien en combinación con galvanoplastia o grabado iónico reactivo en el silicio o vidrio. Los diámetros del lente varían desde 5 hasta 300 μm , y con lentes de 1 a 100 μm de diámetro es posible lograr detalles de alrededor 2 μm [72].

2.1.1.12 Estereolitografía térmica - Stereo thermal lithography (STLG)

El proceso STLG utiliza la radiación UV y la energía térmica (producido, por ejemplo, por radiación infrarroja) para iniciar la reacción de polimerización en un medio que contiene iniciadores tanto fotónicos como térmicos, a diferencia de la técnica BIS, que solo emplea iniciadores fotónicos. Las concentraciones de ambos iniciadores se seleccionan cuidadosamente y la reacción se inicia sólo cuando hay una combinación de radiación UV y la energía térmica, Figura 2.12. De esta manera, la cantidad de cada iniciador debe ser baja para iniciar la polimerización por sólo uno de estos dos efectos. Sin embargo, en el punto donde los dos efectos se cortan entre sí, la cantidad de radicales generados es suficientemente alta para iniciar el proceso de polimerización [62]. Por otro lado, la

temperatura se utiliza para producir radicales a través de la fragmentación de los iniciadores térmicos y simultáneamente para aumentar la iniciación y la velocidad de reacción de la reacción de curado foto iniciado. Por consiguiente el grado de curado se incrementa, por lo que no se requiere un postcurado. Esto es una ventaja importante de este proceso, ya que permite obtener productos de alta calidad. Por otra parte, si una pequeña cantidad de material sólido se forma, un gran número de moléculas que no han reaccionado todavía están presentes, por lo que es posible que una generación excesiva de calor sea producida durante la fase de postcurado, dando lugar a la distorsión y deformación del modelo.

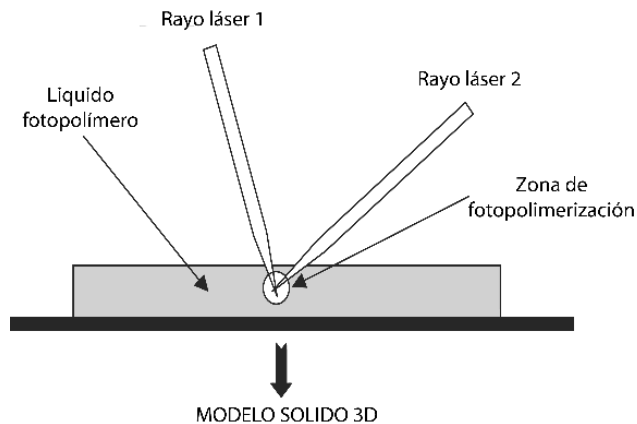


Figura 2.12. Principio de curado por doble láser del proceso STL [62].

-Materiales empleados.

- Resinas termosensibles.

-Ventajas del proceso [62].

- La generación de radicales es más eficiente.
- Se utilizan pequeñas concentraciones de los dos tipos de iniciadores, permitiendo a la reacción penetrar más profundo en el polímero.
- La combinación de radiación UV y radiación infrarroja incrementa el grado de reacción general evitando operaciones de postcurado.
- La reacción de curado es fácil de localizar, lo cual permite una mejor exactitud del modelo producido.
- El sistema es fácil de calibrar.

2.1.1.13 Chorro de fotopolímero - Jetted photopolymer (JP)

El proceso de chorro de fotopolímero combina las técnicas utilizadas en la impresión de inyección de tinta y estereolitografía. El método utiliza una serie de cabezales de impresión de inyección de tinta para depositar pequeñas gotas de material de construcción y material de soporte para formar cada capa de una pieza, Figura 2.13, [68]. Sin embargo, al igual que en la estereolitografía el material de construcción es un fotopolímero a base de acrilato que se cura con una lámpara UV después de que cada capa es depositada. Por esta razón el proceso es llamado también "inyección de tinta de impresión de fotopolímeros". Las ventajas de este proceso son muy buena precisión y

acabados superficiales. Sin embargo, las características y propiedades de los materiales no son tan buenas como en la estereolitografía. La Tabla 2.8, presenta los parámetros técnicos disponibles en la mayoría de los sistemas JP.

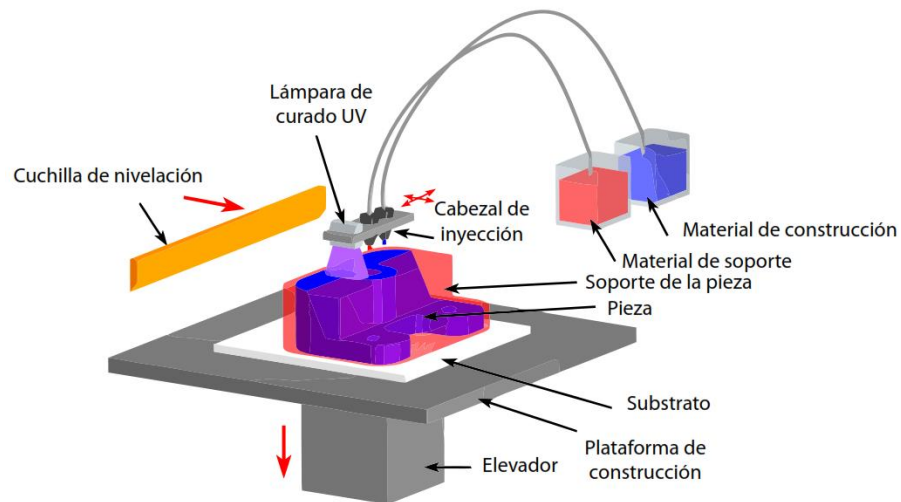


Figura 2.13. Esquema del proceso de chorro de fotopolímero.

Tabla 2.8. Características técnicas disponibles del sistema JP.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		
Espesor mínimo de capa	0.016	mm	[68], [78]
Espacio de trabajo	500 x 400 x 200	mm	[68], [78]
Velocidad de trabajo	N.D	mm/min	-
Acabado superficial (Ra)	N.D	μm	-
Precisión	0.020-0.085	mm	[68], [78]
Velocidad volumétrica	N.D	mm^3/min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramental rápido, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

- Resinas fotocurables.

-Aplicaciones, Figura 2.14 [78]

- Prototipos utilizados para la forma y prueba de ajuste.
- Patrones de mecanizado rápido.
- Joyería.
- Dispositivos médicos.



Figura 2.14. Piezas fabricadas con el sistema JP.

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica 110/220 V AC 60/50 Hz.

-Compañías fabricantes de la tecnología [16]

- Objet (Israel).
- 3D Systems (EUA).

2.1.1.14 Litografía por nanoimpresión - Nanoimprint lithography (NIL)

La litografía por nanoimpresión comprende dos pasos básicos, Figura 2.15. La primera es la etapa de impresión en la que se presiona un molde con nanoestructuras en un material polimérico fundido sobre un sustrato a una temperatura y presión controladas, creando un contraste de espesor en el material polimérico. En la segunda etapa se remueve el molde [79]. El segundo paso es la transferencia del patrón donde se utiliza un proceso de ataque químico anisotrópico, tal como en el grabado por iones reactivos (reactive ion etching, RIE), para eliminar la capa protectora residual en la zona comprimida. Este paso transfiere el patrón de contraste de espesor en toda la resistencia. Durante la etapa de impresión la resistencia se calienta a una temperatura superior a su temperatura de transición vítrea. A esa temperatura la resistencia, que es termoplástica, se convierte en un líquido viscoso y puede fluir. Por lo tanto, puede ser fácilmente deformada en la forma del molde debido a que la viscosidad de la resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura [80].

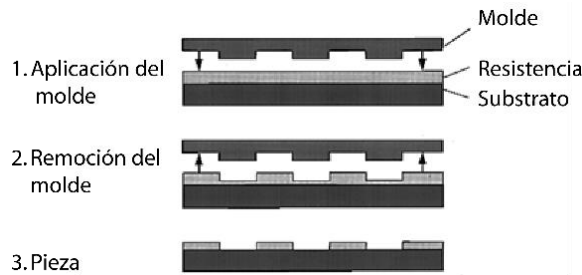


Figura 2.15. Esquema del proceso de nanoimpresión [79].

A diferencia de los métodos convencionales de litografía, la nanoimpresión litográfica no utiliza rayos energéticos. Por lo tanto, la resolución de la litografía por nanoimpresión no está limitada por efectos de la difracción de las ondas, dispersión e interferencia, así como la retrodispersión de un sustrato. La nanoimpresión litográfica es más un proceso físico que un proceso químico, siendo concebible que en el futuro, el molde utilizado en la impresión litográfica se pueda fabricar empleando litografía de alta resolución, y se pueda emplear para la producción de nanoestructuras en grandes masas a un bajo costo [80].

-Ventajas del proceso [79]

- Se pueden alcanzar tamaños de hasta 10 nm.
- Se pueden generar esquinas de casi 90 grados en las piezas.
- Pretende ser un sistema rentable, duradero y de bajo costo.
- Crea piezas de una manera sencilla.

-Desventajas del proceso [79]

- En ocasiones la pieza se adhiere a la superficie.
- Las condiciones de moldeo no han sido optimizadas.
- El efecto de la expansión térmica en el proceso no se entiende completamente.

2.1.1.15 Litografía por rayo de electrones - Electron beam lithography (EBL)

Muchas herramientas nanotecnológicas basadas en la luz están limitadas por la longitud de onda de esta. Sin embargo, cuanto menor es la longitud de onda de la luz mayor es la energía de la luz, lo que puede causar efectos secundarios no deseados. Una forma de evitar esto es emplear electrones en lugar de luz. La litografía por rayo de electrones (EBL) consiste en disparar un haz estrecho, concentrado de electrones sobre un sustrato revestido, Figura 2.16, [81], [82]. Los electrones pueden inducir la deposición de sustancias sobre una superficie (aditivo), o grabado en la superficie (substractivo).

El proceso EBL es particularmente importante en la microelectrónica para la colocación precisa de los elementos de circuito de tamaño micro. Esta técnica permite a los científicos diseñar y colocar los elementos en la escala más pequeña posible [83]. Además, los electrones se pueden utilizar para grabar una “máscara o plantilla” las cuales pueden ser posteriormente transferidas a una sustancia empleando otras técnicas. Sin embargo, el proceso resulta lento en la elaboración de piezas de alta

precisión, por lo que el tiempo y costo de construcción aumentan considerablemente, resultando en una baja aceptación comercial. Además, dado que los electrones son partículas cargadas, es necesario realizar el proceso dentro de una cámara de vacío, complicando aún más el equipo necesario y proceso. Por los inconvenientes anteriores la técnica EBL está obsoleta actualmente.

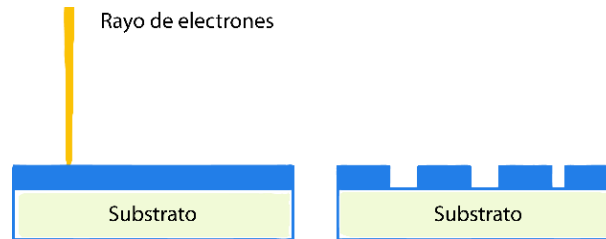


Figura 2.16. Esquema del proceso de litografía por rayo de electrones [82].

-Materiales empleados [81]

- Silicio.
- Polímeros.
- Metales.
- Cerámicos.

-Ventajas del proceso [83]

- Es posible generar piezas con una resolución de 20 nm. Esto se compara con una resolución de 1 μm para la fotolitografía convencional.
- No se requieren patrones o plantillas a diferencia de la fotolitografía, eliminando así los costos y las demoras asociadas con la producción de plantillas.

-Desventajas del proceso [83]

- Las exposiciones pueden tomar muchas horas en completarse.
- Las técnicas convencionales de fabricación pueden ser difícil a escalas de longitud de submicrones.
- Los sistemas EBL son generalmente máquinas costosas y de alta complejidad que requieren mantenimiento sustancial.

-Aplicaciones [83]

- Efectuar detalles a nano escala, Figura 2.17.
- Nuevo procesamiento.
- Micromaquinado.
- El modelado de materiales magnéticos.
- Las aplicaciones en óptica.
- Arreglos biológicos.
- Caracterizar resistencia.
- Elaborar sistemas de procesamiento.
- Elaborar fotomáscaras y sustratos.

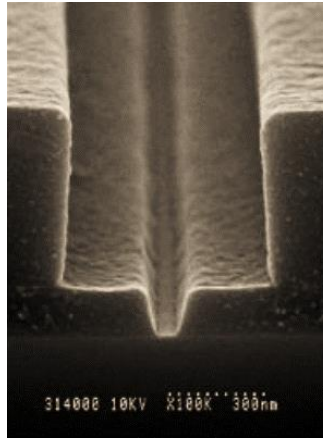


Figura 2.17. Surco elaborado por EBL [73].

-Compañías fabricantes de la tecnología

- JEOL.
- Raith.

2.1.1.16 Revelado por transferencia de películas - Film transfer imaging (FTI)

El proceso FTI utiliza un polímero líquido que se endurece con luz UV en capas de 0.1mm (0.004 pulg.) de espesor. Estos modelos proporcionan detalles muy finos y se pueden lijar, mecanizar, pintar y recubrir de metal. Los modelos elaborados por el proceso FTI se utilizan para muchas aplicaciones que van desde pruebas de productos funcionales para la exhibición del arte fino [19].

2.1.1.17 Estereolitografía refrigerativa - Refrigerative stereolithography (RSLA)

En este proceso la resina de fotopolímero se suministra en estado líquido sobre una plataforma. Para el espesor de la capa uno la resina es primeramente aplanada y luego se enfría rápidamente para convertirla a un estado sólido. La superficie de la resina se expone selectivamente utilizando un rayo láser para curarla, después la plataforma baja el espesor de la capa uno. Después de repetir estos procesos para todas las capas, un bloque sólido que contiene el objeto de destino en el interior se retira de la plataforma, y por calentamiento se retira la resina no fotopolimerizada restante alrededor del objeto obteniendo el producto deseado, Figura 2.18. Como las partes curadas utilizando un rayo láser están totalmente soportadas por la resina no fotopolimerizada, no hay necesidad de estructuras de soporte. En la Tabla 2.9 se presentan los datos técnicos disponibles de la tecnología RSLA.

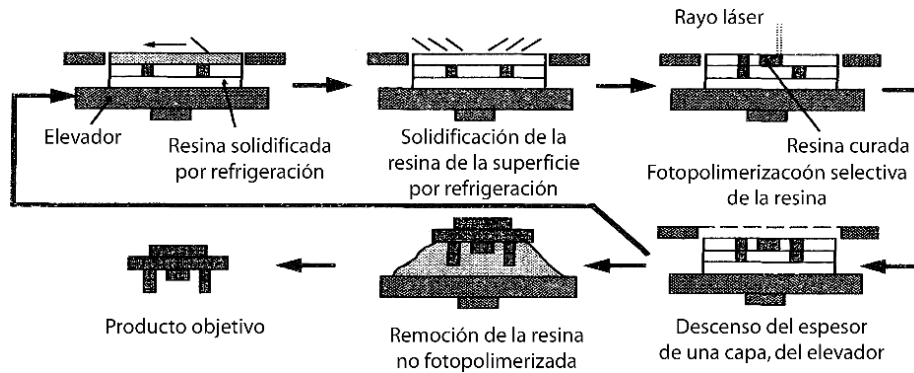


Figura 2.18. Esquema del proceso de estereolitografía refrigerativa [84].

Tabla 2.9. Características técnicas de RSLA.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Obsoleta		
Espesor mínimo de capa	0.1	mm	[84]
Espacio de trabajo	120 x 120 x 100	mm	[84]
Velocidad de trabajo	30 000	mm/min	[84]
Acabado superficial (Ra)	N.D	μm	-
Precisión	N.D	mm	-
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

- Resinas fotopoliméricas

-Ventajas del proceso [84]

- No hay necesidad de estructuras de apoyo durante el proceso de construcción de la parte.
- Es posible la fabricación de objetos con un alto grado de libertad, tales como estructuras articuladas.
- Es posible obtener una superficie de la resina exacta debido a que no hay tensión superficial cuando la resina se utiliza en el estado líquido.
- Otros tratamientos mecánicos sobre la superficie de la resina son posibles ya que la superficie de la resina está en un estado sólido congelado.

-Compañías fabricantes de la tecnología [73]

- DEL Topics (Japón).

2.1.1.18 Araldite

Araldite es una técnica que emplea la tecnología de sistemas microelectromecánicos (microelectromechanical systems, MEMS), el sistema MLS (Micro Light Switch), para distribuir la luz UV de una manera controlada en un ángulo de iluminación de 90 grados, exponiendo con precisión grandes áreas (40 000 píxeles) de resina curable por radiación un cierto tiempo, Figura 2.19. El sistema requiere siempre el mismo tiempo para hacer un barrido completo (exposición), que es claramente una ventaja en comparación con los sistemas convencionales de exposición al láser en los que el tiempo de exposición total está en función de la complejidad y el número de piezas [85], [86]. La Tabla 2.10, presenta los datos técnicos disponibles para la tecnología de Araldite.

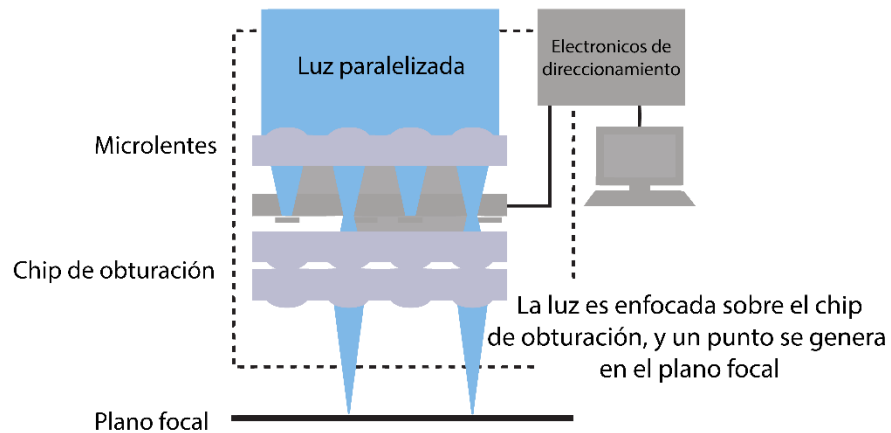


Figura 2.19. Estructura del proceso Araldite [86].

Tabla 2.10. Características técnicas disponibles del proceso Araldite.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[86]
Espesor mínimo de capa	N.D	mm	-
Espacio de trabajo	650 x 370 x 600	mm	[86]
Velocidad de trabajo	3 000	mm/min	[86]
Acabado superficial (Ra)	N.D	µm	-
Precisión	0.05	mm	[86]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramental rápido, N.D: Información no disponible

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Araldite Digitalis.

2.1.1.19 Fotoformado directo - Direct photo shaping (DPS)

El proceso DPS se basa en el fotocurado capa por capa de compuestos polimerizables y curables por luz visible. Cada capa es selectivamente fotografiada por la proyección de la luz digital a través de un dispositivo digital de microespejos (DMD) en un arreglo de matriz que realiza la función de una herramienta de plantilla electrónica, con un tiempo de conmutación inferior a 1 mseg, Figura 2.20. El proceso DPS opera en un ciclo de tres pasos:

Paso 1: La suspensión cerámica se dispensa en la mesa de construcción por medio de una bomba y se aplica uniformemente como una capa delgada por una rasqueta. Típicamente, un espesor de capa de 0.0508 mm (2 milésimas de pulgada) con un control de ± 0.0127 mm (0.5 milésimas de pulgada) se utiliza. Las capas más gruesas se pueden fabricar y el espesor de la capa se pueden controlar de forma adaptativa.

Paso 2: La capa se forma en el perfil de la sección transversal deseada por la proyección digital de la luz de la luz visible (la fuente de luz es un lámpara de halogenuros metálicos de 270 Watts). El tiempo de exposición, que depende del material, es normalmente de 15 segundos o menos.

Paso 3: La porción fotoexpuesta de la capa se cura en una película sólida. La plataforma se traslada a una posición más baja y da comienzo un nuevo ciclo de fabricación.

El tamaño del área de trabajo se determina por los ajustes de proyección de luz, por lo tanto la luz puede ser proyectada en áreas más pequeñas o más grandes según se desee. Para optimizar la resolución, es deseable la proyección de la luz sobre un área pequeña aproximadamente de 150 mm x 200 mm (6 x 8 pulgadas) a 50 mm x 76 mm (2 pulg. x 3 pulg.). El uso de compuestos fotocurables por la luz visible permite lograr una buena profundidad de curado especialmente para composiciones altamente cargadas tales como suspensiones cerámicas [87].

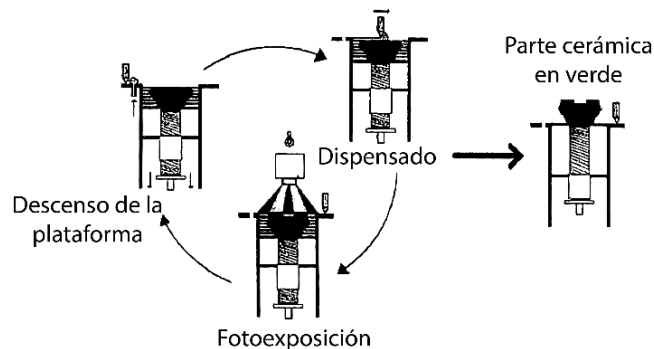


Figura 2.20. Estructura del proceso DPS.

-Ventajas del proceso [87]

- Corto tiempo de construcción.
- Mínimo número de pasos.
- No se requiere postprocesamiento después de la construcción de cada capa.

- Alta resolución (cada píxel es un espejo de 16 micrones de cuadrados y las matrices con DMD cuentan con una resolución de 1280x1024 y un factor de llenado de aproximadamente el 90%).

2.1.1.20 Impresión directa asistida por láser - Laser assisted direct imprint (LADI)

La impresión directa asistida por láser (LADI) es una técnica que utiliza un láser pulsado de UV de alta energía para penetrar en un molde de cuarzo fundido que está precargado en un sustrato de silicio. La energía de los impulsos láser derrite momentáneamente la superficie del material (silicio) para formar una capa delgada de silicio fundido. Después de volver a la solidificación de silicio, el molde de cuarzo se retira del sustrato y las nanoestructuras en la superficie del molde se transfieren directamente sobre el sustrato, como se puede ver en la Figura 2.21. El proceso LADI es rápido, directo, y no son necesarios procesos de grabado químicos posteriores.

El éxito de un proceso de LADI depende de varios parámetros importantes como son: la fluencia del láser y la presión de contacto, así como otros factores secundarios, tales como la impresión de tamaño de la característica y la movilidad materiales durante la fusión. Hasta el momento, ningún análisis sistemático y global se ha dado sobre la influencia de estos parámetros en la técnica LADI [88].

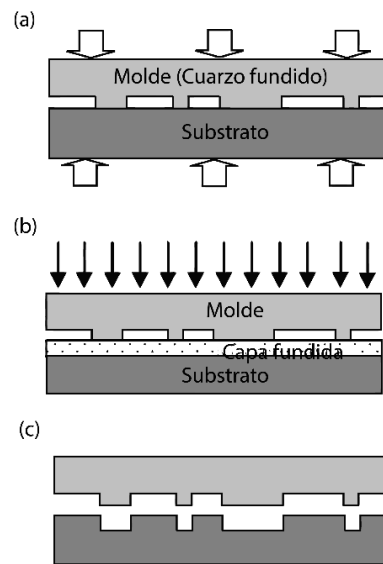


Figura 2.21. Estructura del proceso LADI.

2.1.1.21 Optoform

El sistema Optoform emplea diferentes resinas epoxi fotocurables de cerámica altamente viscosas, las cuales pueden emplearse para la fabricación de piezas y herramientas. Optoform LLC., es una subsidiaria de 3D Systems Corp., y es responsable del desarrollo del sistema Optoform. La secuencia de operación comienza con la preparación de los datos CAD de manera similar a otros procesos RP. El suministro de material es similar al proceso SLS, un pistón empuja verticalmente el material sobre la plataforma de generación donde el material es extendido por una unidad de repintado, Figura 2.22. Debido a la alta viscosidad de la resina epoxi, esta se comporta como una pasta por lo que para ser licuada se utilizan rodillos en frente de las cuchillas de repintado. En general, el proceso de

repintado ofrece un alto potencial para reducir la velocidad de construcción. El tiempo de repintado depende del tamaño del área que ha de ser recubierta, por esa razón, las plataformas de construcción de diferentes tamaños es una opción disponible. Posteriormente la capa es curada por medio de un láser UV, repitiéndose el proceso hasta finalizar la pieza, finalmente la parte tiene que ser retirada de la plataforma pues está plenamente integrada en la pasta sin curar. La pasta no curada se retira manualmente por raspadores y se puede reutilizar. Como resultado de la falta de transparencia de la pasta, es necesario remover la pasta no curada de manera cuidadosa para evitar que se dañen detalles finos de la pieza [89]. Actualmente se encuentran disponibles espesores de capa en un intervalo entre 75 y 200 μm y el tamaño máximo de construcción es de 250 x 350 x 500 mm.

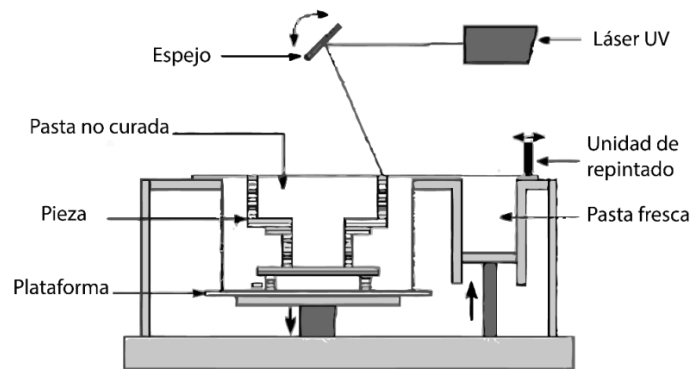


Figura 2.22. Diagrama esquemático del sistema Optoform.

-Aplicaciones

- Piezas empleadas en la automatización de procesos, como prototipos de carcasas en sistemas de iluminación y señalización.
- Herramientas empleadas en procesos de recubrimiento.

2.1.1.22 Microestereolitografía – Microstereolithography (MSLA)

En la microestereolitografía cada capa del objeto se realiza en una etapa de irradiación mediante la proyección de su imagen en la superficie de la resina fotopolimerizable, con una alta resolución a una cierta profundidad focal. Esto evita los problemas relacionados con el centrado del rayo de luz en un punto de la superficie. Un generador de patrón permite dar forma a la luz, de tal manera que contiene la imagen de la capa a ser solidificada. Esta imagen se reduce entonces y se concentra en la superficie del medio reactivo con el sistema óptico apropiado. La superposición de las diferentes capas que componen el objeto se lleva a cabo de la misma manera como en estereolitografía convencional, Figura 2.23. Los procesos de microestereolitografía son rápidos porque la irradiación de una capa entera se realiza en un solo paso, cualquiera que sea su patrón [90].

La microestereolitografía es la denominación general de las diversas tecnologías de microfabricación basadas en el principio de la estereolitografía. La microestereolitografía es conocida por diferentes nombres: microfotoformado (micro-photoforming), proceso de IH (IH process), desarrollo rápido de microproductos (rapid microproduct development), modelado óptico

3D (3D optical medeling), microestereofotolitografía (microstereophotolithography), formado óptico (óptico forming).

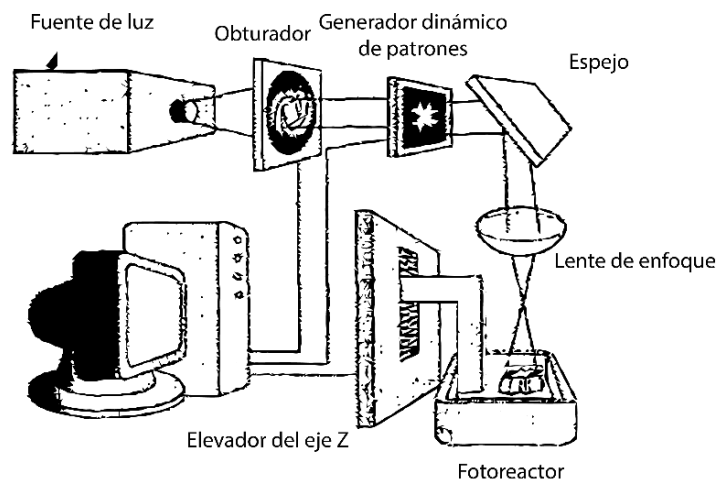


Figura 2.23. Estructura del sistema MSLA

2.1.2 Procesos de apilado

En los procesos de apilado la pieza se conforma añadiendo capas de material, que por lo general se encuentran en forma de láminas, las cuales son apiladas y adheridas a la capa anterior. Dichas capas son cortadas según la sección transversal del modelo CAD 3D para obtener la pieza deseada. Entre las tecnologías de apilado se encuentran:

- Manufactura de objetos laminados – Laminated object manufacturing (LOM).
- Manufactura de objetos laminados curvos – Curved laminated object manufacturing (CLOM).
- Manufactura asistida por computadora – Ingeniería de materiales laminados - Computer aided manufacturing – Laminated engineering materials (CAM-LEM).
- Polimerización sólida de láminas delgadas – Solid foil polymerization (SFP).
- Hotplot – Trazado en caliente.
- Laminación por deposición selectiva – Selective deposition lamination (SDL aka MCOR).

2.1.2.1 Manufactura de objetos laminados - Laminated object manufacturing (LOM)

En este proceso las secciones transversales de los objetos se cortan de papel utilizando un láser de CO₂. El papel se despliega de un rollo de alimentación sobre una base y se une a la capa anterior usando un rodillo caliente. El rodillo funde un revestimiento de plástico en el lado inferior del papel para crear la unión. Los perfiles son trazados por un sistema óptico que está montado en un sistema X-Y, Figura 2.24. Después de cortar la capa superior de papel de acuerdo a las características geométricas de la capa, el papel adicional de la banda se enrolla en un rodillo. Al finalizar la sección transversal de cada capa, se efectúa un proceso donde el láser corta una matriz cuadrangular sobre el material que rodea la pieza. Este último proceso de corte tiene la finalidad de facilitar la remoción del material adicional que rodea la pieza [50]. El método es autosuficiente para soportar voladizos y cavidades.

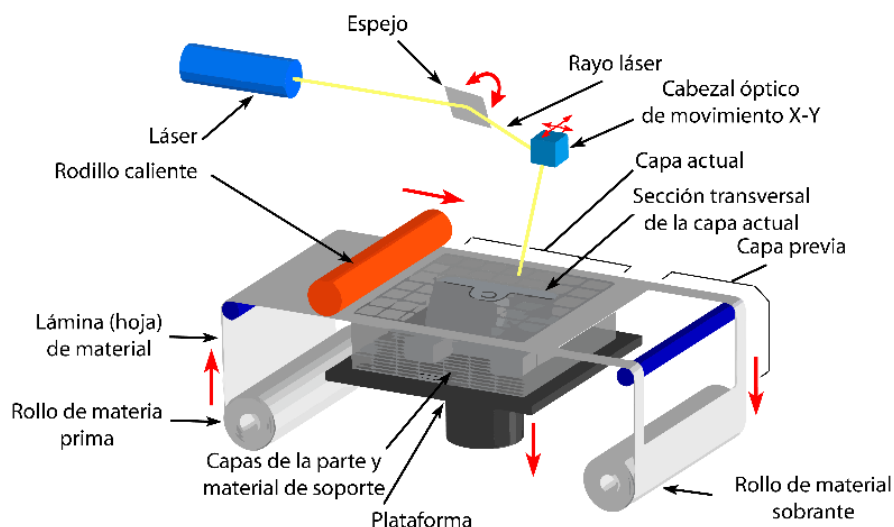


Figura 2.24. Estructura del proceso del sistema LOM [68].

En general, el acabado, la precisión y la estabilidad de los objetos de papel no son tan buenos como los materiales utilizados en otros métodos RP. Sin embargo, los costos de materiales son muy bajos, y los objetos tienen el aspecto y el tacto de la madera y se pueden trabajar y terminar de la misma manera.

Variaciones de este método han sido desarrolladas por muchas compañías y grupos de investigación a través de los años. Por ejemplo, MCOR Technologies Ltd. (Irlanda) usa un cuchillo para cortar cada capa en lugar de un láser y aplica selectivamente adhesivo para unir capas [50]. También hay variaciones que tratan de aumentar la velocidad y/o la versatilidad de material por corte de los bordes de las capas gruesas diagonalmente para evitar generar el aspecto de escalera, pero estas técnicas no están disponibles comercialmente. En la Tabla 2.11, se enlistan algunos parámetros técnicos disponibles para los sistemas LOM.

Tabla 2.11. Características técnicas disponibles de los sistemas LOM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		-
Espesor mínimo de capa	0.05	mm	[68]
Velocidad de trabajo	12 000	mm/min	[91]
Acabado superficial	8-27	μm	[92]
Precisión	0.004	mm	[68]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

- Celulosa.
- Hojas de metales ferroso y no ferroso.
- Cerámicos.
- Termoplásticos.

-Ventajas del proceso [50]

- Los materiales son baratos
- La técnica es moderadamente rápida ya que se construye una capa de forma rápida si las capas son bastante gruesas.

-Desventajas del proceso [50]

- Si se emplea papel, la pieza generada no es muy estable en el tiempo. Absorbe la humedad, y los objetos pueden llegar a ser inexactos o deformarse.
- Hay muy pocas aplicaciones.
- El escalonamiento en los bordes es la característica más pronunciada de cualquier tecnología aditiva.
- La precisión y el detalle no están a la par con otros métodos.
- El proceso de remoción del material adicional puede consumir bastante tiempo.

-Aplicaciones [50]

- Piezas para pruebas de diseño y forma.
- Partes poco detallada.
- Patrones de herramental rápido.

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica: 220V AC 50/60Hz.
- Colector o chimenea de gas.
- Extintores de incendios.
- Sistema de filtros de carbón.

-Compañías fabricantes de la tecnología [73]

- Beijing Yinhua Co. Ltd. (China).
- Kira Co. (Japón).
- RapidPRO (Reino Unido).

2.1.2.2 Manufactura de objetos laminados curvos - Curved laminated object manufacturing (CLOM)

El proceso CLOM es casi idéntico al proceso del laminado de objetos (LOM), sin embargo son muy distintos en sus implementaciones. El proceso CLOM requiere la capacidad para formar capas curvas mediante una base curva, Figura 2.25. Esta base puede generarse empleando un método cualquiera de manufactura o la técnica de laminado de objetos (LOM). La base debe alinearse en el equipo debido a que no forma parte de la pieza final y no se encuentra definida en el modelo CAD [93]. Actualmente el proceso de desarrollo de esta tecnología se encuentra en investigación, pues se tienen problemas para resolver el corte y adhesión de las capas para conformar el producto final, así como la fabricación de agujeros y pendientes elevadas.

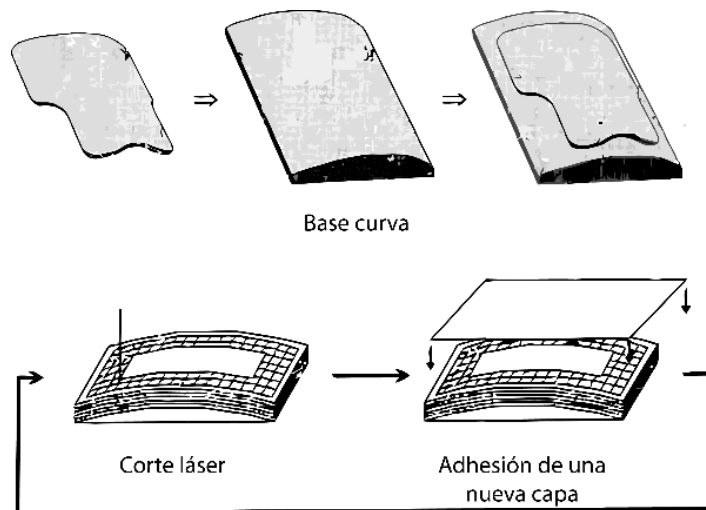


Figura 2.25. Base curva del proceso CLOM (arriba), Estructura del proceso LOM (abajo) [93].

2.1.2.3 Manufactura asistida por computadora –Ingeniería de materiales laminados - Computer aided manufacturing – Laminated engineering materials (CAM-LEM)

CAM-LEM es un proceso de fabricación en fase de desarrollo por la Universidad de Case Western Reserve y CAM-LEM Inc. En el proceso CAM-LEM cada pieza se origina a partir del modelo CAD el cual es descompuesto transversalmente en capas finas. En CAM-LEM las capas son cortadas físicamente con láser sobre una hoja. Las secciones resultantes se extraen de la hoja y se apilan para formar el modelo 3D. La operación de montaje incluye un procedimiento de laminación que fija la posición relativa de cada hoja de la pila preexistente y logra el contacto íntimo entre capas, para una operación de sinterización posterior. El resultado es una parte 3D que exhibe la forma geométrica correcta Figura 2.26 [94], [95].

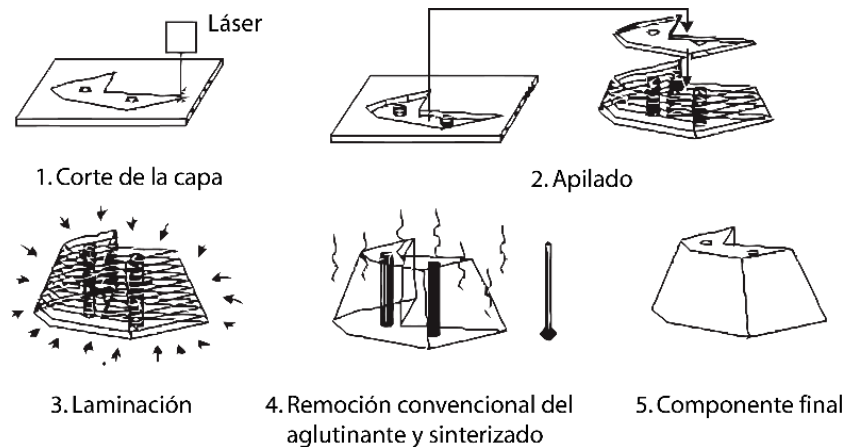


Figura 2.26. Secuencia del proceso CAM-LEM [96].

Uno de los problemas inherentes en todos los procesos de fabricación en capas es el acabado de escalera resultante de la discretización de las capas en la dirección de apilado. Este acabado de la superficie puede ser reducido al minimizar el espesor de cada capa, pero a expensas de la velocidad de fabricación. Hasta ahora pocos esfuerzos se han efectuado para interpolar la superficie en la dirección de compilación [97]. La Figura 2.27 presenta algunos ejemplos de objetos fabricados mediante el proceso CAM-LEM [96].

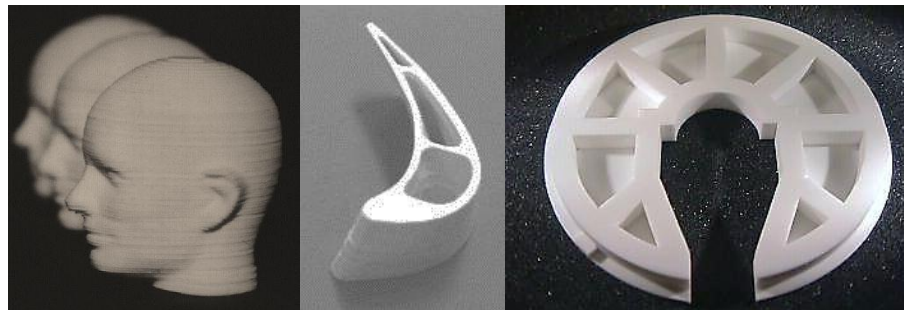


Figura 2.27. Piezas fabricadas empleando el sistema CAM-LEM.

-Materiales empleados [96]

- Cerámicas de alta alúmina.
- Nitruro de silicio de cerámica.
- Aleación de metal de níquel-hierro.
- Acero inoxidable.

2.1.2.4 Polimerización sólida de láminas delgadas - Solid foil polymerization (SFP)

En SFP la pieza se construye usando láminas de aluminio semipolimerizadas. Cuando se expone a la luz ultravioleta el papel de aluminio se solidifica y se adhiere a la capa anterior. Una vez que la sección transversal ha sido iluminada, una nueva lámina puede ser aplicada. Las áreas de papel que no constituyen la parte final se utilizan para soportar las siguientes láminas durante el proceso de construcción, pero permanecen solubles y por lo tanto son fáciles de quitar. Una vez que la pieza está completa, las piezas que no fueron expuestas a la luz UV pueden ser disueltas para dejar la pieza acabada [6]. No se reportan sistemas comerciales disponibles de esta tecnología [73].

2.1.2.5 Hotplot

El sistema llamado Hotplot une hojas de poliestireno de 1mm (0.040 pulgadas) de espesor. La máquina corta las hojas de material utilizando un plotter de cama plana equipado con un electrodo de corte. El operador debe colocar manualmente las láminas de poliestireno. El sistema utiliza los archivos de AutoCAD y HPGL como entrada. El sistema Hotplot fue comercializado por Sparx AB (Suecia), actualmente no se tiene información acerca de su actual comercialización [98].

2.1.2.6 Laminación por deposición selectiva - Selective deposition lamination (SDL aka MCOR)

La tecnología SDL o impresión de papel en 3D fue inventado por el Dr. Conor y Fintan MacCormack en 2003 [99]. El proceso también conocido como MCOR emplea papel de oficina normal como el material de construcción. El SDL no se debe confundir con la tecnología de manufactura de objetos laminados (LOM), LOM utiliza un láser, papel laminado y adhesivo, el cual adhiere todo el material de soporte, resultando complicado la remoción de los soportes. MCOR utiliza una cuchilla para el corte y la impresora 3D deposita selectivamente el adhesivo sólo cuando se requiere.

La impresión en 3D comienza con un archivo de datos CAD 3D en formato STL, así como OBJ y VRML. El software llamado SliceIT lee los datos digitales y rebana el modelo CAD en capas imprimibles equivalente al grosor del papel. El proceso de impresión comienza uniendo manualmente la hoja a la placa de construcción. La colocación de la primera hoja no es importante, pues el primer par de páginas se adjuntan como una capa de base antes de que comience la parte de corte real, Figura 2.28 (a).

Una vez que la profundidad de la hoja y los niveles de adhesivo son correctos la máquina está lista para aceptar datos de SliceIT. El adhesivo se aplica de manera selectiva, de ahí el nombre SDL. Esto significa que una densidad mucho mayor de adhesivo se deposita en la zona que se convertirá en la parte, y una densidad mucho más baja de adhesivo se aplica en la zona de los alrededores que sirven como soporte, Figura 2.28 (b).

Una nueva hoja de papel se introduce en la impresora desde el mecanismo de alimentación de papel y se coloca precisamente en la parte superior del adhesivo recién aplicado. La placa de construcción se mueve hacia arriba a una placa de calor y la presión se aplica. Esta presión asegura un vínculo entre las dos hojas de papel, Figura 2.28(c). Cuando la placa de construcción vuelve a la altura de construcción, una cuchilla de carburo de tungsteno corta la hoja de papel, trazando el contorno de objetos para crear los bordes de la pieza, Figura 2.28(d).

Cuando esta secuencia de corte se completa, la máquina comienza a depositar la siguiente capa de adhesivo y todo el proceso continúa hasta que el modelo está terminado. Después de que la última capa se completa, la pieza puede ser retirada de la cámara de construcción, Figura 2.28 (e); [99]. La Tabla 2.12 presenta los datos técnicos disponibles del proceso MCOR.

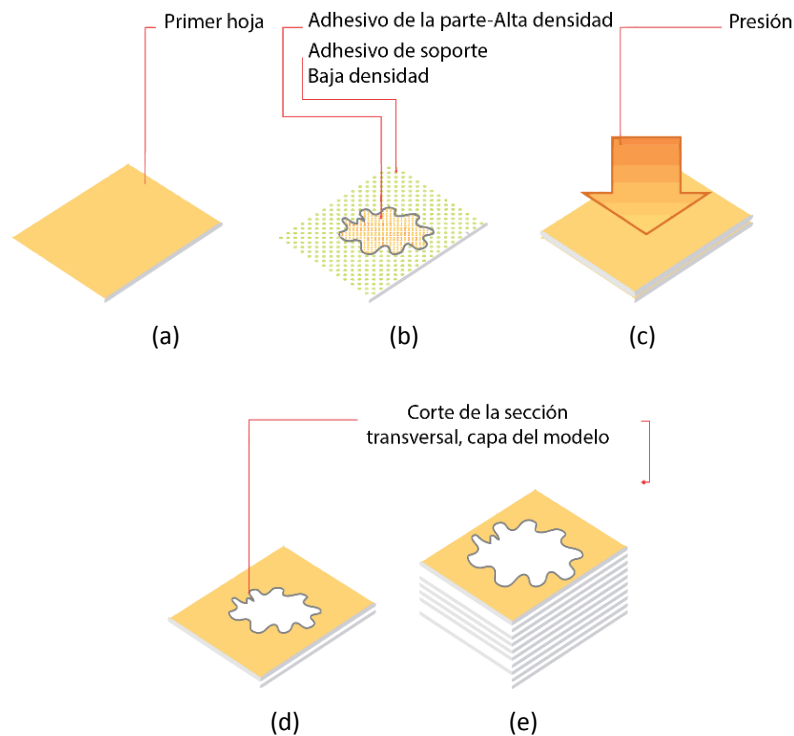


Figura 2.28. Secuencia del proceso SDL-MCOR.

Tabla 2.12. Datos técnicos disponibles de la tecnología MCOR.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		-
Espesor mínimo de capa	0.1	mm	[99]
Espacio de trabajo	256 x 169 x 150	mm	[99]
Velocidad de trabajo	10 000-15 000	mm/min	[99]
Acabado superficial	8-27	μm	[99]
Precisión	0.12	mm	[99]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Aplicaciones

- Prototipos de diseño y visualización, Figura 2.29.



Figura 2.29. Prototipos de papel elaborados por SDL-MCOR.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- MCOR Ltd.

2.1.3 Procesos de dispensado

Los procesos de dispensado se basan en convertir transformar el material de una fase sólida a un estado líquido para después ser depositado sobre una capa previa o sustrato, en forma de gotas o como un filamento.

Los sistemas que se han desarrollado reportados en la literatura que siguen este principio son:

El proceso de dispensado se basa en convertir el material de construcción en estado líquido para después ser depositado sobre una capa previa o sustrato como gotas o un filamento.

Los sistemas que se han desarrollado y reportado en la literatura son:

- Modelado por deposición líquida - Fused deposition modeling (FDM).
- Soldadura tridimensional - Three dimensional welding (3DW).
- Deposición de fase gaseosa – Gas phase deposition (GPD).
- Evaporación asistida por matriz de pulsos láser – Matrix assisted pulsed laser evaporation (MAPLE).
- Manufactura balística de partículas – Ballistic particle manufacturing (BPM).
- Fabricación electroquímica – Electrochemical fabrication (EFAB).
- Formado final en ingeniería por láser – Laser engineered net shaping (LENS).
- Deposición líquida de cerámicas – Fused deposition of ceramics (FDC).
- Solidificación por chorro multifase - Multiphase jet solidification (MJS).
- Chorro de metal – Metal jet (MJ).
- Modelado por deposición directa con láser - Direct laser deposition modeling (DLDM).
- Atomizado de metal – Metal spray (MS).
- Deposición química de vapor con láser – Laser chemical vapor deposition (LCVD).
- Prototipado rápido por congelamiento– Rapid freeze prototyping (RFP).
- Manufactura por deposición con multibocinas – Multi-nozzle deposition manufacturing (MDM).
- Modelado por multichorro - Multi-jet modeling (MJM).
- Inyección de alta viscosidad – High viscosity jetting (HVJ).
- Robocasting (RBC).
- Extrusión y deposición de metales semisólidos - Extrusion and deposition of semi-solids metals (EDSSM).
- Formado libre por extrusión - Extrusion freeforming (EFF).
- Fabricación de formas libres por deposición electrofotográfica de polvos – Electrophotographic powder deposition for free form fabrication (EPDFF).
- Manufactura por deposición de moldes de formas – Mold shape deposition manufacturing (MOLD-SDM).
- Deposición por pulsos láser – Pulsed laser deposition (PLD).
- Deposición selectiva de áreas por láser – Selective area laser deposition (SALD).
- Deposición selectiva de áreas por láser e infiltración de vapor – Selective area laser deposition and vapour infiltration (SALDVI).
- Micromoldeo capilar – Micromolding in capillaries (MIMIC).
- Moldeado por inyección a baja presión – Low pressure injection molding (LPIM).
- Construcción de contornos – Contour crafting (CC).
- Impresión por chorro de tinta – Inkjet printing (IP).

- Modelado por deposición fundida de metales – Fused deposition modeling of metals (FDMm aka FDMet).
- Manufactura de formas netas basado en goteo de alta precisión – High precision droplet based net-form manufacturing (HPDBNFM).
- Moldeo por inyección de polvo – Powder injection molding (PIM).
- Microsoldadura 3D – 3D Micro welding (3DMW).
- Manufactura por deposición de plasma – Plasma deposition manufacturing (PDM).
- Manufactura por deposición plasma-láser – Plasma-laser deposition manufacturing (PLDM).
- Consolidación láser de formas libres – Freeform laser consolidation (FLC).
- Atomizado térmico y refundido por láser – Thermal spraying and laser remelting (TSLR).
- Atomizado por plantilla – Mask based spraying (MBS).
- Modelado por compresión – Compression molding (CM).
- Deposición mesoscópica de formas – Mesoscopic shape deposition manufacturing (MESO-SDM).
- Deposición inteligente de polvos – Pointwise powder deposition (PPD).

2.1.3.1 Modelado por deposición líquida - Fused deposition modeling (FDM)

En el proceso FDM un filamento de material fundido se extruye de una boquilla fina y se deposita sobre una plataforma. La boquilla se mueve en el plano X-Y para formar una capa de la sección transversal de la pieza. La plataforma se baja entonces respecto a la boquilla y la capa siguiente de la pieza se deposita en la parte superior de la rebanada anterior [1], Figura 2.30, [68]. A medida que el filamento extruido está caliente, se une al material en el segmento anterior. Una segunda boquilla se utiliza para la extrusión de un material diferente o para crear estructuras de apoyo. Una vez que la parte se ha completado las estructuras de soporte deben ser desprendidas de la parte. La Tabla 2.13 muestra parámetros disponibles de los sistemas FDM.

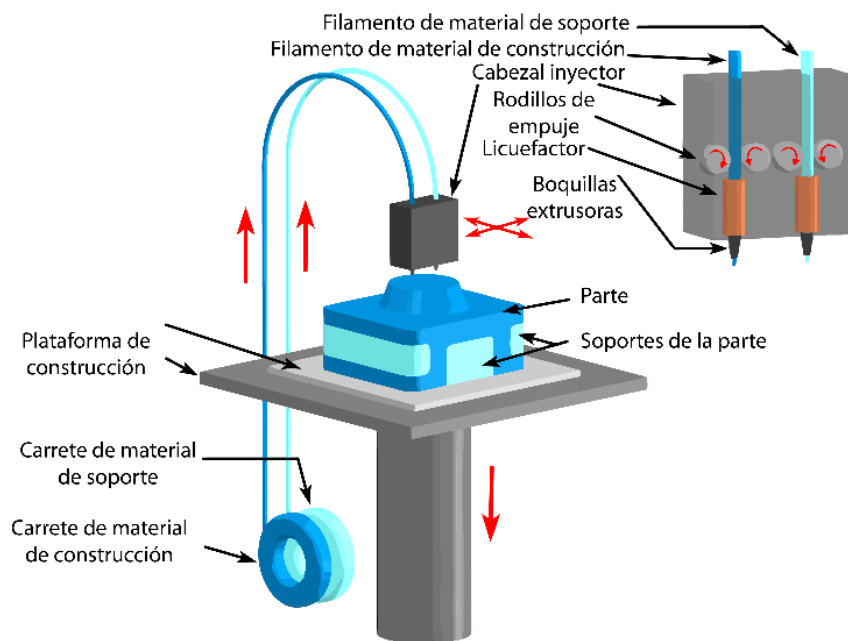


Figura 2.30. Esquema de proceso del sistema FDM [68].

Tabla 2.13. Características técnicas disponibles del sistema FDM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	Comercial	-	[19]
Espesor mínimo de capa	0.125	mm	[19]
Espacio de trabajo	910 x 610 x 910	mm	[19]
Velocidad de trabajo	1 800	mm/min	[19]
Acabado superficial	20-80	μm	[100]
Precisión	0.015	mm	[19]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados [19]

- ABS.
- Policarbonato.
- Polifenilsulfona.
- Elastómeros
- PLA.

-Ventajas del proceso [19]

- Las piezas se pueden hacer de una variedad de materiales.
- La máquina puede ser instalada fácilmente y utilizada en un entorno de oficina.

-Desventajas del proceso [19]

- Las piezas requieren estructuras de apoyo.
- El proceso es lento en la fabricación de piezas que requieren un alto volumen de material.
- El acabado superficial de las piezas generadas es pobre.

-Aplicaciones [19]

- Creación de modelos conceptuales.
- Modelos de ingeniería.
- Prototipos de pruebas funcionales.

La Figura 2.31, presenta algunos modelos fabricados empleando la tecnología FDM [101].



Figura 2.31. Ejemplo de modelos generados con el sistema FDM [101].

-Requerimientos de Instalación [101]

- Fuente de energía eléctrica 110/220 V AC 60/50 Hz.

-Compañías fabricantes de la tecnología [73]

- Beijing Yinhua Co. Ltd. (China).
- Fochif Mechatronics Technology Co. (China).
- RepRap (Reino Unido).
- Stratasys, Inc (EUA).
- 3Systems (EUA).
- Pirate 3D (EUA).

2.1.3.2 Soldadura tridimensional - Three dimensional welding (3DW)

Este sistema experimental utiliza un robot de soldadura por arco para depositar material de soldadura sobre una plataforma. A diferencia de la mayoría de las tecnologías RP, los prototipos no se construyen con rodajas de archivos CAD [6]. Varios problemas siguen sin resolverse puesto que no hay realimentación, la acumulación de calor durante la fabricación puede causar que los prototipos se fundan y debido a que las capas de soldadura no forman una superficie lisa, el electrodo puede golpear la parte. Tampoco se sabe si estructuras complejas se pueden construir. Además se debe desarrollar la metodología para generar el programa del robot directamente desde el archivo CAD, generación de la orientación de cada sección de construcción, así como el orden en que las secciones se ensamblan.

Dentro de las investigaciones actuales para el desarrollo del sistema 3DW se encuentra la deposición del material de soldadura en capas y el control de realimentación que se establece por el uso de termopares que controlan la temperatura y operan un sistema de agua de enfriamiento en línea. Esta investigación propone emplear una tobera de granallado para reducir al mínimo la oxidación de la pieza, una bomba de aspiración y una boquilla de vacío con la finalidad de eliminar el exceso de agua y los vapores generados por la soldadura [102].

2.1.3.3 Deposición de fase gaseosa - Gas phase deposition (GPD)

En este proceso las moléculas de un gas reactivo se descomponen utilizando luz o calor para generar un sólido que después es adherido a un sustrato para formar una pieza, Figura 2.32. Actualmente se están investigando tres métodos ligeramente distintos para la construcción de la parte [6]. En el primero, llamado deposición selectiva de áreas por láser (selective area laser deposition, SALD), el componente sólido del gas descompuesto es totalmente empleado para formar la pieza. Es posible construir piezas de carbono, silicio, carburos y nitruros de silicio de esta manera. En el segundo método, deposición selectiva de áreas por láser e infiltración de vapor (selective area laser deposition vapour infiltration, SALDVI), se extiende una capa delgada de polvo para cada capa; entonces los sólidos descompuestos rellenan los espacios entre los granos. En el tercer método nombrado como sinterizado selectivo por reacción láser (selective laser reactive sintering, SLRS), el láser inicia una reacción entre el gas y la capa de polvo para formar una parte sólida de carburo de silicio o nitruro de silicio, obteniendo resoluciones de hasta una micra [46].

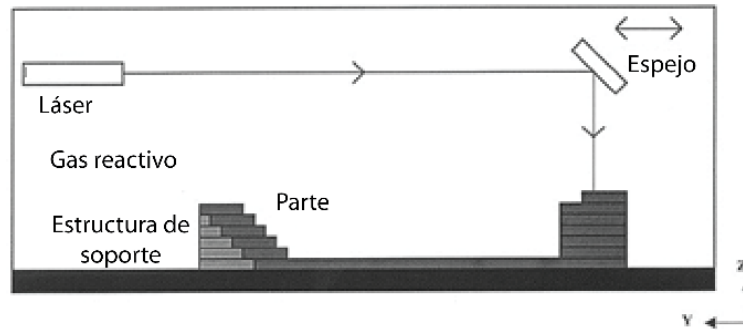


Figura 2.32. Representación esquemática del proceso GPD [46].

2.1.3.4 Evaporación asistida por matriz de pulsos láser - Matrix assisted pulsed laser evaporation (MAPLE)

El proceso MAPLE utiliza una tasa alta de pulsación por medio de un láser de rayos UV de 355 nm que se enfoca en una material transparente o "cinta" que tiene una capa de 1-10 μm de espesor. A medida que la energía láser se dirige a la cinta, el material se transfiere a un sustrato, similar al listón de una máquina de escribir, Figura 2.33 [29]. Con esta técnica es posible fabricar componentes de alta calidad de mesoescala electrónicos y bioestructuras. Esta técnica tiene posibles aplicaciones que van desde pantallas electroluminiscentes a la escritura directa de biomateriales para ingeniería de tejidos y biosensores basados en matrices [103].

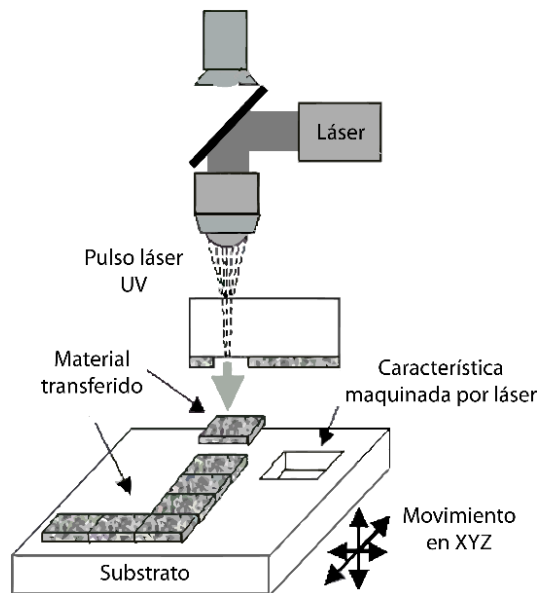


Figura 2.33. Representación esquemática del proceso MAPLE [103].

2.1.3.5 Manufactura Balística de Partículas - Ballistic particle manufacturing (BPM)

La tecnología BPM fue desarrollada por BPM Technology, Inc., el sistema emplea un chorro de material fundido o tecnología de fabricación a base de gotas (droplet based manufacturing, DBM). El chorro de material se separa en pequeñas gotas las cuales golpean el sustrato e

inmediatamente se enfrían para formar la pieza [104]. Si el sustrato es rugoso, el contacto térmico entre éste y la pieza se incrementa pudiendo reducir la tensión dentro de la pieza. La inyección de material puede ser con un sistema interrumpido o continuo. Cuando se adopta un sistema continuo el material se inyecta a través de una boquilla que se excita por un transductor piezoeléctrico a una frecuencia de aproximadamente 60 Hz. El transductor es colocado a cierta distancia de la boquilla para prevenir que se funda. Aunque un chorro de material se descompone naturalmente en gotas, la boquilla obliga al material a producir gotas pequeñas y regulares con una distancia y espacio uniforme. Los parámetros que podrían afectar las características de la pieza son la temperatura y la velocidad de las gotas, y la carga electrostática que contienen la cual es adquirida cuando el chorro de material es expulsado, y éste puede usarse para localizar de manera precisa el material, Figura 2.34.

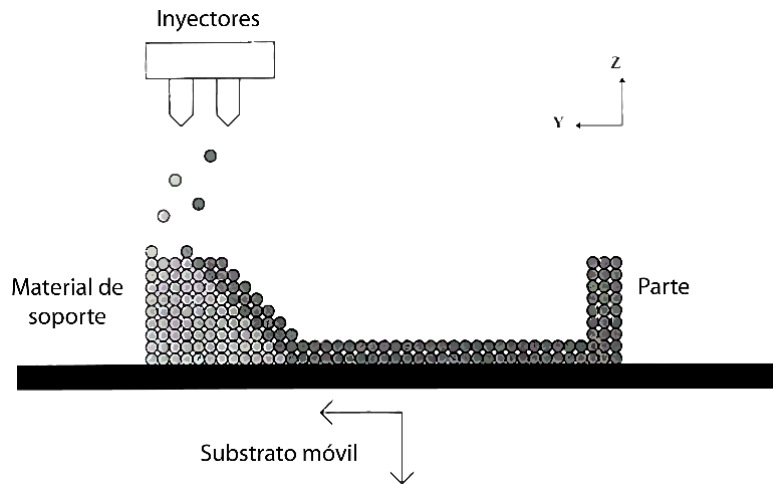


Figura 2.34. Esquema del proceso BPM [46].

Como la carga máxima que puede soportar una gota es limitada, la máxima deflexión de tal gota también es limitada, por lo que el sustrato o la boquilla deben de ser móviles para alcanzar la producción de piezas más grandes. La temperatura controla la velocidad a la cual el material fundido solidifica. Si las gotas están muy frías estas pueden solidificar a medio camino y por lo tanto no unirse al sustrato. Si el material está muy caliente la pieza puede perder forma. La formación y precisión del acomodo de las gotas depende de la velocidad de salida de la boquilla, si se está moviendo muy lentamente, la precisión de acomodo será pobre, si esta se mueve muy rápido, las gotas se deformarán al impactar al sustrato.

El proceso de BPM tiene cinco planos de movimiento para la impresión del material. El X-Y en el cual el movimiento es proporcionado por un sistema de transporte que mueve los cabezales de inyección hacia el frente, hacia atrás y de lado a lado durante la impresión. Esta acción resulta en una capa delgada de cera que representa el contorno de una sección transversal de la pieza. El eje Z es proporcionado por una plataforma montada en un conductor de tornillo similar a un husillo de bolas, que permiten que la plataforma baje o suba para permitir creación de la próxima sección transversal.

Los dos últimos grados de movimiento los establece el sistema BPM aparte de otros. El inyector de material puede dar la vuelta para disparar casi completamente horizontal. Este movimiento elimina la necesidad de soportes pues el material puede depositarse lateralmente, en un plano horizontal.

Esta capacidad única se complementa con la capacidad de que la cabeza gire en el plano X-Y para la impresión horizontal [104].

La resolución de los prototipos está relacionada al diámetro de las gotas, el cual oscila típicamente entre los 50-100 μm . El proceso es realizado en una atmósfera controlada de nitrógeno o al vacío para prevenir la oxidación y la dispersión. El grado de deposición está por encima de las 15,000 gotas por segundo usando una sola boquilla y un chorro continuo de material. En el proceso BPM los soportes son comúnmente hechos de un material diferente para facilitar que sea retirado [6].

Uno de los sistemas BPM más precisos utiliza una boquilla que arroja gotas de material fundido según se requiera. Las gotas son esferas de 76 μm de diámetro las cuales se aplanan al impactarse creando discos con un diámetro de 101 μm y un espesor de 63 μm . Después de que cada capa es depositada, ésta es fresada para alcanzar las dimensiones deseadas en el eje "Z". La Tabla 2.14, muestra datos técnicos disponibles para BPM.

Tabla 2.14. Características técnicas disponibles para los sistemas BPM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref
Tipo de tecnología	RPM&T	-	
Status	N.D	-	-
Espesor mínimo de capa	0.013	mm	[104]
Velocidad de trabajo	18 600	mm/min	[104]
Acabado superficial	N.D	mm	-
Precisión	0.025	mm	[104]

-Materiales empleados [104]

- Zinc.
- Estaño.
- Plomo.
- Aleaciones y termoplásticos cuyo punto de fusión es bajo (<420 °C).
- Cobre.

-Ventajas del proceso [104]

- Bajos costos de producción y mantenimiento.
- El método proporciona buenas propiedades mecánicas.
- No se requiere postprocesamiento.
- La toxicidad del proceso es baja
- Bajo consumo de energía.
- Bajo costo del sistema y materiales.
- Existen sistemas comerciales de doble material los cuales pueden depositar termoplásticos o cera.

-Desventajas del proceso [104]

- Se puede emplear un rango limitado de materiales.

-Aplicaciones [104].

- Visualización del concepto.

2.1.3.6 Fabricación electroquímica - Electrochemical fabrication (EFAB)

La técnica EFABTM fue desarrollada en el Instituto de Ciencias de la Información (Marina del Rey) en la Universidad del Sur de California (USC) y comercializada por Memgen Inc., ahora Microfabrica Inc., Burbank, CA [105]. El proceso EFABTM es una secuencia repetida de electrochapado (electroplating), la deposición de un material de soporte y del aplanado de la capa. Con la técnica EFABTM es posible fabricar microdispositivos 3D de formas muy complejas, basándose en el apilamiento de capas delgadas que pueden tener un espesor de 2 a 10 μm en una alta velocidad de deposición. Cada capa consiste en un material estructural, por ejemplo, cobre y un material de sacrificio, que puede ser níquel. El material estructural está embebido dentro del material de sacrificio, que proporciona soporte mecánico para el microdispositivo durante las etapas de fabricación. También permite que la siguiente sea depositada sobre toda el área sin restricciones.

El material estructural y de sacrificio es depositado por electrochapado. Para el material estructural se emplea un proceso de deposición selectiva llamado "plantillas instantáneas" (Instant maskTM). En este proceso una fotoplantilla inicial se crea mediante métodos estándar de litografía. La fotoplantilla se utiliza para hacer la plantilla instantánea formada por un ánodo de metal y un material aislante conformable. Dependiendo del tamaño del sustrato es posible preparar muchas capas individuales en una máscara o plantilla. La plantilla instantánea es presionada contra el sustrato dentro de un baño electroquímico. Ahora el material estructural se deposita selectivamente sobre el sustrato por una corriente aplicada. La plantilla se retira y el sustrato se coloca en un segundo baño en donde el material de sacrificio es depositado como una manta sobre el sustrato entero, Figura 2.35. A continuación ambos materiales son pulidos para formar una capa plana con el espesor deseado y el proceso se repite tantas veces como sea necesario. Finalmente el material de sacrificio se elimina en un baño de decapado [72].

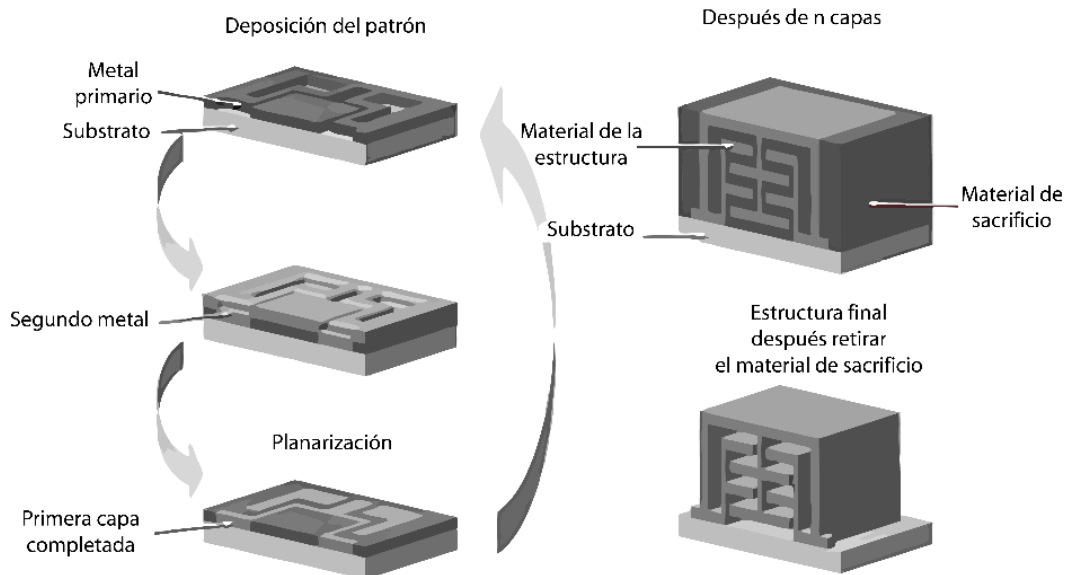


Figura 2.35. Estructura del proceso EFAB [72].

El tiempo de fabricación está en el intervalo de unas pocas semanas. Se tarda hasta una semana para producir la plantilla instantánea a partir del dibujo CAD. Como la fabricación de una única capa dura menos de una hora, es posible construir la pila a una velocidad de más de 30 mm por día. Sin embargo, debido al pequeño tamaño de los microdispositivos es posible construir un gran número y una gran variedad de dispositivos simultáneamente en el mismo sustrato. Un aspecto interesante de EFAB™ es que permite una integración monolítica con circuitos integrados para proporcionar una solución de sistema en un chip. Esto es posible debido a las temperaturas que están por debajo de los 60°C [106].

-Materiales empleados [105]

- Cobre.
- Níquel.
- Plata.
- Oro y aleaciones.

-Aplicaciones [105]

- Condensadores electrónicos.
- Sensores inerciales.
- Acelerómetros laterales y verticales.
- Sensores de presión.
- Estructuras coaxiales tales como filtros, desfasadores, y similares.
- Microdispositivos magnéticos como bobinas de alta conductividad y elementos de alta permeabilidad magnética.

La Figura 2.36, presenta ejemplos de estructuras fabricadas por medio de la tecnología EFAB [105].

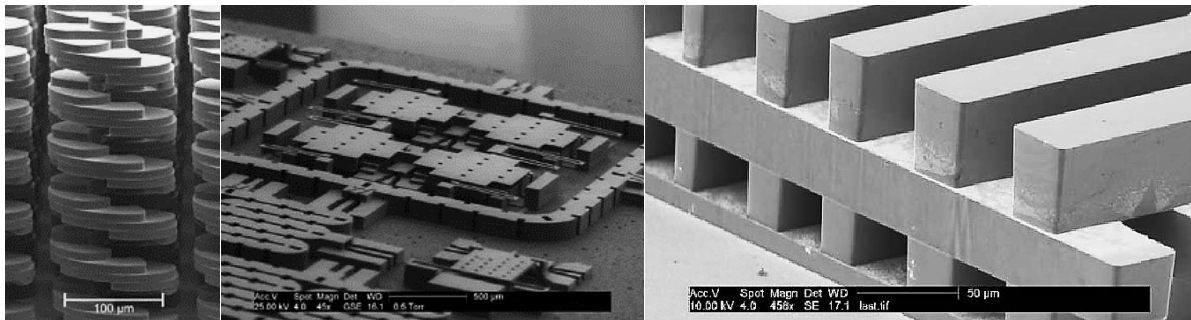


Figura 2.36. Microestructuras fabricadas por medio de EFAB.

2.1.3.7 Formado final en ingeniería por láser - Laser engineered net shaping (LENS)

La tecnología LENS, también conocida como formado por láser y polvo (laser powder forming, LPF), es similar al sinterizado selectivo por láser (SLS), pero a diferencia de este, LENS emplea un láser de alta potencia para fundir polvo metálico suministrado coaxialmente con el foco del haz láser a través de un cabezal de deposición, [72], [107]. El haz de láser normalmente viaja a través del centro de la boquilla y se concentra en un pequeño punto por una o más lentes. En el punto central del rayo láser genera una laguna de material fundido; dentro de esta laguna se inyecta el material

de la pieza. La mesa de trabajo se mueve en el plano X-Y para formar cada capa del objeto, mientras que la boquilla se mueve de forma vertical para crear las capas.

El proceso se repite adhiriendo capas consecutivas hasta formar el objeto 3D. En el proceso el polvo metálico se deposita y distribuye alrededor de la circunferencia de la boquilla, ya sea por gravedad, o mediante el uso de un gas inerte presurizado que se utiliza típicamente para proteger el proceso de formado de la pieza, con el fin de tener un mejor control de las propiedades y promover la adhesión de cada capa, proporcionando una mejor humectación de la superficie [72]. La Figura 2.37, presenta el esquema del proceso LENS [108].

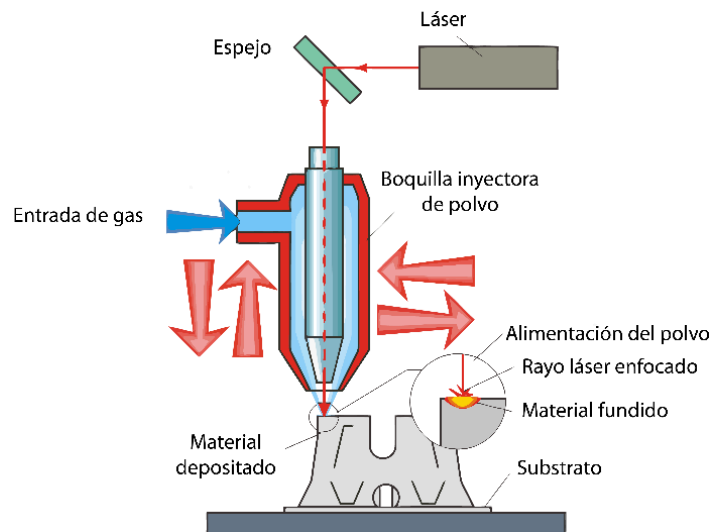


Figura 2.37. Esquema del sistema LENS.

La mayoría de los sistemas utilizan materias primas en polvo, pero también se han realizado sistemas con material en forma de un alambre. En este caso el material se alimenta fuera del eje central de la boquilla y se sustituye la fuente de energía láser por un haz de alta energía de electrones. El sistema puede emplear composiciones de polvos de diversos materiales permitiendo modificar dinámicamente y de forma continua las propiedades del material, lo que conduce a objetos con propiedades que pueden ser mutuamente excluyentes utilizando métodos clásicos de fabricación [107]. La cabina de construcción suele estar aislada de las cercanías ambientales con la finalidad de proteger a los operadores de la posible exposición a polvos finos y al rayo láser. La potencia del láser utilizado varía mucho, desde unos pocos cientos de vatios a 20 KW o más, dependiendo del material, la velocidad de alimentación y otros parámetros.

El enfriamiento extremadamente rápido del proceso crea una microestructura de grano fino, obteniéndose una excelente resistencia a la tensión. Las partes fabricadas por LENS tienen buena apariencia aunque generalmente necesitan un acabado superficial posterior. El costo del equipo se ubica entre los \$350 000 y \$500 000 usd, [72]. La Tabla 2.15, presenta características técnicas del proceso LENS.

Tabla 2.15. Datos técnicos disponibles de la tecnología LENS.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	Comercial	-	[109]
Espesor mínimo de capa	0.02	mm	[110]
Espacio de trabajo	900 x 1500 x 900		[109]
Velocidad de trabajo	3 600	mm/min	[109]
Acabado superficial	5-10	μm	[111]
Precisión	0.025	mm	[109]
Velocidad volumétrica	0.5	kg/hra	[109]

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida

-Materiales empleados

- Acero inoxidable.
- Inconel.
- Cobre.
- Aluminio.
- Titanio.
- Cerámicos.

-Ventajas del proceso

- Se pueden fabricar piezas y herramientas de gran tamaño en un corto tiempo de construcción.
- Se pueden producir piezas muy cercanas a la pieza de uso final, con buenas propiedades metalúrgicas.
- La técnica se puede emplear para elementos de reparación y reacondicionamiento.
- Se pueden generar piezas con una densidad del 100%.

-Desventajas del proceso

- La maquinaria es grande, costosa, y utiliza una gran cantidad de energía.
- Los voladizos y cortes pueden requerir estructuras de apoyo que necesitarán mecanizado secundario sustancial para eliminarse.
- Cualquier pieza fabricada por la tecnología LENS requerirá por lo menos algún mecanizado final para obtener el acabado requerido.

-Aplicaciones

La fuerza de esta tecnología radica en su capacidad para fabricar piezas grandes totalmente densas y utillajes con buenas propiedades metalúrgicas a velocidades razonables [16]. La Figura 2.38 presenta ejemplos de piezas fabricadas empleando el sistema LENS [112].

- Reconstrucción de piezas metálicas dañadas.
- Fabricación de moldes para inyección.
- Generación de partes metálicas para uso final.

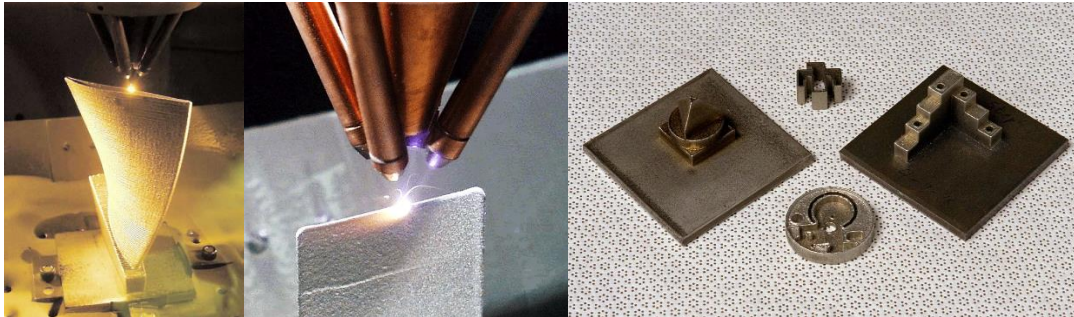


Figura 2.38. Ejemplo de piezas fabricadas mediante LENS.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Optomec, Inc. (EUA).

2.1.3.8 Deposición líquida de cerámicas - Fused deposition of ceramics (FDC)

La deposición líquida de cerámicas (fused deposition of cerámico, FDC) es una modificación del proceso FDM [113]. En el proceso FDC un filamento de cerámica con un diámetro de aproximadamente 1.8 mm pasa a través de un licuefactor precalentado (140°C a 200 °C) y actúa como un pistón que extruye un cordón continuo a través de la punta del inyector con un diámetro de 0.254 a 1.5 mm. El cordón es depositado en una plataforma la cual tiene un avance controlado hacia abajo de 25µm a 1mm de espesor, Figura 2.39 [114]. La vinculación de los granos y las capas previamente depositadas ocurre debido a la adherencia del material parcialmente fundido.

La técnica FDC ha sido usada con una variedad de materiales cerámicos y ha sido adaptada a metales pero es particularmente interesante y ventajosa en la fabricación de componentes piezocerámicos/polímero. Para una aplicación superior del FDC, la calidad del filamento es un parámetro sumamente importante. Si el filamento exhibe un endurecimiento o la viscosidad del material fundido es muy alta, una torcedura o flexión del filamento puede ocurrir justo enfrente del inyector. De este modo, el desarrollo de un aglutinante es el objetivo para optimizar la viscosidad, resistencia y flexibilidad del material de aporte [72].

Durante la deposición fundida de cerámica, se usan polímeros termoplásticos fundidos para llevar los polvos cerámicos. Las partes de cerámica son similares a piezas moldeadas por inyección que tienen 40-45% de aglutinante de volumen en el mismo. La Figura 2.40, presenta modelos fabricados por deposición líquida de cerámicas [113].

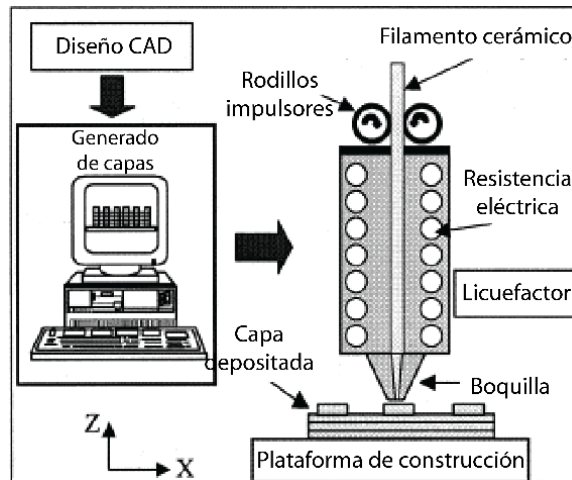


Figura 2.39. Esquema del proceso FDC [115].

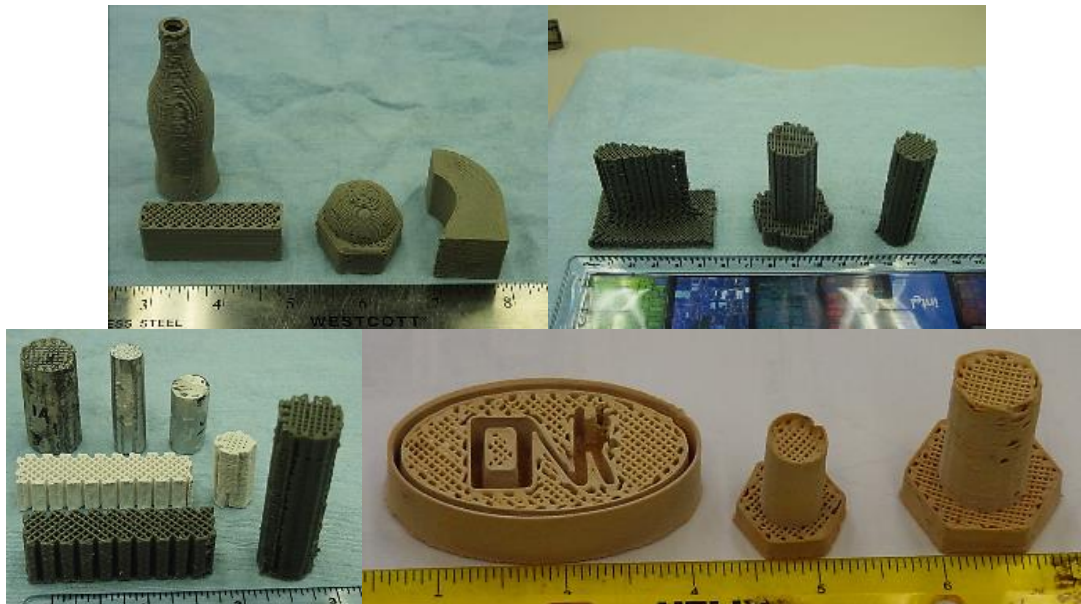


Figura 2.40. Ejemplos de piezas fabricadas por deposición líquida de cerámicas.

-Desventajas del proceso

- El sistema posee fallas en la generación de capas saturadas de material debido a errores de movimiento y control del flujo.

-Materiales empleados

- Dióxido de titanio (TiO_2).
- Alúmina (Al_2O_3).
- Sílice (SiO_2).
- Mullita ($3Al_2O_3 - 2SiO_2$).

2.1.3.9 Solidificación por chorro multifase - Multiphase jet solidification (MJS)

La tecnología MJS es comparable a la técnica FDM con respecto a la deposición de capas de material fundido de baja viscosidad por un sistema de boquilla [72]. Sin embargo, las principales diferencias entre ambos procesos son la materia prima y el sistema de alimentación. En el proceso MJS el material se suministra en diferentes fases; por ejemplo, en forma de una mezcla de polvo y aglomerante o como una sustancia licuada en lugar de utilizar material de alambre. En cualquier caso el material se calienta a más allá de su punto de fusión y es exprimido a través de una boquilla mediante un sistema de bombeo depositándose capa por capa. El material fundido se solidifica cuando entra en contacto con la plataforma o la capa anterior debido a una caída de presión, temperatura y transferencia de calor entre capas y el medio ambiente. El contacto del material licuado conduce a una refusión parcial de la capa anterior originando una buena unión de las capas [116].

En el proceso MJS el material de alambre se transporta en la cámara caliente por dos rodillos de transporte que efectúa la descarga del material fundido, la cual se encuentra montado sobre una mesa que se mueve en el espacio XYZ, Figura 2.41. Después de que una sección transversal se produce en el plano X-Y, la cabeza de extrusión se mueve en la dirección Z (espesores de: 0.5-0.1mm) y la capa siguiente es fabricada. Los parámetros del proceso tales como mecanizado, velocidad de flujo de material se añaden, y el archivo de control de la máquina se genera. El archivo es entonces descargado en el controlador de la máquina y el proceso de construcción se inicia.

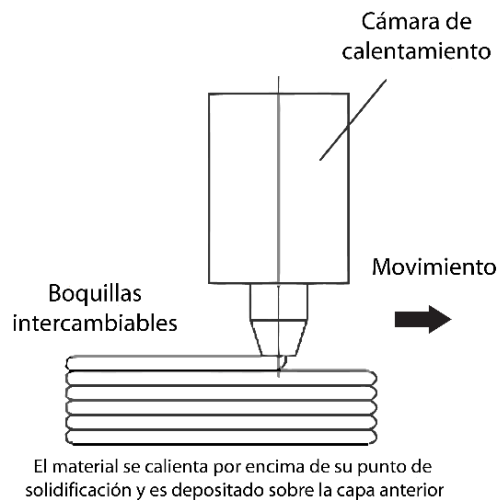


Figura 2.41. Representación esquemática del proceso MJS [116].

La fabricación de piezas en el proceso MJS consta de tres pasos generales. Primeramente una pieza en verde se construye en la máquina de prototipado rápido, empleando el proceso descrito anteriormente. La parte en verde se compone de 50 por ciento de volumen de aglomerante (polímeros y ceras) y 50 por ciento de volumen de polvo metálico o cerámico. Después la pieza en verde se coloca en un disolvente para posteriormente efectuar un proceso de sinterizado, mediante el cual se obtiene una densidad final de la pieza del 95 al 98 %. La Figura 2.42, presenta ejemplos de modelos fabricados mediante solidificación por chorro Multifase [116].

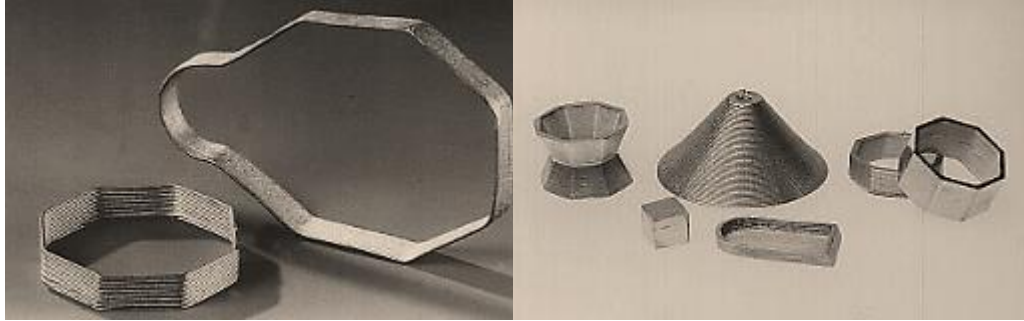


Figura 2.42. Modelos fabricados mediante la tecnología MJS [116].

-Materiales empleados [116]

- Metales y aleaciones de alto punto de fusión.
- Cerámicas.

-Ventajas del proceso [116]

- Se pueden producir prototipos de metal y aleaciones.
- Se pueden producir piezas de geometrías complejas, con alta precisión y repetibilidad.

-Desventajas del proceso [116]

- Se requiere un postprocesamiento de sinterizado.

2.1.3.10 Chorro de metal - Metal jet (MJ)

El proceso de chorro de metal es un método en donde las capas estampadas están formadas por gotas de un metal fundido. Este mecanismo es similar al de una impresora de chorro de tinta, pero a diferencia de la impresión 2D, la acumulación de capas forma una estructura 3D. Las gotas de metal fundido son expulsadas a través de una boquilla de metal en el cual un actuador piezoeléctrico mueve un diafragma. Las gotas se expulsan a una velocidad de 1 m/s y una frecuencia de 4-20 Hz. Con una boquilla de 50 μm de diámetro se pueden obtener tamaños de gota de 80 μm ; este tamaño es comparable con el tamaño de la gotita de tinta de una impresora comercial de chorro de tinta. Sin embargo, el potencial del método ha sido demostrado por la realización de gotas con un tamaño de sólo 8 μm . Cuando las gotas chocan con la superficie, siguen siendo líquidas, esto reduce la exactitud de las piezas, pero mejora la densidad de compactación de la capa depositada. Por lo tanto se pueden obtener densidades máximas del 98%. Como materiales estándar se han utilizado metales de bajo punto de fusión como una aleación fusible (Bi-Pb-Sn-Cd-In) con un punto de fusión a 47 °C o una soldadura con un punto de fusión a 183 °C. La Figura 2.43 muestra ejemplos de modelos hechos por el método de chorro de metal. Una boquilla para metales de alto punto de fusión se encuentra en desarrollo y tendrá la finalidad de depositar gotas de oro o níquel. La velocidad de formación de la pieza puede ser mejorada mediante múltiples cabezas de boquilla de impresión [72].

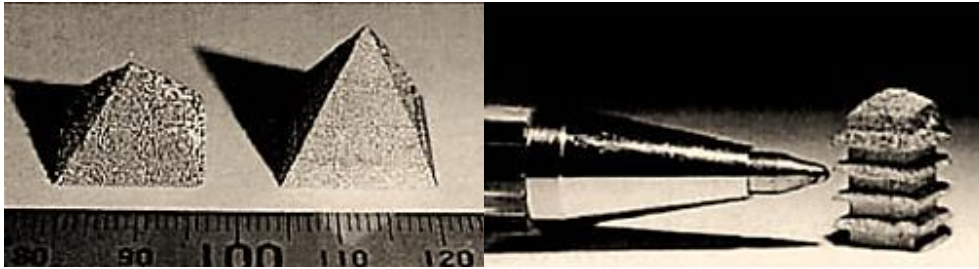


Figura 2.43. Modelos fabricados por la tecnología chorro de metal (metal jet, MJ).

2.1.3.11 Modelado por deposición directa con láser - Direct laser deposition modeling (DLDM)

La tecnología (DLM) tiene la capacidad de fabricación directa de piezas de metal [117]. El proceso utiliza un haz de láser enfocado como fuente de calor para crear un charco de masa fundida en un sustrato subyacente. El material en polvo se inyecta entonces en el baño fundido a través de boquillas. El polvo entrante es unido metalúrgicamente con el sustrato tras la solidificación. La pieza se fabrica capa por capa de acuerdo al modelo CAD. Después de que el segmento de datos se traduce en trayectorias del láser, un bosquejo de cada característica de la capa se genera y a continuación la capa es depositada utilizando una técnica de barrido para la fabricación de una sola capa. Después de la deposición de una sola capa, las capas siguientes se depositan mediante el incremento de las boquillas y la lente de enfoque del láser en la dirección Z, hasta que la pieza tridimensional se ha completado. Para depositar material en polvo con éxito, el haz de rayo láser y el polvo deben ser cuidadosamente controlados y entendidos. Por lo anterior, se han desarrollado simulaciones y validaciones experimentales del sistema de suministro de polvo y su interacción con el láser y el gas protector, empleados en el proceso de deposición con láser. Las simulaciones y experimentación efectuadas han permitido aumentar el conocimiento del proceso DLDM y así tener un cuidadoso control del proceso.

La calidad y eficiencia del proceso depende de la corriente de polvo que se forma debajo de la boquilla. El realizar modelos numéricos de la distribución y concentración del polvo es complejo, debido a los fenómenos implicados en el flujo de turbulencia de dos fases. Se han realizado investigaciones del flujo de polvo junto con las propiedades del mismo, las geometrías de boquilla, y la protección de gas [118].

Un modelo 3D fue usado para predecir cuantitativamente la variación de concentración de corriente de polvo para facilitar el diseño de un inyector coaxial, Figura 2.44(a). La alberca de material fundido formada durante la deposición láser es un factor crítico y la geometría de ésta alberca es un factor crucial en la determinación de la calidad de revestido. La Figura 2.44 (b), muestra un modelo desarrollado para simular el proceso coaxial de recubrimiento de láser (coaxial laser cladding process) con la inyección de polvo, la cual incluye las interacciones láser-sustrato y láser-polvo. El modelo concibe fenómenos asociados, tales como fundición, solidificación, evaporación, evolución de la superficie libre e inyección de polvo [119].

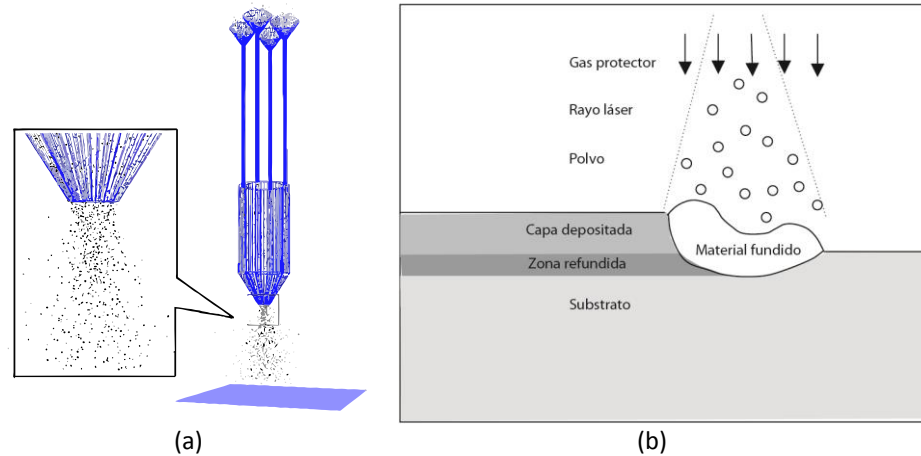


Figura 2.44. Esquema del proceso DLDM: (a) simulación 3D empleado para predecir la concentración de polvo según el diseño de la boquilla de inyección, (b) diagrama del proceso DLDM.

2.1.3.12 Atomizado de metal - Metal spray (MS)

En el método MS se atomizan gotas de metal líquido sobre un molde. Los materiales comúnmente usados son el zinc y el acero [38]. El sistema de atomizado metálico comprende de una corriente continua de baja tensión que es alimentada por una fuente muy similar a la de una maquina soldadora de arco, una consola para la regulación de aire comprimido, una pistola de arco spray, y la materia prima que es suministrada por cable o polvo metálico [120]. La pistola de pulverización es de aproximadamente el tamaño de un pulverizador de pintura y puede ser fácilmente manipulada por la mano o montada en un robot [121]. En el proceso, los rodillos accionados alimentan un alambre eléctricamente aislado en una pistola pulverizadora; posteriormente se forma un arco en la parte delantera de la pistola. El arco funde el alambre y el material fundido se sopla en forma de partículas finas mediante un chorro de pulverización para formar una capa. Este proceso se repite hasta que la pieza se ha completado [48], Figura 2.45.

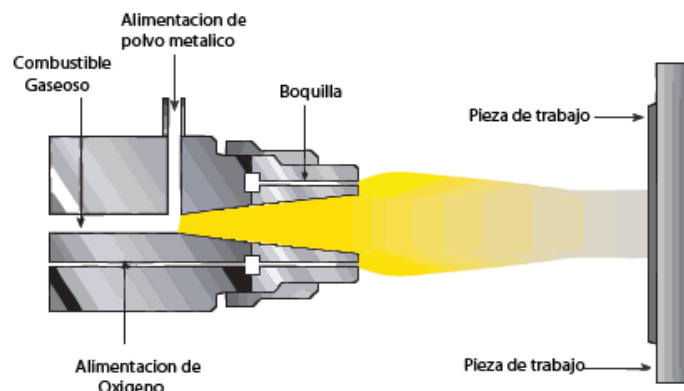


Figura 2.45. Esquema del proceso MS [122].

El mayor problema con el atomizado de metal es el esfuerzo térmico el cual causa la deformación de la pieza. De la información disponible actualmente se puede esperar que el atomizado de metal se convierta en un proceso interesante, especialmente para la creación de grandes moldes (los agujeros pequeños son difíciles de rellenar con este método) [38].

-Requerimientos de Instalación

- Equipo de protección para el usuario.

2.1.3.13 Deposición química de vapor con láser - Laser chemical vapor deposition (LCVD)

La deposición química de vapor con láser (LCVD) es una variante de la deposición química de vapor (CVD). EL LCVD es un proceso para la generación de depósitos sólidos en la superficie de un sustrato mediante la inducción de reacciones químicas de un adecuado vapor reactivo a través del uso de un haz de láser [123], Figura 2.46. El LCVD tiene la ventaja añadida del control geométrico del depósito, mediante el control de la ubicación del rayo láser. El LCVD puede ser utilizado para depositar diferentes tipos de materiales, incluyendo metales y cerámicas. Tiene el potencial para construir redes de forma libre de dispositivos que contienen múltiples materiales o materiales graduados incluso funcionalmente. El tamaño de la característica del depósito depende del tamaño del punto láser, que oscila entre 5-500 μm ; las características finas se pueden fabricar con un punto pequeño del láser, mientras que áreas de grandes tamaños pueden construirse rápidamente usando un punto de láser más grande.

Los materiales preparados por LCVD son típicamente de alta calidad puesto que el material depositado generalmente posee alta pureza, baja porosidad, y un alto grado de cristalinidad. Estos atributos son el resultado de deposición de un átomo a la vez, dando lugar a materiales que tienen propiedades mecánicas superiores y estabilidad térmica, en comparación con los materiales depositados por otras técnicas [124]. Las técnicas alternativas para depositar cerámica y metales, tales como recubrimientos, pulverización catódica o evaporación, a menudo producen materiales que contienen tensiones residuales no deseadas [125]. El proceso LCVD es también muy adecuado para la preparación de estructuras graduadas o laminado que mejoran las propiedades mecánicas.

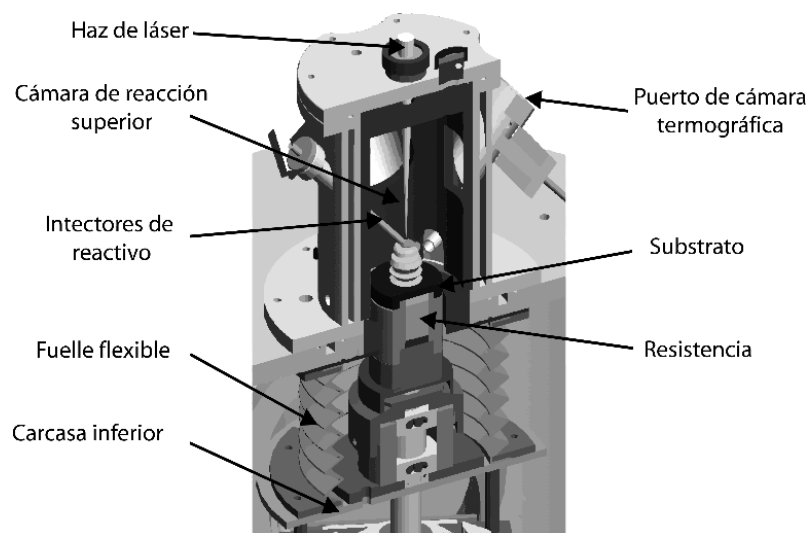


Figura 2.46. Esquema del sistema LCVD [124].

El proceso LCVD se divide en dos categorías principales (fotolítica y pirolítica) dependiendo del mecanismo que inicia las reacciones químicas. Aunque la mayoría de los sistemas se basan predominantemente en una clase de reacciones, existen pocos que combinan técnicas fotolíticas y pirolíticas [126]. El proceso fotolítico LCVD utiliza fotones de un rayo láser para romper los enlaces químicos dentro de los gases reactivos. Las moléculas se descomponen o bien se recombinan para formar un polvo o depósito sólido sobre la superficie del sustrato. Como los gases a lo largo de la longitud de la trayectoria deben absorber los fotones de láser y generar partículas sólidas, la resolución espacial del depósito resultante puede ser pobre. Los láseres pulsados en el espectro ultravioleta se usan típicamente para reacciones fotolíticas. Una ventaja del proceso fotolítico, es la ausencia de las altas temperaturas que pueden dañar el sustrato o crear tensiones térmicas dentro de las capas depositadas.

El proceso LCVD pirolítico es un proceso impulsado térmicamente en los que se utiliza la energía de un haz de láser para calentar la superficie de un sustrato a la temperatura requerida para la deposición química de vapor (CVD). Este proceso permite un control excelente resolución espacial ($0.5 \mu\text{m}$) debido a que las reacciones químicas se limitan a la zona caliente creado por el punto láser enfocado. Esta zona se define por el diámetro del haz de láser y las propiedades térmicas y ópticas del sustrato; los láseres de CO_2 y Nd: YAG se utilizan normalmente para procesos pirolíticos. La alta resolución proporcionada por las técnicas de pirolíticos los hace más adecuados para la fabricación y creación rápida de prototipos de piezas pequeñas y complejas [5].

Existen dos métodos para la producción de piezas tridimensionales a través de LCVD pirolítico. La escritura directa, Figura 2.47(a) deposita un patrón de líneas finas sobre el sustrato moviendo el sustrato perpendicular al haz de láser. Estos patrones de dos dimensiones se pueden formar sobre depósitos previos para crear una pieza en capas tridimensional. Las deposiciones de fibra son posibles, Figura 2.47 (b). En este caso, el sustrato se mueve paralelo al eje del haz láser a una tasa igual a la tasa de deposición de la fibra. Mediante el método se pueden producir estructuras tales como muelles en espiral, antenas helicoidales o compuestos reforzados con fibra laminar [124].

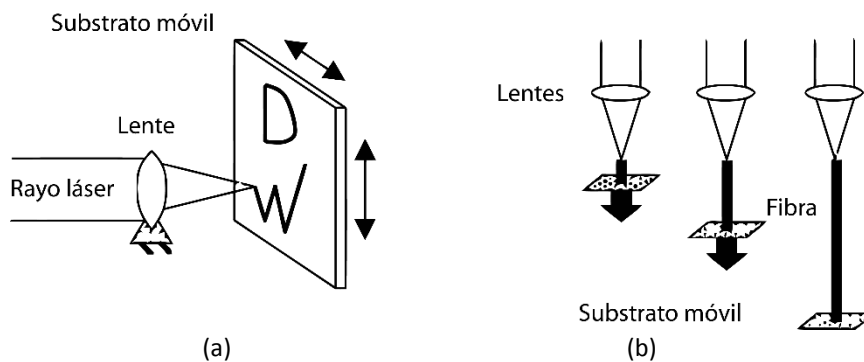


Figura 2.47. LCVD: (a) grabado directo, (b) grabado por fibra.

La Figura 2.48, muestra algunos ejemplos de estructuras de grafito realizadas a través de la escritura directa sobre un sustrato de grafito.

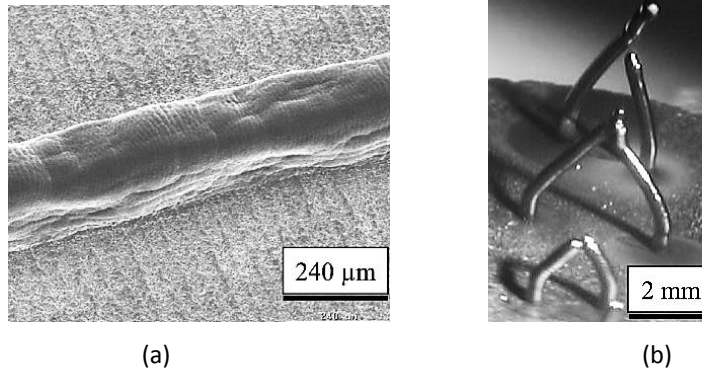


Figura 2.48. Deposición de grafito: (a) escritura directa en líneas con 20 capas, (b) escritura directa con fibras.

2.1.3.14 Prototipado rápido por congelamiento - Rapid freeze prototyping (RFP)

El RFP es un método que usa agua como materia prima. El método usa una unidad de agua presurizada, una plataforma X-Y para controlar la geometría correcta de la pieza, un eje Z elevador para levantar el inyector y crear las capas sucesivas, un inyector y un congelador. El inyector tiene un sistema que dispara sólo la cantidad necesaria de material de acuerdo a como éste se vaya demandando, Figura 2.49. Al inyector llega el agua por un tubo de teflón. Una vez que el agua deja el tubo de teflón y antes de que se lance al sustrato, pasa por el inyector, donde se encuentra con acero inoxidable, sulfuro de polifenileno, caucho de etileno/polipropileno y finalmente zafiro. El uso de estos materiales es importante para evitar la adherencia del agua antes de salir del inyector. Los materiales que comprenden el tubo de alimentación y el inyector son especiales para permitir que el agua fluya libremente con una mínima adhesión [127]. Como la técnica de RFP usa solamente agua como material de trabajo, el ambiente de trabajo es mucho más limpio que en cualquier otro sistema RP. Además el sistema RFP ofrece tiempos rápidos de construcción, bajo consumo de energía en el proceso, materia prima barata, separación limpia y fácil del sustrato, y buen acabado superficial.

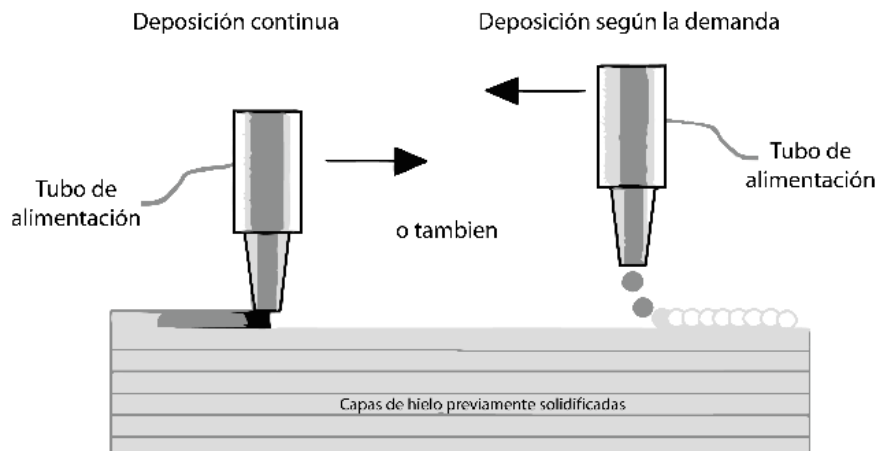


Figura 2.49. Esquema del proceso RFP [128].

La Figura 2.50, muestra una pieza de hielo fabricada por RFP. El congelador que se ha utilizado puede alcanzar los -20°C . Entre las desventajas se encuentran que la pieza creada debe mantenerse a una temperatura igual o menor a la del punto de congelación del agua, las propiedades mecánicas de los prototipos son pobres y no se pueden usar como piezas final [128].

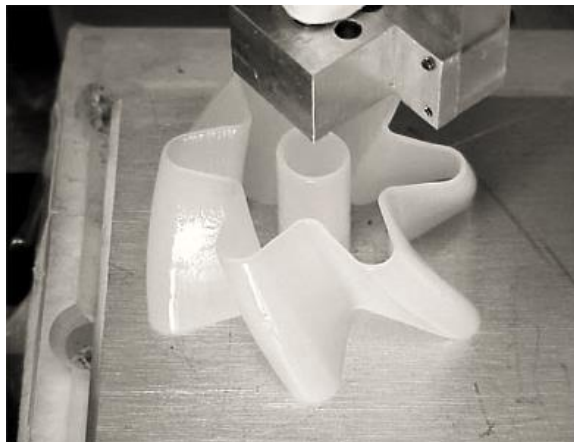


Figura 2.50. Parte de hielo fabricada por RFP.

2.1.3.15 Manufactura por deposición con multiboquillas - Multi-nozzle deposition manufacturing (MDM)

El MDM es un sistema que realiza procesos de extrusión e inyección mediante cuatro boquillas controladas por una computadora. Para asegurarse de que el proceso de extrusión/inyección se efectúe, los materiales sólidos deben transformarse a un estado líquido, los cuales se introducen en cada fuente de material que es un recipiente que tiene en su parte inferior un tubo blando conectado a una boquilla. Debido a que las propiedades hidrodinámicas varían según diferentes materiales, se emplean diversos tipos de boquillas. Para los materiales líquidos de viscosidad alta, la boquilla emplea un diseño de inyección de alta presión con aire comprimido. Para los materiales con viscosidad media, el material se inyecta empleando una bomba de tornillo. Para los materiales de baja viscosidad, una boquilla de solenoide es suficiente para generar un chorro de material.

La tecnología MDM puede construir andamios capa por capa, Figura 2.51. El proceso se lleva a cabo en un ambiente de temperatura bajo 0°C , en un refrigerador. La computadora controla los inyectores para moverse en direcciones X-Y y deposita el material líquido sobre la plataforma de acuerdo al área definida por los modelos digitales. La capa de material depositado se congela en la plataforma. Después la plataforma se mueve hacia abajo (dirección Z) un espesor de la capa tras el proceso de formación de cada capa. De esta manera el andamio congelado se apila capa por capa. Después de que el proceso de fabricación se ha completado, un proceso de deshidratación es necesario para remover el disolvente y el agua congelados fuera de los andamios. La Figura 2.52 muestra una representación esquemática del sistema MDM [129].

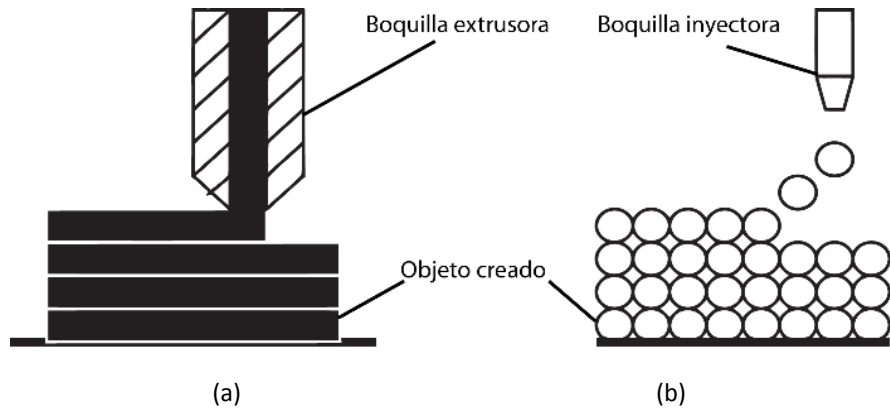
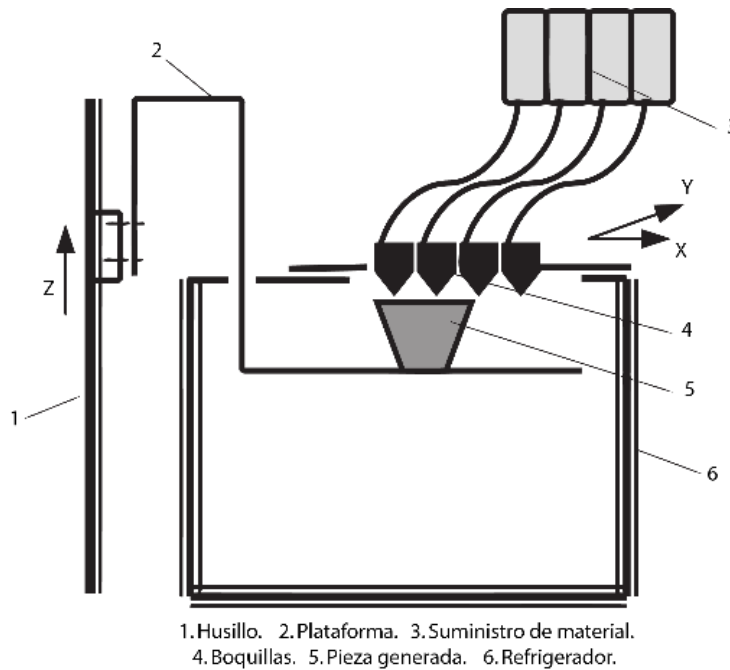


Figura 2.51. Esquema del proceso MDM: (a) extrusión, (b) inyección.



1. Husillo. 2. Plataforma. 3. Suministro de material. 4. Boquillas. 5. Pieza generada. 6. Refrigerador.

Figura 2.52. Representación esquemática del sistema MDM.

2.1.3.16 Modelado por multichorro - Multi-jet modeling (MJM)

El MJM se basa en un cabezal que contiene 96 boquillas pequeñas en una matriz lineal que se mueve en el plano X-Y sobre una plataforma. Para la formación de cada capa una o varias boquillas del cabezal se activan para dispensar microgotas de un polímero termoplástico. [1], Figura 2.53. Las gotas calientes de material se unen a la capa anterior que se acaba de imprimir. En caso de requerir estructura de soporte se construyen pequeños pilares de apoyo en las zonas donde se requieren. Cuando cada capa es completada la plataforma se baja con relación a la cabeza de impresión y la siguiente capa es depositada. Cuando todas las capas se han completado la pieza se retira de la máquina y la estructura de soporte se rompe [1], [130]. La Tabla 2.16 presenta características técnicas para la mayoría de los sistemas que emplean la tecnología MJM.

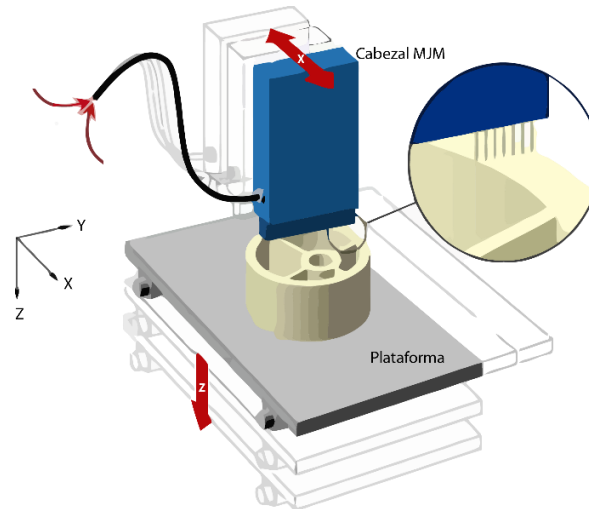


Figura 2.53. Esquema del sistema MJM [131].

Tabla 2.16. Características técnicas disponibles del sistema MJM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[19]
Espesor mínimo de capa	0.016	mm	[19]
Espacio de trabajo	298 x 185 x 203		[19]
Velocidad de trabajo	15	mm/min	[19]
Acabado superficial	0.05	mm	[19]
Precisión	0.025	mm	[19]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramental rápido, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

- Termopolímeros.

-Ventajas del proceso [130]

- El equipo se puede emplear en un entorno de oficina.

-Desventajas del proceso [130]

- El acabado superficial es muy pobre.
- La resistencia mecánica de las piezas es pobre.

-Aplicaciones

- Prototipos de visualización, Figura 2.54.

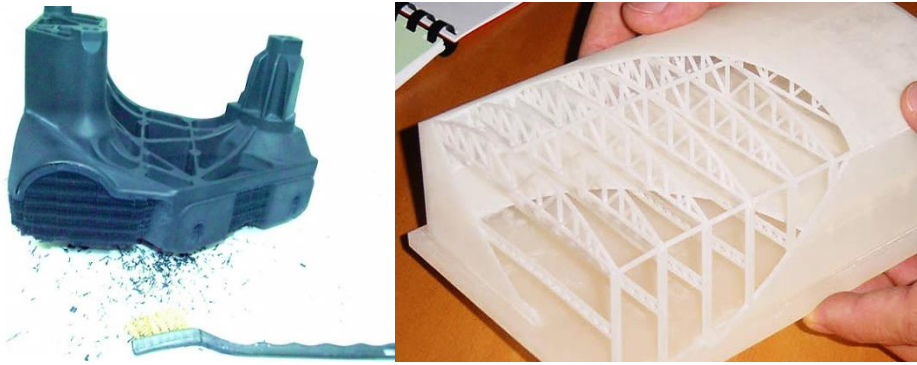


Figura 2.54. Ejemplos de prototipos fabricados mediante MJM.

-*Requerimientos de Instalación* [19]

- Conexión eléctrica de 110V CA 50/60Hz Monofásico.

-*Compañías fabricantes de la tecnología* [130]

- 3D Systems (EUA).

2.1.3.17 Inyección de alta viscosidad - High-viscosity jetting (HVJ)

El proceso HVJ consiste en el cambio de un patrón que es empleado para formar cada una de las capas que forman el objeto a ser impreso. El HVJ emplea un mecanismo basado en el desplazamiento de una pequeña gota de un material imprimible lleno de polvo y pasta de polímero, a un lugar deseado sobre un sustrato. La unidad fundamental se compone de un solo chorro de material, que está controlado por presión de aire, la distancia del sustrato y la duración del pulso de inyección, Figura 2.55. La precisión del proceso está en función del tamaño de la boquilla que se emplea para depositar el material. La velocidad de producción de HVJ es similar a los métodos actuales de producción de alto volumen [29]. Actualmente el proceso se encuentra en investigación y se han desarrollado experimentos del proceso de deposición del material, con el fin de determinar las diferentes formas y tamaños de capa que se pueden conseguir.



Figura 2.55. Principio del proceso HVJ.

2.1.3.18 Robocasting (RBC)

La técnica Robocasting fue desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Sandia en los Estados Unidos. El proceso se basa en la deposición mediante un robot de lodos de cerámica (mezclas de polvo de cerámica, agua, y pequeñas cantidades de modificadores químicos) a través de una jeringa, Figura 2.56 (a). El material, que fluye como un batido de leche a pesar de que el contenido de agua es de sólo 15 por ciento, se deposita en capas delgadas secuenciales sobre una base previamente calentada, Figura 2.56(b).

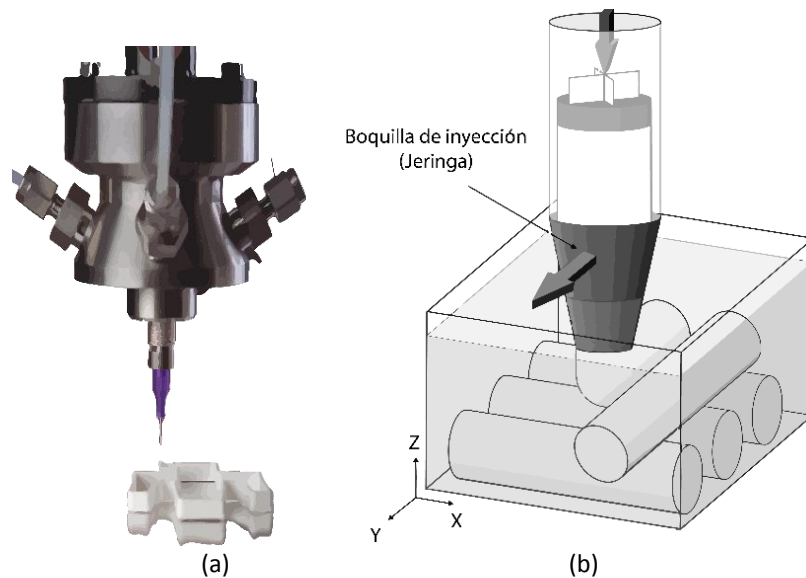


Figura 2.56. Boquilla de inyección del sistema Robocasting; (a) fotografía del cabezal inyector; (b) esquema del proceso Robocasting.

El reto en Robocasting consiste en poder generar cerámicas que contengan más sólido que líquido, pero que a la par presenten una buena consistencia y flujo. Al comprender la ciencia de coloides y la manipulación de la química de la superficie de polvo, se es posible generar pastas cerámicas que son hasta un 85% de cerámica y 15% de agua pues el alto contenido en sólidos minimiza la cantidad de secado y la contracción de la pieza final. Las propiedades del lodo cerámico son esenciales para el secado rápido del material. Dentro de 10 a 15 segundos después de ser depositados, la mezcla debe secarse de modo que la siguiente capa pueda ser añadida. Si la mezcla cerámica es demasiado fluida, los depósitos de capa saldrán como gotas que se propagan sin control. Si es demasiado espesa los depósitos son como una cuerda. Con la consistencia adecuada, cada cordón depositado es una sección transversal rectangular con paredes relativamente rectas. Tal estructura se convierte en una base sólida sobre la que más capas pueden ser depositadas. Después de que la parte está formada por capas y se secó completamente, se efectúa un proceso de sinterización a temperaturas que oscilan entre 1,000-1,700 °C aproximadamente durante dos horas; esta temperatura depende del material cerámico empleado [132], [72].

-Materiales empleados

Cerámicos:

- Óxido de aluminio.
- Titanato de bario.
- Titanato de bario estroncio.
- Vidrio bioactivo.
- Ferrita de cobalto.
- Feldespato.
- Hidroxiapatita.
- Óxido de hierro.
- Caolín.
- Titanato zirconato de plomo.
- Mullita.
- Dióxido de silicio.
- Carburo.
- Nitruro de silicio.
- Óxido de zinc.
- Óxido de circonio.

Compuestos:

- Al₂O₃ / Al.
- Al₂O₃ / Mo.
- Al₂O₃ / TiCuSil.
- BaTiO₃ / ZrO₂.
- Nicrom / ZrO₂.
- Poroso / Denso Al₂O₃.
- Poroso / Denso PZT.
- PZT / polímero.
- Si₃N₄ / C de nanotubos.
- ZrO₂ / Al₂O₃.

- ZrO₂ / mullita.

Metales:

- Oro.
- Manganeso.
- Molibdeno.
- Niquel.
- Cromo.
- Renio
- Plata.
- Acero inoxidable.
- Tungsteno.

Polímeros:

- Epoxy.
- Polímeros termoplásticos.

-Ventajas del proceso

- Tiene la capacidad de aplicar más de un material a la vez, ya sea un material cerámico o un metal dentro de una parte sin causar daño estructural.
- La técnica permite una colocación discreta de un material "fugitivo" que se evapora o quema durante el proceso de cocción. Esto es útil para crear una parte que tenga canales internos de refrigeración en su estructura.

-Aplicaciones

- Prototipos de validación y funcionales.

-Compañías fabricantes de la tecnología.

- Robocasting Enterprise (EUA).

2.1.3.19 Extrusión y deposición de metales semisólidos - Extrusion and deposition of semi-solid metals (EDSSM)

El sistema de extrusión y deposición de metales semisólidos, permite obtener piezas totalmente densas, el sistema es desarrollado por la Organización Holandesa de Investigación Científica Aplicada y la Universidad de Twente, empleando metales de bajo punto de fusión. El proceso emplea un aparato de extrusión similar a un viscosímetro. El material se suministra en forma de alambre y se transporta con un conjunto de 4 ruedas de fricción. La presión se puede variar a través de la velocidad de las ruedas de fricción. Con el fin de crear capas el material se extruye a través de la cabeza de extrusión sobre una placa base que se mueve en las direcciones X-Y. El movimiento sobre el eje Z se lleva a cabo manualmente para proceder con la deposición de la siguiente capa. La Figura 2.57, ilustra el esquema del sistema EDSSM.

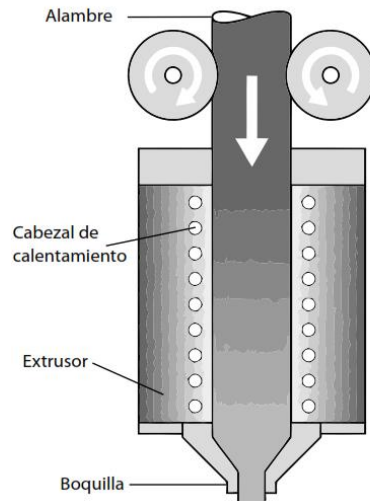


Figura 2.57. Esquema del sistema EDSSM.

Con el fin de controlar tales procesos es necesario el conocimiento sobre el flujo y el comportamiento de solidificación de metales semisólidos (SSM). Se han realizado pruebas experimentales que han demostrado que la extrusión y deposición de materiales metálicos es factible para la creación de objetos físicos 3D. Investigaciones actuales se centran en automatizar el proceso de deposición y el movimiento en X-Y y Z. La relación entre la velocidad de extrusión y el movimiento en el plano X-Y son críticos para el proceso y requieren su optimización [133].

2.1.3.20 Formado libre por extrusión - Extrusion freeforming (EFF)

El proceso de formado libre por extrusión emplea una pasta cerámica que se conforma empleando disolventes volátiles que se extruyen a temperatura ambiente empleando boquillas finas para crear estructuras en 2D y 3D, Figura 2.58. El filamento extruido puede alcanzar como diámetro mínimo los 80 μm , lo que proporciona la capacidad de controlar el tamaño de poro, la distribución del tamaño de poro y la fracción de volumen cerámico. El proceso tiene la versatilidad de que cualquier polvo cerámico puede ser empleado y no implica un calentamiento o enfriamiento, y es adecuado para la producción en masa. En el modelado convencional por deposición fundida (FDM), debido a la necesidad de enfriar el filamento termoplástico depositado a partir de la temperatura de fusión, la contracción puede inducir el alabeo de las capas depositadas, este fenómeno no ocurre en el proceso EFF, debido a que el material es depositado a temperatura ambiente [134].

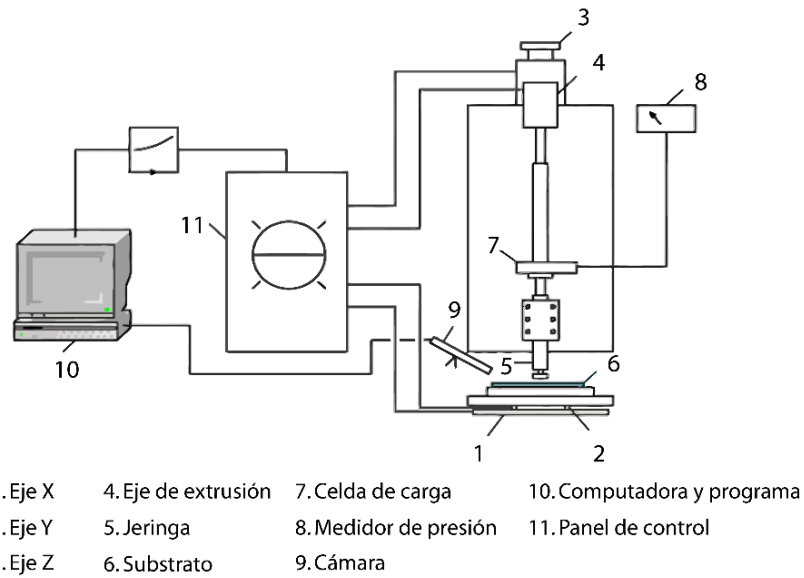


Figura 2.58. Esquema del sistema EFF.

-Materiales empleados [134]

- Hidroxiapatita.
- Alúmina.
- Cuarzo.
- Ingrediente orgánico.
- Materiales piezoeléctricos.

-Ventajas del proceso [134]

- La pasta es compatible con una gran variedad de polvos cerámicos.
- La extrusión de la pasta se lleva a cabo a temperatura ambiente sin procesos de polimerización.

-Aplicaciones

- Prototipos cerámicos, tales como andamios de tejidos y panales, Figura 2.59.

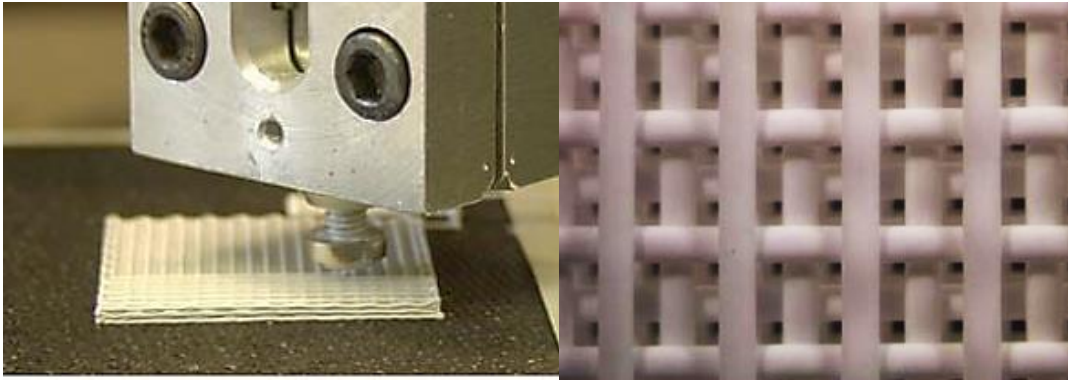


Figura 2.59. Ejemplo de estructuras fabricadas empleando EFF.

2.1.3.21 Fabricación de formas libres por deposición electrofotográfica de polvos - Electrophotographic powder deposition for freeform fabrication (EPDFF)

El proceso EPDFF es una técnica que deposita polvo capa por capa utilizando la impresión electrofotográfica [135]. El proceso de electrofotografía es el proceso empleado en fotocopiadoras e impresoras de polvo del tóner sobre el papel. En este proceso, el polvo es recogido y depositado utilizando una superficie cargada por fotoconductores y luego depositado sobre una plataforma de construcción. El sistema emplea un polímero en polvo de tóner para construir componentes mediante la fusión de cada capa de polvo de impresora utilizando una placa de compactación en caliente. Esta tecnología es capaz de imprimir en polvo con una alta precisión y resolución. Cada capa de polvo que se imprime tiene la forma de la sección transversal de la parte a construir. Dentro del proceso de deposición electrofotográfica de polvos existen dos variantes: en la primera cada capa de la sección transversal de la pieza se imprime y se funde térmicamente con las capas anteriores, en la segunda variante, una primera capa delgada de polvo se deposita de una manera uniforme por un rodillo y luego un polvo aglutinante se imprime en la sección transversal de la capa, el aglutinante es entonces fusionado térmicamente de manera que se difunde y se une la capa de polvo.

El sistema consta de un sistema automatizado de dos ejes que realizan la deposición de polvo, y una plataforma de construcción y de control, así como un fusor térmico y un sistema de compactación. Una transmisión de correa mueve la plataforma de construcción en el plano horizontal X-Y, mientras un tornillo de avance impulsado por un servomotor mueve la plataforma en dirección Z. El sistema de deposición consta de un tambor fotoconductor que tiene un recubrimiento de un material fotoreceptor que no es conductor a una determinada longitud de onda y es conductor al exponerse a la luz. Al girar el tambor su superficie es limpiada para posteriormente ser cargada de polvo por un rodillo extra de poliuretano. Posteriormente la superficie cargada es selectivamente descargada por un láser UV, el cual traza la capa a generar y vuelve conductora la superficie expuesta descargando el polvo innecesario, Figura 2.60, [135]. En la Figura 2.61, se puede apreciar un modelo fabricado por la tecnología EPDFF.

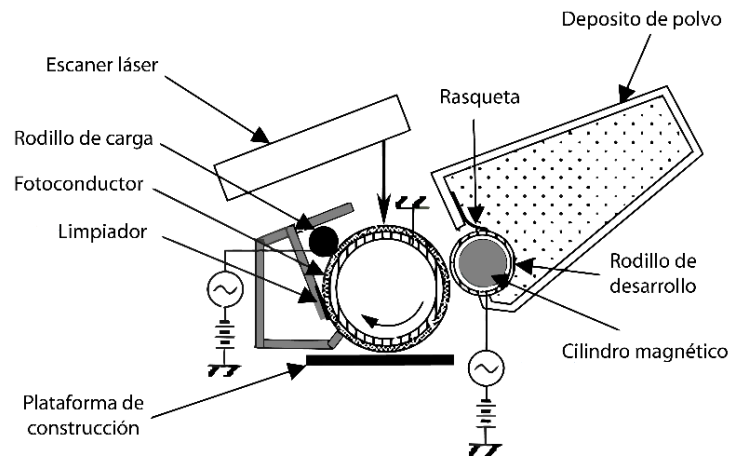


Figura 2.60. Representación esquemática del sistema EPDFF.

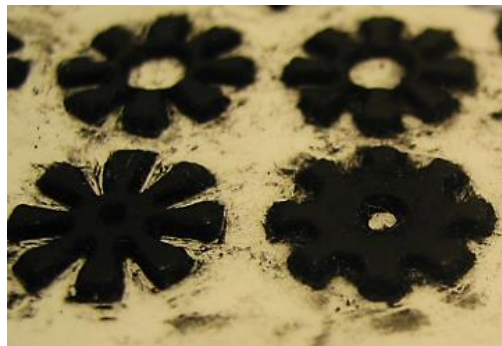


Figura 2.61. Pieza fabricada empleando EPDFF, [135].

2.1.3.22 Manufactura por deposición de moldes de formas - Mold shape deposition manufacturing (MOLD-SDM)

El sistema MOLD-SDM es una variación de la técnica de fabricación de deposición de formas (shape deposition manufacturing, SDM), el cual es un proceso de fabricación por adición y sustracción de capas y que se utiliza para construir una variedad de piezas de metal y polímero [136], [137]. En el proceso SDM el modelo CAD 3D se descompone en capas de espesor arbitrario sin la necesidad de ser planas. Esta descomposición adaptativa permite minimizar el número de capas que a su vez conduce a la reducción de los tiempos de fabricación.

En el proceso MOLD-SDM una capa de un modelo de cera se coloca sobre una capa construida previamente del molde; posteriormente se construye una capa del molde alrededor del modelo de cera, enseguida la siguiente capa del molde se añade siguiéndole la siguiente capa del modelo. Este proceso se repite hasta culminar con la generación del molde, Figura 2.62 (1) a (8). En ocasiones para garantizar la planicidad de cada capa se realiza una operación de fresado posterior a su adición, como en el proceso SDM. Una vez que se ha terminado de construir el molde se procede a la eliminación del modelo de cera, Figura 2.62 (9), obteniéndose un molde listo para la fundición. Posteriormente el material fundido se vierte en el molde para generar la pieza deseada, Figura 2.62 (10). Una vez solidificando el material fundido, éste se puede postprocesar mediante una amplia

gama de opciones. La Figura 2.62 muestra dos posibles alternativas: Figura 2.62, (11a) y (12a), el material del molde se retira y luego las operaciones de acabado, tales como la eliminación de los vertederos, se realizan; Figura 2.62 (11b) y (12b), el material del molde se utiliza como soporte, durante las operaciones de acabado y se retira después [138].

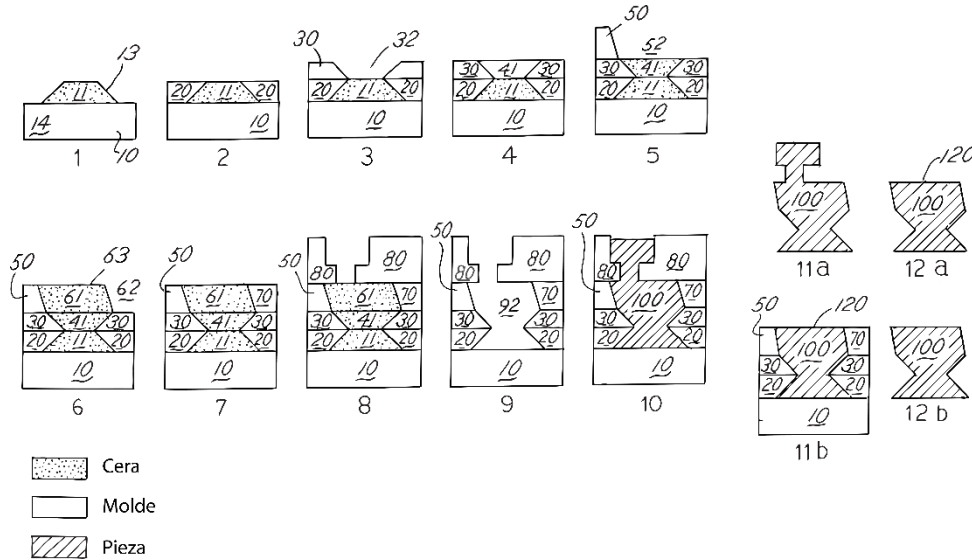


Figura 2.62. Secuencia del proceso MOLD-SDM.

-Materiales empleados

- Cerámicos.
- Arena de sílice.

2.1.3.23 Deposición por pulsos láser - Pulsed laser deposition (PLD)

La técnica PLD es empleada para depositar películas delgadas empleando pulsos de láser de alta potencia (típicamente $\sim 108 \text{ W/cm}^2$) para fundir, evaporar e ionizar el material de la superficie de un blanco. Este fenómeno es conocido como ablación láser y produce una columna de productos de ablación altamente luminosa que contiene iones y electrones del material a depositar, Figura 2.63. La columna de productos de ablación producida se expande fuera de la superficie objetivo, a velocidades que oscilan entre los 106 cm/s. El material extraído es depositado a razón de 10^{-6} m/s sobre un sustrato, sobre el cual se condensa y crece una película delgada. Las propiedades de la película se ven afectadas por la fluencia del láser, la presión del gas ambiente y la temperatura. El control de estas variables permite en cierta medida manipular las propiedades de la película para adaptarse a diversas aplicaciones individuales [139].

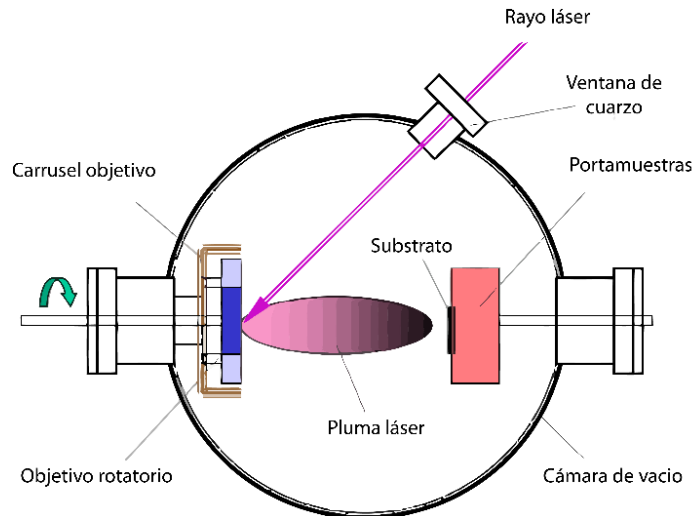


Figura 2.63. Esquema del proceso PLD [139].

El proceso PLD se puede dividir en las siguientes cuatro etapas.

1. Interacción láser de la radiación con el objetivo.
2. Dinámica de los materiales de ablación.
3. La descomposición de los materiales de ablación sobre el sustrato.
4. La nucleación y el crecimiento de una película delgada sobre la superficie del sustrato.

A pesar del amplio uso de la técnica, los procesos fundamentales que ocurren durante la transferencia del material objetivo al sustrato no se entienden completamente y, en consecuencia, muchos trabajos de investigación se enfocan en esto. Una variedad de técnicas, incluyendo la interferometría, espectroscopía óptica y fluorescencia inducida por láser (laser induced fluorescence, LIF), se utilizan para investigar las diferentes etapas de la creación de plasma y los tiempos de retardo y expansión [139].

-Ventajas del proceso [140]

- Permite la deposición de composición químicas exactas de materiales complejos como Oxido de Ytrio Bario y Cobre (Yttrium Barium Cooper Oxide, YBCO).
- Velocidades de deposición relativamente elevadas.
- Proceso extremadamente limpio.
- La deposición puede ocurrir en los gases de fondo, tanto inertes y reactivos.

-Desventajas del proceso [140]

- La estela de plasma creado durante el proceso de ablación con láser es altamente dirigida hacia adelante, por lo tanto, el espesor de material recogido en un sustrato es altamente no uniforme y la composición puede variar a través de la película.
- El material extirpado contiene glóbulos macroscópicos de material fundido, hasta un diámetro de ~ 10 micrones. La llegada de estas partículas en el sustrato es obviamente perjudicial para las propiedades de la película que se deposita.

- Los procesos fundamentales, que se producen dentro de los plasmas producidos por láser, no se entienden completamente, por lo que la deposición de materiales novedosos generalmente implica un período de optimización empírica de los parámetros de deposición.

-Aplicaciones [140]

- Producción de superconductores y aislantes.

2.1.3.24 Deposición selectiva de áreas por láser - Selective area laser deposition (SALD)

La deposición selectiva de áreas por láser (SALD) es un proceso que emplea un láser en movimiento el cual efectúa un calentamiento de un sustrato para inducir una reacción química en un gas precursor y así depositar un cierto material, Figura 2.64, [141], [142]. La deposición selectiva por láser se utiliza exclusivamente para producir materia sólida a partir de gas. En este método, un rayo láser enfocado produce un gas precursor que reacciona químicamente y produce un material sólido sólo cuando el haz de láser incide en un sustrato. A medida que el haz se mueve sobre el sustrato deja un rastro de material, que se puede utilizar para construir un objeto sólido [142]. Al escanear el láser un patrón controlado con pasadas repetidas sobre la misma zona, una forma de depósito a granel se construye. El principal factor que influye en el proceso es la interacción del gas precursor con el perfil de temperatura en el sustrato. La reflectividad en el sustrato, la conductividad y temperatura de fusión son importantes para SALD, el principal factor que controla la composición de depósito es la morfología del gas precursor [141].

El mayor obstáculo que presenta el proceso es la baja tasa de deposición de material asociada con la química convencional de deposición de vapor (CVD), que generalmente oscila de 100-1000 $\mu\text{m}^2/\text{hr}$. Por lo anterior se requiere que técnica SALD sea un proceso con una tasa de deposición mucho mayor. Otro requisito importante es garantizar la deposición uniforme a lo largo y en dirección perpendicular a la dirección de escaneo [142].

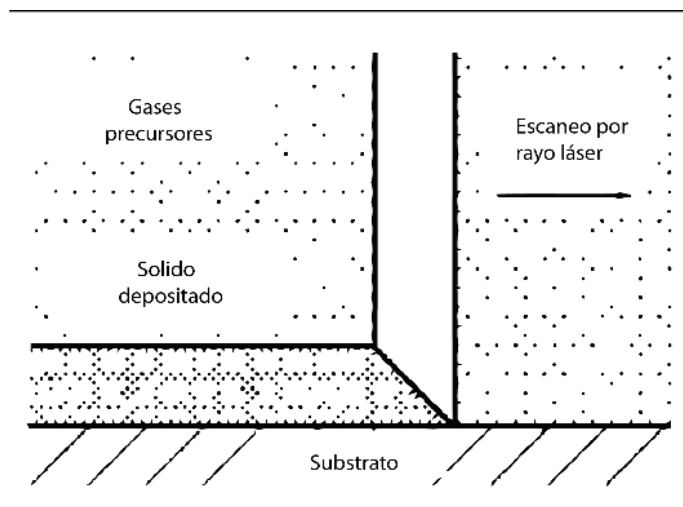


Figura 2.64. Esquema de proceso de la tecnología SALD [142].

-Materiales empleados

- Carbón.
- Cobalto.
- Oxido de silicio.
- Oxido de titanio.

-Ventajas del proceso

- La resolución no está limitada por el tamaño de grano del polvo o los espesores de las capas de polvo.
- El depósito de gas minimiza la porosidad inherente con los polvos, no se limita a las secciones planas transversales de composición uniforme
- Ofrece una capacidad casi ilimitada para producir variaciones internas en la composición por conmutación de gases precursores, o posiblemente incluso para crear huecos internos o conductos.

2.1.3.25 Deposición selectiva de áreas por láser e infiltración de vapor - Selective area laser deposition and vapour infiltration (SALDVI)

La tecnología SALDVI es una técnica que tiene el potencial para producir piezas de metal monolítico y compuesto así como formas cerámicas. SALDVI utiliza simultáneamente la técnica de deposición selectiva de áreas por láser (SALD) y la infiltración de vapor [143]. El proceso se inicia mediante la generación de un patrón bidimensional sobre un sustrato en polvo con un láser de escaneo. La alta temperatura producida en el punto focal del láser, descompone pirolíticamente un precursor de gas ocasionando que los productos de descomposición se infiltren y unan las partículas de polvo. Después de que cada patrón bidimensional ha sido escaneado y se infiltra, una nueva capa de polvo se extiende en la parte superior de la capa anterior infiltrada usando tecnología desarrollada para la sinterización selectiva por láser, Figura 2.65 [144]. El proceso se repite hasta que la forma deseada tridimensional se construye. La pieza final tiene una estructura compuesta de polvo el cual está unido en una matriz del material depositado.

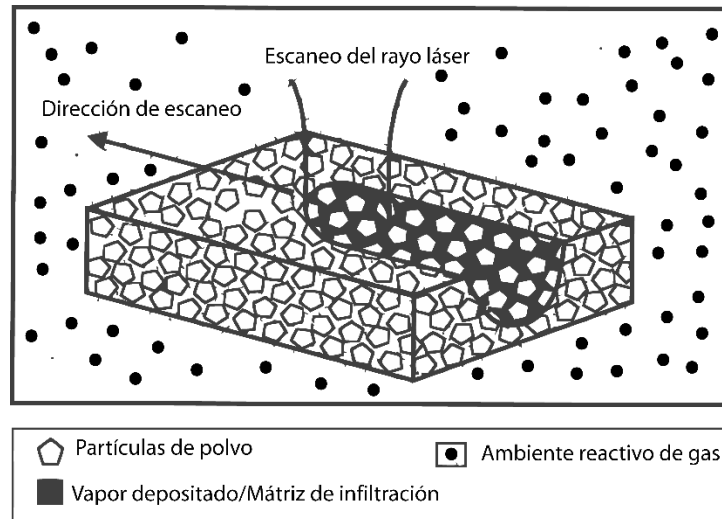


Figura 2.65. Representación esquemática del proceso SALDVI [145].

-Materiales empleados [146]

- Aluminio (Al).
- Nitruro de aluminio (AlN).
- Óxido de aluminio (Al₂O₃).
- Silicio (Si).
- Dióxido de silicio (SiO₂).
- Nitruro de silicio (Si₃N₄).
- Carburo de silicio (SiC).
- Titanio (Ti).
- Dióxido de titanio (TiO₂).
- Zirconio (Zr).
- Dióxido de zirconio (ZrO₂).
- Hafnio (Hf).
- Wolframio (W).
- Cobalto (Co).
- Hierro (Fe).
- Níquel (Ni).
- Cromo (Cr).
- Cobre (Cu).

-Ventajas del proceso [146]

- Genera formas completamente densas sin procesamiento posterior.
- Se pueden producir formas de una amplia gama de materiales.
- El proceso elimina las restricciones dimensionales inherentes a la infiltración tradicional de vapor químico (CVI) debido a que estas últimas se limitan a las formas pequeñas porque el exterior de las formas se tiende a sellar y evitar la infiltración adicional antes de que el interior este totalmente denso.

2.1.3.26 Micro moldeo capilar - Micromolding in capillaries (MIMIC)

El proceso MIMIC es una técnica litográfica suave que permite la generación de estructuras complejas de polímeros, cerámicas y metales en superficies planas y curvas [147]. El proceso básicamente comprende dos etapas principales: la formación del molde y el relleno capilar. Un bloque elastomérico (típicamente hecho de Polidimetilsiloxano, PDMS) que tiene una estructura de relieve estampada en su superficie, se prepara contra de un patrón mediante procedimientos desarrollados en la impresión por microcontacto, Figura 2.66. El patrón puede ser preparado por fotolitografía o por un rango otras técnicas similares. El molde de PDMS se coloca sobre la superficie de un sustrato y hace contacto conforme con esa superficie, y como resultado, una red de canales se forma entre el molde y el sustrato. El sustrato de recepción de la microestructura puede ser de forma plana o curva [148]. Cuando el material de depósito se coloca en los extremos abiertos de la red de canales, el líquido del material depositado llena de forma espontánea los canales por acción capilar. Después de llenar los canales se efectúa un proceso de curado para posteriormente retirar el molde de PDMS [147].

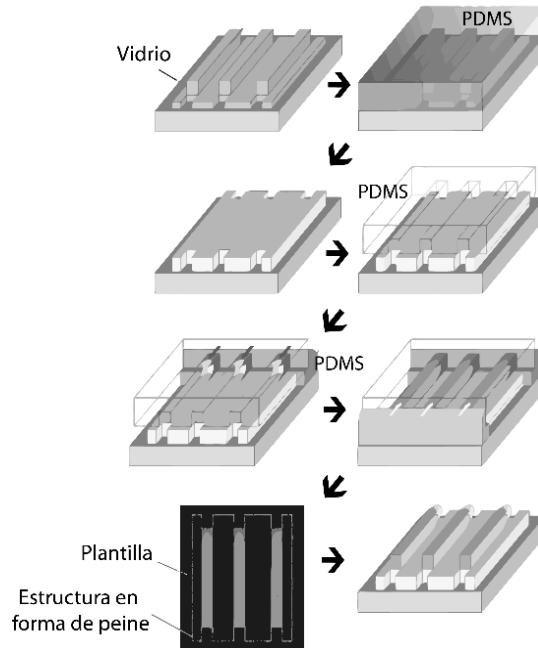


Figura 2.66. Estructura del proceso MIMIC.

-Ventajas del proceso

- Alta fidelidad en la transferencia de los patrones del molde para el sustrato.
- Flexibilidad en la generación de estructuras con diferentes formas, tamaños y geometrías.

2.1.3.27 Moldeado por inyección a baja presión – Low pressure injection molding (LPIM)

El proceso de moldeo por inyección a baja presión utiliza una mezcla de cera como aglutinante en un medio líquido para la fabricación de cuerpos cerámicos [149]. El aglutinante, típicamente compuesto de un 15 a 25 % de agua, se mezcla con polvo cerámico. Esta suspensión mezclada se inyecta en un molde con aire a baja presión para posteriormente enfriarse. La temperatura en el tanque controla la viscosidad de la suspensión y la temperatura de la matriz controla el tiempo de puesta a punto. La temperatura en el tanque y la matriz junto con la presión de inyección y el tiempo de retención se manipulan para asegurar la producción completa de una pieza bien formada. El proceso LPIM es muy similar a la técnica convencional de moldeo por inyección de cerámica, con la diferencia que las presiones empleadas están en el rango de 0.35-0.7 MPa (50-100 psi) vs 7-70 MPa (1000-10,000 psi) para el moldeo por inyección convencional de cerámica. Los materiales empleados son principalmente cerámicos.

2.1.3.28 Construcción de contornos - Contour crafting (CC)

La tecnología CC ha sido desarrollada por el Dr. Behrokh Khoshnevis de la Universidad del Sur de California con el apoyo de la National Science Foundation (NSF) y la Office of Naval Research (ONR) de Estados Unidos [150]. La técnica CC se basa en la adición de capas de material con espesores que van desde los 101 a 151 mm (4-6 pulg), [151]. El proceso consiste en formar las paredes de cada capa empleando una boquilla que extruye el material de construcción. Posteriormente y una vez construidas las paredes de una capa, la boquilla extrusora vierte material de construcción entre dos

paredes, con la finalidad de construir el núcleo del objeto [152]. La Tabla 2.17, presenta datos técnicos disponibles de la técnica CC.

Tabla 2.17. Datos técnicos disponibles de la tecnología CC.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	N.D	-	-
Espesor de capa	102-151	mm	[153]
Velocidad de trabajo	300	mm/min	[153]
Precisión	N.D	mm	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible.

La tecnología CC tiene un gran potencial en la automatización del proceso de construcción de estructuras completas, así como también subcomponentes, Figura 2.67. Las máquinas CC son ligeras y pueden ser rápidamente montadas, desmontadas y transportadas por una pequeña tripulación. La Figura 2.68 presenta el montaje de un inyector del proceso CC. La operación de construcción puede ser totalmente automatizada puesto que requiere un mínimo de supervisión, Figura 2.69; [154]. Usando el proceso CC, una casa o una colonia de casas, cada una con posibilidades de diseño personalizado, pueden ser construidas automáticamente en una sola corrida, embebiendo en cada casa todos los conductos eléctricos, de plomería y aire acondicionado [150]. A principios del año 2008, la mayor compañía de equipos de construcción, Caterpillar Inc., apoyo la investigación del CC, y esperan un día llegar a la construcción total de una casa en horas [153]. Mediante esta técnica también es posible la creación de grandes esculturas de cerámica.



Figura 2.67. Estructuras fabricadas por CC.

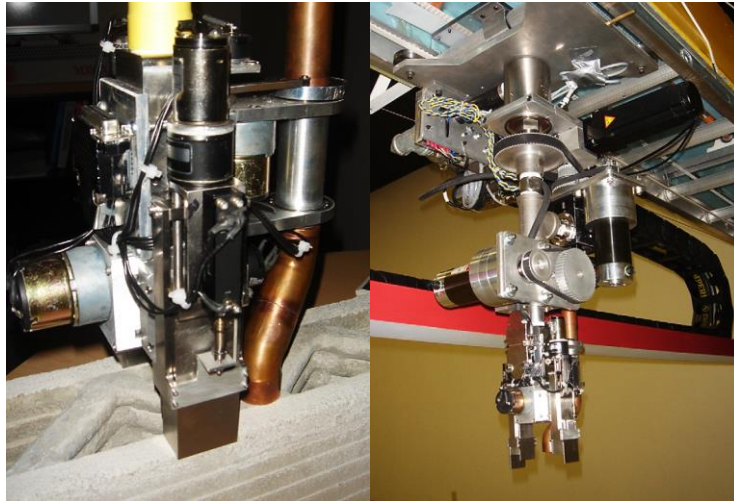


Figura 2.68. Inyector de cerámicas y plásticos del proceso CC [153].



Figura 2.69. Sistema CC [153].

-Ventajas del proceso [153]

- Bajos costos de construcción.
- Velocidad de la construcción superior, en comparación con los procesos convencionales.
- Flexibilidad de diseño arquitectónico, diseño personalizado.
- Seguridad y facilidad para el medio ambiente.
- Mejor acabado superficial en comparación con los procesos convencionales.

-Aplicaciones [153]

- Construcción de casas en situaciones de emergencia, casas para personas de bajo ingreso económico, casas comerciales.
- Construcción de hábitats en otros planetas.
- Construcción de estructuras en otros cuerpos celestes, tales como la Luna y Marte,

2.1.3.29 Impresión por chorro de tinta- Inkjet printing (IP o MM)

El proceso IP, también conocido como inyección térmica por cambio de fase (thermal phase change inkjets, single jet inkjet or inkjet method) usa una boquilla para la inyección de plástico y cera. El proceso es el mismo que utilizan las impresoras de inyección de tinta en papel, pero en este caso la impresora IP se utiliza para crear objetos 3D mediante la deposición de múltiples capas formadas por gotas que se solidifican. Las impresoras IP utilizan un termoplástico para construir el modelo, y un material a base de cera para construir las estructuras de soporte. En el proceso cada capa es fresada a un espesor preseleccionado antes de colocar la siguiente capa, después de este paso la siguiente capa es impresa. Inmediatamente después de cada impresión cada capa es expuesta a radiación ultravioleta para curarla y endurecerla. Al finalizar el proceso se retiran los soportes estructurales con la ayuda de un solvente y se obtiene la pieza final [16].

Hay dos tipos principales de impresoras, las de chorro continuo (CIJ) y las de chorro por demanda (DOD). En las impresoras de chorro continuo se tiene una inyección continua de gotas durante todo el proceso, mientras que en las impresoras de chorro por demanda las gotas son generadas sólo cuando son requeridas, Figura 2.70 [72]. La Tabla 2.18 presenta información técnica disponible de la tecnología IP.

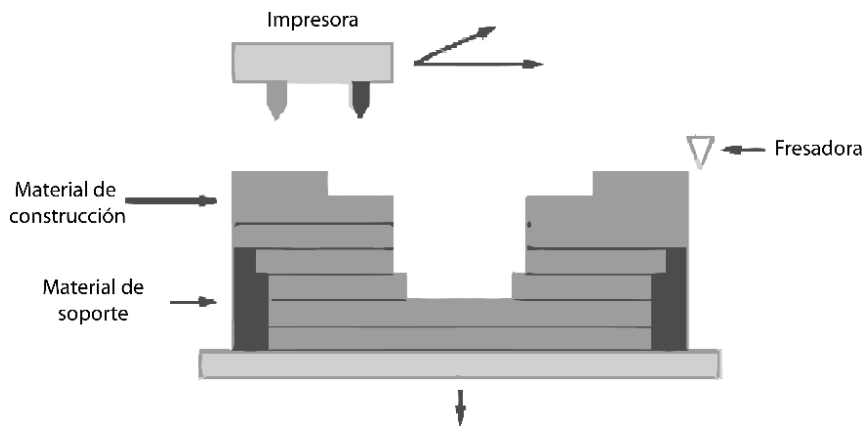


Figura 2.70. Representación esquemática del proceso IP.

Tabla 2.18. Características técnicas disponibles de los sistemas IP.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T	-	-
Status	Comercial	-	[16]
Espesor mínimo de capa	0.00625-0.1	mm	[155]
Espacio de trabajo	150x150x50	mm	[155]
Velocidad de trabajo	3000	mm/min	[155], [156]
Acabado superficial	25.4-60	µm	[155], [156]
Precisión	0.025-0.005	mm	[155], [156]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible.

-Ventajas del proceso

- El sistema tiene la habilidad de producir muy buenos acabados superficiales, como los alcanzados por maquinado CNC.

-Desventajas del proceso

- La técnica es muy lenta para piezas grandes.
- El proceso de fresado provoca mucho ruido, lo cual puede ser molesto.
- La selección de material de construcción es muy limitada.
- Las piezas construidas por el proceso IP tienen malas propiedades mecánicas y sólo son útiles para visualización y moldes de fundición.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- 3D Systems (EUA).
- Solidscape Inc. (Alemania).
- MicroFab (EUA).

2.1.3.30 Modelado por deposición fundida de metales - Fused deposition modeling of metals (FDMm aka FDMet)

El proceso de modelado por deposición fundida de metales se basa en el principio de funcionamiento del FDM. Al comienzo del FDMm se utilizaron filamentos de metal/polímero siendo posible la fabricación exitosa de estructuras 3D [157]; sin embargo, las partes mostraron propiedades de los materiales insuficientes, tales como la conductividad eléctrica, en comparación con las aleaciones a granel o puras (es decir, metales sin un aglutinante de polímero). Recientemente se han utilizado metales con bajo punto de fusión, como aleaciones de estaño-bismuto, alcanzando espesores de capa del orden de 0.7 mm (0.029 pulg.). El sistema FDMm o FDMet se encuentra aún en proceso de investigación. Las posibles aplicaciones de la técnica incluyen la construcción de, mandriles, moldes, matrices de encapsulación, aplicaciones de unión de dispositivos electrónicos, así como la impresión de circuitos en 3D [158]. La Figura 2.71 muestra el cabezal de deposición del sistema FDMet y la Figura 2.72 presenta ejemplos de piezas fabricadas empleando FDMm.

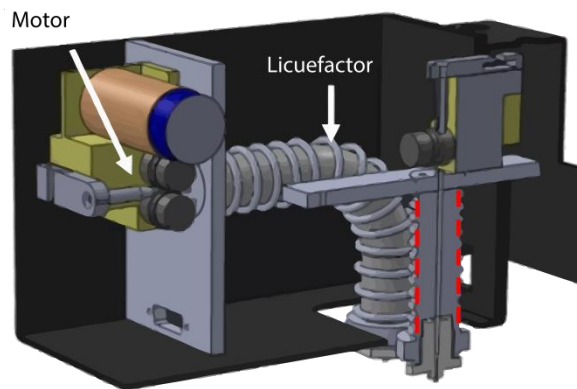


Figura 2.71. Cabezal de deposición de material empleado en el proceso FDMet, [159].

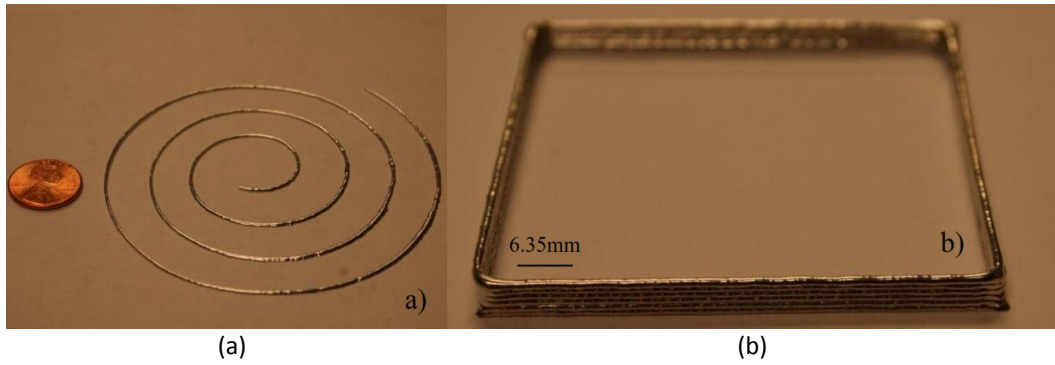


Figura 2.72. Piezas fabricadas empleando FDMet: (a) espiral empleando una sola capa, (b) estructura 3D empleando 6 capas, [159]

2.1.3.31 Manufactura de formas netas basado en goteo de alta precisión - High precision droplet based net-form manufacturing (HPDBNM)

La Universidad de California (UCI) en colaboración con el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL) han desarrollado una tecnología basada en la deposición precisa de nano gotas de metal fundido que se dirigen a un sustrato por carga electrostática y deflexión [160]. Un crisol en la parte superior del aparato contiene metal líquido que fluye a través de un orificio que forma un flujo capilar en la cámara de vacío inferior. Se ha desarrollado un método para generar patrones determinados de gotas por la ruptura del flujo capilar mediante la aplicación de específicas perturbaciones de amplitud modulada de una corriente a un flujo capilar viscoso, permitiendo un patrón predecible, flexible y controlado de gotas, Figura 2.73. La perturbación es creada por un transductor piezoeléctrico por encima del orificio. Las gotas de metal se forman y su trayectoria es controlada por electrodos de deflexión. El propio sustrato puede ser movido por una mesa de posicionamiento X-Y controlable para la fabricación de piezas en tres dimensiones, o el sustrato se gira para fabricar piezas con simetría axial, el uso de múltiples boquillas con tasas de deposición de 40,000 gotas/s, proporciona un medio para piezas metálicas de prototipado rápido. Debido a que el volumen de las gotas es pequeño, se solidifican rápidamente en el impacto, obteniéndose un componente de material con propiedades mejoradas (por ejemplo, resistencia).

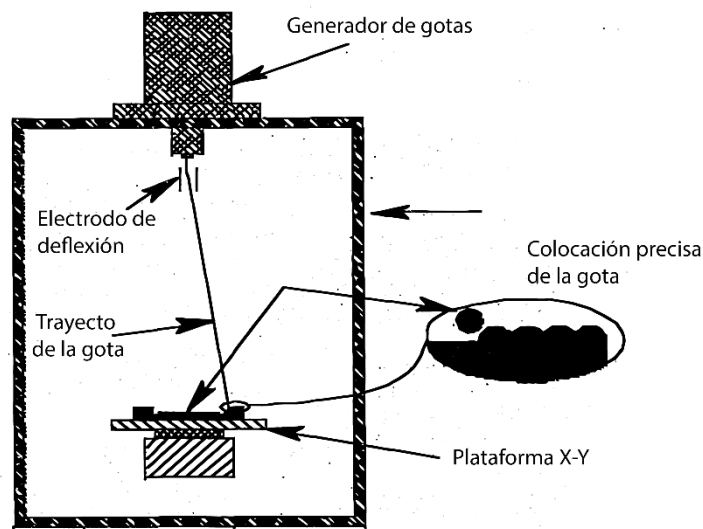


Figura 2.73. Representación esquemática del sistema HPDBNM.

-Ventajas del proceso

- HPDBNM tiene el potencial para fabricar partes con una mayor resistencia, usando nuevas aleaciones y en formas que se puede hacer hoy en día.
- La rápida solidificación de las nanogotitas de metal conduce a granos más finos que se traduce en una parte que posee una mayor resistencia que la alcanzable por procesos de fundición convencionales.
- Aleaciones nuevas y novedosas pueden ser creadas por la corriente de chorro de gotas con diferentes metales y tasas de deposición.
- Se pueden generar microestructuras variadas en diferentes lugares en la pieza fabricada por la capacidad para controlar el tamaño de las gotas, la velocidad de deposición, y la temperatura.

-Aplicaciones

- Fabricación de piezas con estructuras de grano fino y amplia fidelidad geométrica.
- Fabricación de dispositivos MEMS, híbridos, tales como la fabricación de estructuras metálicas tridimensionales en un dispositivo MEM.
- Este proceso de microfundición es útil para la lo que puede ser una alternativa viable para la colada convencional de materiales nucleares especiales.

2.1.3.32 Moldeo por inyección de polvo - Powder injection molding (PIM)

El sistema de moldeo por inyección de polvo (PIM) ha emergido como un método viable de producción de piezas de formas complejas a un costo competitivo. El proceso de PIM utiliza una combinación de la metalurgia en polvo y las tecnologías de moldeo por inyección de plástico para producir piezas de metal, cerámica o partes de material duro de forma neta y se compone de un sistema de alimentación de material mediante moldeo por inyección, un sistema de eliminación de aglomerante y la sinterización, Figura 2.74. El PIM es un proceso atractivo cuando las características de los componentes son: espesor que varía de 0.2 a 20 mm, radio esquinas superiores a 0.075 mm, masa que oscila desde 0.02 hasta 1000 g, niveles moderados de forma y complejidad de superficies lisas. El rango típico de tolerancias se encuentra entre 0.1 y 1 mm.

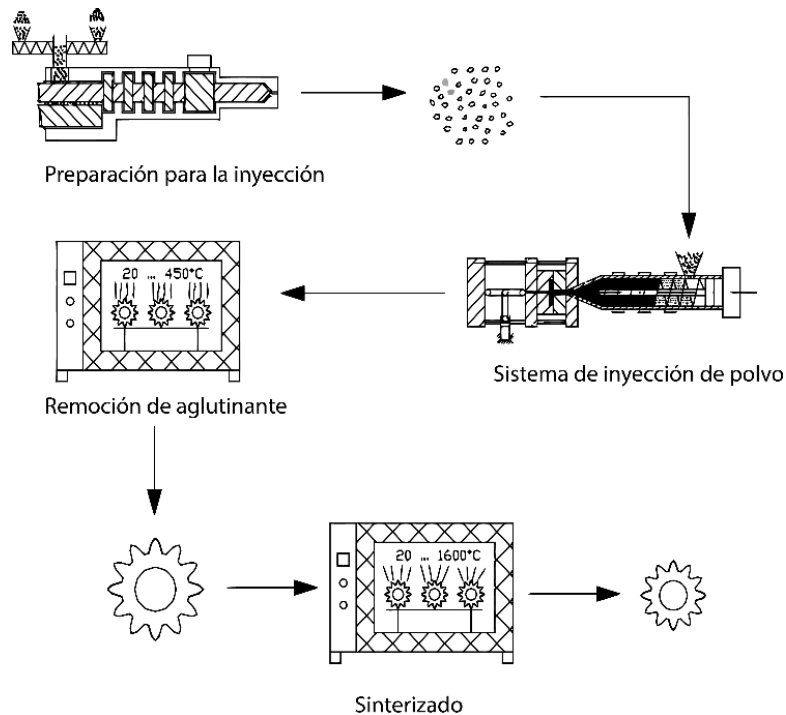


Figura 2.74. Diagrama de flujo del proceso PIM.

-Materiales empleados

- Acero inoxidable.
- Óxidos cerámicos.

-Aplicaciones

- Fabricación de componentes de complejos.
- Producción en masa.

2.1.3.33 Microsoldadura 3D - 3D Micro welding (3DMW)

La tecnología de Microsoldadura 3D (3DMW) es una combinación de microsoldadura de tungsteno y gas inerte (TIG) y una técnica de fabricación por capas [161]. Debido a que el metal es fundido durante el proceso de soldadura, el objeto producido puede tener una estructura completamente densa y concentración deseada. La composición del metal de las piezas se puede cambiar mediante el uso de dos o tres puertos de alimentación de alambres metálicos diferentes. La Figura 2.75 presenta el sistema 3DMW el cual consta de cuatro componentes: una estación de formado, una unidad de control de arco, computadoras para el control del sistema y un dispositivo de video vigilancia. La estación de formado se compone de una plataforma con movimiento en el plano X-Y y un soplete de soldadura con movimiento sobre el eje Z. En la unidad de control del arco, se encuentra una máquina soldadora micro-TIG. Las ilustraciones esquemáticas de la estación de formado y el proceso de conformado se muestra en la Figura 2.76 (a) y (b), respectivamente.

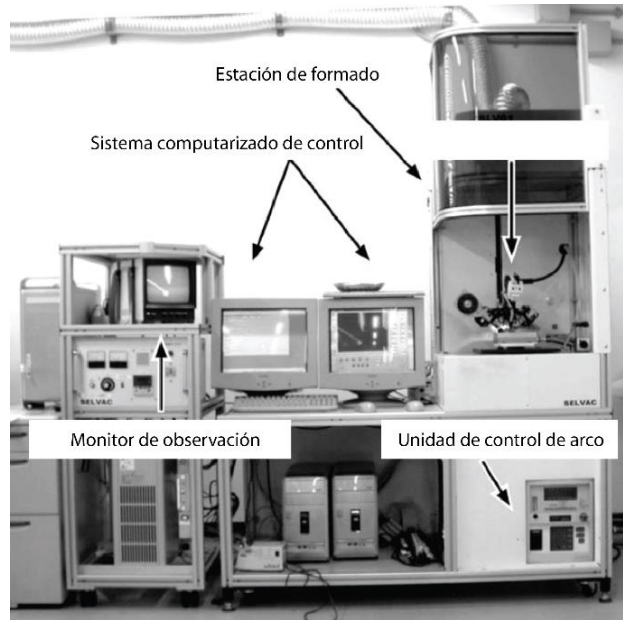
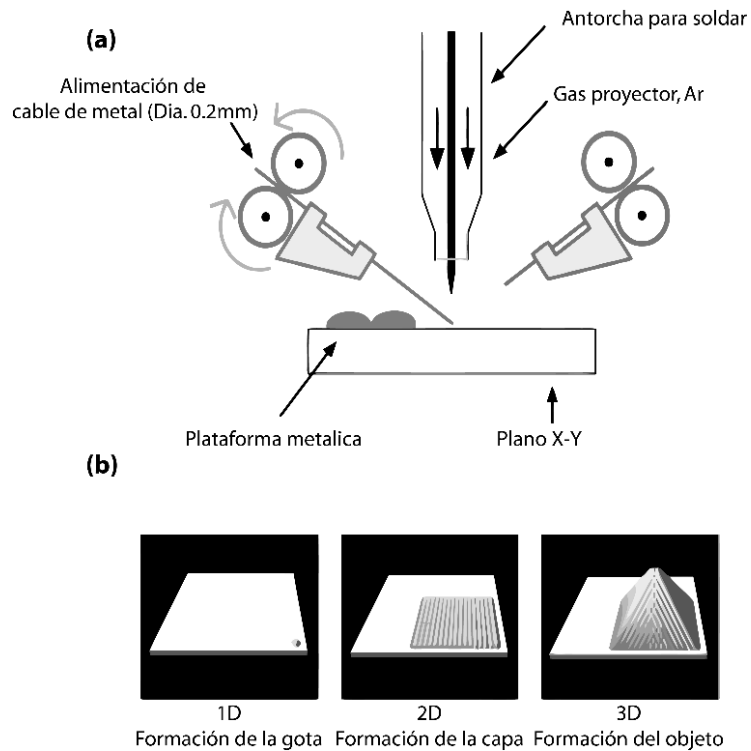


Figura 2.75. Aparato de 3DMW.



Formación de la gota Formación de la capa Formación del objeto

Figura 2.76. Sistema 3DMW: (a) esquema de la estación de formado, (b) proceso de conformado.

En el proceso 3DMW un sustrato metálico se coloca en un portaobjetos sobre la plataforma X-Y bajo un electrodo de soldadura. Al emitir un micro arco a la punta de un alambre fino de diámetro 200 μm que es alimentado a través de cabestrantes opuestos accionados por servomotores, se forma una gota de 0.4 a 1mm de diámetro. Las gotas formadas por el proceso se unen y solidifican

a las formadas previamente sobre el sustrato. Al continuar este proceso y construyendo capa por capa perlas bajo el control del sistema, un objeto de metal 3D puede ser producido. El tamaño mínimo del componente a formar es 0.5 mm. El modelo CAD se convierte en un conjunto de capas delgadas de 120 μm de espesor. Para obtener la forma diseñada, las perlas tienen que estar dispuestas a intervalos regulares y cada esquina debe ser llenada con un cordón de soldadura. La Figura 2.77 muestra un ejemplo de una pieza fabricada por 3DMW, [161].

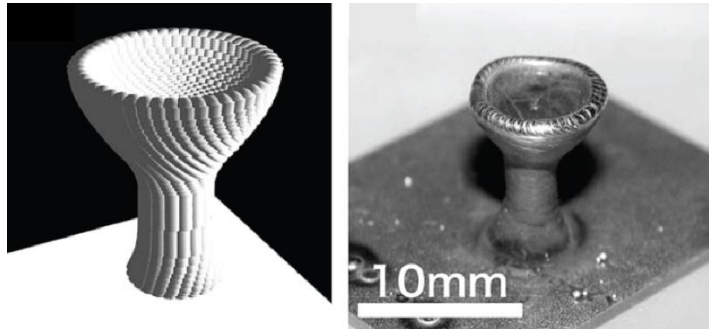


Figura 2.77. Pieza formada mediante 3DMW

2.1.3.34 Manufactura por deposición de plasma - Plasma deposition manufacturing (PDM)

La tecnología de fabricación de deposición de plasma (PDM) se caracteriza por la deposición de polvo metálico sobre un baño de fusión formado por calentamiento controlado por plasma, Figura 2.78. El proceso es capaz de construir piezas totalmente densas de uno o distintos materiales capa por capa, debido a la rápida fusión y solidificación del material alimentado en la forma deseada [162].

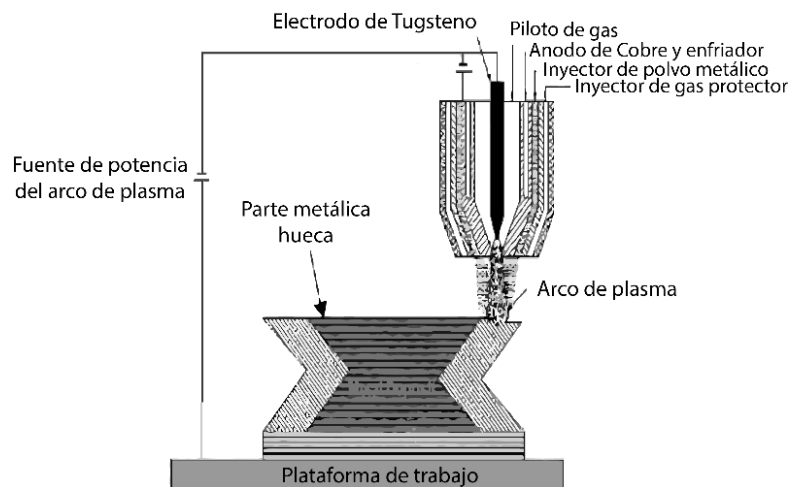


Figura 2.78. Diagrama esquemático del sistema PDM.

-Ventajas del proceso

- El PDM está diseñado para producir directamente cerca de las partes netas dentro de un solo paso y tiene la ventaja de permitir el uso de diferentes materiales de parte a parte o en un solo componente.
- El proceso de PDM tiene la capacidad de fabricar directamente los componentes de metal o de uso final.
- El PDM se puede utilizar como una herramienta efectiva de remanufactura y por lo tanto debe ser útil para mejorar el comportamiento del ciclo de vida.

2.1.3.35 Manufactura por deposición plasma-láser – Plasma-laser deposition manufacturing (PLDM)

La técnica PLDM utiliza un plasma y un láser para fundir polvos metálicos depositados en forma de capas [163]. El proceso se lleva a cabo por lo general en un ambiente controlado por un gas inerte como argón para reducir la oxidación. Los polvos de material se depositan formando el espesor designado para generar una capa. La forma y dimensiones de la capa se obtienen a partir de un modelo CAD 3D, el cual es seccionado de acuerdo al requisito de precisión. Con la información de cada capa el sistema de control genera el código CNC para controlar el movimiento de la máquina NC. Cuando se deposita una capa entera, la potencia de un haz de plasma y un láser se combina para fundir el material y generar una capa de densidad completa para cualquier aleación de alta temperatura y materiales refractarios. Las capas sucesivas se apilan de la misma manera hasta que la pieza completa se construye, Figura 2.79.

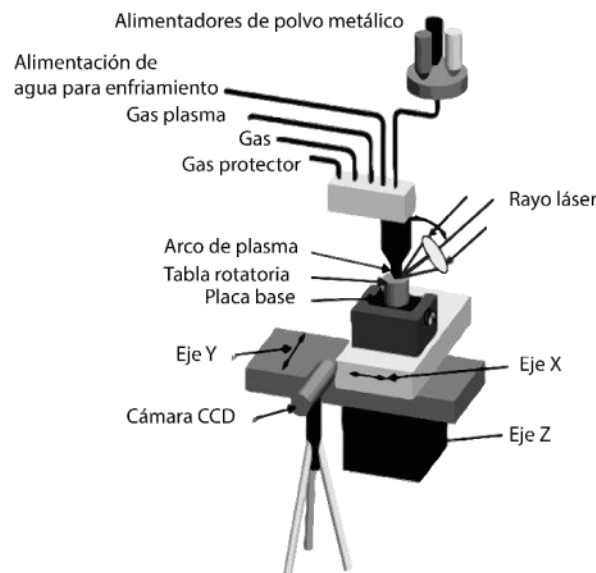


Figura 2.79. Sistema PLDM.

-Ventajas del proceso

- Se pueden obtener piezas totalmente densas.

-Desventajas del proceso

- La dimensión de las piezas generadas no es precisa, por lo que se pudiesen requerir operaciones de maquinado convencional para obtener las dimensiones finales.

2.1.3.36 Consolidación láser de formas libres - Freeform laser consolidation (FLC)

La consolidación láser de formas libres es una tecnología de fabricación asistida por computadora. El FLC utiliza un rayo láser para generar un charco de material fundido sobre el cual se inyecta un metal en forma de polvo o alambre a razón de 1 a 30 g/min, Figura 2.80, [164]. En FLC la parte se construye sobre una base sólida (generalmente metálica) donde se incide el haz de láser que crea el charco de material sobre el cual se depositara el metal de aporte. El proceso se efectúa en un ambiente controlado donde se mantiene una concentración de Oxígeno por debajo de las 50ppm. El FLC emplea un sistema control de movimiento de control numérico de 3 o 5 ejes, que brinda al láser y boquilla inyectora de material la capacidad de seguir la trayectoria definida para cada capa desde el archivo CAD 3D. A diferencia del proceso LENS, la consolidación láser emplea solo una boquilla inyectora de material y permite el uso de granos de polvo de entre 2-3 μm .

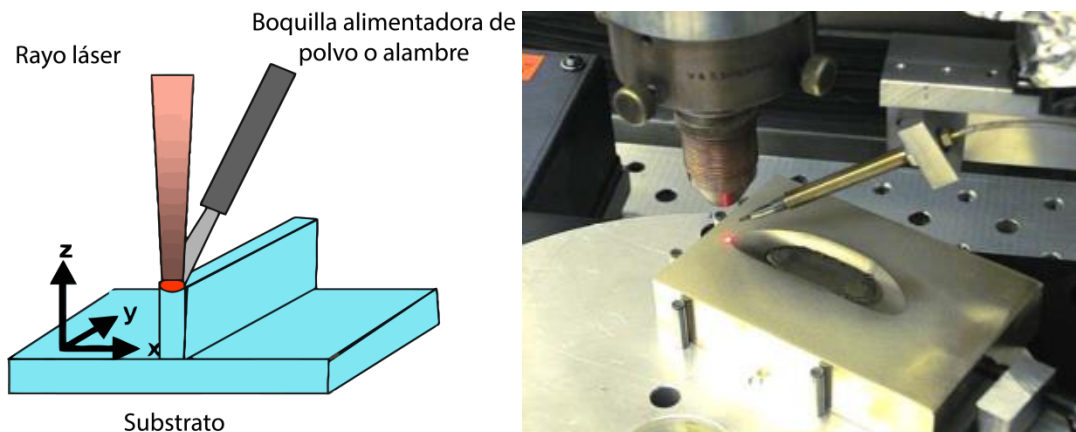


Figura 2.80. Esquema del proceso FLC.

La tecnología FLC se encuentra en actual desarrollo y tiene un gran potencial puesto que, se ha reportado la construcción satisfactoria de piezas totalmente funcionales empleando aleaciones basadas en Titanio y Níquel, así como piezas en aceros inoxidables, Figura 2.81. Así mismo mediante el proceso FLC es posible reparar y añadir detalles geométricos de hasta 0.7 mm a piezas previamente elaboradas por procesos de mecanizado tradicional, y obtener rugosidades que oscilan entre 1 y 2 μm (Ra).

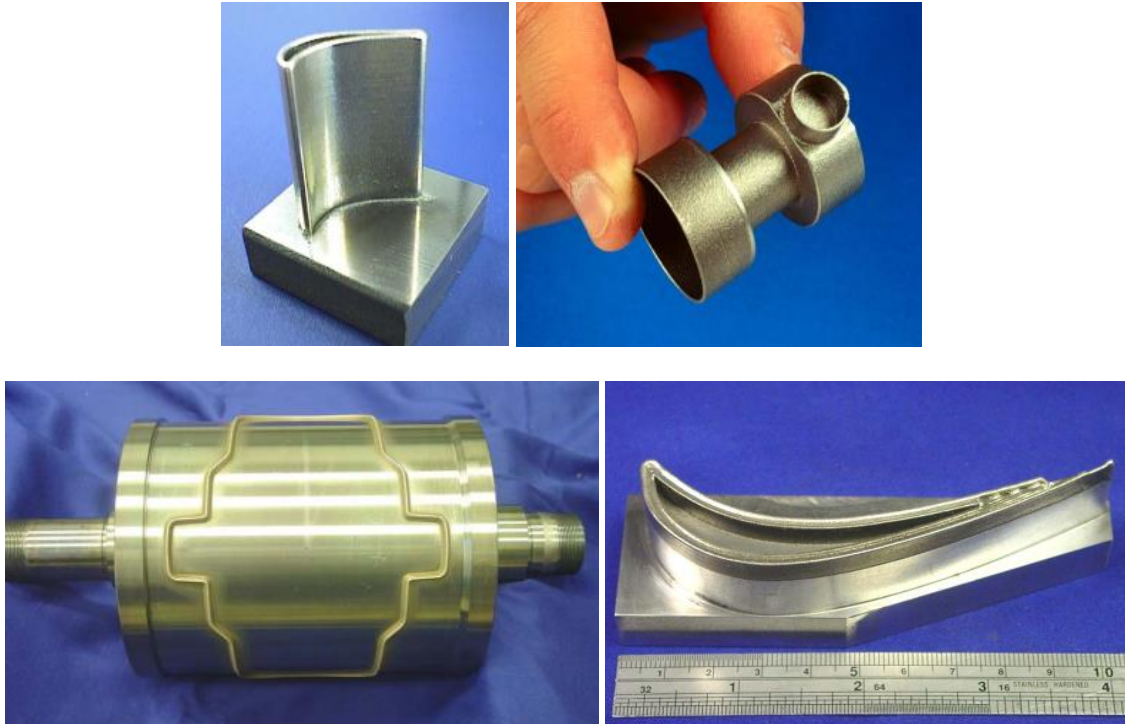


Figura 2.81. Ejemplo de piezas fabricadas por FLC.

2.1.3.37 Otros procesos de dispensado

Dentro de las tecnologías RP de dispensado, existen otros procesos, sin embargo no se reportan detalles en la literatura. Dentro de estas tecnologías RP se incluyen:

- Atomizado térmico y refundido por láser - Thermal spraying and laser remelting (TSLR), [37].
- Atomizado por plantilla - Mask based spraying (MBS), [19].
- Modelado por compresión - Compression molding (CM), [165].
- Deposición mesoscópica de formas - Mesoscopic shape deposition manufacturing (MESO-SDM), [1].
- Deposición inteligente de polvos - Pointwise powder deposition (PPD), [1].

2.1.4 Procesos de sinterizado

Las tecnologías RP de sinterizado emplean una fuente de calor que generalmente es un láser para conglomerar el material de construcción que es suministrado en forma de polvo. Al igual que la mayoría de las técnicas de prototipado rápido las piezas generadas por procesos de sinterizado RP son concebidas mediante la adición de capas. Dentro de los procesos de prototipado basados en el sinterizado existen técnicas en las que es posible obtener piezas totalmente densas y funcionales.

Los procesos que conforman las piezas añadiendo material y emplean un proceso de sinterizado son los siguientes:

- Sinterizado selectivo por láser – Selective laser sintering (SLS).
- Sinterizado directo de metal por láser – Direct laser metal sintering (DLMS).
- Fundición por haz de electrones – Electron beam melting (EBM).
- Fundición selectiva por láser – Selective laser melting (SLM).
- Sinterizado selectivo por plantilla – Selective masking sintering (SMS).
- Sinterizado selectivo por inhibición – Selective inhibition sintering (SIS).
- Manufactura en capas electrográficas – Electrophotographic layered manufacturing (ELM).
- Sinterizado de alta velocidad – High-speed sintering (HSS).
- Microsinterizado por láser – Laser microsintering (LMS).
- Sinterizado microselectivo por láser – Micro-selective laser sintering (μ -SLS).
- Microsinterizado selectivo por láser – Selective laser micro sintering (SLMS).
- Sinterizado selectivo por descarga eléctrica de alta frecuencia – High frequency selective electrical discharge sintering (HFSEDS).
- Sinterizado rápido de patrones basado en polvos – Rapid pattern based powder sintering (RPBPS).
- Sinterizado multimaterial selectivo por láser – Multimaterial selective laser sintering (MMSLS).
- Refundido selectivo de polvo por láser – Selective laser powder remelting (SLPR).

2.1.4.1 Sinterizado selectivo por láser - Selective laser sintering (SLS)

El sistema SLS fue desarrollado y patentado por el Dr. Carl Deckard y el Dr. Joe Beaman en la Universidad de Austin Texas a mediados de la década de 1980, bajo el patrocinio de DARPA [166]. El proceso de sinterizado selectivo por láser (SLS) es una técnica que utiliza un láser de alta potencia para fusionar pequeñas partículas de plástico, metal, cerámica, vidrio o polvos de una capa transversal que forma un modelo tridimensional [167]. Puesto que la densidad final de la pieza depende de la potencia pico del láser, en lugar de exponer el láser un largo tiempo sobre el polvo, éste generalmente emite pulsos debido a que el polvo de material se precalienta por debajo del punto de fusión, lo que facilita al láser elevar la temperatura de las regiones seleccionadas hasta el punto de fusión.

En el proceso STL las piezas se construyen sobre una plataforma que se ajusta en altura de acuerdo al espesor de la capa que se está construyendo. Una cama de polvo se deposita en la parte superior de cada capa solidificada. Este polvo se aplana sobre la plataforma mediante un rodillo, antes de la construcción de cada capa. Un láser funde en un ambiente controlado el material pulverizado de forma selectiva mediante el escaneo de secciones transversales, generadas a partir del modelo digital 3D de la pieza, en la superficie de un lecho de polvo. Después de que cada sección

transversal se escanea, el lecho de polvo se reduce en espesor de la capa uno, una nueva capa de material se aplica en la parte superior, y el proceso se repite hasta que la parte se ha completado, Figura 2.82, [68],[166].

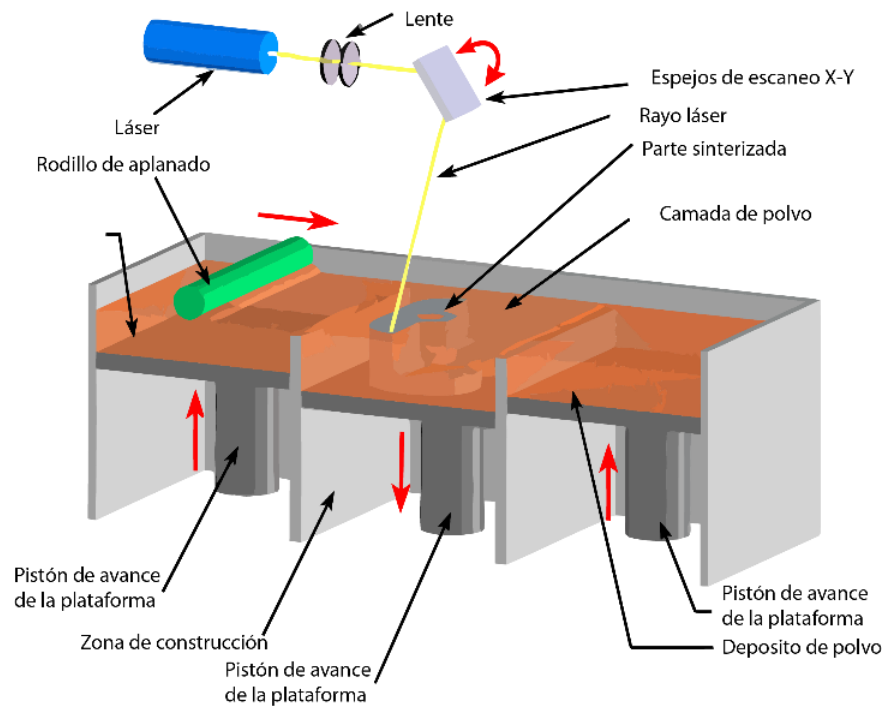


Figura 2.82. Esquema del sistema SLS [68].

El proceso físico del SLS puede ser de fusión completa, fusión parcial, o en fase líquida de sinterización dependiendo del material, siendo posible generar piezas 100% densas y con características mecánicas comparables a otros procesos de fabricación convencionales. En muchos casos se pueden producir varias piezas dentro del lecho de polvo, lo que permite una productividad más alta [166].

A diferencia de otros procesos RPM&T, las estructuras de apoyo especiales no son necesarias porque el polvo no sinterizado en cada capa actúa como un soporte para la pieza que se está construyendo [68]. La Tabla 2.19, presenta datos técnicos de la tecnología SLS.

Tabla 2.19. Parámetros técnicos de sistemas SLS.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[73]
Espesor mínimo de capa	0.06	mm	[21]
Espacio de trabajo	508 x 508 x 760	mm	[68]
Velocidad de trabajo	42,000	mm/min	[21]
Acabado superficial (Ra)	5-15.5	μm	[168]
Precisión	0.025	mm	[21]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados

Polímeros:

- Nylon.
- Poliestireno.

Metales:

- Acero y aleaciones.
- Acero inoxidable.
- Acero para herramientas.
- Aluminio.
- Bronce.
- Cromo.
- Cobalto.
- Titanio.

Otros:

- Arena verde.

-Ventajas del proceso

- No requiere estructuras de soporte.
- Dependiendo del material es posible obtener partes totalmente densas.

-Desventajas del proceso

- La tecnología es costosa, el precio de un equipo SLS supera los \$100,000 usd.

-Aplicaciones

- Pruebas de forma y ajuste.
- Prototipos funcionales, Figura 2.83.
- Herramental rápido.
- Piezas con bisagras.
- Piezas para aplicaciones de alta temperatura.



Figura 2.83. Múltiple de automóvil fabricado por SLS [169].

-Requerimientos de instalación y operación

- Protección ocular para el usuario.
- Protección nasal mediante mascarilla.
- Uso de guantes de látex.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- 3D Systems Inc. (EUA).
- 3D-Micromac AG (Alemania).
- Accufusion Inc. (Canada).
- EOS GmbH (Alemania).
- Inno-shape GmbH (Alemania).
- microLS GmbH (Alemania).
- Optomec Design Company (EUA).
- Phenix Systems (Francia).
- POM Group Inc. (EUA).
- Wuhan Benha Mechanical & Electrical Co., Ltd. (China).

2.1.4.2 Sinterizado directo de metal por láser - Direct laser metal sintering (DLMS)

El proceso DLMS fue desarrollado en 1994 por EOS GmbH, siendo el primer método comercial de prototipado rápido para producir piezas de metal, empleando polvo de metal de 20 μm de diámetro, libre de aglutinante o agente fundente. En el proceso DLMS el material se funde completamente mediante un haz láser de alta potencia para construir la parte con las propiedades del material original. La eliminación del aglutinante evita la infiltración teniendo la capacidad de producir piezas con una densidad del 95-99%. En el proceso DLMS un pistón distribuidor de polvo eleva la plataforma de suministro de metal, luego un brazo distribuye una capa de polvo sobre la capa previa. Un láser sinteriza la capa de metal en polvo, después de que una capa se construye el pistón baja la plataforma de generación y la siguiente capa de polvo es aplicada, Figura 2.84.

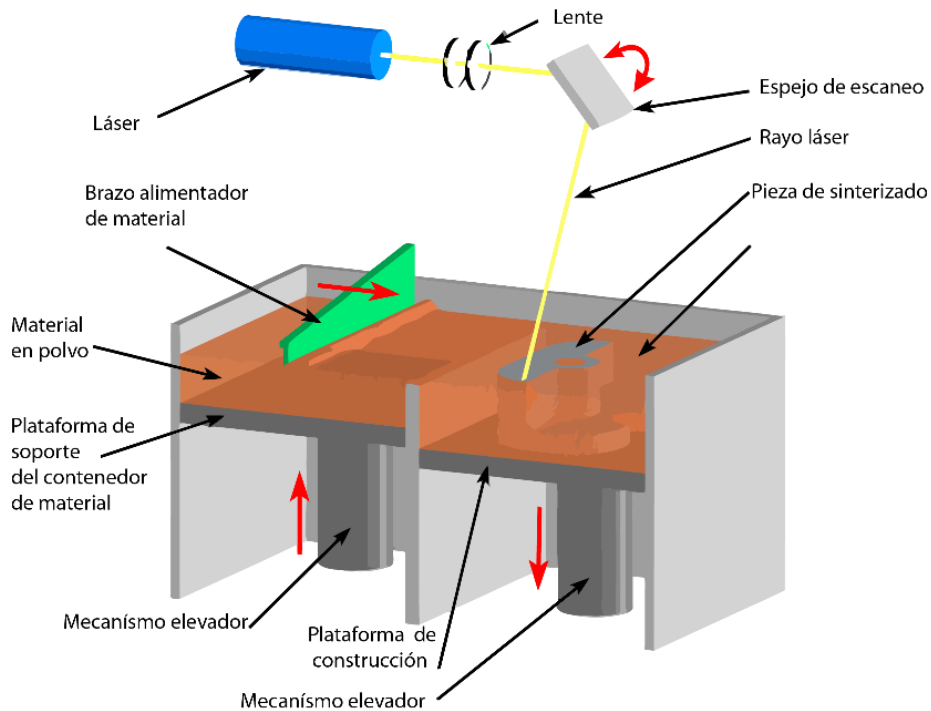


Figura 2.84. Ilustración esquemática del sistema DLMS [68].

La tecnología DLMS es similar al proceso de sinterizado selectivo láser sin embargo, a diferencia de este último, el DLMS emplea un brazo alimentador de material en lugar de un rodillo como lo hace el SLS. Lo anterior permite generar un espesor de capa menor y emplear más de un material, en comparación con el sinterizado selectivo láser [68]. La Tabla 2.20 presenta características técnicas del sistema DLMS.

Tabla 2.20. Datos técnicos de la tecnología DLMS.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[73]
Espesor mínimo de capa	0.025	mm	[68]
Espacio de trabajo	250 x 250 x 220	mm	[21]
Velocidad de trabajo	42,000	mm/min	[21]
Acabado superficial (Ra)	1.2-7	μm	[168]
Precisión	0.025	mm	[68]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramental rápido, N.D: Información no disponible

-*Materiales empleados* [170]

Polímeros:

- Nylon.
- Poliestireno.

Metales:

- Acero y aleaciones.
- Acero inoxidable.
- Acero para herramientas.
- Aluminio.
- Bronce.
- Cromo.
- Cobalto.
- Titanio.

Otros:

- Arena verde.

-Aplicaciones [170]

- Prototipos funcionales, Figura 2.85.
- Implantes médicos.
- Piezas aeroespaciales.
- Piezas con aplicaciones de alta temperatura.

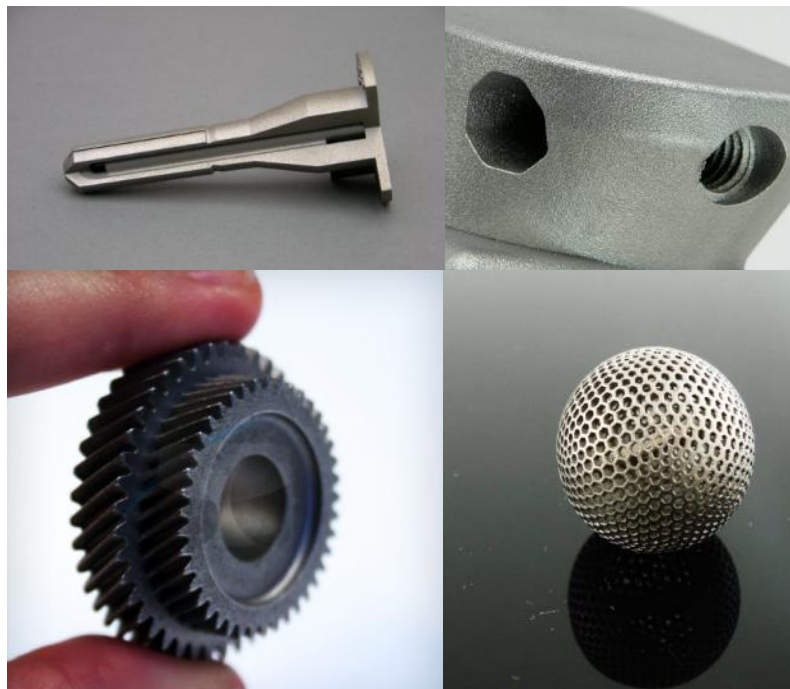


Figura 2.85. Piezas fabricadas por DLMS.

-Requerimientos de instalación y operación

- Protección ocular para el usuario.
- Protección nasal con mascarilla.
- Uso de guantes de látex.

- EOS GmbH (Alemania).

2.1.4.3 Fundición por haz de electrones - Electron beam melting (EBM)

El proceso EBM emplea un haz de electrones para construir piezas capa por capa sobre un lecho de polvo,[171]. El haz de electrones es generado empleando un filamento de Tungsteno el cual se calienta a altas temperaturas con la finalidad de excitar y hacer fluir electrones a través de un cabezal, a velocidades que se aproximan a la mitad de la velocidad de la luz. Dentro del cabezal se encuentran presentes dos campos magnéticos que organizan y dirigen los electrones. El primero de ellos actúa como una lente magnética que enfoca el haz hasta el diámetro deseado. El segundo campo magnético desvía el haz enfocado al punto de destino en el lecho de polvo. Cuando el haz de electrones golpea el polvo de metal, la energía cinética se convierte instantáneamente en energía térmica fusionando las partículas de metal, Figura 2.86. El haz de electrones traza la sección transversal de cada capa de acuerdo a los datos generados a partir de un archivo CAD 3D, una vez que una capa de polvo se funde y solidifica, la siguiente capa de polvo se deposita y el proceso se repite hasta que se finaliza la pieza [172].

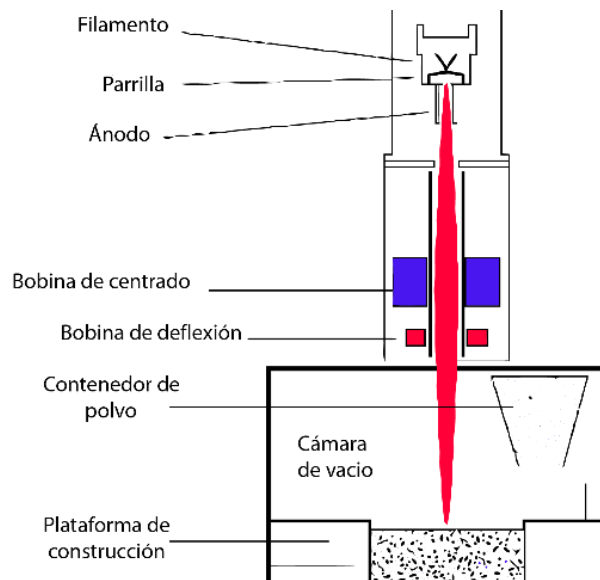


Figura 2.86. Representación esquemática del sistema EBM [171].

El proceso de EBM se realiza en el vacío para evitar una pérdida de energía que podría ser causada por los electrones en movimiento que colisionan con las moléculas de aire o gas. El vacío tiene dos ventajas. En primer lugar, el proceso es 95% eficiente en su uso de energía, que es 5 a 10 veces mayor que la tecnología láser. En segundo lugar, el vacío admite el procesamiento de aleaciones de metales reactivos como el titanio [173], La Tabla 2.21, presenta características técnicas disponibles del proceso EBM.

Tabla 2.21. Datos técnicos disponibles de la tecnología EBM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[73]
Espesor mínimo de capa	0.05	mm	[174]
Espacio de trabajo	200 x 200 x 180	mm	[174]
Velocidad de trabajo	Hasta 480,000,000	mm/min	[174]
Acabado superficial (Ra)	25-35	μm	[174]
Precisión	0.013	mm	[174]
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados [174]

- Aceros grado herramienta.
- Aceros de baja aleación.
- Aleaciones de Titanio.
- Titanio comercialmente puro.
- Aleaciones de Níquel.

-Ventajas del proceso [174]

- Alta eficiencia energética.
- Bajos costos de mantenimiento.
- Las piezas generadas resultan libres de impurezas de óxidos y nitruros.
- Es posible generar piezas totalmente densas.

-Desventajas del proceso [174]

- El proceso requiere una cámara de vacío, lo que se refleja en el costo del equipo.
- El proceso produce rayos X durante su funcionamiento.

-Aplicaciones [174]

- Producción de piezas totalmente funcionales.
- Fabricación de prótesis médicas.

-Requerimientos de instalación y operación [174]

- Escudos de aspiración de rayos X.
- Protección ocular para el usuario.
- Protección nasal por mascarilla.
- Uso de guantes de látex.

-Compañías fabricantes de la tecnología [174]

- Arcam AB (Suecia).

2.1.4.4 Fundición selectiva por láser - Selective laser melting (SLM)

La Figura 2.87 ilustra el principio del proceso SLM. El primer lugar el modelo 3D CAD se divide en capas y se transfiere a la máquina de fusión por láser selectivo. Posteriormente, el material en polvo (tamaño de grano: 10-45 μm) se deposita como una capa delgada (aprox. 20–50 μm) sobre un sustrato, dependiendo del tamaño de grano. La información geométrica de las capas individuales se transmite por rayo láser hacia el lecho de polvo en el que las regiones que contienen material sólido se escanean en una atmósfera inerte, dejando una capa sólida de la pieza a fabricar. Después de bajar el sustrato de acuerdo al espesor de la capa, los pasos del proceso se repiten hasta que la parte se ha terminado. Los polvos metálicos empleados en SLM se funden completamente, por lo que es posible obtener piezas 100% densas, por lo tanto las propiedades mecánicas coinciden con las partes fabricadas convencionalmente por procesos de corte o fundición, [175], [176]. La Tabla 2.22 presenta información técnica disponible de la tecnología SLM.

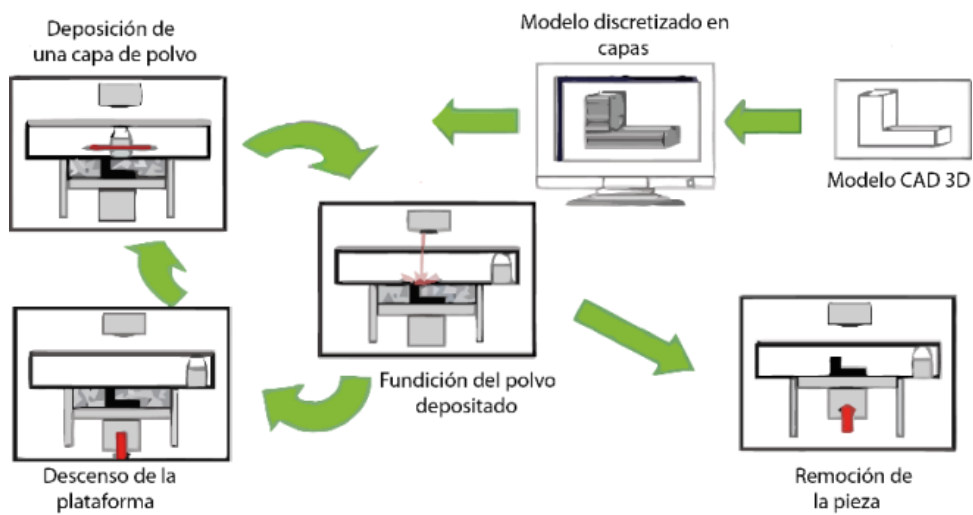


Figura 2.87. Principio del sistema SLM [175].

Tabla 2.22. Datos técnicos disponibles de la tecnología SLM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[177]
Espesor mínimo de capa	0.02	mm	[177]
Espacio de trabajo	70-250 x 70-250 x 40-300	mm	[177]
Velocidad de trabajo	420,000	mm/min	[177]
Acabado superficial (Ra)	25-35	μm	[178]
Precisión	0.013	mm	[178]
Velocidad volumétrica	83-333	mm^3/min	[178]

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida

-Materiales empleados [176], [178]

- Cromo.
- Cobalto.
- Acero inoxidable.

- Oro.
- Plata.
- Aleaciones de paladio.
- Titanio.
- Aceros grado herramienta.
- Aluminio.
- Inconel.

-Aplicaciones, Figura 2.88 [176]

- Prototipos funcionales.
- Manufactura rápida.
- Implantes médicos.
- Piezas aeroespaciales.
- Piezas con aplicaciones de alta temperatura.



Figura 2.88. Ejemplos de aplicaciones de la tecnología SLM, (arriba-izquierda: estructura de panal, arriba-derecha: prototipo visual, abajo-izquierda: implante médico, abajo-derecha: manufactura rápida).

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Realizer (Alemania).
- Renishaw (Reino Unido).

2.1.4.5 Sinterizado selectivo por plantilla - Selective masking sintering (SMS)

La tecnología SMS se desarrolló para la producción de piezas de distintos materiales. La máquina permite que diferentes partes que se fabriquen simultáneamente dentro del espacio de trabajo. Durante la fabricación el material se aplica en una capa fina sobre la superficie entera de la plataforma de generación. Al mismo tiempo, una máscara se imprime con la sección transversal de acuerdo a la sección de la pieza. Un espejo está situado debajo de la plantilla en el cual un haz infrarrojo y funde el material en polvo en toda la sección transversal. La plantilla se limpia y se repite el procedimiento con plantillas nuevas para cada capa, Figura 2.89. La plantilla está constituida por polvo cerámico electrostático sobre un espejo reflectante. El polvo cerámico se recicla después de cada capa y el polvo se reutiliza [179]. La Tabla 2.23 presenta información técnica correspondiente a la tecnología SMS.

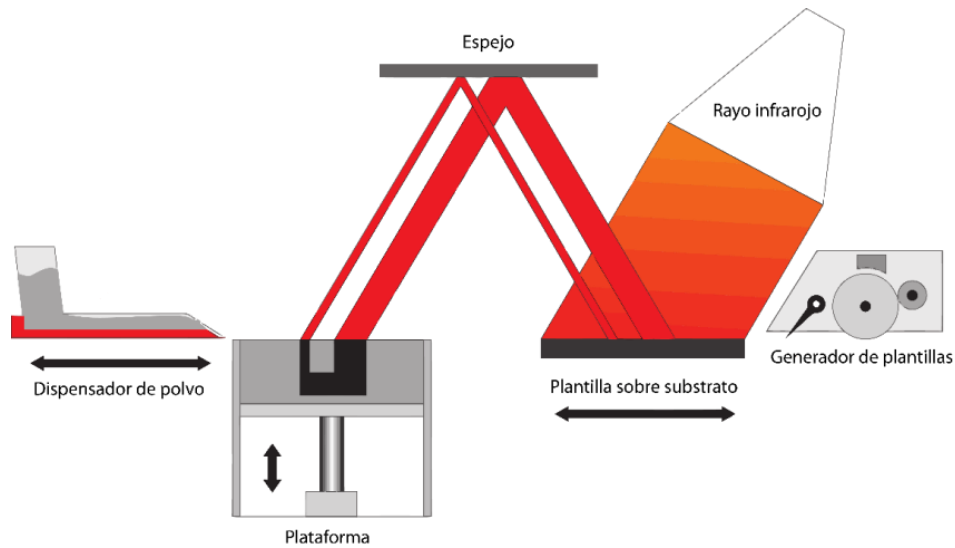


Figura 2.89. Esquema del proceso SMS.

Tabla 2.23. Información técnica de la tecnología SMS.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[179]
Espesor mínimo de capa	0.05	mm	[179]
Espacio de trabajo	300 x 200 x 800	mm	[179]
Velocidad de trabajo	0.15-3	mm/min	[179]
Acabado superficial (Ra)	20	μm	[179]
Precisión	N.D	mm	-
Velocidad volumétrica	N.D	mm ³ /min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados [179]

- Poliestireno.
- Policarbonato.
- Polietileno.

- Polipropileno.
- Cera.
- Arena.

-Ventajas del proceso [179]

- Alta resolución.
- Alta capacidad de transferencia de energía.
- Bajo costo.
- Fusión uniforme.
- Conectividad total entre las capas.

-Desventajas del proceso

- La cantidad de materiales empleados es limitada.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Sintermask (Alemania).

2.1.4.6 Sinterizado por inhibición selectiva - Selective inhibition sintering (SIS)

La tecnología SIS se basa en la inhibición de las partículas de polvo que no se desean sinterizar para formar cada capa del modelo 3D. La Figura 2.90, ilustra la secuencia del proceso SIS, el cual se encuentra actualmente en proceso de investigación y desarrollo. El proceso consta de cuatro pasos básicos [180]:

1. Deposición de capa de polvo fino. Esto se hace generalmente por un rodillo que barre una superficie horizontal ligeramente por encima de la capa anterior y transporta el material en polvo delante mientras se hace girar de manera que su superficie delantera hace un movimiento hacia arriba. Este enfoque, utilizado por el SLS y la impresión 3D, es capaz de crear capas de polvo fino y denso de manera uniforme.
2. Deposición de inhibidor de la sinterización. En este paso se utiliza la impresión de trama en una impresora de inyección de tinta estándar multiboquilla, o la impresión de vector con una boquilla de impresión con un solo orificio, un líquido inhibidor de sinterización se deposita en áreas seleccionadas de cada capa.
3. Generación de los límites que contendrán la pieza. Este paso se utiliza para la conservación del material en polvo por medio de placas reflectantes que exponen únicamente la parte necesaria de cada capa a la radiación. Sin estas placas la base entera de polvo se sinteriza. La posición de estas placas es controlada por computadora y puede ser diferente para cada capa, dependiendo de la capa fuera de perfil.

4. Sinterización por radiación térmica. En este paso una superficie plana irradia calor utilizando una resistencia eléctrica o un quemador de gas para sinterizar todas las áreas seleccionadas de la capa de polvo en una sola operación. Después de que todas las capas han sido sinterizadas, la parte final se extrae. El polvo no sinterizado puede ser reutilizado y el exceso de material que se sinteriza puede ser aplastado y reciclado en forma de polvo.

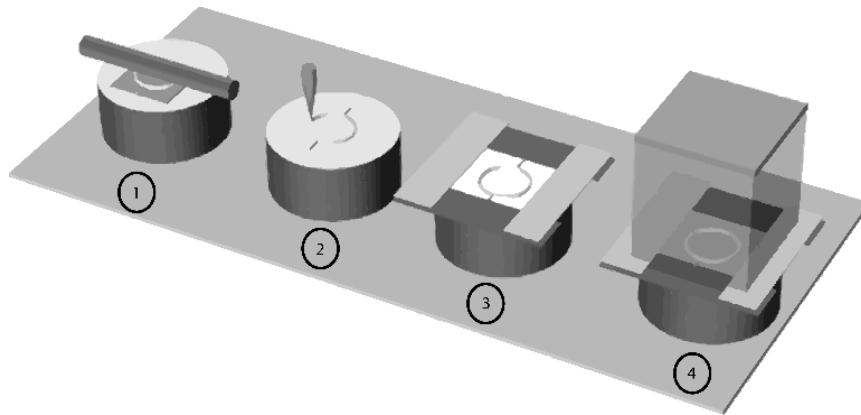


Figura 2.90. Secuencia del proceso SIS [180].

-Materiales empleados

- Polímeros.
- Bronce.

-Ventajas del proceso [180]

- La máquina basada en SIS será mucho menos costosa que la máquina de SLS equivalente ya que el generador de láser de alta potencia de SLS se sustituye con un elemento de calor de bajo costo.
- Toda la capa se sinteriza a la vez.
- La precisión dimensional y calidad superficial de las piezas fabricadas es probable que sea superior a la de la impresión 3D y SLS.
- Piezas multicolor pueden fabricarse.
- Las piezas fabricadas por SIS no requieren estructuras de apoyo.

-Desventajas del proceso

- Al emplear fuentes de calor como resistencias eléctricas y/o estufas de gas para el sinterizado, el proceso puede resultar lento.

-Aplicaciones

- Generación de prototipos para visualización e inspección.
- Generación de piezas funcionales.

La Figura 2.91, muestra prototipos generados por SIS.

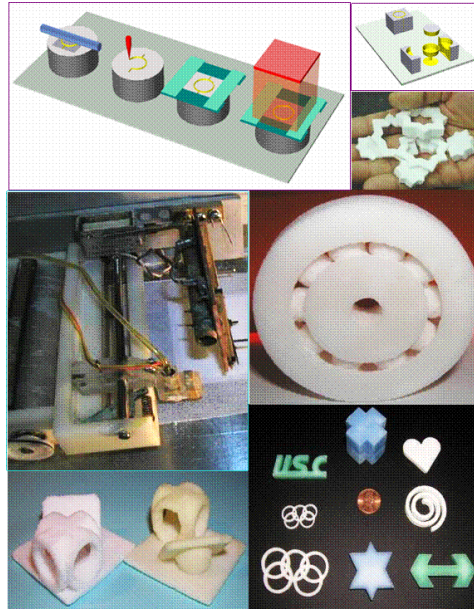


Figura 2.91. Modelos fabricados por SIS [180].

2.1.4.7 Manufactura electrofotográfica en capas - Electrophotographic layered manufacturing (ELM)

ELM se ha desarrollado en la Universidad de Florida. El proceso inicial se centra en la idea de producir una pieza en verde por deposición separada de la pieza y los polvos de soporte, y después usando una operación de calentamiento sinterizar el material. Para lo anterior se requiere que el material de soporte tenga un punto mayor de fusión que el material de la pieza. Sin embargo, se ha experimentado la forma de sinterizar cada capa antes de pasar a la deposición de la siguiente capa, como se hace en otros procesos de manufactura basados en capas de polvos, Figura 2.92. Uno de los problemas a superar es la deposición electrofotográfica del material para crear piezas de gran longitud en Z. Se prevé que este proceso podría ser conveniente para ritmos de producción altos pero limitados a piezas pequeñas como es el caso de los componentes eléctricos [29].

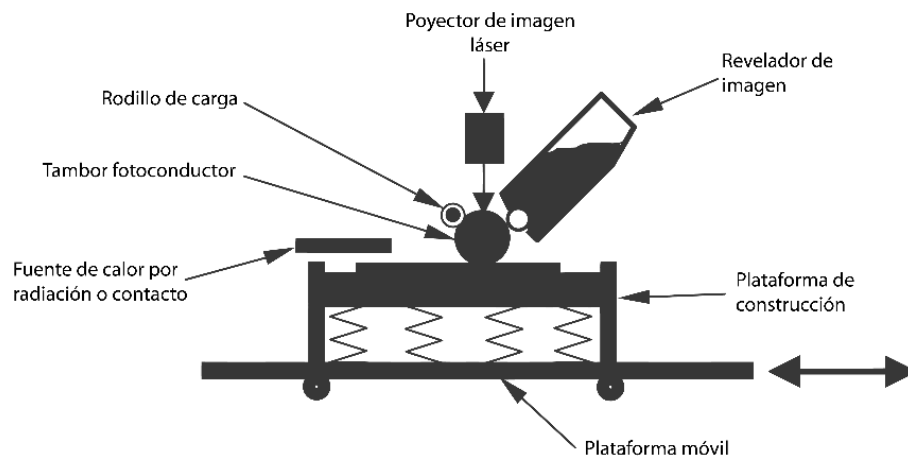


Figura 2.92. Esquema del proceso ELM [29].

2.1.4.8 Sinterizado de alta velocidad - High-speed sintering (HSS)

Loughborough en el Reino Unido. El proceso utiliza cabezales de impresión de inyección de tinta y la tecnología de rayos infrarrojos de calentamiento para la fabricación de productos capa por capa a partir de materiales poliméricos en polvo. El proceso de fabricación HSS comienza con un modelo 3D CAD que se corta en capas, típicamente 100 μm de espesor. Cada capa discreta se convierte entonces en una imagen de mapa de bits monocromática y es cargada en la máquina HSS. La máquina está preparada para la construcción y la plataforma de construcción se calienta justo por debajo de la temperatura de fusión del polímero.

La primera parte del ciclo de construcción comienza con un conjunto de rodillos que se desplazan de izquierda a derecha a fin de depositar una capa nueva de polvo sobre la plataforma o capa anterior. El conjunto de rodillos se desplaza entonces de vuelta en la dirección opuesta y en este momento, los cabezales de impresión de chorro impregnan la capa depositada con un material absorbente de radiación (Radiation Absorbent Material, RAM). Simultáneamente, una luz infrarroja (IR) se expone a la capa previamente depositada. El polvo impregnado por el material RAM absorbe la radiación suficiente para ocasionar que las partículas de polímero se fundan y se fusionen, creando una capa 2D. Así mismo las regiones no impresas con material RAM dentro de la plataforma no absorben la energía suficiente para que sean fundidas y, por consiguiente, permanecen en forma de polvo [29], [181]. El ciclo completo se repite a continuación hasta que toda la geometría ha sido fabricada.

2.1.4.9 Microsinterizado láser - Laser microsintering (LMS)

El proceso de microsinterizado por láser, también conocido como microsinterizado (microsintering), es una técnica desarrollada por el Instituto Láser de Mittelsachsen (Laser Institute Mittelsachsen, LIM) en 2003 [72]. El LMS es una modificación de la tecnología SLS, puesto que emplea una hoja afilada que distribuye el lecho de polvo para formar cada capa, a diferencia de un rodillo como suceden en el sinterizado selectivo láser. El proceso comienza con la deposición de una capa sobredimensionada de polvo por medio de la hoja afilada, que posteriormente se mueve en sentido opuesto y en conjunto con la plataforma de construcción para dar el espesor final de capa, que oscila los 5 μm . Una vez formada la capa, esta es sometida a un régimen de pulsos de un láser de Nd-YAG con la finalidad de sinterizarla, enseguida una nueva capa de polvo es depositada y el proceso se repite hasta obtener el modelo deseado, Figura 2.93. El proceso LMS se efectúa en una cámara de vacío o dentro de una atmósfera de un gas inerte, con la finalidad de reducir la oxidación de las partículas de polvo sensibles al oxígeno. El sistema LMS cuenta con una resolución de 30 μm y es posible lograr acabados superficiales de hasta 1.5 μm Ra y obtener piezas con una densidad del 90%. Los materiales empleados por la tecnología abarcan el tungsteno, cobre, aluminio, plata, titanio y aceros, [182]. La Figura 2.94, presenta ejemplos de piezas construidas empleando la tecnología LMS

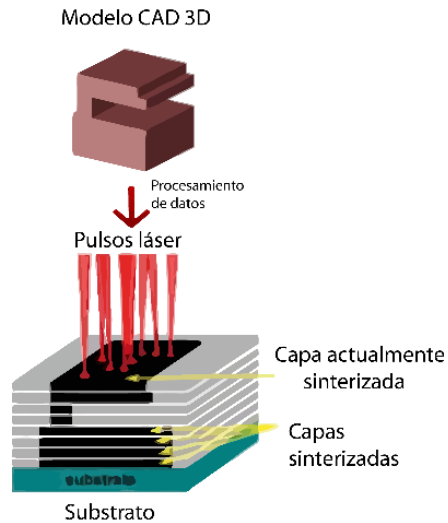


Figura 2.93. Esquema del proceso LMS [182].

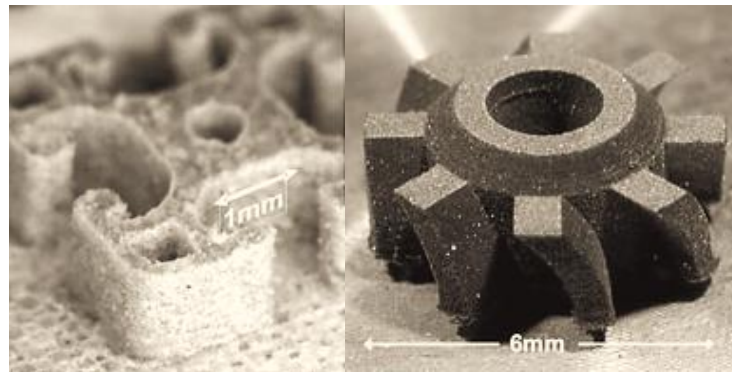


Figura 2.94. Piezas construidas por el sistema LMS [182].

2.1.4.10 Sinterizado micro selectivo por láser - Micro selective laser sintering (μ -SLS)

El proceso μ SLS tiene como objetivo obtener una resolución y una rugosidad en el intervalo de tamaño de grano y el tamaño del punto láser enfocado. Por lo tanto se utilizan polvos con un tamaño de grano en el intervalo de micrómetros y mezclas de los mismos, y una longitud de onda de láser en el infrarrojo cercano a 1064 nm. Para evitar la fusión de las regiones no deseadas en polvo así como reducir las tensiones térmicas y la contracción de la pieza, la radiación pulsada por medio del láser se limitan a la profundidad de penetración térmica en el rango del tamaño de grano. Adicionalmente para superar los problemas derivados de la difusión de los polvos finos en una capa delgada, se desarrolla un método que deposita los polvos a partir de una suspensión líquida. En este caso, el líquido tiene que ser evaporado antes de la etapa de sinterización para asegurar que el láser interactúa con el polvo seco y compactado. Actualmente la técnica de μ -SLS se encuentra en desarrollo por la Ecole Polytechnique de Lausanne, donde se cuenta con un dispositivo SLS con la capacidad de desarrollar prototipos metálicos y cerámicos [72].

2.1.4.11 Micro sinterizado selectivo por láser - Selective laser micro sintering (SLMS)

El SLMS fue desarrollado en el Centro Nacional de Tecnología Láser de la Universidad Politécnica de Beijing, ofrece una resolución mejorada en comparación a otros procesos de sinterizado de micropartes ya que emplea un punto de rayo láser más pequeño. Con el fin de fabricar microdispositivos la tecnología emplea un láser Q-switched Nd: YAG a 1064 nm y una potencia de 50 W. Además se ha desarrollado un equipo que duplica la frecuencia del láser, empleando una cavidad resonante en forma de anillo por donde se hace pasar el haz láser. Con este equipo la longitud de onda se desplaza hacia la luz verde (532 nm). En comparación con otras técnicas que emplean un diámetro del punto láser de 28,3 μm con la frecuencia fundamental de 1064 nm, el SLMS puede generar un punto de láser de 13 μm de diámetro. Se ha comprobado una eficiencia de conversión de 31%. Para demostrar la funcionalidad del sistema, se sinterizaron micro caracteres chinos con un espesor de pared de menos de 100 μm y una altura de aproximadamente 2 mm a partir de polvo de plomo [72].

2.1.4.12 Sinterizado por descarga eléctrica selectiva de alta frecuencia - High frequency selective electrical discharge sintering (HFSEDS)

En el proceso HFSEDS un objeto es creado por la fusión selectiva de capas delgadas empleando polvos metálicos que están recubiertos con polímeros, los cuales son empleados como materias primas. Una computadora controla el escaneo de un arco de plasma de alta frecuencia que se emplea como una fuente de calor concentrada para la sinterización de capas secuenciales correspondientes a las rebanadas en del modelo de CAD. Por lo tanto, la capa externa de los polvos metálicos recubiertos se funde después de absorber una pequeña cantidad de calor del arco de plasma de alta frecuencia y después libera el calor durante la resolidificación para formar formas densas. La parte en verde manufacturada es frágil por lo que se requiere un postprocesamiento de sinterización e infiltración. El proceso de transferencia de calor tiene una influencia significativa en la calidad microestructural final de las piezas.

La secuencia de pasos del proceso HFSEDS es la siguiente, [183]:

Preparación del polvo. Se seleccionan cuidadosamente los polvos metálicos con respecto al tipo y tamaño y un aglutinante polimérico adecuado. A continuación, las partículas de polvo de metal se recubren por aglutinantes poliméricos que proporcionan una mayor resistencia en verde y aumentan su capacidad de absorción de la radiación térmica incidente.

Alimentación del polvo. Una capa delgada de polvo es añadida ligeramente por encima de la anterior. El operador determina el espesor de cada capa en el rebanado del modelo CAD. Esta etapa generalmente se realiza mediante un sistema independiente, que está incluido en un cilindro y una placa giratoria de deposición ajustable, Figura 2.95 (a). A continuación, un rodillo barre una superficie horizontal ligeramente por encima de la nueva capa y lleva a cabo una acción de prensado para disminuir la porosidad y proporcionar una mayor densidad.

Control de las condiciones atmosféricas. Las condiciones de alta temperatura del proceso de unión proporcionan una condición adecuada para la oxidación del polvo metálico. Por lo tanto, el sistema debe encontrarse un ambiente libre de Oxígeno en el cual se unen los materiales. Por lo tanto, un sistema de control atmosférico se coloca alrededor del objeto en la cámara incorporada del sistema HFSEDS para evitar la formación de óxidos. Se utilizan gases de protección como el Argón,

Nitrógeno y Helio. Por lo tanto se recomienda que el proceso de HFSEDS se realice en una cámara flexible llena de argón, Figura 2.95 (b), ya que mejora la eficiencia del arco de plasma [183].

Aglutinado primario/sinterizado. Existen dos tipos de mecanismos de sinterización de polvo: sinterización en fase sólida (Solid Phase Sintering, SPS) y sinterizado en fase líquida (Liquid Phase Sintering, LPS). SPS es un proceso térmico, que se produce a temperaturas inferiores al punto de fusión de los polvos y es un proceso bastante lento [184]. A su vez, el LPS es mucho más rápido. Como HFSEDS se caracteriza por el tiempo relativamente corto de interacción radiación térmica entre arco de plasma de alta frecuencia y las partículas de polvo el proceso HFSEDS sólo puede ser realizado por el mecanismo de LPS [183]. La condición de alta temperatura en las partículas de polvo es inducida por la energía de la descarga eléctrica, generando temperaturas cercanas al punto de fusión del aglutinante revestido y actuando como una fuente de calor concentrada que causa la fusión superficial del aglutinante.

Después de completar este proceso, se forma un puente entre las partículas del aglutinante, Figura 2.96, [185]. Antes de fundir las partículas de polvo adyacentes estas son unidas por acción del arco de plasma de alta frecuencia, todo el polvo de la capa se calienta justo por debajo del punto de fusión del material aglutinante con el fin de minimizar la distorsión térmica y facilitar la fusión a la capa anterior.

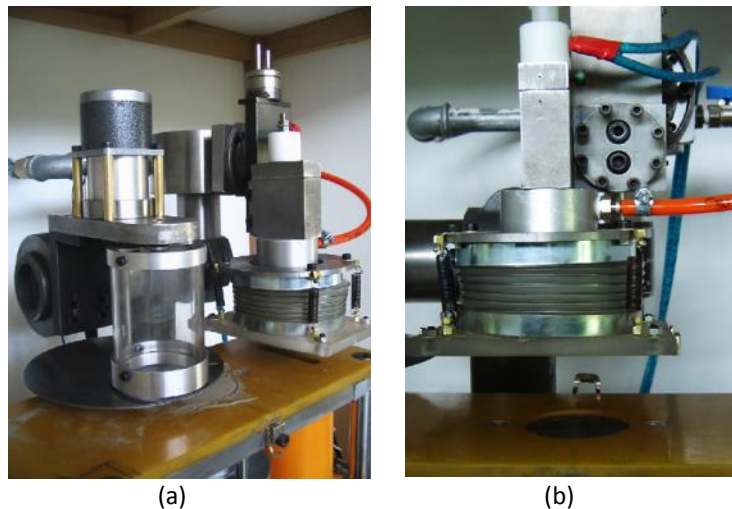


Figura 2.95. (a) Sistema de avance de ajuste rotatorio del sistema HFSEDS, (b) Cámara flexible para el llenado de Argón.

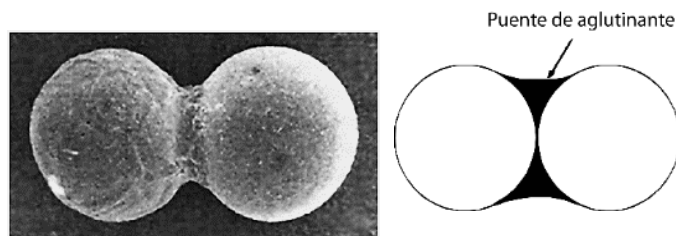


Figura 2.96. Esquema del puente de aglutinante formado después de que el aglutinante se funde.

2.1.4.13 Sinterizado rápido de polvos basado en patrones - Rapid pattern based powder sintering (RPBPS)

La técnica RPBPS comprende las etapas de creación de un patrón hecho de materiales poliméricos usando una máquina de prototipado rápido a partir de una geometría CAD en 3D. El patrón se coloca sobre un sustrato en una caja o marco y una mezcla de metal (cerámica o polímero) en polvo y aglutinante se moldea alrededor del patrón. A continuación, existe una etapa para retirar el patrón y separar el sustrato para obtener un molde compacto en verde que tiene la cavidad deseada. Posteriormente el molde en verde se sinteriza y/o infiltra de un aglutinante u otro material para formar una herramienta o pieza. La nueva técnica tiene las ventajas de utilizar una variedad de materiales, la rapidez, la fabricación de piezas complejas de geometría y de bajo costo, en comparación con varias técnicas existentes de manufactura rápida. La Figura 2.97 presenta un ejemplo de pieza fabricada mediante el proceso RPBPS [186]. El proceso RPBPS es muy similar al proceso de cera perdida utilizado en fundición.

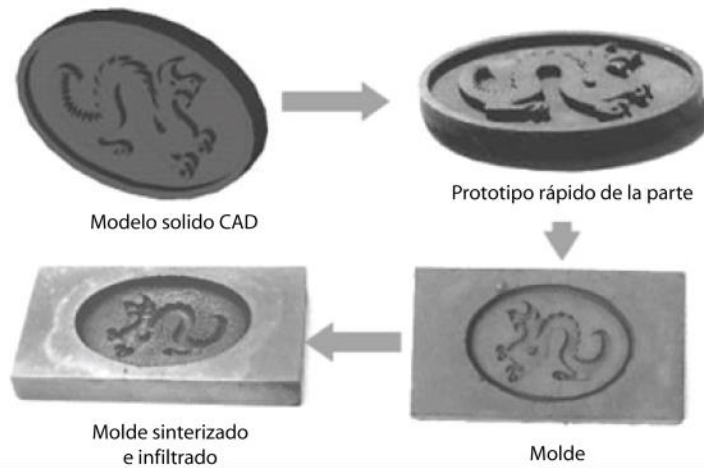


Figura 2.97. Pieza fabricada mediante RPBPS.

2.1.4.14 Otros procesos de sinterizado

Dentro de las tecnologías RP basadas en el sinterizado, existen otros procesos, sin embargo no se reportan detalles en la literatura. Dentro de estas tecnologías de prototipado rápido, se incluyen:

- Sinterizado multimaterial selectivo por láser - Multimaterial selective laser sintering (MMSLS), [1].
- Refundido selectivo de polvo por láser - Selective laser powder remelting (SLPR), [1].

2.1.5 Procesos de aglutinado

Los procesos de aglutinado emplean un material aglutinante para unir el material de construcción, que generalmente se encuentra en polvo. Dentro de estas tecnologías es común que no se requieran estructuras de apoyo debido a que el material depositado previamente, y no aglutinado, realiza la función de soporte hasta finalizar el proceso de construcción.

- Impresión tridimensional – Three dimensional printing (3DP).
- Formación topográfica de formas – Topographic shape formation (TSF).
- Modelado de polvo de formas libres – Freeform powder molding (FPM).
- Calentamiento por reacción química local a través de escaneo láser – Local chemical reaction heat by laser scanning (LCRHLS).

2.1.5.1 Impresión tridimensional - Three dimensional printing (3DP)

El proceso de impresión tridimensional, inventado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, utiliza un aglutinante el cual se imprime sobre un lecho de polvo. En el proceso 3DP una capa delgada de polvo cerámico, metálico o polimérico se difunde por dispersión en seco o mediante un vehículo líquido por medio de un rodillo. Posteriormente el polvo se une selectivamente por la deposición de gotitas de aglutinante, de acuerdo con los datos de CAD 3D, Figura 2.98. El lecho de polvo también actúa como una estructura de soporte. Para la generación de una nueva capa, la plataforma se baja y el proceso continúa con la difusión de una nueva capa de polvo. Cuando todas las capas han sido aglutinadas, la pieza se somete a un postprocesamiento el cual incluye la limpieza para eliminar el polvo excedente y un curado. La resolución del proceso depende principalmente del comportamiento de penetración de las gotitas de aglutinante en el lecho de polvo [72]. La Tabla 2.24, presenta parámetros técnicos de la tecnología 3DP.

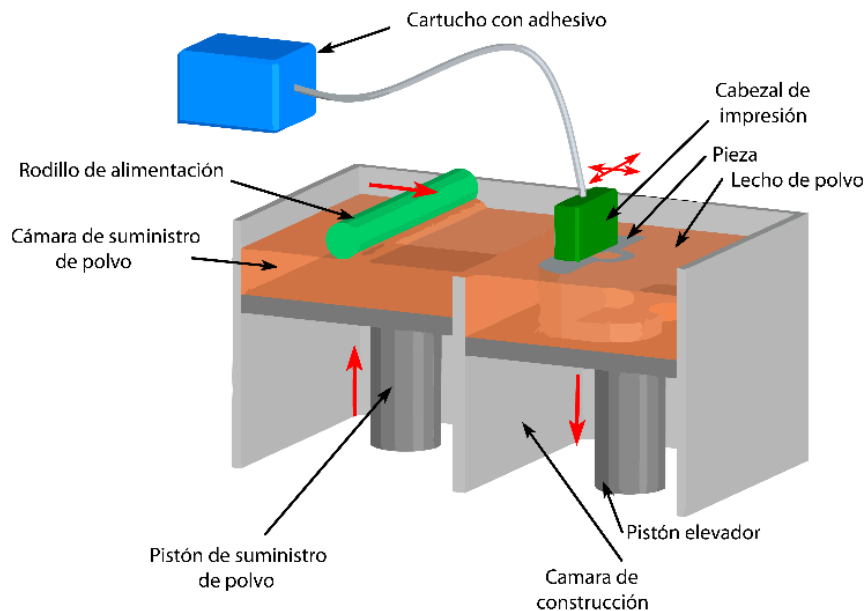


Figura 2.98. Representación del sistema 3DP [68].

Tabla 2.24. Parámetros técnicos de la tecnología 3DP.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[73]
Espesor mínimo de capa	0.05	mm	[19]
Espacio de trabajo	750 x 750 x 700	mm	[68]
Velocidad de trabajo	0.43-0.6	mm/min	[187], [188]
Acabado superficial (R_a)	30-60	μm	[189]
Precisión	0.07	mm	[187], [188]
Velocidad volumétrica	275 000-383 333	mm^3/min	[187], [188]

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: Información no disponible

-Materiales empleados [19]

- Yeso.
- Materiales compuestos o basados en almidón
- Materiales basados en sílice.
- Metales.

-Ventajas del proceso [73]

- Proceso rápido.
- Puede ser utilizado para generar casi cualquier geometría.
- Costo bajo de los materiales.
- Permite generar piezas de color.

-Desventajas del proceso [73]

- Densidad restringida de las partes.
- Se requiere que las partes sean infiltradas después del tratamiento térmico.
- Las piezas generadas son frágiles.

-Aplicaciones [73]

- Diseño industrial.
- Visualización científica.
- Salida de datos de análisis de elementos finitos, Figura 2.99 (a).
- Aplicaciones arquitectónicas de modelado, Figura 2.99, (b).
- Fabricación de biomodelos, Figura 2.100.
- Modelos de diseño o de fundición de metales.
- Fabricación moldes de cerámica para fundición de metal.
- Verificación de ensamble y visualización en ingeniería, Figura 2.99(c) y Figura 2.101.

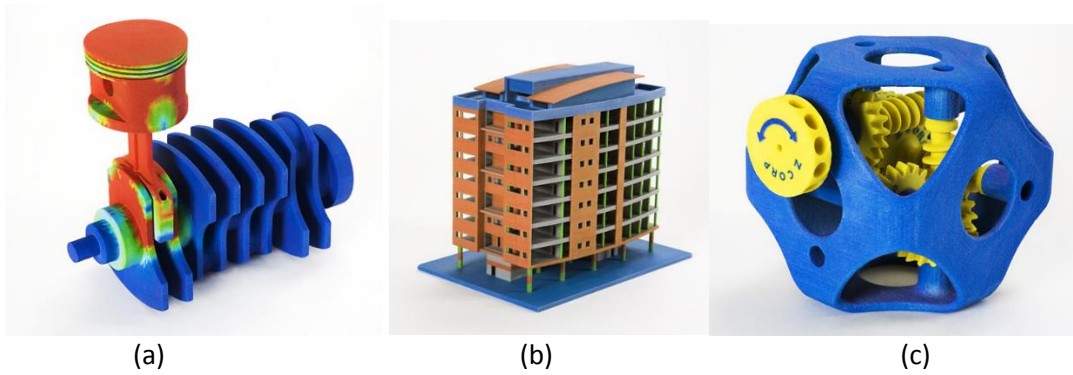


Figura 2.99. Ejemplos de modelos de visualización generados por 3DP [190]: (a) salida de datos de análisis de elementos finitos, (b) prototipo de visualización arquitectónica, (c) prototipo de ensamble.

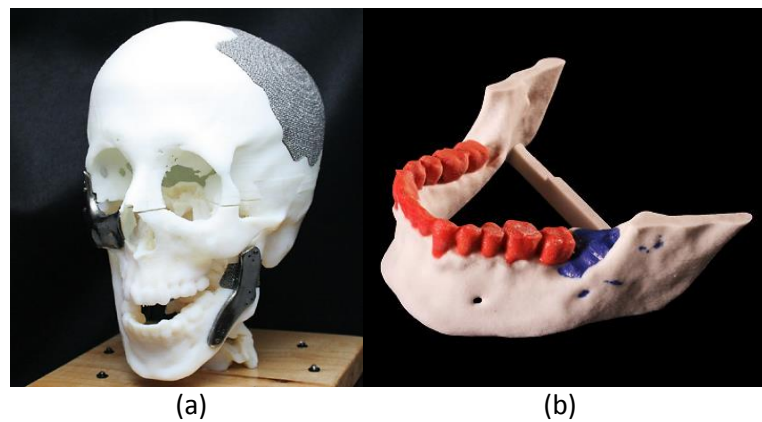


Figura 2.100. Aplicaciones médicas empleando 3DP: (a) modelado de un implante de cráneo mediante 3DP [191], (b) mandíbula artificial generada por 3DP [192].



Figura 2.101 Modelo de visualización y verificación de ensamble en ingeniería [19].

-Compañías fabricantes de la tecnología

- 3D Systems (EUA).
- ZCorp (EUA).
- ExOne (Alemania).
- HöganäsAB (Suecia).
- Viridis3DLLC.
- Voxeljet Technology GmbH (Alemania).

2.1.5.2 Formación topográfica de formas - Topographic shape formation (TSF)

TSF se utiliza principalmente para la producción rápida de moldes, que luego pueden ser utilizadas para crear un prototipo. El sistema imprime cera de parafina alrededor de un centímetro por debajo de la superficie de un polvo de sílice. Una vez que cada capa se ha completado, más polvo se aplica y se repite el proceso. La cera se une al polvo para formar la parte y también se funde parcialmente a la capa anterior para asegurar una buena adherencia. Una vez que la parte se ha completado, se lija el recubierto de cera y luego puede emplearse como un molde para la parte deseada. En la actualidad la técnica TSF está en uso en una oficina de servicios solamente. La máquina dispone de un espacio de trabajo de 3353 x 1829 x 1219 mm, un espesor de capa de 1.270-3.810 μm , resolución de 12.7 μm y una precisión de $\pm 1.270 \mu\text{m}$, [6].

-Materiales empleados

- Fibra de vidrio.
- Hormigón.
- Espuma de expansión.

-Ventajas del proceso

- Puede construir piezas muy grandes de forma rápida y económica.

-Desventajas del proceso

- Los moldes tienen un acabado "arenoso" de la superficie y pueden requerir un proceso de acabado.

-Aplicaciones

- Producción de moldes.

2.1.5.3 Moldeado de polvo de forma libre - Freeform powder molding (FPM)

La tecnología FPM es una técnica para producir rápidamente herramientas basadas en el moldeo de dos materiales en polvo y la noción del moldeo por congelación. El proceso se basa en las diferencias de comportamiento del material para definir selectivamente la forma del componente. Mediante la disposición de polvos con diferente cinética de difusión dentro de un volumen confinado, es posible procesar todo el volumen y hacer que sólo uno de los materiales se consolide mientras que el otro permanece como polvo suelto. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.102, donde

el material que consolida es denominado polvo de parte y el material que no es consolidado se denomina polvo de herramienta. En este ejemplo el polvo de parte representa una parte que se convertirá en el utillaje utilizado para la conformación de metales. Una suspensión de polvo y el portador se introducen en un molde a baja o nula presión y la mezcla se congela. Los moldes se pueden fabricar a partir de una variedad de materiales de bajo costo que pueden ser fácilmente mecanizados o pueden ser producidos por una variedad de procesos de RP comerciales. Los vehículos acuosos se utilizan porque pueden ser fácilmente congelados.

El procedimiento de FPM se utiliza para producir utillaje. Un molde se crea por RP y se utiliza para dar forma a una masa de polvo. Este polvo se sinteriza posteriormente para generar un componente sólido que tiene las propiedades físicas requeridas de utillaje. El utillaje resultante se usa para hacer el componente final deseado [193]. La Figura 2.103 representa la secuencia de operaciones usadas para la producción del herramental rápido.

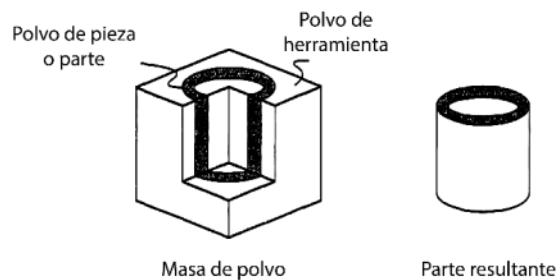


Figura 2.102. Concepto de materiales de la tecnología FPM.

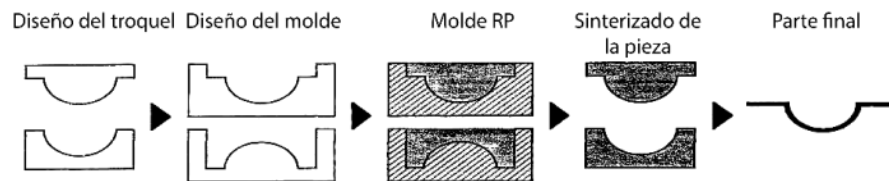


Figura 2.103 Secuencia del proceso FPM.

2.1.5.4 Otros procesos de aglutinado

Existen otros procesos de aglutinado los cuales han sido propuestos como técnicas potenciales RP sin embargo no se tienen detalles en la literatura al respecto. Estos procesos incluyen:

- Calentamiento por reacción química local mediante escaneo láser - Local chemical reaction heat by laser scanning (LCRHLS), [1].

2.1.6 Procesos de ensamble

En los procesos de ensamble la pieza a construir es dividida en formas 3D simples, en lugar de ser dividida en capas horizontales. Estas formas simples pueden ser creadas físicamente por métodos de manufactura convencional o técnicas RP, para luego ser ensambladas y formar la pieza final. Dentro de los sistemas de ensamble se encuentran:

- RPBloX.
- OcBloX/RPNNS.
- Estratoconcepción – Stratoconception (SC).

2.1.6.1 Rpblox- Rpblox (RPBloX)

El proceso RPBloX usa maquinaria y tecnología de manufactura convencional para la fabricación rápida de piezas. En el proceso RPBloX el modelo CAD se descompone en celdas (o BloX) de distintos tamaños [53]. La metodología RPBloX consta de los siguientes pasos, Figura 2.104: descomposición del modelo 3D en BloXes; planeación de la manufactura y ensamble de BloXes; generación de código de maquinado y ensamble robótico; fabricación de BloXes y ensamble del componente. La arquitectura del sistema está abierta para que puedan ser fácilmente incluidas funciones adicionales para permitir la manufacturabilidad y el análisis del ensamble para el proceso. Por ejemplo, un análisis de manufacturabilidad se puede aplicar a cada BloX para determinar dificultades de producción o quizás prevenir el levantamiento del BloX [194].

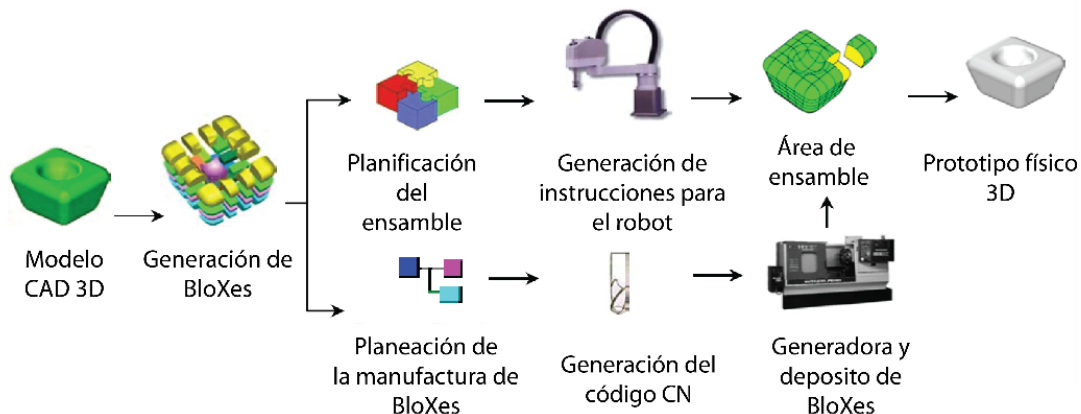


Figura 2.104. Vista esquemática del proceso RPBloX.

-Materiales empleados

- Metales.
- Polímeros.
- Madera.

-Ventajas del proceso

- Reducción del tiempo de construcción, especialmente cuando se producen componentes grandes o de paredes gruesas.
- Bajos costos de producción sin perder la precisión del proceso de construcción.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo CNC.
- Equipo robotizado de ensamble.

2.1.6.2 OcBlox / RPNNs

El sistema OcBlox o RPNNs (Rapid prototyping of near net shape, producción rápida de formas aproximadas) está basado en la aproximación de un modelo 3D mediante pequeños cubos de varios tamaños, llamados octantes, usando la técnica de descomposición Octree, Figura 2.105. Cada uno de estos cubos se identifica por un código de ubicación que representa su posición en el modelo en un árbol de octantes. Se realiza además una optimización de la aproximación para reducir el número de cubos requeridos para formar el modelo 3D. Una vez que los modelos Octree han sido verificados, el sistema genera automáticamente instrucciones para el ensamble automático del prototipo aproximado. En el sistema RPNNs están integradas la planeación de ensamble y la generación automática de las instrucciones del robot. Posteriormente se requiere un postprocesamiento de maquinado del modelo NNS (near net shape, aproximada a la forma final), para obtener la pieza con sus dimensiones finales [195]. En la Figura 2.106, se muestra el sistema RPNNs real y la Tabla 2.25 presenta las características técnicas del sistema OcBlox.

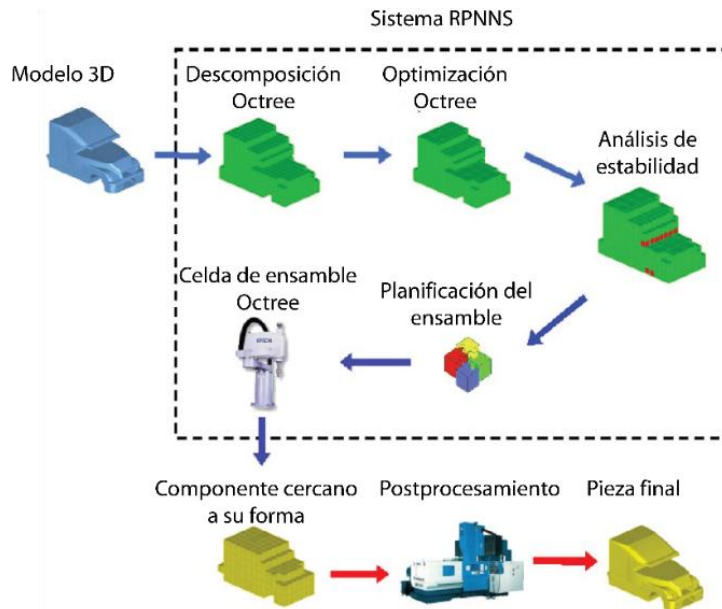


Figura 2.105. Sistema RPNNs.

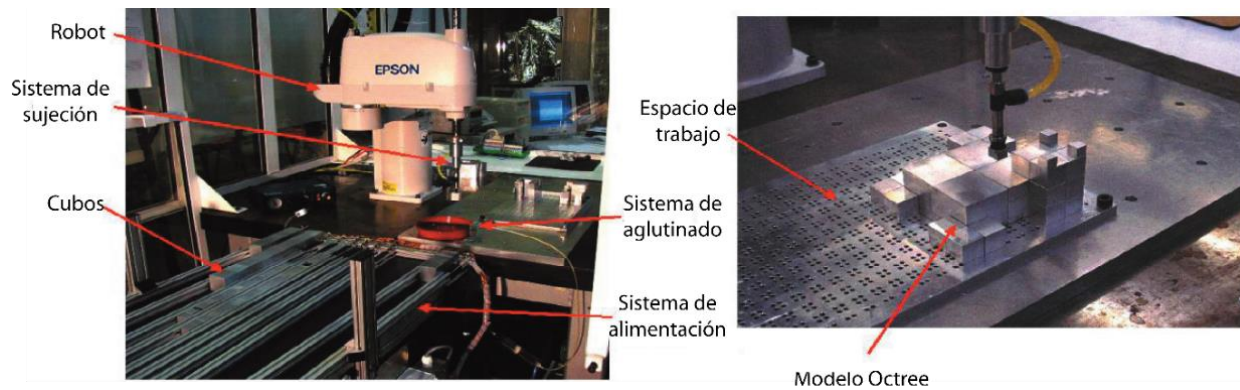


Figura 2.106. Sistema real RPNNS.

Tabla 2.25. Datos técnicos disponibles para la tecnología OcBlox.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Investigación y desarrollo		[195]
Espesor de capa de adhesivo	0.05	mm	[195]
Espacio de trabajo	600 x 300 x 200	mm	[195]
Velocidad de trabajo	9.66	seg/cubo	[195]
Tiempo de curado del adhesivo	5	seg	[195]
Acabado superficial (Ra)	1-6	μm	[195]
Precisión del robot	0.02	mm	[195]
Error de alineación entre cubos	0.65	mm	[195]
Velocidad volumétrica	N.D	mm^3/min	

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.D: No disponible

-Materiales empleados

- Metales.
- Polímeros.

-Ventajas del proceso

- Reducción del tiempo de construcción, especialmente cuando se construyen componentes de grandes dimensiones y/o paredes gruesas.
- Bajos costos de producción.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo CNC.
- Equipo robotizado para ensamble.

2.1.6.3 Estratoconcepción – Stratoconception (SC)

El proceso de Estratoconcepción consiste en descomponer el modelo CAD 3D en un conjunto de capas elementales sencillas llamadas "estratos", en el que se insertan los elementos de ensamble. Cada uno de los estratos se identifica y a continuación son fabricados directamente por fresado rápido, corte por láser, corte con hilo caliente o de todas las otras tecnologías de corte de todo tipo de material de lámina, Figura 2.107. Los estratos son entonces ensamblados, junto con inserciones, puentes o elementos de unión con el fin de reconstruir la pieza final. El conjunto de los estratos se considera desde la etapa de diseño para ayudar a soportar los esfuerzos mecánicos durante el uso. El proceso es rápido y no tiene ninguna limitación, ya sea en formas, materiales o tamaño. Permite la fabricación de partes sólidas, piezas con subvaloración (que no pueden ser fabricados en el maquinado 3D convencional), o partes huecas. Se puede utilizar para piezas mecánicas nuevas, así como para maquetas, modelos y utillajes [196].

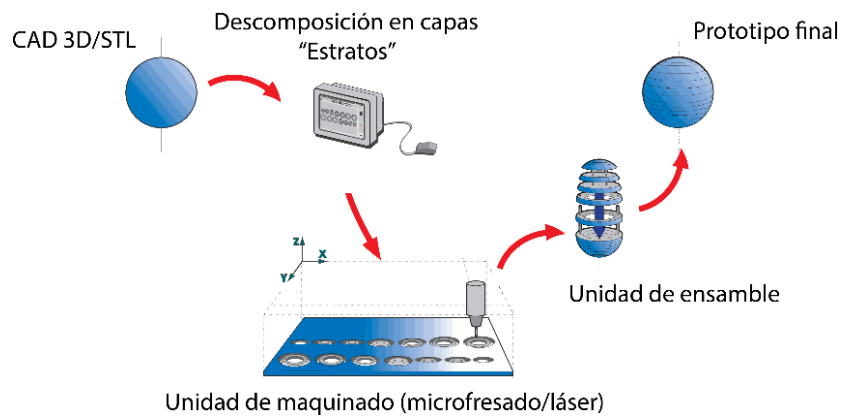


Figura 2.107. Representación esquemática del proceso de Estratoconcepción.

2.1.7 Procesos de organismos

Los procesos de organismos son aquellos que pueden producir andamios, tejidos u órganos funcionales a partir de células vivas. Dentro de los procesos RP de organismos es común que se reporten logros en la generación de tejido óseo y tejido dérmico empleando biomateriales compatibles con el organismo, ya sea humano o animal. En su mayoría los procesos RP de organismos se encuentran en actual desarrollo y en fase de investigación. Dentro de estos procesos se incluyen:

- Formado por gradiente de temperatura controlada – Grading-temperature control forming (GTCF).
- Laminado en sitio de enlaces cruzados – Layered in situ cross-linking (LISC).
- Solidificación de materiales termosensibles – Thermo-sensitive materials solidification (TSMS).
- Manufactura por deposición a baja temperatura – Low-temperature deposition manufacturing (LDM).
- Impresión de órganos – Organ printing (OP).
- Solidificación por chorro de aire a presión – Air-pressure jet solidification (AJS).
- Prototipado criogénico – Cryogenic prototyping (CP).
- Manufactura por extrusión precisa – Precise extrusion manufacturing (PEM).
- Ensamble tridimensional de células – 3D Cell-assembly technique (3DCAT).
- Impresión biológica por láser – Biological laser printing (Bio-LP).

2.1.7.1 Formado por gradiente de temperatura controlada - Grading-temperature control forming (GTCF)

La técnica GTCF se desarrolla por investigadores de la Universidad de Tsinghua (Beijing, China). El GTCF se basa en las propiedades térmicas de los enlaces cruzados de una solución de material elástico, que es dispensado sobre un sustrato para formar objetos tridimensionales. El material depositado es solidificado con ayuda del gradiente de temperatura que se genera cuando éste sale del inyector [28].

-Aplicaciones

- Construcción de andamios para la liberación controlada de drogas.
- Construcción de andamios de segmentos de hueso.
- Construcción de andamios de cartílagos.
- Andamios de las glándulas salivales.
- Ensamble directo de células.

2.1.7.2 Laminado en sitio de enlaces cruzados - Layered in situ cross-linking (LISC)

En el proceso LISC, siendo desarrollado por la Universidad de Tsinghua (Beijing, China), se ensamblan gotas hechas de células y de material extra celular para formar capas y crear estructuras 3D. El proceso garantiza la unión total de las célula entre cada capa ya que emplea una boquilla inyectora para efectuar el ensamble, [28].

-Aplicaciones

- Construcción de andamios para la liberación controlada de drogas.
- Construcción de andamios de segmentos de hueso.
- Construcción de andamios de cartílagos.
- Ensamble directo de células.

2.1.7.3 Solidificación de materiales termo sensibles - Thermo-sensitive materials solidification (TSMS)

Un grupo formado por la Universidad de Clemson y la Universidad Médica del Sur de Carolina en EU, desarrolló el proceso TSMS para imprimir gel termosensitivo biodegradable y formar objetos 3D. El objetivo era aplicar este proceso de impresión de células para formar tejidos u órganos, posicionando células sobre las capas de gel generadas, [28].

-Aplicaciones

- Construcción de andamios para la liberación controlada de drogas.
- Construcción de andamios de segmentos de hueso.
- Construcción de andamios de cartílagos.
- Ensamble directo de células.

2.1.7.4 Manufactura por deposición a baja temperatura - Low-temperature deposition manufacturing (LDM)

El proceso LDM es una técnica empleada para fabricar andamios de poliácido L-láctico (PLLA) y fosfato tricálcico (TCP) para ingeniería tisular. El proceso comienza con granos de PLLA que son disueltos en dioxano ($C_4H_8O_2$), después de esto el polvo de TCP se mezcla con la solución de PLLA para preparar una suspensión de material. La suspensión formada consiste de 15% PLLA, 15% TCP y 70% de dioxano en peso. La suspensión se introduce en el contenedor de material de suministro, el cual tiene en su parte inferior un tubería blanda conectada a la boquilla de una bomba de tornillo, Figura 2.108 (a). El diámetro de la salida de la boquilla es de 0.3 mm. El sistema construye capa por capa y directamente el andamio guiándose por el modelo tridimensional. Esto se logra en un ambiente de temperaturas bajo 0 °C, en un refrigerador. La computadora controla el movimiento de la boquilla en el plano X-Y y extruye la suspensión de material hacia fuera, depositándola en la plataforma siguiendo el área definida por los modelos digitales. La capa de material depositada se congela en la plataforma. También bajo el control de la computadora, la plataforma desplaza hacia abajo 0.15 mm en la dirección Z tras el proceso de formación de cada capa.

Para asegurar la formación de los poros de la sección transversal vertical, el material extruido se deposita en una serie de líneas paralelas a lo largo de la dirección Y alternándose con líneas paralelas a la dirección X, Figura 2.108 (b). Las dimensiones de los poros se ajustan cambiando el intervalo y dirección de barrido, así como el intervalo de distancia de las líneas paralelas en una capa [197]. Después del proceso de formado, los andamios congelados formados por el sistema LDM se introducen en un secador ALPHA1-2 Freeze por 38 hrs para eliminar el disolvente. La Figura 2.109 presenta un tejido poroso fabricado por el sistema LDM, [197].

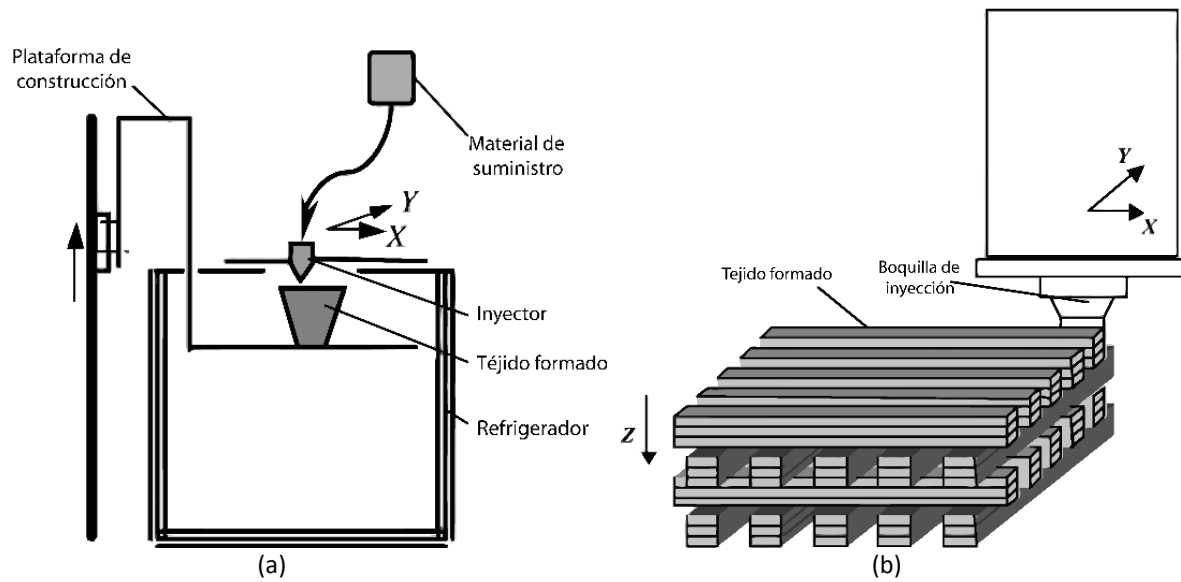


Figura 2.108. Sistema LDM: (a) Estructura del sistema LDM, (b) Ilustración del esquema de formado de andamios en LDM, [197].

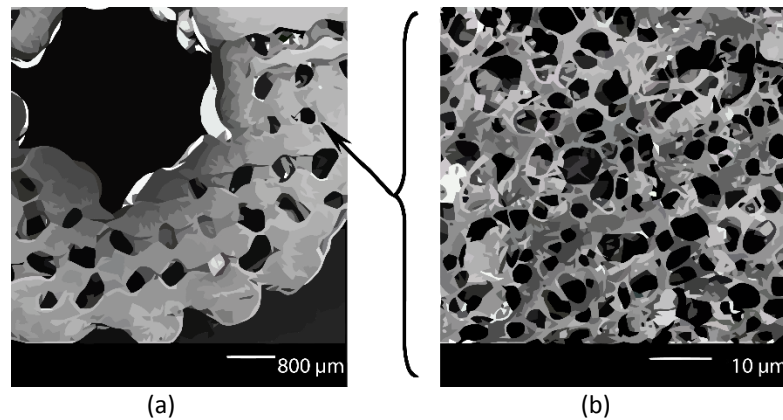


Figura 2.109. Tejido poroso compuesto de PLLA/TCP fabricado mediante LDM: (a) baja magnificación, (b) alta magnificación, [197].

-Materiales empleados, [197]

- PLLA.
- Fosfato tricálcico.
- Dioxano

-Aplicaciones [197]

- Construcción de andamios para la liberación controlada de drogas.
- Construcción de andamios de segmentos de hueso.
- Construcción de andamios de cartílagos.
- Ensamble directo de células.

2.1.7.5 Impresión de órganos - Organ printing (OP)

La impresión de órganos, OP, es una variante biomédica de la tecnología del prototipado rápido, la cual está basada en la fluidez de los tejidos. El OP se define como una tecnología de prototipado rápido de órganos 3D asistida por computadora, basada en la deposición de capa por capa de células y/o segregados de células dentro de un gel 3D con maduración secuencial de la construcción impresa dentro de órganos o tejidos vivos. Esta definición de impresión de órganos incluye los diversos diseños de impresoras y componentes del proceso de deposición, tales como, por ejemplo, chorro de impresoras de base celulares, dispensores celulares o bioplotters, los diferentes tipos de hidrogeles 3D y diferentes tipos de células.

El procedimiento de impresión de órganos se puede subdividir en tres etapas sucesivas: preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento. El preprocesamiento trata principalmente con el desarrollo de un diseño asistido por computadora (CAD) o el modelo de un órgano específico. El diseño se puede derivar de reconstrucción de la imagen digitalizada de un órgano natural o tejido. Los datos de imagen pueden ser derivados de diversas modalidades incluyendo exploración no invasiva del cuerpo humano (por ejemplo, resonancia magnética o tomografía computarizada) o de una reconstrucción 3D detallada de secciones en serie, de órganos específicos. Otro enfoque para el diseño de un tejido se basa en un modelo matemático utilizando un conjunto de principios teóricos, reglas o leyes relacionadas con la organización espacial. El siguiente paso es el procesamiento o impresión órgano real, que consiste en colocar las células en un andamio impreso y post-procesamiento u órgano que se refiere a la maduración de los órganos, Figura 2.110 [198].

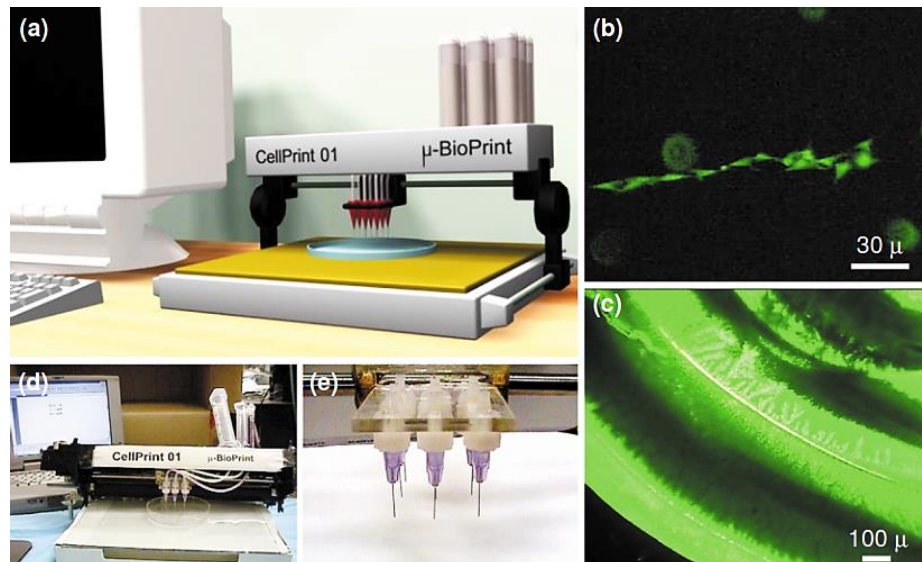


Figura 2.110. Impresora de células e imágenes de células impresas: (a) modelo CAD de un sistema OP, (b) células endoteliales bovinas impresas en gotas de 50 μm de tamaño en una línea, (c) sección transversal de un gel impreso, (d) fotografía de una impresora real de células, (e) inyectores de células, [198].

-Desventajas del proceso

- Incapacidad para colocar con precisión las células o agregados de células en un andamio impreso.

-Aplicaciones

- Ensamble directo de células.

2.1.7.6 Solidificación por chorro de aire a presión - Air-pressure jet solidification (AJS)

La técnica AJS, actualmente en desarrollo, construye una pieza capa por capa directamente desde datos provenientes de un modelo CAD 3D, el cual se obtiene a partir de datos computarizados del escaneo de imágenes médicas, como una tomografía. El modelo 3D con formato STL se puede enviar al sistema AJS para fabricar el contorno exterior de un molde y los andamios internos de este. Una vez cargados los datos del modelo al sistema AJS, se procede a llenar las dos boquillas inyectoras con material de construcción, Figura 2.111. Una vez llenas las boquillas, estas son calentadas hasta una temperatura de 90° y 120 °C, respectivamente, con la finalidad de derretir el material de construcción hasta un estado semifundido. Posteriormente, se comienza a construir el contorno exterior del molde, extruyendo un filamento fino de material por una boquilla inyectora, la cual tiene un diámetro de 0.2mm, y es controlada en sus operaciones de encendido y apagado por medio de una válvula electromagnética. Una vez finalizada la primera capa, la plataforma de construcción desciende 0.2mm y continúa con la fabricación de la siguiente capa hasta que se tiene una altura suficiente para contener los andamios. A continuación, la segunda boquilla inyectora comienza a extruir los andamios requeridos en el molde, bajo el mismo principio de funcionamiento del primer inyector. Este proceso se repite hasta finalizar la construcción del contorno exterior del molde y los andamios 3D, [199].

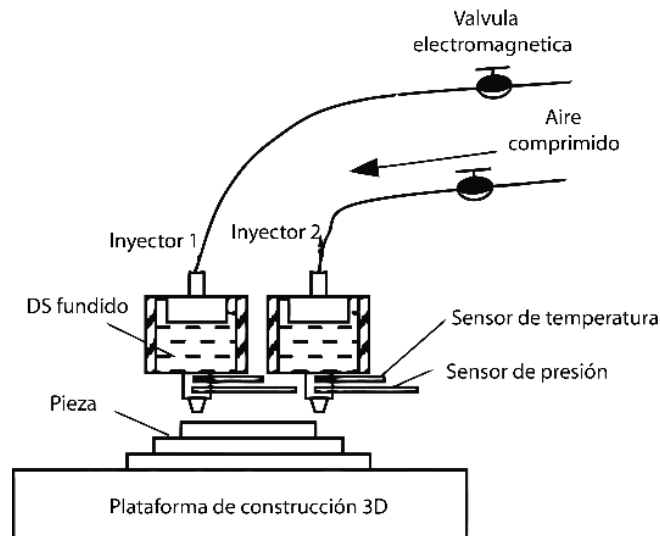


Figura 2.111. Ilustración esquemática del sistema AJS.

La técnica AJS emplea sacarosa desnaturalizada (denatured sucrose, DS) como material de construcción, esto debido a que tiene una viscosidad propicia para la generación de los andamios 3D y presenta una ductilidad y plasticidad adecuada después de la solidificación. Además, con la finalidad de evitar que los andamios 3D colapsen se añade a la DS CPC (cemento de fosfato de calcio, calcium phosphate cement), el cual es un tipo de hidroxiapatita que presenta una buena biocompatibilidad y BMP que son proteínas morfogenéticas óseas. La Figura 2.112, muestra el molde de una estructura ósea artificial generada por AJS.

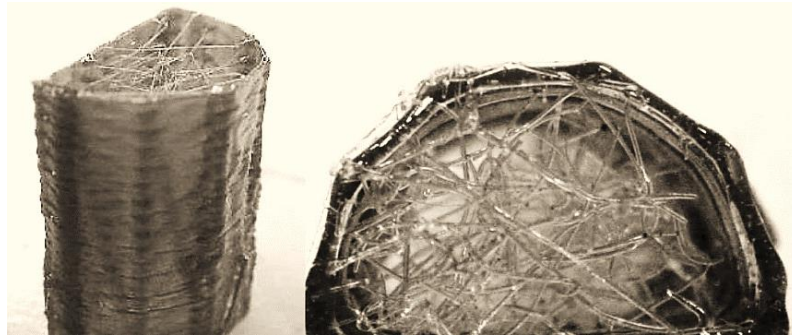


Figura 2.112. Molde de estructura ósea creada por el sistema AJS.

-Materiales empleados [199]

- Sacarosa desnaturalizada.

-Aplicaciones [199]

- Moldes de huesos artificiales con geometría específica de contorno.
- Arquitecturas porosas internas.

2.1.7.7 Prototipado criogénico - Cryogenic prototyping (CP)

El método CP es similar a la creación de prototipos rápidos por congelamiento (RFP), sin embargo en el CP el material depositado se solidifica en una cámara criogénica para evitar el colapso de las estructuras del andamio. Además, el método CP es capaz de producir andamios predeterminados con macro y microestructuras porosas. Esto es debido a que las soluciones de materiales se dispensan en caminos controlados y se congelan rápidamente para conservar las estructuras depositadas (macroestructura del andamio).

El diagrama esquemático del proceso de prototipado criogénico se presenta en la Figura 2.113 (a). Se tiene una boquilla con un movimiento de traslación en la dirección vertical, combinada con un 2º grado de libertad de la plataforma que tiene un movimiento en el plano horizontal. El flujo de los materiales es vigilado por un controlador neumático en una cámara criogénica, en la cual la temperatura es críticamente vigilada y mantenida en un rango constante dentro del volumen de barrido del trazador CP. Se tienen dos componentes: un refrigerador y una cámara térmicamente aislada. El refrigerador funciona con líquido, el cual es enfriado haciéndose pasar entre lazos externos de una bobina para controlar y mantener la temperatura deseada en el compartimiento aislado. La tubería que contiene el líquido está hecha de acero inoxidable para eliminar los efectos corrosivos del líquido.

Una vez construido el sistema, las técnicas usuales RP se utilizan para fabricar entramados por Ingeniería de Tejidos (Tissue Engineering, TE). Hay tres componentes principales que se utilizan: los componentes de diseño asistido por computadora (CAD), componentes de manufactura asistida por computadora (CAM) y el sistema que segrega el material siguiendo el proceso mostrado en la Figura 2.113 (b). Un programa CAM necesita ser desarrollado para la construcción del entramado por TE, el cual debe tener las funciones básicas que se muestran en la Figura 2.114.

Una versión del software CAM ha sido desarrollada y se le llama Entramado de Tejidos Asistido por Computadora, CATS (por sus siglas en inglés Computer-Aided Tissue Scaffolds) [200].

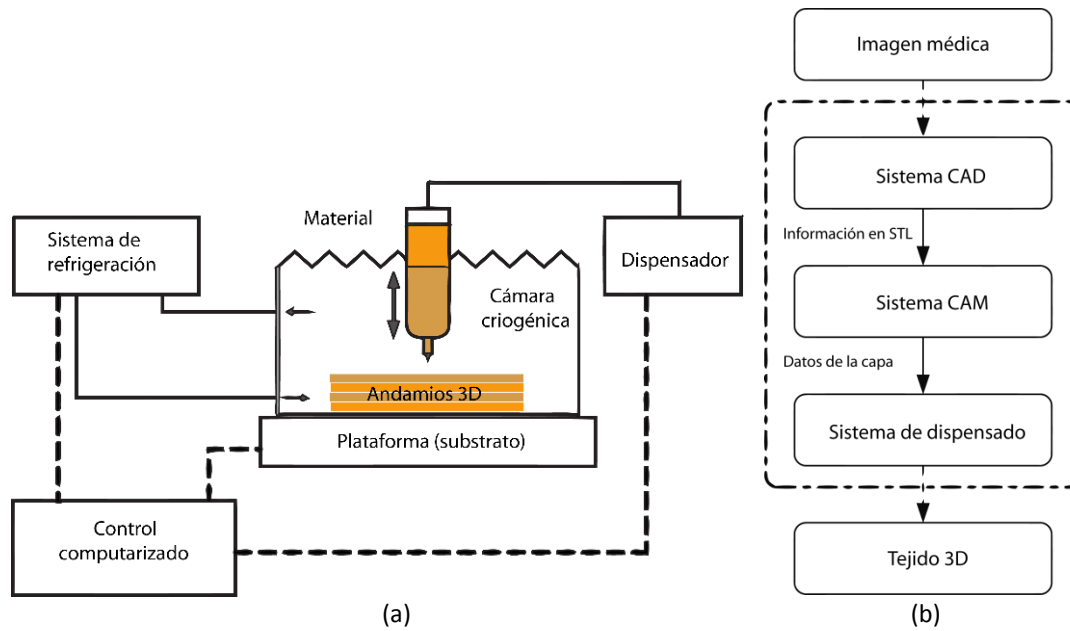


Figura 2.113. Sistema de prototipado criogénico: (a) representación esquemática del sistema CP, (b) secuencia del proceso CP [200].

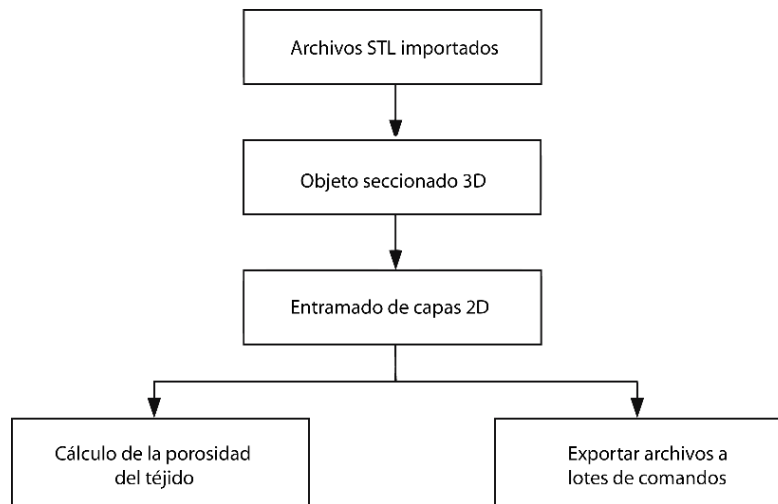


Figura 2.114. Funciones básicas del software CAM para el proceso CP [200].

La Figura 2.115 (a) muestra la sección transversal de dos fibras fabricadas con CP, en donde se puede apreciar como el perfil es casi circular. Por otro lado, las estructuras de macro y microporos se muestran en la Figura 2.115 (b) y (c), respectivamente.

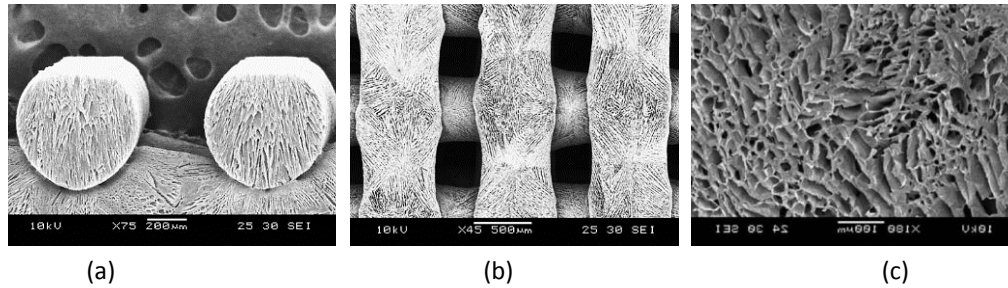


Figura 2.115. Estructuras fabricadas por prototipado criogénico: (a) fibras fabricadas por CP, (b) estructura macroporosa, (c) estructura microporosa, [200].

-Materiales empleados [199]

- Células.
- Proteínas.

-Ventajas del proceso [199]

- Es posible producir andamios con redes de poros abiertos lo que facilita el paso de nutrientes y células en el andamio garantizando al mismo tiempo el transporte de los productos de desecho.
- El proceso permite controlar la formación de estructuras cristalinas por el congelado rápido de solventes para manipular la formación de micro y nano poros.
- El sistema cuenta con una resolución de 0.01 mm.
- El volumen máximo de barrido es 300 x 300 mm en el plano horizontal y 80 mm en la dirección vertical.
- Es posible controlar la microporosidad del andamio retirando los cristales de hielo formados durante el proceso.

-Aplicaciones

- Fabricación andamios de ingeniería tisular.
- Fabricación de andamios con redes de poros abiertos.
- Fabricación de andamios poliméricos sensibles a la temperatura.

2.1.7.8 Manufactura por extrusión precisa - Precise extrusion manufacturing (PEM)

La PEM se basa en el principio de capa por capa para la fabricación de andamios para ingeniería tisular a partir de ácido poli-láctico (PLLA), con la capacidad de hacer fácilmente implantes personalizados y controlados de arquitecturas porosas de 200 a 500 μm de tamaño. El sistema PEM es una integración de hardware, software, control NC y materiales. El material termoplástico se alimenta en un pulverizador de extrusión caliente capaz de moverse en direcciones X-Y. El pulverizador extruye un filamento fino de material sobre una plataforma de trabajo con movimiento en dirección Z. Basándose en los datos de la capa a generar, una computadora controla el movimiento del pulverizador y la plataforma. El material se extruye y se deposita capa por capa en las zonas definidas por el modelo CAD para construir un objeto 3D.

La Figura 2.116 (a) muestra el pulverizador especial para la extrusión precisa de PLLA, y la Figura 2.116 (b) ilustra el diagrama esquemático del principio del pulverizador el cual incluye un licuefactor cilíndrico de 6 mm de diámetro x 80 mm de largo, en donde los granos de PLLA son fundidos a un estado de semilíquido para ser extruidos. El amarre en la parte superior del pulverizador se conecta la tubería de aire comprimido que actúa como un pistón para empujar el PLLA derretido a través de la boquilla. El diámetro de la boquilla es de 0.3 mm y cuenta con una válvula digital controlada por computadora la cual posee una alta velocidad de respuesta con el fin de mejorar la precisión de conformación [201]. La Figura 2.117, muestra la sección transversal de un andamio para ingeniería tisular construido mediante el proceso PEM.

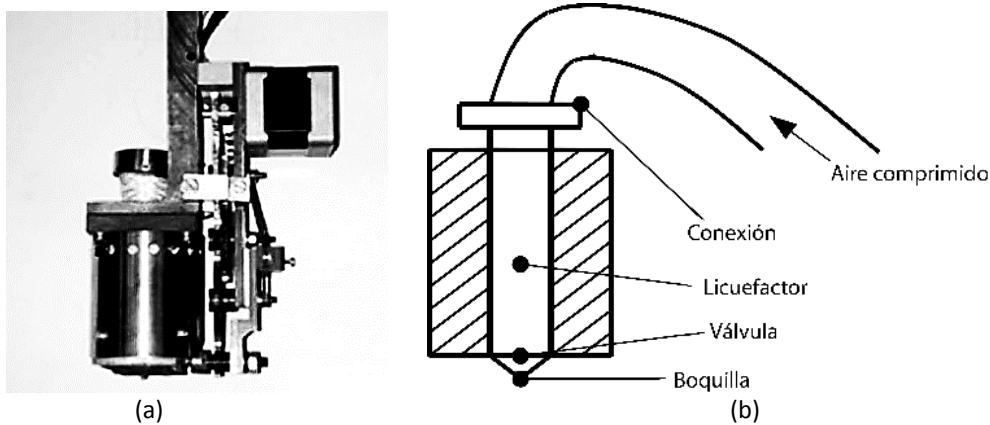


Figura 2.116. Pulverizador del sistema PEM: (a) imagen real del pulverizador para la extrusión de PLLA, (b) diagrama esquemático del pulverizador empleado en PEM, [201]

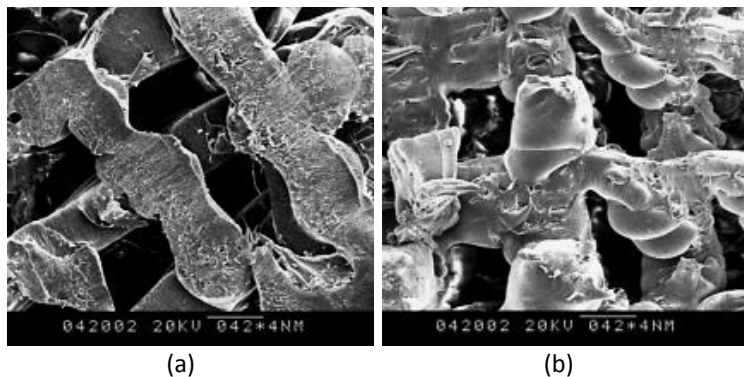


Figura 2.117. Sección transversal de un andamio tisular formado mediante PEM: (a) dirección horizontal, (b) dirección vertical, [201]

2.1.7.9 Ensamble tridimensional de células - Cell-assembly technique (3DCAT)

Esta técnica emplea un sistema de microposicionamiento 3D de alta precisión con una jeringa controlada a la cual se le ejerce presión para depositar células y/o estructuras de biomaterial con una resolución de 10 μm . La microjeringa es activada por presión y está equipada con una aguja de calibre fino con la que se crea una amplia variedad de patrones 3D con diferentes matrices de canales (orificios pasantes) en los que se puede suministrar células vivas con nutrientes y a su vez permiten la eliminación de los residuos metabólicos celulares. Las células embebidas permanecen

viables y realizan funciones biológicas siempre y cuando se conservan las estructuras 3D. La nueva tecnología tiene el potencial para una eventual producción de alto rendimiento de los tejidos y órganos humanos artificiales [202].

2.1.7.10 Impresión biológica por láser - Biological laser printing (Bio-LP)

La técnica de transferencia directa BioLP utiliza pulsos de láser enfocados para transferir material desde un soporte o cinta portadora a un sustrato receptor. El soporte portador se compone de tres capas: un soporte transparente UV, un recubrimiento absorbente de la luz, y el material biológico de interés, siendo posible depositar rápidamente patrones de biomoléculas activas y células vivas en una superficie de material. El soporte transparente permite que un pulso láser se enfoque en la interfaz con la capa absorbente. La interacción láser en este material de interfaz produce fotoabsorción, que a través de efectos fototérmicos y/o fotomecánicos se impulsa un píxel tridimensional del biomaterial hacia el sustrato receptor, Figura 2.118, [203].

Actualmente se efectúan investigaciones para modelar con más detalle la interacción láser-materia y el proceso de transferencia de biomaterial resultante. Los resultados preliminares indican que hay un mínimo de calor transferido a la capa de biomaterial durante el proceso de impresión, resultando que menos del 5% de biomaterial impreso aumenta su temperatura por encima del ambiente. La cantidad de biomaterial transferido en un único píxel es una función de factores como el tamaño de centrado del punto láser, el espesor de la capa de biomaterial en el objetivo, y la fluencia del láser. El sistema está completamente automatizado, lo que permite la modulación del láser y el escaneo del sustrato que recibe a través del software CAD/CAM. Este diseño permite generar un patrón de forma rápida y precisa en una amplia variedad de sustratos, incluyendo placas de microtitulación y canales de microfluidos. El uso de una cámara CCD posicionada en línea con la configuración óptica permite un análisis en tiempo real y el seguimiento del proceso de transferencia [204].

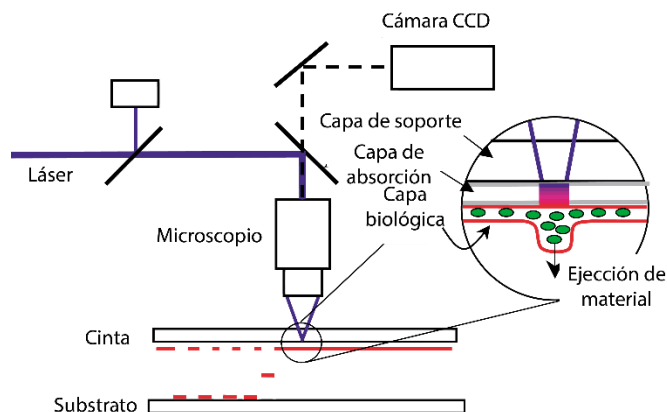


Figura 2.118. Estructura del sistema BIO-LP [204].

2.2 Tecnologías Substractivas

Las tecnologías RP substractivas están basadas en la remoción de material de una pieza de trabajo para generar la forma deseada. A diferencia de los procesos convencionales de fabricación y CNC, los métodos RP tienen ventajas sobre estos últimos, tales como una mayor velocidad de trabajo y la generación automática de la trayectoria de la herramienta. Dentro de las tecnologías substractivas se encuentran los siguientes procesos de conformado:

- Maquinado CNC.
- Maquinado por robot.
- Maquinado láser.

2.2.1 Maquinado CNC

Los procesos RP que conforman la pieza empleando maquinado CNC generan la trayectoria de la herramienta y código CN de forma automática, a diferencia de los sistemas CNC convencionales donde se programa manualmente o con ayuda de un programa CAD/CAM la trayectoria de la herramienta. Los sistemas RP CNC poseen una velocidad de trabajo superior, en comparación con los sistemas CNC tradicionales. Dentro de las tecnologías RP que emplean el maquinado CNC se involucran:

- Control numérico computarizado-Prototipado rápido – Computer numerical control-Rapid prototyping (CNC-RP).
- Maquinado de escritorio – Desktop milling (DM).
- Maquinado de alta velocidad – High-speed milling (HSM).

2.2.1.1 Control numérico computarizado -Prototipado rápido - Computer numerical control - Rapid prototyping (CNC-RP)

El maquinado CNC puede crear partes con una gran precisión en casi cualquier tipo de material sólido. La precisión del desbaste típicamente es de ± 0.0508 mm (± 0.002 pulg), mientras que en el acabado se puede alcanzar hasta ± 0.0127 mm (± 0.0005 pulg). Actualmente el maquinado CNC está limitado a ciertas geometrías. El maquinado CNC requiere trabajo de alta habilidad técnica, incluyendo la planeación del proceso, hacer decisiones de la herramienta y diseñar un esquema de la pieza. Diferente a otros métodos RP, el CNC-RP es un proceso de sustracción, el cual requiere accesibilidad para la herramienta de corte. Las piezas huecas son imposibles de fabricar y las esquinas internas pequeñas son difíciles de maquinar sin el uso de herramientas especializadas.

El objetivo del CNC-RP fue encontrar formas automatizadas de producir piezas, [205]. Se desarrolló un método CAM que usa una máquina de 3 ejes en conjunto con un eje rotatorio estilo indexador para así conducir a una máquina de 5 ejes. Este método es posible pero no resuelve los problemas del sistema de fijación, ni sería fácil de automatizar. El CNC-RP usa múltiples series de códigos de maquinado en 3 ejes. Cada código es creado usando un principio similar como el de otros sistemas RP, excepto que los límites de cada capa representan el área que será dejada después del maquinado, en lugar del área que será añadida. El espesor de la capa es simplemente la profundidad de corte para cada trayectoria de la herramienta. Los contornos superficiales de la

pieza son creados con el mismo efecto de escalera que se observa en los métodos RP tradicionales. Como el maquinado es capaz de alcanzar profundidades muy pequeñas de corte, CNC-RP puede alcanzar espesores de capa más pequeños que muchos otros sistemas comerciales RP. El tiempo de maquinado se incrementa con la reducción del espesor de capa. El espesor de capa en el sistema CNC-RP puede llegar fácilmente hasta los 0.076 mm (0.003 pulg) o menos.

En la Figura 2.119 se aprecia cómo la superficie de una esfera es creada después de varios pasos de una fresa plana. Obviamente este código de trayectoria de la herramienta es solo capaz de maquinar la superficie superior de la esfera, la cual es visible de la dirección de la orientación de la herramienta; por lo tanto el hemisferio de abajo queda sin maquinar. Si un código similar de la trayectoria de la herramienta rotara 180° sobre el eje X, se podría maquinar la superficie completa de la esfera.

La sujeción de este tipo de partes parece ser un problema obvio, una propuesta para resolver este problema consiste en hacer la sujeción por medio de unos cilindros de diámetro pequeño añadidos a la superficie del modelo sólido a lo largo del eje de rotación. Una limitante de esta solución es que el punto de contacto del cilindro en la superficie del modelo no sea maquinado, Figura 2.120. El tamaño de los prototipos creados usando CNC-RP está limitado por la longitud de la herramienta disponible, la Figura 2.121 muestra el proceso de conformado de una pieza de matatena [205].

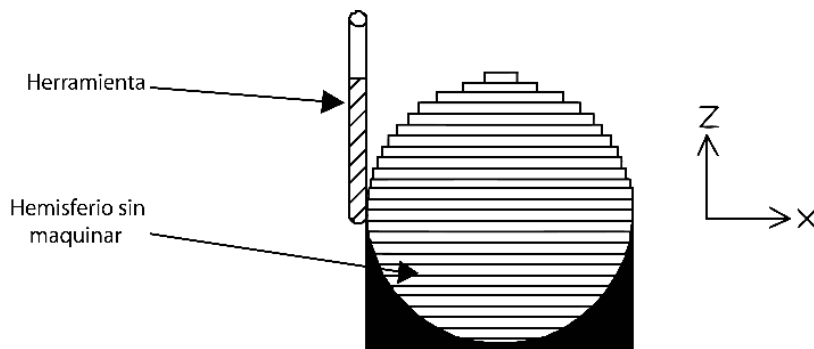


Figura 2.119. Ilustración esquemática del maquinado de una esfera mediante CNC-RP, [205]

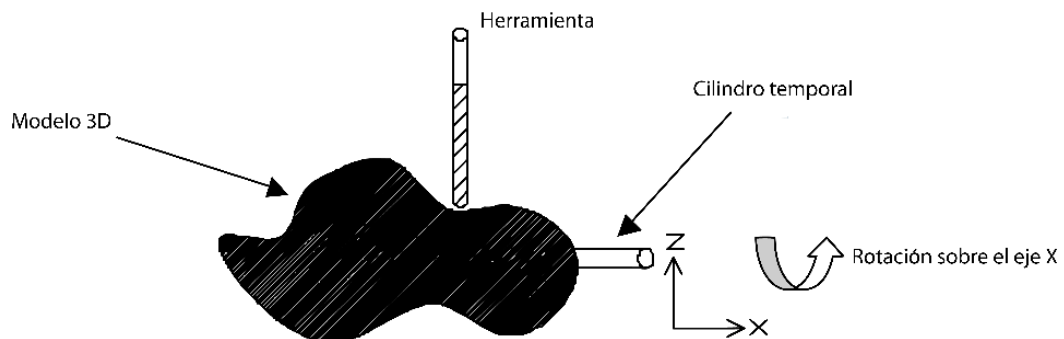


Figura 2.120. Esquema de un modelo cualquiera con un cilindro añadido a la superficie, [205]

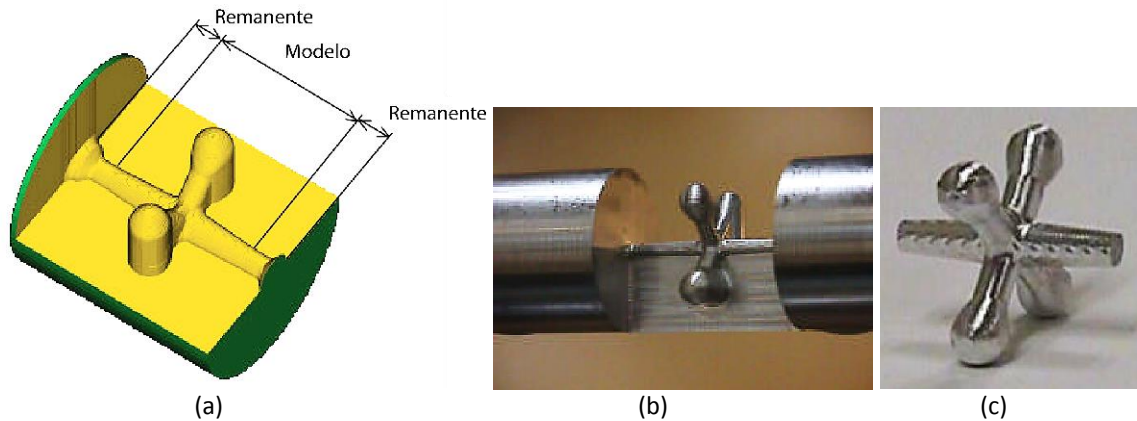


Figura 2.121. Prototipo de una pieza de matatena fabricado por CNC-RP: (a) simulación CAM, (b) Prototipo después de ser rotado en dos ocasiones, (c) pieza fina, [205].

-Materiales empleados

- Metales ferrosos y no ferrosos.
- Polímeros.
- Madera.

-Ventajas del proceso

- Gran precisión.
- Buen acabado superficial.

-Desventajas del proceso

- El proceso está limitado a ciertas geometrías.

-Aplicaciones

- Prototipos funcionales.
- Prototipos de prueba y visualización.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo CNC (por lo menos 4 ejes).

2.2.1.2 Maquinado de escritorio - Desktop milling (DM)

El maquinado de escritorio, DM, es un proceso que remueve material de la pieza de trabajo como en los procesos de maquinado tradicionales. Cualquier máquina CNC se puede emplear para hacer prototipos a partir de un material barato, tal como cera. El sistema comercial DM utiliza archivos STL, genera automáticamente la trayectoria NC de la herramienta, y no requiere conocimientos en NC para su operación. Las velocidades de corte, 0.06-3.6 m/seg, dependen del material del modelo. La resolución puede ser tan alta como ± 10 micras para una máquina de bajo costo, entre \$3 145 - \$36 795 USD, [6]. Los prototipos pueden realizarse en el DM con un alto grado de exactitud debido

a que no se deforman después de que se han completado. El DM puede manejar una amplia variedad de materiales [206]. La Figura 2.122, muestra la secuencia del proceso DM y la Tabla 2.26 algunas características técnicas de la tecnología. La Figura 2.123 ilustra un prototipo construyéndose en un sistema DM.

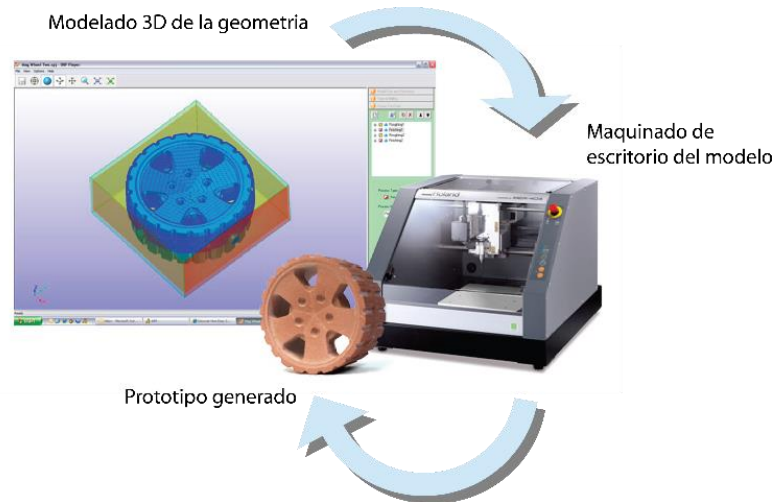


Figura 2.122. Secuencia del proceso DM [206].

Tabla 2.26. Características técnicas del sistema DM.

Característica Técnica		Unidad (SI)	Ref.
Tipo de tecnología	RPM&T		-
Status	Comercial		[206]
Espesor mínimo de capa	N.A	mm	-
Espacio de trabajo	300 x 300 x 100	mm	[206]
Velocidad de trabajo	180 000	mm/min	[206]
Acabado superficial	N.D	μm	-
Precisión	0.01	mm	[206]
Velocidad volumétrica	N.D	mm^3/min	-

RPM&T: Prototipado, manufactura y herramienta rápida, N.A: No aplica, N.D; Información no disponible

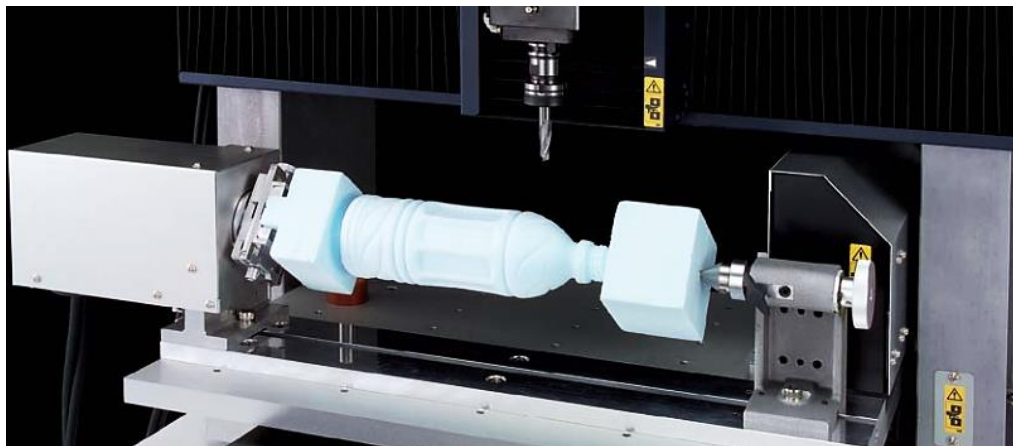


Figura 2.123. Prototipo generándose en el sistema DM [206].

-Materiales empleados [206]

- Cera.
- Plásticos.
- Madera.
- Bronce.
- Aluminio.
- Cobre.

-Ventajas del proceso

- Gran precisión.
- Buen acabado superficial.
- Economía en equipo y materiales.

-Desventajas del proceso

- El proceso está limitado a ciertas geometrías.

-Aplicaciones

- Prototipos funcionales.
- Prototipos de prueba y visualización.

-Requerimientos de Instalación

- Instalación eléctrica 110/220 VCA 50/60 Hz 1F.

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Roland.

2.2.1.3 Maquinado de alta velocidad - High-speed milling (HSM)

El maquinado de alta velocidad es probablemente el más conocido, con tan solo incrementar la velocidad de rotación de 5000 rpm a 50 000 rpm y por el control directo de un archivo CAD, las piezas pueden ser construidas rápidamente. Con el fresado, la calidad superficial no es un problema ni la precisión [38].

-Materiales empleados

- Metales ferrosos y no ferrosos.
- Polímeros.
- Madera.

-Ventajas del proceso

- Gran precisión.
- Buen acabado superficial.

-Desventajas del proceso

- El proceso está limitado a ciertas geometrías.
- No es posible maquinar esquinas rectas.
- Se consume mucho tiempo en la generación de la trayectoria de la herramienta.
- No es posible efectuar cortes bajo una superficie.

-Aplicaciones

- Prototipos funcionales.
- Prototipos de prueba y visualización.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo CNC de alta velocidad.

2.2.2 Maquinado por robot

El maquinado por robot implican aquellos procesos en los que se acopla un husillo como efector final a un brazo robótico articulado con el propósito de incrementar la accesibilidad en relación a un centro de maquinado convencional. Dentro de este tipo de sistemas se incluye:

- Sistema robótico de prototipado – Robotic prototyping system (RPS).

2.2.2.1 Sistema robótico de prototipado - Robotic prototyping system (RPS)

El sistema RPS emplea un husillo porta herramienta montado en el efector final de un brazo robótico industrial para generar un modelo sólido. Las trayectorias de desbaste y acabado se generan automáticamente a partir del modelo de un objeto sólido. El sistema de prototipado robótico se utiliza en lugar de los dispositivos CNC tradicionales debido a que el sistema de prototipado robótico reduce en un 40% el espacio de piso requerido en comparación con los dispositivos CNC. De igual manera debido a la configuración del robot articulado, el sistema es más flexible en términos de accesibilidad de la herramienta; por lo tanto, puede manejar partes geométricas más complicadas. La Figura 2.124, [207], muestra una imagen del sistema robótico de prototipado.



Figura 2.124. Sistema RPS.

2.2.3 Maquinado láser

Los procesos de maquinado láser utilizan un láser como herramienta de remoción de material. El láser hace el trabajo que generalmente está a cargo de una herramienta de corte, remover el material no deseado de la pieza de trabajo para obtener la pieza deseada. Dentro de los sistemas de maquinado láser se encuentran:

- Desbastado láser – Lasercaving (LC).
- Erosión asistida por láser – Laser assisted etching (LAE).
- Erosión húmeda inducida por láser – Laser induced backside wet etching (LIBWE).
- Torneado microquímico por láser – Laser micro-chemical lathe (LML).
- Manufactura por láser de diodo – Laser diode manufacturing (LDM).

2.2.1.1 Desbastado láser - Lasercaving (LC)

El desbaste láser se puede realizar por diversos métodos, uno de ellos es la eliminación de material por fusión y/o vaporización (con o sin apoyo de chorro de gas), y se denomina eliminación por fusión láser (laser melt removal). Otro método es la extracción de metal en fase sólida, llamado arranque de viruta por láser (chip removal).

Se han efectuado investigaciones del proceso de eliminación por fusión láser en acero y cerámica demostrándose que sus ventajas se comparan con el corte, esmerilado o erosionando, ampliando las posibilidades de mecanizado en la geometría o materiales. Los parámetros de desbaste y de acabado pueden ser elegidos obteniéndose tasas de ablación de 100-1000 mm³, y pudiéndose obtener acabados superficiales de Ra <10 μm, facilitando de esta manera la generación de prototipos.

Por otro lado, el método de arranque de viruta por láser se ha desarrollado para trabajar el acero. En este proceso se eliminan virutas solidas por los esfuerzos de tensión y compresión que resultan del ciclo térmico del haz de láser, el cual es producido en un ambiente de un gas inerte con la finalidad de reducir la oxidación. Mediante la eliminación de virutas sólidas, los bordes así como las superficies circundantes permanecen y no son manchadas por gotitas de material fundido. Recientes investigaciones han demostrado que incluso 8 W de potencia del láser de onda continua (continuous wave, CW) es suficiente para un mecanizado bien definido, siendo posible generar ranuras de 50 μm de ancho y 10μm de profundidad, con una precisión de 10μm y una rugosidad de 2 μm, [208]. La Figura 2.125, muestra el grabado y mecanizado de una rosca por medio de LC.

-Materiales empleados

- Acero.
- Materiales cerámicos.

-Aplicaciones

- Maquinado de cavidades en los troqueles o la estructuración de sus superficies (ejemplos típicos son troqueles para moldeo por inyección de plásticos).
- Marcado de piezas.

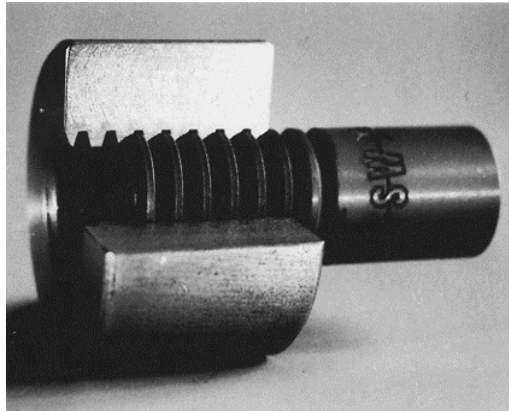


Figura 2.125. Grabado y mecanizado de rosca por medio de LC.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo de protección ocular para el operador.

2.2.1.2 Erosión asistida por láser - Laser assisted etching (LAE)

El proceso LAE es un método de microfabricación actualmente en desarrollo que emplea un haz de láser con frecuencia verde, azul o de emisión UV de iones de argón que se enfoca sobre una superficie de silicio a través en una atmósfera de cloro molecular. El foco del láser calienta el silicio a temperaturas cercanas al punto de fusión. A continuación el gas cloro reacciona con el silicio el cual se calienta para formar compuestos volátiles como el dicloruro de silicio (SiCl_2) y tetraclorosilano (SiCl_4). Esta transición completa de silicio en la fase de gas permite una eliminación rápida, fácil y completa del silicio, Figura 2.126 (a). El proceso aprovecha la tasa de ataque excepcionalmente alta de silicio fundido (hasta $1000 \mu\text{m s}^{-1}$), en comparación con una tasa de ataque muy baja del material no modificado. Sólo el silicio localmente fundido reacciona con el cloro proporcionando de este modo una técnica de microfabricación para microestructuras de silicio. Muchos grupos de investigación han utilizado este concepto para microfabricación asistida por láser. Incluso se han fabricado microestructuras completas mediante estas técnicas. La Figura 2.126 (b) muestra un ejemplo de una estructura fabricada por LAE.

A pesar de sus excelentes capacidades tecnológicas no se ha encontrado la aplicación comercial. Con la aparición de fuentes de láser adecuadas, el micromecanizado láser directo de silicio y otros materiales ha entrado en el foco de la investigación. Hoy en día, los láseres UV profundos, así como láseres de femtosegundo, picosegundos ya están disponibles para un mecanizado de alta precisión de una gran variedad de materiales, ya sea mediante el uso de la alta densidad de energía, de la longitud de ondas cortas de láser o los procesos de ablación no térmicos que se producen en pulso ultra corto de láser [72].

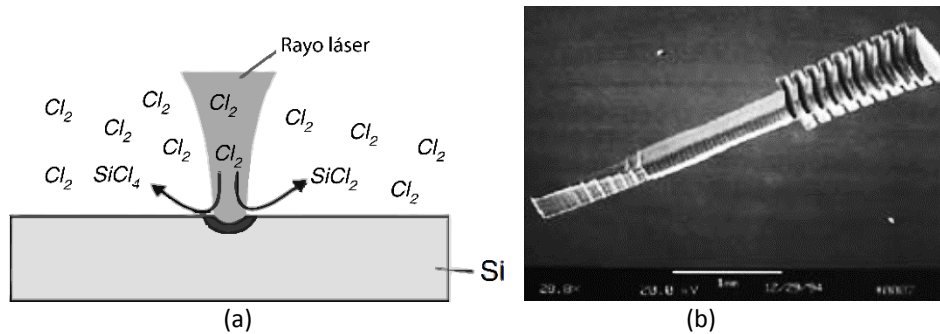


Figura 2.126. Proceso de erosión asistida por láser: (a) esquema del proceso LAE, (b) microestructura 3D fabricada por medio de la tecnología LAE.

Una desventaja general puede ser la maquinaria relativamente compleja que comprende una cámara de vacío con acceso óptico y un aparato de manejo complicado para los gases muy reactivos y tóxicos en uso. Por otra parte, el enfoque del haz láser toma solo una fracción de tiempo en comparación con la litografía estándar

-Materiales empleados

- Silicio.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo de protección ocular para el operador.

2.2.1.3 Erosión húmeda posterior inducida por láser - Laser-induced backside wet etching (LIBWE)

El método erosión húmeda inducida por láser (laser induced backside wet etching, LIBWE) emplea un pulso de rayo láser UV el cual pasa a través de una fotoplantilla y una placa transparente para ser absorbida por una solución de colorante situado en la superficie posterior de la placa de construcción. Debido a la fuerte absorción del láser por la solución, la energía del láser es inicialmente confinada a una capa delgada fotoactivada en la escala del micrón de la interfaz entre el plato transparente y la solución, donde las moléculas de la tintura son excitadas colectivamente [209]. La capa fotoactivada interactúa con la superficie de la placa, lo que resulta en un micrograbado. La velocidad de grabado típica es de alrededor de 10 nm de pulso⁻¹. Un diagrama esquemático que ilustra el método LIBWE para micrograbado profundo, se muestra en la Figura 2.127.

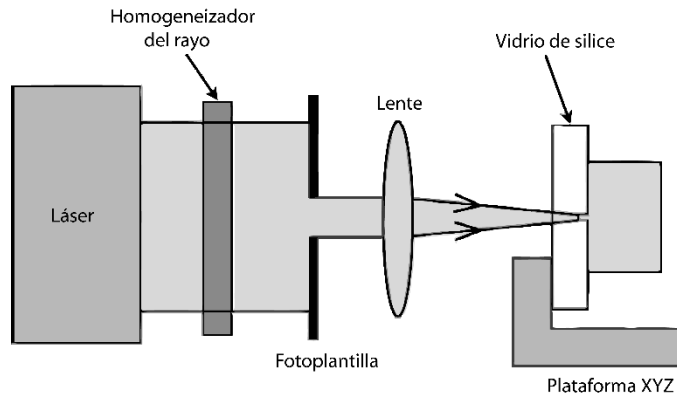


Figura 2.127. Diagrama esquemático del método LIBWE.

-Ventajas del proceso

- Control de la profundidad de grabado de la escala de nanómetros a varios cientos de micrómetros mediante el control del láser.
- Permite el grabado de diversos materiales transparentes como vidrio de sílice y zafiro.
- Estructuración superficial flexible mediante el uso de un sistema de proyección de plantilla.

De estas ventajas, la capacidad de fabricar las zanjas con profundidades de varios cientos de micrómetros es una de las características más prominentes del método LIBWE, Figura 2.128.

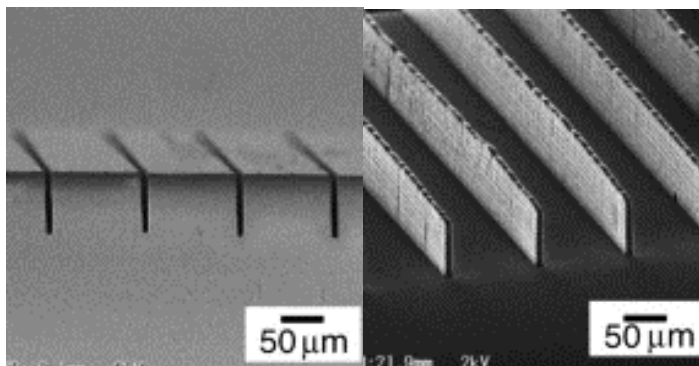


Figura 2.128. Zanjas fabricadas mediante el método LIBWE.

2.2.1.5 Otros procesos de maquinado láser

Se han desarrollado otros procesos de maquinado láser, sin embargo solo han sido propuestos como técnicas potenciales RP y no se ubican detalles en la literatura al respecto. Dentro de estos procesos se encuentra:

- Manufactura por láser de diodo - Laser diode manufacturing (LDM), [1].

2.3 Tecnologías formativas

Son aquellos procesos RP en los cuales la pieza final se obtiene formando o moldeando la materia prima. Actualmente sólo existe una técnica formativa:

- Robotyping

2.3.1 Robotyping

El proceso Robotyping es una técnica que se basa en adherir capas mediante el movimiento en tres dimensiones de herramientas manejadas por un robot industrial [58]. Hasta el momento hay dos conceptos para robotyping: primero, el modelado de capas de forma libre a partir de formas modulares pre-ajustadas, Figura 2.129 (a); y segundo, la consolidación de formas de material por herramientas sumergibles Figura 2.129 (b).

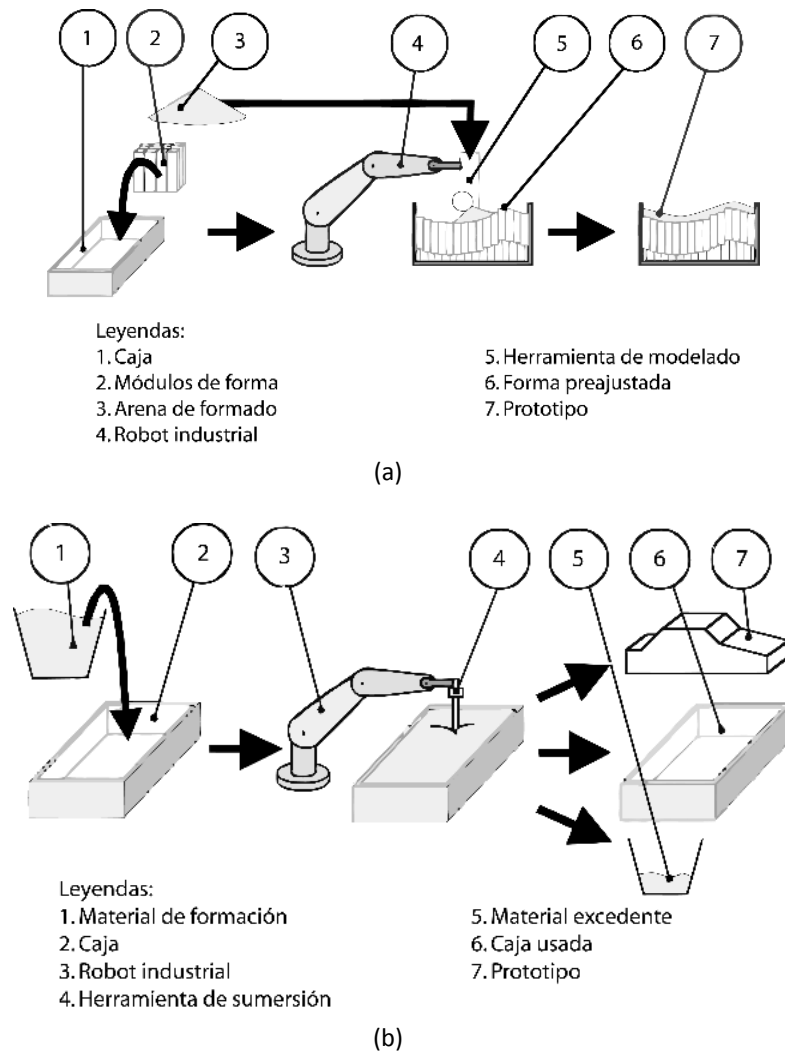


Figura 2.129. Representación esquemática de los conceptos de Robotyping: (a) concepto 1: aplicación de capas delgadas de forma libre, (b) concepto 2: sumersión de herramientas para la consolidación de la forma sobre el material.

Concepto 1: Modelado de capas de forma libre

El modelado de las capas de forma libre desde formas modulares preajustadas se divide en una etapa de aplicación y una de modelado. La tarea de aplicación comienza con la construcción de una forma aproximada que consiste en conos rugosos de material, comenzando en las regiones bajas de la geometría; haciendo conos a lo largo de las líneas de contorno y subiendo en las regiones superiores. Para la tarea de modelado, se emplean rodillos que son impulsados por una unidad externa. Estos rodillos pueden ser clasificados por la forma y flexibilidad de acuerdo con la Figura 2.130. Cada tipo de rodillo exige un control específico con el fin de adaptarse a la superficie deseada. La Figura 2.131 es un ejemplo de que los rodillos cóncavos, cilíndricos o convexos ajustan mejor cuando se mueven a lo largo de las crestas, curvas de nivel o el fondo de un valle respectivamente con el fin de lograr la precisión deseada. La planificación de la trayectoria se realiza mediante una segmentación de la superficie utilizando las características de curvatura de la superficie y la selección de un rodillo adecuado para cada segmento [58]. La Figura 2.132, muestra un ejemplo real del concepto de modelado de capas de forma libre del sistema Robotyping, en el modelado de arena.

		Rodillos			
		Rígidos			Flexibles
		Cilíndricos	Cóncavos	Convexos	
Simétricos					
Asimétricos					

Figura 2.130. Clasificación de rodillos para el concepto de modelado de capas de forma libre del sistema Robotyping.

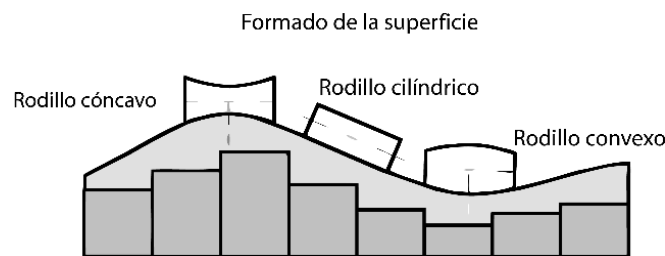


Figura 2.131. Ajuste de los rodillos según la superficie a formar.

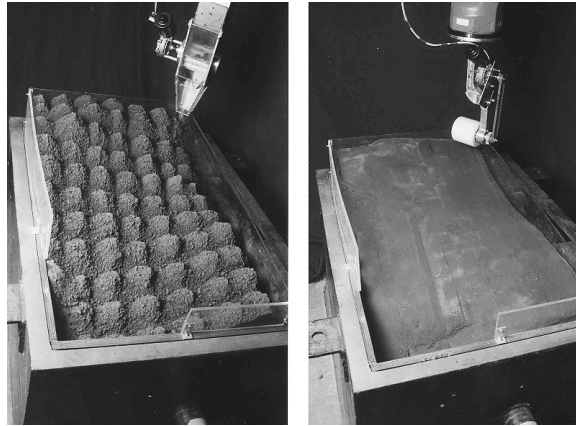


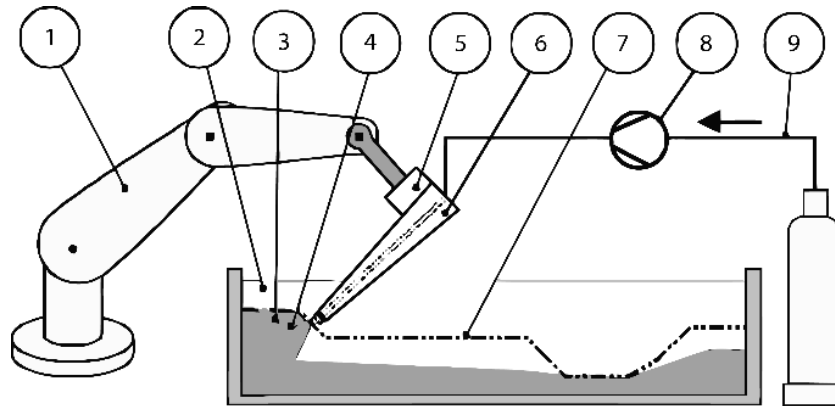
Figura 2.132. Modelado de arena según el concepto de modelado de capas de forma libre, sistema Robotyping.

Concepto 2: Sumersión de herramientas del robot

Este proceso considera consolidar el prototipo dentro del material sumergiendo las herramientas por debajo de la superficie y moviéndolas tridimensionalmente mediante un robot. Después de la consolidación el material suelto se retira por succión o la inclinación de la caja y se puede reutilizar. Los principios de consolidación se determinan por el tipo de material. Hay diferentes tipos de material que se consolidan por reacciones químicas o procesos físicos. Las reacciones químicas pueden ser invocadas por líquidos o gases reactivos, cuando se exponen a luz o microondas. Un proceso físico es la compactación de la arena de arcilla y un aglutinante.

En el caso de la consolidación química, esta se da mediante el suministro de un gas o un líquido. La herramienta empleada consta de una boquilla que exhala el componente químico a través de un obturador que se cierra cuando se mueve a través del material suelto, Figura 2.133. Al mover la boquilla a lo largo del contorno deseado, el material se consolida dentro de la zona de funcionamiento de la boquilla. De esta manera el prototipo puede ser construido de una vez o en etapas de proceso sucesivas.

En el caso de la consolidación física se controla el movimiento, velocidad y oscilación de la herramienta que se sumerge de acuerdo con los datos de la geometría deseada. La herramienta se mueve a través del material suelto con la finalidad de compactarlo mediante oscilaciones, las cuales tienen cuatro fases, Figura 2.134: espera en la posición de partida, levantamiento y el relleno, espera en la posición de reversa, y movimiento de compactación [58]. La Figura 2.135, presenta un ejemplo del modelado de arena de acuerdo al concepto de sumersión de herramientas en el caso de consolidación física.



Leyendas:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. Robot industrial | 6. Inyector |
| 2. Material de construcción | 7. Geometría del prototipo |
| 3. Consolidación del material | 8. Bomba |
| 4. Área de operación del inyector | 9. Fuente de gas o líquido |
| 5. Sensor de esfuerzo | |

Figura 2.133. Representación esquemática del concepto de sumersión de herramientas del sistema Robotyping en el caso de consolidación química.

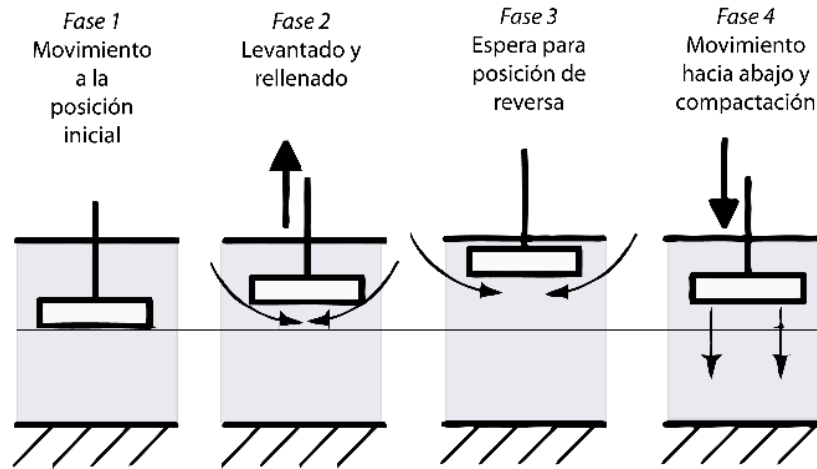


Figura 2.134. Fases de oscilación del concepto de sumersión de herramientas en el caso de consolidación física.

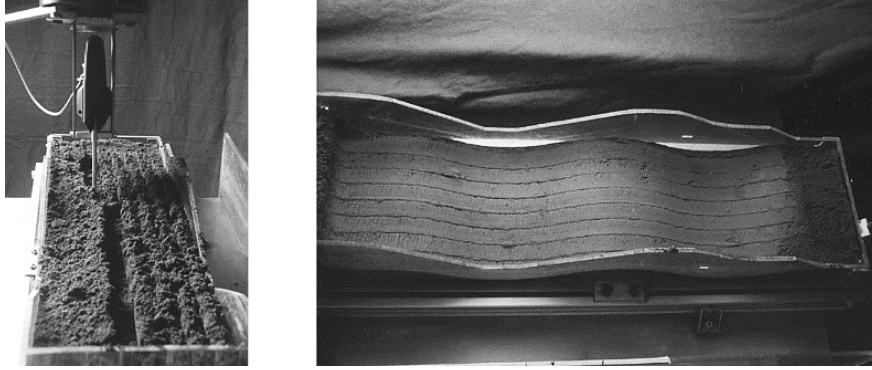


Figura 2.135. Modelado de arena según el concepto de sumersión de herramientas en el caso de consolidación física.

2.4 Tecnologías híbridas

Las tecnologías RP denominadas híbridas combinan procesos aditivos, substractivos y/o formativos en una sola máquina.. Dentro de estos procesos generalmente la pieza es generada comenzando con un proceso aditivo que se utiliza para crear la pieza, seguido de un proceso substractivo que da la forma final del componente. Los procesos híbridos son:

- Maquinado y soldadura 3D – 3D Welding and milling (3DWM).
- Manufactura por deposición de formas – Shape deposition manufacturing (SDM).
- Deposición directa por láser y CNC – Direct laser deposition & CNC (DLD-CNC).
- Deposición por plasma y maquinado – Hybrid plasma deposition and milling (HPDM).
- Generación láser y maquinado de alta velocidad – Laser generating and high-speed milling (LGHSM).
- Nano deposición de compuestos – Nano composite deposition (NCD).
- Sistema de maquinado por robot – Robot machining system (RMS).
- Consolidación ultrasónica – Ultrasonic consolidation (UC).
- Rayo iónico enfocado – Focused ion beam (FIB).
- Maquinado rápido en capas – Rapid layer manufacturing (RLM).
- Crecimiento controlado de metal – Controlled metal build up (CMB).

2.4.1 Maquinado y soldadura 3D - 3D Welding and milling (3DWM)

El principio del proceso 3DWM se basa en la deposición de capas de material de alambre fundido usando GMAW (gas metal arc welding), que es la forma más económica de depositar metales fundidos. Sin embargo, el material depositado es de calidad inferior a los cordones de soldadura láser con respecto a la precisión y la calidad de la superficie, por lo que es requerida una etapa de post-procesamiento, como el maquinado de la superficie.

El principio de la técnica 3DWM se muestra en la Figura 2.136, en donde una capa simple es depositada mediante soldadura, posteriormente la capa es maquinada a un espesor prescrito para la deposición adicional. La combinación de la deposición y el fresado frontal posterior permite hacer cambios en el espesor de la capa entre 0.1 y 1 mm, siendo una característica única del proceso la capacidad de depositar capas de espesor variable. Cuando la secuencia de deposición y fresado frontal han finalizado, el acabado superficial se obtiene aplicando la misma disposición para eliminar el efecto de escalera en la superficie. Cualquier imprecisión dimensional y geométrica resultante de la deposición puede ser completamente compensada por este acabado final de la superficie.

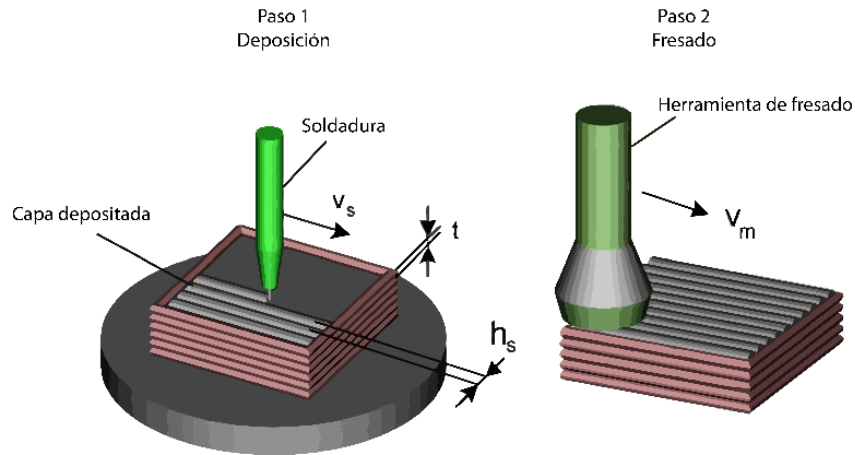


Figura 2.136. Principio del proceso 3DWM.

Se han realizado pruebas experimentales del sistema 3DWM, Figura 2.137. La configuración del sistema se basa en una máquina de fresado de 3 ejes con dos pistolas de soldadura que están verticalmente unidas a la carcasa del husillo. Un reequipamiento sencillo de una máquina de fresado común de 3 ejes se requiere con el fin de llevar a cabo el proceso, eliminando así cualquier necesidad de comprar equipos especiales, tales como ejes lineales. Las dos pistolas de soldadura permiten la conmutación entre dos materiales diferentes o alambre de diámetros distintos. En el lado izquierdo del eje, un cabezal de soldadura láser está unido para permitir un método de deposición alternativo. Los granos individuales se depositan sobre una placa de sustrato, que se precalienta hasta 200 °C con un calentador incorporado. El precalentamiento de la placa de sustrato se utiliza para reducir la acumulación de esfuerzos térmicos durante la deposición [210]. La Figura 2.138 presenta una pieza fabricada por 3DWM.



Figura 2.137. Sistema experimental 3DWM.

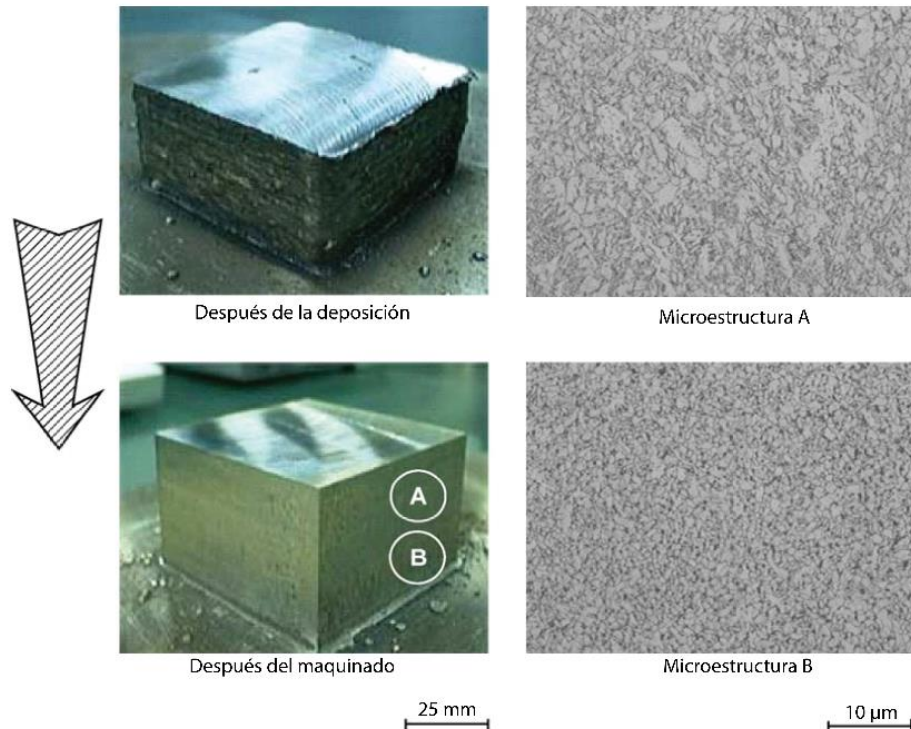


Figura 2.138. Modelo fabricado por 3DMW.

-Aplicaciones

- Prototipos de visualización y verificación.
- Fabricación de partes funcionales.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo de protección ocular para el usuario.
- Sistema de extracción de residuos gaseosos de soldadura.

2.4.2 Manufactura por deposición de formas - Shape deposition manufacturing (SDM)

La técnica SDM es un proceso en el que gradualmente se fabrican piezas complejas de forma sistemática mediante la combinación de procesos aditivos y substractivos [211]. El proceso SDM consiste en rociar gotas de metal fundido hasta obtener una forma cercana a la final sobre un sustrato, a continuación el material no deseado se elimina a través de las operaciones de maquinado CNC, Figura 2.139. El material de soporte se añade en la misma forma, ya sea antes o después del material del prototipo, dependiendo de la complejidad geométrica de la capa que es construida. Cada capa es entonces granallada para eliminar esfuerzos residuales. El prototipo se transfiere de una estación a otra utilizando un sistema de paletas robotizado que puede posicionar la pieza de trabajo con una precisión de $\pm 5 \mu\text{m}$. El sistema tiene la capacidad de generar gotas de metal fundido de un diámetro de 1-3 mm y depositarlas a una velocidad de 1 a 5 gotas por segundo.

Hasta la fecha se han producido partes de acero inoxidable compatibles con cobre. El cobre puede ser eliminado por inmersión en ácido nítrico. Pueden emplearse múltiples materiales y diversos componentes pueden ser embebidos en la estructura. Aun no se puede controlar con precisión la temperatura, tamaño y trayectoria de las partículas, ya que no se cuenta con un sistema para regular estos parámetros [136]. Los prototipos fabricados con la técnica SDM tienen la misma estructura que piezas fabricadas por vaciado o partes soldadas con la precisión de fresado NC.

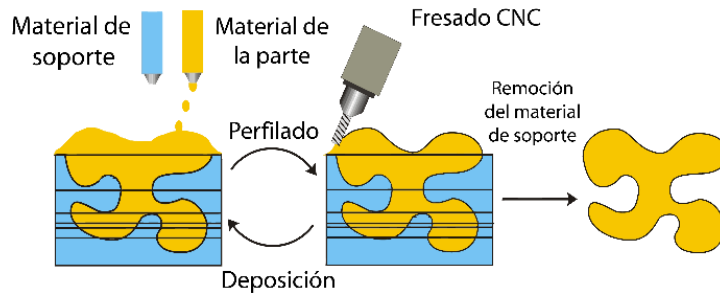


Figura 2.139. Esquema del principio de funcionamiento del sistema SDM.

2.4.3 Deposición directa por láser y CNC - Direct laser deposition & CNC (DLD-CNC)

El proceso DLD-CNC combina la deposición directa por láser (DLD), para depositar el material, y el fresado CNC, para remover el exceso de material de la pieza de trabajo. El sistema de deposición consiste en un láser el cual es enfocado como fuente de calor para crear un charco de masa fundida en un sustrato. Una vez generado el charco de masa fundida, el material de construcción es depositado en forma de polvo, el cual se inyecta empleando una boquilla alimentadora. Posterior a la generación de una capa, un centro de mecanizado CNC efectúa una operación de fresado con la finalidad de obtener la geometría final de la capa, Figura 2.140. El proceso de adición y remoción de material se repite hasta completar la pieza final. Con la finalidad de obtener piezas geoméricamente complejas y reducir el tiempo de construcción de nuevos modelos, se ha desarrollado un sistema experimental del proceso DLD-CNC, que se integra en un centro de mecanizado de 5 ejes y permite la adición y remoción de material en planos perpendiculares entre sí, [119].

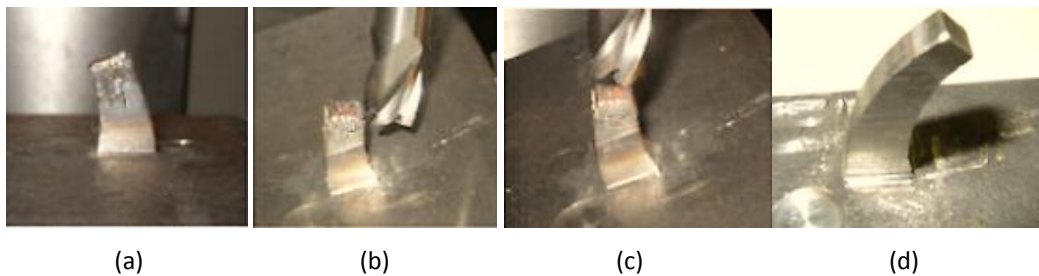


Figura 2.140. Proceso de fabricación de una pieza mediante DLD-CNC: (a) deposición de material, (b) fresado del contorno de la capa, (c) fresado de la superficie superior de la capa, (d) pieza final, [119].

2.4.4 Deposición por plasma y maquinado - Hybrid plasma deposition and milling (HPDM)

El proceso HPDM se basa en la deposición de capas de material en polvo fundido usando arco de plasma, que es una de las formas más económicas de depositar metales fundidos. La Figura 2.141, presenta el diagrama de proceso de la técnica HPDM, donde un archivo STL del modelo CAD 3D es introducido en el software HPDM. Las trayectorias de procesamiento y las instrucciones NC son generadas automáticamente por el software. Con base en esta información la deposición por plasma y fresado NC se realiza mediante una máquina híbrida [212].

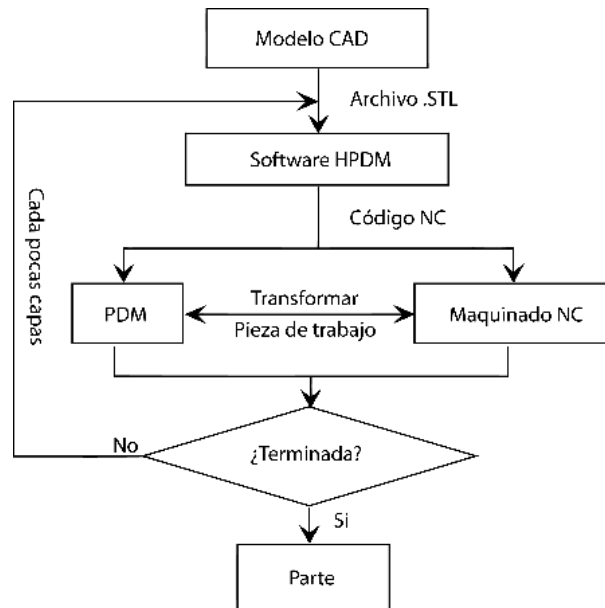


Figura 2.141. Diagrama del proceso HPDM.

El diagrama esquemático de la máquina HPDM se muestra en la Figura 2.142 (a), la cual dispone de dos elementos de trabajo: la antorcha de deposición de plasma y el cabezal de una fresadora NC para generar el acabado de las superficies. En el proceso HPDM, tras aplicar una capa de material la superficie superior se máquina mediante una operación de fresado para obtener una superficie lisa con un cierto grosor, para después depositar la capa subsecuente de material. El contorno de la superficie interna y externa es maquinada empleando cortadores de ranura en T para remover los peldaños restantes y lograr una superficie fina, Figura 2.142 (b).

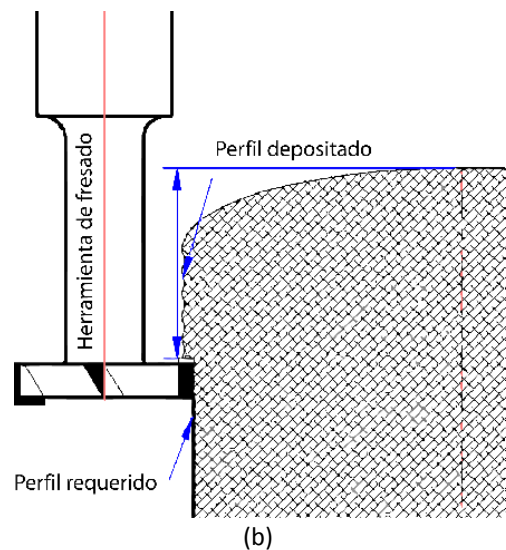
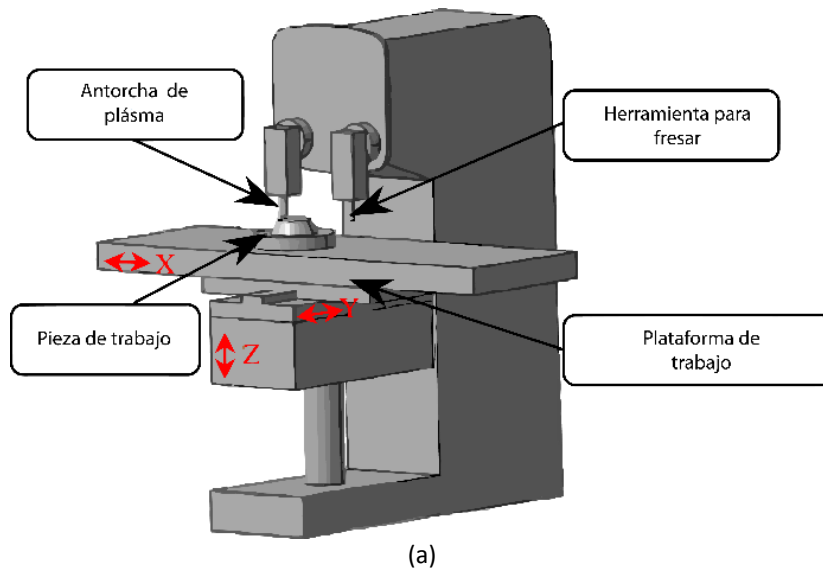


Figura 2.142. Sistema HPDM: (a) diagrama esquemático del equipo, (b) esquema del principio del proceso de fresado de contornos [212].

La Figura 2.143 muestra un álabe, difícilmente manufacturado por una máquina de 3 ejes, fabricado por HPDM. La Figura 2.143 (a) muestra la deposición, (b) y (c) muestran el fresado plano y el fresado de contornos, respectivamente, (d) muestra el post-proceso del álabe de metal. Como se muestra en la Figura 2.143 (d) no se tiene ninguna grieta, poro o defecto en la superficie. La fabricación satisfactoria del álabe con una densidad del 100% y un estado de superficie fina, demuestra la viabilidad y el potencial del proceso HPDM.



Figura 2.143. Alabe fabricada por medio de HPDM [212].

-Aplicaciones

- Prototipos de visualización y verificación.
- Fabricación de partes funcionales.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo de protección ocular para el usuario.
- Sistema de extracción de residuos gaseosos.

2.4.5 Generación láser y maquinado de alta velocidad - Laser generating and high-speed milling (LGHSM)

El sistema LGHSM combina el proceso de generación láser y el maquinado de alta velocidad para la construcción de prototipos y moldes. El proceso permite cumplir con las tolerancias de forma y precisión requeridas para la fabricación de moldes, sin embargo, los ángulos agudos siguen siendo un problema debido al diámetro de la fresa [38].

2.4.6 Nano deposición de compuestos - Nano composite deposition (NCD)

El sistema de nano deposición de compuestos fue desarrollado para alcanzar una alta precisión en la manufactura de piezas a microescala. El proceso NCD comienza con la deposición de una resina fotocurable que contiene partículas nanométricas, la cual es curada por medio de luz UV ($\lambda=365$ nm) para después remover el exceso de material por medio de micromáquinado. El proceso de deposición y micromáquinado se efectúa sobre una plataforma de tres ejes, controlada desde un tablero, la plataforma tiene un codificador lineal para cada eje el cual es provisto con una resolución de $1\mu\text{m}$ [213]. El sistema se muestra en la Figura 2.144.

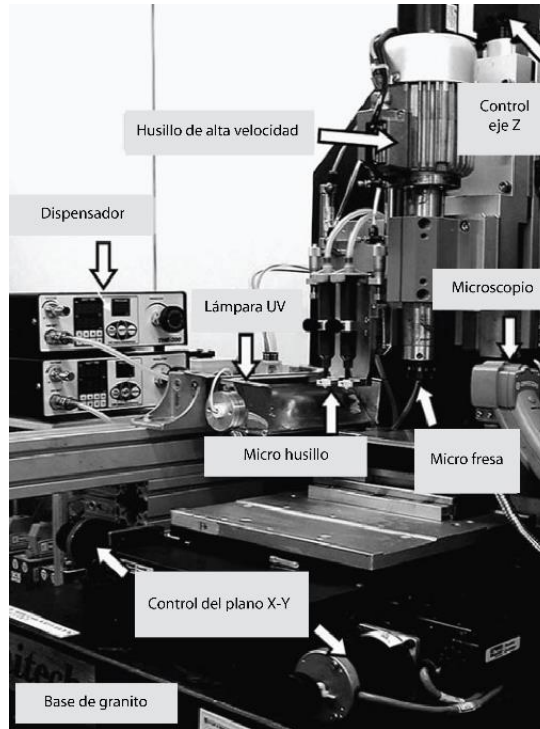


Figura 2.144. Hardware del sistema NCD.

En el proceso de adición empleado por la técnica NCD, se depositan cientos de capas de espesor micrométrico con la finalidad de obtener una geometría cercana a la forma neta, posteriormente mediante un proceso de fresado empleando microherramientas, Figura 2.145, se obtiene la forma final. La Figura 2.146, muestra la secuencia esquemática del proceso, [213].

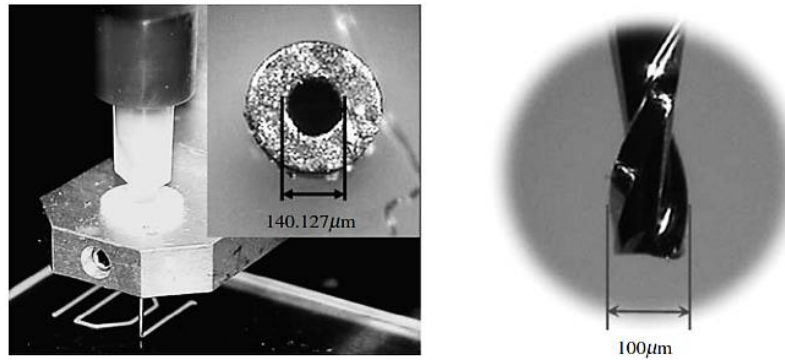


Figura 2.145. Inyector de deposición empleado en NCD (izquierda), vista ampliada de una microfresa empleada en NCD (derecha).

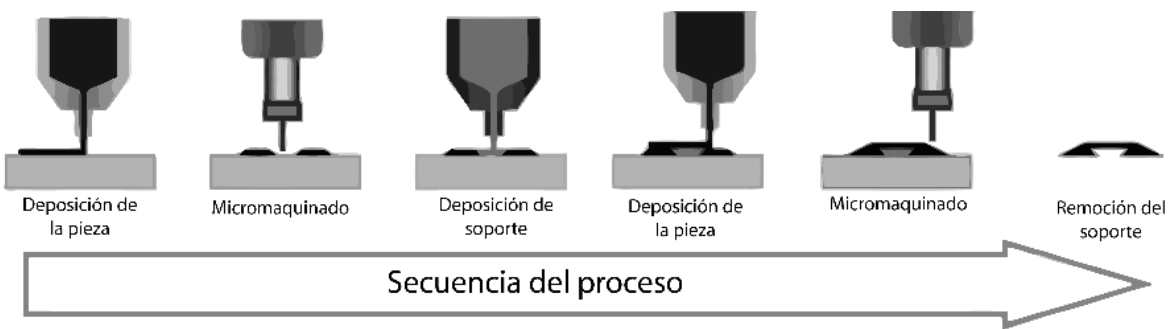


Figura 2.146. Secuencia esquemática del proceso NCD.

Se han fabricado varias piezas con el fin de evaluar la precisión del proceso y medir las propiedades mecánicas del material empleado. Dentro de las pruebas efectuadas se empleó resina de poliuretano acrílico al cual se le añadió 8% de un fotoindicador. Con la finalidad de comprobar la precisión del sistema NCD, se elaboró un microengrane, de diámetro 2.9mm, empleando 3 distintos procesos (deposición, fundición y NCD), Figura 2.147. El material empleado para la fabricación del microengrane mediante NCD, se compuso de la resina anteriormente mencionada, añadiéndosele el 5% del contenido en peso de nanotubos de carbono de paredes múltiples, así como el 40% de partículas de hidroxiapatita. Esta composición permitió la reducción del tiempo de curado a 30 seg., por capa. Los resultados de precisión exhiben que el proceso de deposición presentó un 23.32% de error y el proceso de fundición un error del 15.55% en relación al modelo CAD, resultando tener una mayor precisión el proceso de NCD con un error del 0.17%, Figura 2.148, [213].

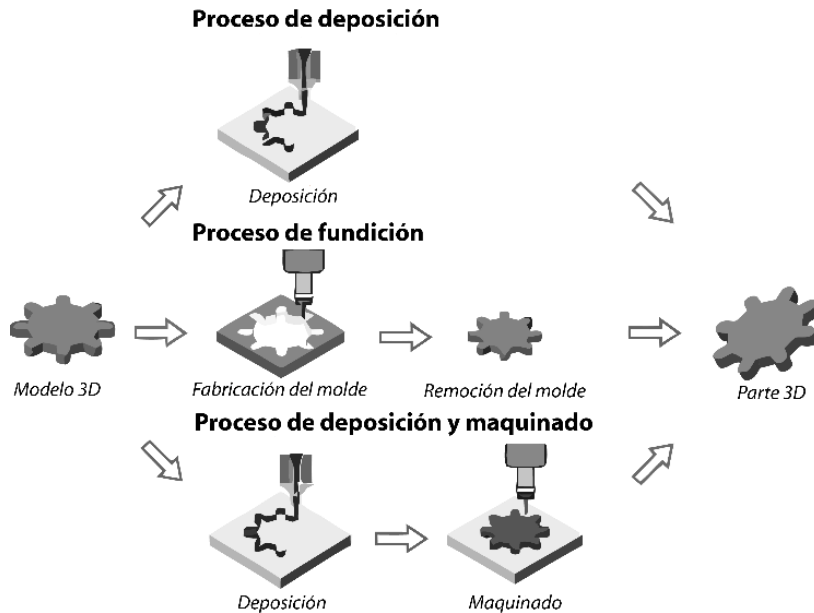


Figura 2.147. Fabricación de microengrane por tres procesos distintos.

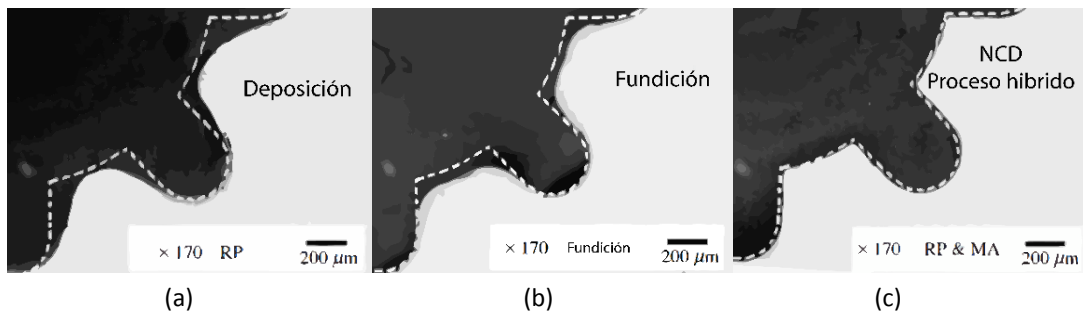


Figura 2.148. Comparativa entre procesos en la fabricación de un microengrane: a) proceso de deposición, (b) proceso de fundición, (c) proceso híbrido NCD.

2.4.7 Sistema de maquinado por robot - Robot machining system (RMS)

El sistema de maquinado por robot utiliza un robot industrial con seis grados de libertad montado sobre un riel lineal de 2 m de largo, Figura 2.149 [214]. Con esta configuración el robot puede cubrir un espacio de trabajo de 4 x 2 x 2 m. Una plataforma giratoria con dispositivos de sujeción está instalada para sostener las piezas de trabajo así como dos cámaras ubicadas cerca de la plataforma giratoria para la calibración de las herramientas y el robot. Los modelos sólidos pueden ser creados en algún software comercial CAD e importarse al software diseñado para esta tecnología, el cual realiza las trayectorias para el proceso de construcción basándose en un método incremental y maquinado en capas [214].

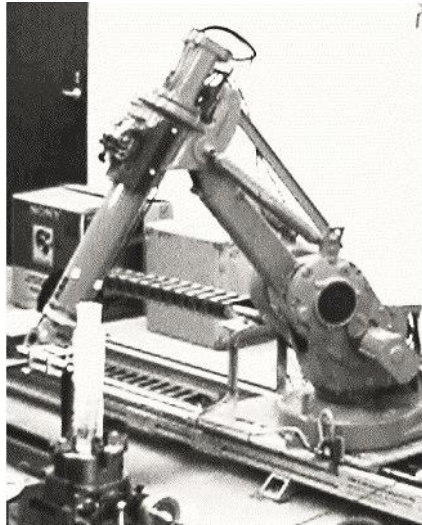


Figura 2.149. Sistema robótico para maquinado.

El sistema RMS tiene características únicas como la capacidad de movimiento de la herramienta en más de tres ejes, sin embargo tiene algunas desventajas al igual que los métodos de mecanizado CNC. El problema más obvio es que los modelos con características de huecos o superficies en cavidades profundas no se pueden mecanizar. En la Figura 2.150 (a), cuando la herramienta intenta maquinar un punto inferior en el interior de una cavidad, se produce la colisión entre el soporte de la herramienta y la superficie del modelo. Para resolver este problema, se desarrolló un método de mecanizado en capas. En primer lugar, todo el modelo se corta en secciones, Figura 2.150 (b). La sección base o inferior es añadida y después mecanizada con la finalidad de obtener la geometría final Figura 2.150 (c). Dado que la cavidad en esta sección es mucho menos profunda que la del modelo original, ninguna colisión ocurre entre la herramienta y el modelo. Después del mecanizado de la sección inferior se pega de manera homogénea otra sección con un adhesivo. Entonces el maquinado de una nueva sección se repite sin colisiones como en la Figura 2.150 (d). En el maquinado de secciones debe haber un pequeño solapamiento de la trayectoria de la herramienta entre las dos siguientes secciones de stock consecutivas. Esto permite eliminar el área convexa entre las dos secciones causadas por la aplicación de material adhesivo.

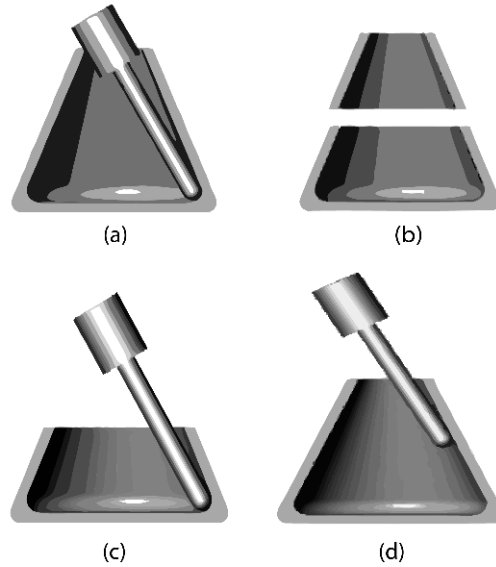


Figura 2.150. Mecanizado basado en capas.

En el método RMS el espesor de la sección es mucho más grande en comparación a una capa en el proceso tradicional RP, puesto que emplean espesores de 5, 9 y 18 mm. La Figura 2.151, muestra el modelo de un florero construido por RMS, el cual tomo alrededor de 15 horas para su construcción [214].

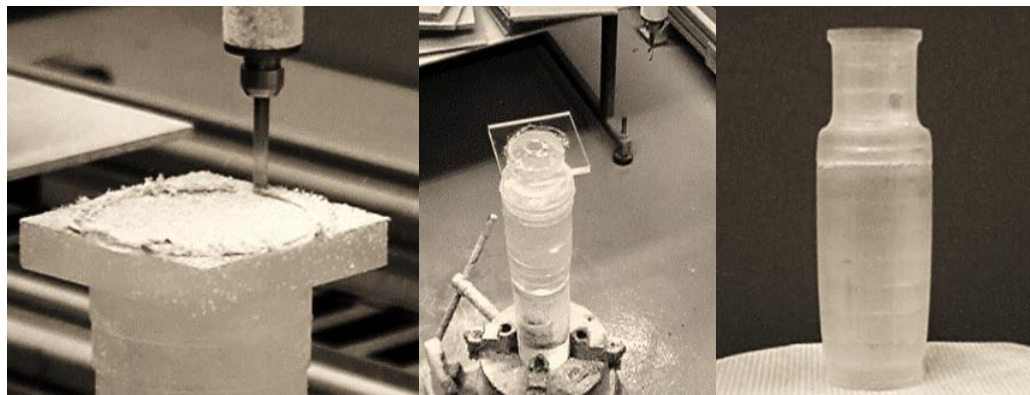


Figura 2.151. Proceso de maquinado y pieza final.

2.4.8 Consolidación ultrasónica - Ultrasonic consolidation (UC)

El proceso UC se basa en la microfricción para producir uniones metalúrgicas verdaderas entre las capas de metal (láminas) sin fusión. La capa consolidada se traduce en el modelo construido a muy alta frecuencia ultrasónica. El proceso utiliza una fuente de alta frecuencia de energía ultrasónica para inducir fuerzas combinadas de cizallamiento estático y oscilante dentro de láminas de metal para producir una unión en estado sólido y construir una parte cercana a su forma final, que se maquina a continuación a sus dimensiones finales utilizando un sistema integrado CNC de tres eje [215]. Como las superficies vibran una contra otra, los contaminantes tales como los óxidos son fracturados y desplazados. Estas superficies son limpiadas atómicamente y se ponen a continuación

en contacto bajo presiones moderadas a temperaturas que normalmente no superan el medio punto de fusión del metal, Figura 2.152; [216]. En el proceso el metal fluye plásticamente en una zona interfacial estrecha alrededor de 10 a 20 μm de ancho, recristalizándose y procediendo a un crecimiento de grano a través de la interfaz [216]. Debido a que el proceso no involucra fundición, no hay errores dimensionales a causa de la contracción, la tensión residual y la distorsión en la pieza final [215].

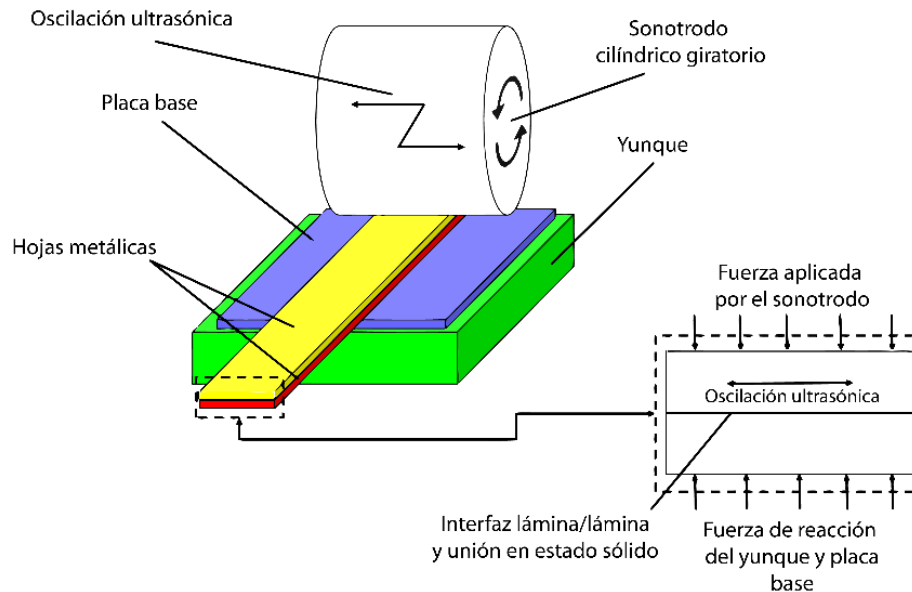


Figura 2.152. Esquema del proceso UC.

-Materiales empleados

- Hierro (Fe).
- Níquel (Ni).
- Cobre (Cu)
- Aleación de aluminio-bronce, aluminio-acero inoxidable y aluminio-níquel.

-Aplicaciones

- Herramientas para moldeo por inyección.
- Herramientas para extrusión.
- Herramientas de moldeo por vacío, y otros

-Compañías fabricantes de la tecnología

- Fabrisonic LLC (EUA).

2.4.9 Rayo iónico enfocado - Focused ion beam (FIB)

El proceso FIB permite la formación de imágenes, el fresado y la deposición de materiales conductores y aislantes con una alta precisión. El FIB tiene la capacidad para fabricar estructuras que tienen un tamaño por debajo de $1\ \mu\text{m}$, por lo tanto puede ser utilizado para la creación de prototipos o fabricación de microdispositivos de alta precisión con un gran número de materiales, Figura 2.153 (a). Un sistema FIB opera de manera similar a un microscopio electrónico de barrido. Ambos instrumentos utilizan partículas cargadas de una fuente, Figura 2.153 (b), y enfocan en un haz de iones a través de lentes electromagnéticas/electrostáticas para escanear pequeñas áreas de la muestra. Con ambos instrumentos es posible obtener una imagen de alta resolución mediante la recopilación de la emisión de electrones secundarios producidos por la interacción del haz con la superficie de la muestra. El FIB difiere de un microscopio electrónico por el uso de iones cargados de un ion de metal líquido [217].

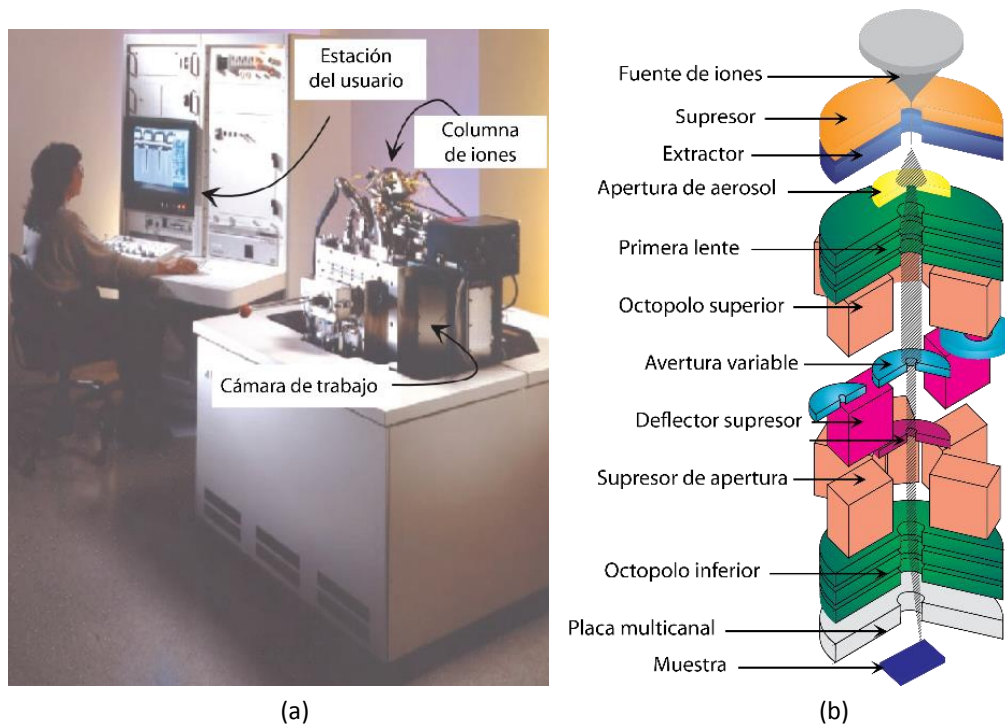


Figura 2.153. Sistema FIB: (a) componentes del equipo FIB, (b) esquema de la columna de iones empleada en FIB.

El proceso FIB ocurre cuando los iones energéticos golpean la superficie de una muestra sólida que cede energía a los electrones del sólido, así como a sus átomos. Los efectos físicos más importantes de los iones incidentes sobre el sustrato son: la pulverización catódica de átomos de sustrato neutro e ionizado que permiten el fresado del sustrato. La emisión de electrones y las interacciones químicas hacen posible la formación de imágenes y la ruptura de los enlaces químicos de las moléculas durante la deposición [217].

-Formado de imágenes

Durante la formación de imágenes el haz de iones es finamente enfocado y escanea la trama sobre un sustrato ocasionando que las partículas secundarias (átomos neutros, iones y electrones) se generen en la muestra. La mejor resolución de las imágenes FIB es igual al tamaño mínimo del haz de iones, es decir, por debajo de 10 nm, Figura 2.154 (a).

-Fresado

La eliminación de material de la muestra se consigue utilizando un haz de iones de alta corriente. El resultado es una pulverización catódica física del material de la muestra, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.154 (b).

-Deposición

El proceso FIB permite la deposición de metal y materiales aislantes sin emplear plantillas. El principio es la deposición química de vapor (CVD). La principal diferencia entre FIB y CVD es la mejor resolución que se puede lograr con FIB pero a una menor velocidad de deposición.

En el proceso de deposición un gas precursor se pulveriza sobre la superficie de un sustrato por una boquilla fina. Las moléculas del gas pulverizado son golpeadas por un haz de iones que descomponen localmente el precursor. El producto de reacción entre el haz de iones y el gas precursor permanece en la superficie del sustrato como una capa fina con una forma definida, mientras que los productos volátiles de reacción son eliminados por el sistema de vacío, Figura 2.154 (c). Mediante el sistema FIB es posible la deposición de varias capas para formar geometrías complejas con características sobresalientes, Figura 2.155.

Es posible obtener por deposición una resolución y espesor de capa por debajo de 100 nm. Los sistemas más recientes FIB son aún capaces de producir modelos con una dimensión de 10 nm [217].

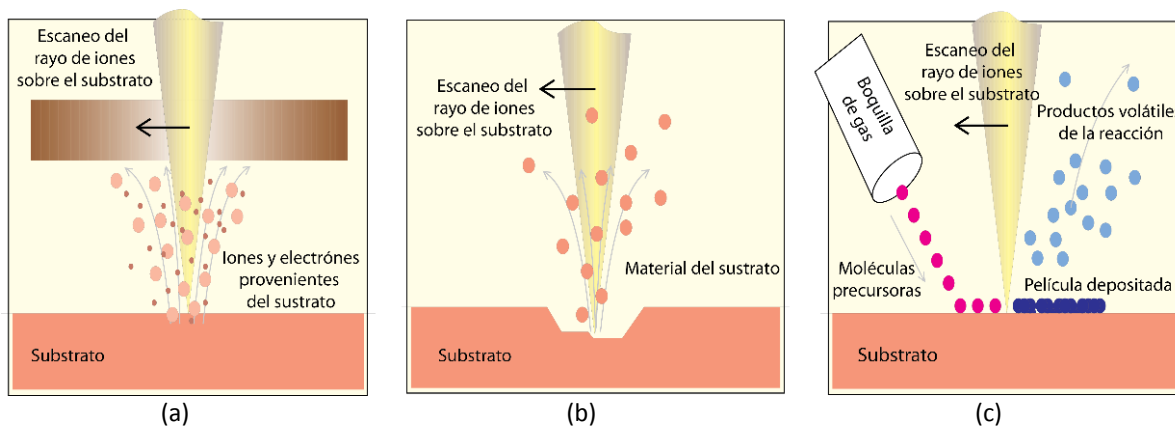


Figura 2.154. Principios de FIB: (a) imagen, (b) maquinado, (c) deposición.

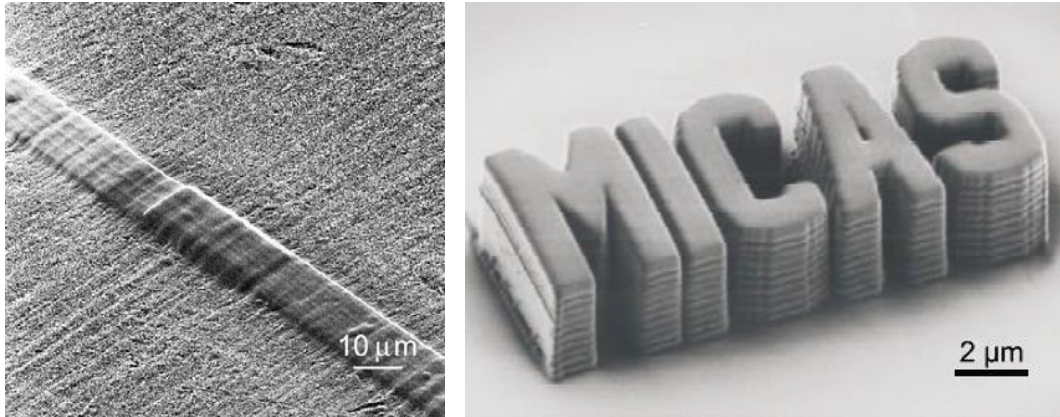


Figura 2.155. Geometrías 3D formadas por la tecnología FIB.

2.4.10 Maquinado rápido en capas - Rapid layer milling (RLM)

El proceso RLM es una técnica para maquinar cavidades profundas y estrechas. El RLM, se auxilia de un módulo CAM nuevo, llamado WorkNC-LMP para dividir automáticamente los modelos 3D y crear trayectorias de desbaste y acabado para cada capa, [23] EL proceso RLM comienza al fabricar la primera capa, utilizando técnicas de maquinado de alta velocidad. Una vez fabricada la primera capa, una nueva placa de material es adherida a la anterior para efectuar el mecanizado de la siguiente capa, esto continúa hasta que la pieza se construye en su totalidad.

La tecnología RLM se puede utilizar en cualquier centro de maquinado, lo que simplifica la programación y el corte de formas complejas. Al utilizar el CAM en conjunto con el centro de fresado, todas las trayectorias de la herramienta y secuencias de control de la máquina se generan automáticamente para cada capa. Esta técnica es ideal para el mecanizado de alta velocidad que permite el uso de cortadores cortos y rígidos, y elimina la posibilidad de una colisión. Los factores necesarios para fabricar exitosamente piezas es el control de la corrugación de la superficie antes de la unión, el corte de canales adhesivos para controlar el exceso de pegamento, la superposición de las trayectorias de corte para eliminar los restos de pegamento, y las rutas de acceso para la aplicación de adhesivo entre las capas [218].

-Materiales empleados

- Metales ferrosos y no ferrosos.
- Polímeros.
- Madera.

-Desventajas del proceso

- No es posible maquinar esquinas rectas.

-Aplicaciones

- Prototipos funcionales.
- Prototipos de prueba y visualización.

-Requerimientos de Instalación

- Equipo CNC.

2.4.11 Acumulación controlada de metal - Controlled metal build up (CMB)

El proceso CMB, desarrollado en el Instituto Fraunhofer de Tecnología de Producción, IPT (Aquisgrán, Alemania), combina la deposición de la soldadura láser con fresado de alta velocidad (HSC) con el fin de construir, modificar y reparar moldes y matrices, [219]. El proceso se originó a partir de conceptos de maquinado rápido donde la generación de piezas se hace capa por capa.

El proceso CMB comienza con la deposición de material mediante soldadura láser. Una vez depositada la primera capa, la superficie de metal se mecaniza en el plano de la superficie, con el fin de generar una superficie definida para la deposición de la siguiente capa. El dispositivo de soldadura consta de un alimentador de material y una fuente láser montada al lado del husillo de una máquina de fresado de tres ejes. En el fresado el dispositivo de soldadura se mueve hacia arriba por un mecanismo neumático para evitar daños y colisiones con la pieza de trabajo. El proceso funciona con todos los materiales soldables, incluyendo aceros para herramientas. El proceso llega a valores de densidad total y dureza máxima de 60 HRC. Además, el uso de una herramienta de fresado HSC garantiza un mecanizado de alta precisión obteniéndose valores de rugosidad de la superficie de 0.4 a 3 $\mu\text{m Ra}$.

2.4.12 Torneado micro químico por láser - Laser microchemical lathe (LML)

El proceso de torneado microquímico por láser (LML) es empleado para la creación de prototipos de partes axisimétricas a partir de la fase de vapor. En el LML, un haz de láser se enfoca a lo largo del eje de rotación de un torno, mientras que otro escanea la pieza en ángulo recto con respecto al primero. El primer haz se utiliza para la alineación y para depositar una especie de fibras sobre el mandril a partir de percusión en fase de vapor. El segundo haz se aplica entonces para añadir o eliminar material de este mandril giratorio, ya sea a través deposición química de vapor por láser (LCVD) o erosiónado químico de vapor por láser (LCVE), Figura 2.156. El material se añade cuando un precursor apropiado está presente, o eliminado cuando una atmósfera reductora tal como cloro, yodo o hidrógeno se emplea que es como ocurre el LCVE generando el perfil de la parte por erosiónado láser. La capacidad para corregir errores en el proceso de deposición a través de perfiles de láser permite fabricar prototipos precisos de escalas milimétricas simétricamente axiales, tales como tornillos de avance, levas, y agujas afiladas. La deposición ocurre muy rápido y las tasas de erosiónado que se han logrado son superiores a los 120 000 μm por segundo (12 cm/seg). Esta tasa de crecimiento sin precedentes permite la creación de prototipos con estructuras de volúmenes que superan el centímetro cúbico en sólo 10-20 minutos [220].

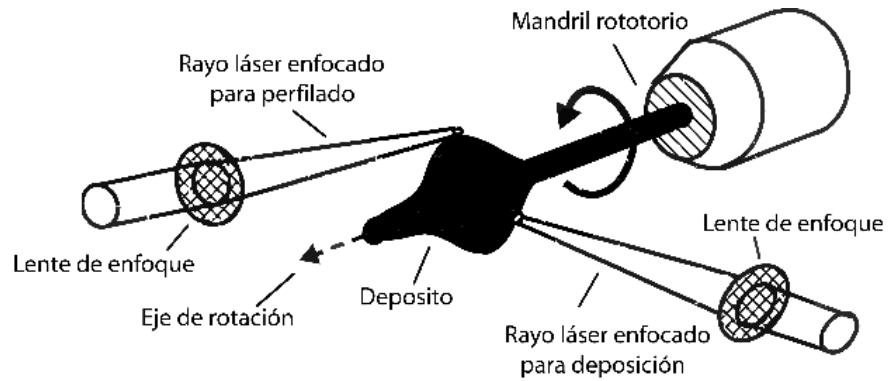


Figura 2.156. Esquema del proceso LML.

2.5 Discusión

Se han ubicado en la literatura más de 120 técnicas de RPM&T que han sido desarrolladas, pudiéndose observar que solo el 18% de todas ellas se han sido comercializadas. Dentro del 82% restante se incluyen técnicas que han sido propuestas, pero con resultados no muy favorables, por lo que no han sido comercializadas. También existen muchas técnicas que se encuentran todavía en desarrollo. Sin embargo, en general las técnicas de RPM&T se basan en procesos como la adición, sustracción, formado y combinación de éstas, siendo en su mayoría aditivas.

La Tabla 2.27 presenta un resumen actualizado de los datos técnicos y status de las tecnologías desarrolladas y propuestas en la literatura o información comercial.

Tabla 2.27. Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas.

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados
1	SLA	Aditivo	Curado	Comercial	737 x 635 x 533	0.05	210 000	±0.01	Polímeros fotocurables
2	DLP	Aditivo	Curado	Comercial	175x131x230	0.0075	0.16	-	Resinas fotocurables
3	LTP	Aditivo	Curado	Investigación	-	-	-	-	Resinas termosensible
4	BIS	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Resinas fotocurables
5	SGC	Aditivo	Curado	Obsoleto	500 x 350 x 500	0.025	-	-	Resinas fotocurables
6	HIS	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	-
7	ES	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Caucho de silicona, poliéster, poliuretano, epoxi.
8	SF	Aditivo	Curado	-	0.250 x 1 x 20	-	-	-	Metales, cerámicas, piezocerámicos, plásticos.
9	LL	Aditivo	Curado	Comercial	150 x 150 150	-	18 000	±0.005	Resinas fotocurables
10	NSL	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Resinas fotocurables
11	UVRM	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	-
12	STLG	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Resinas termosensibles
13	JP	Aditivo	Curado	Comercial	500 x 400 x 200	0.016	-	±0.020 ±0.085	Resinas fotocurables
14	NIL	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	-
15	EBL	Aditivo	Curado	Comercial	-	-	-	-	Silicio, polímeros, metales, cerámicos.
16	FTI	Aditivo	Curado	-	-	0.1	-	-	Resinas fotocurables
17	RSLA	Aditivo	Curado	Comercial	120 x 120 x 100	0.1	30 000	-	Resinas fotopoliméricas
18	Araldite	Aditivo	Curado	Comercial	650 x 370 x 600	-	3 000	-	Resinas fotocurables
19	DPS	Aditivo	Curado	-	-	0.0508	-	±0.0127	Compuestos polimerizables fotocurables
20	LADI	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Silicio
21	Optoform	Aditivo	Curado	-	250 x 350 x 500	0.075-0.2	-	-	Resinas epoxi fotocurables
22	MSLA	Aditivo	Curado	-	-	-	-	-	Resinas fotopolimerizables
23	LOM	Aditivo	Apilado	Comercial	-	0.05	12 000	±0.004	Celulosa, hojas de metales ferrosos y no ferrosos, cerámicos, termoplásticos
24	CLOM	Aditivo	Apilado	-	-	-	-	-	Celulosa, hojas de metales ferrosos y no ferrosos, cerámicos, termoplásticos

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados	
25	CAM-LEM	Aditivo	Apilado	-	-	-	-	-	Cerámicas de alta alúmina, nitruro de silicio de cerámica, aleación de metal de níquel-hierro, acero inoxidable.	
26	SFP	Aditivo	Apilado	-	-	-	-	-	Laminas semipolimerizadas	
27	Hotplot	Aditivo	Apilado	Obsoleto	-	1.0	-	-	Papel de oficina	
28	SDL aka MCOR	Aditivo	Apilado	Comercial	256 x 169 x 150	0.1	10 000-15 0000	8-27	±0.012	Papel de oficina
29	FDM	Aditivo	Dispensado	Comercial	910 x 610 x 910	0.125	1 800	20-80	±0.015	ABS, policarbonato, Polifenilsulfona, elastómeros, PLA.
30	3DW	Aditivo	Dispensado	Investigación	-	-	-	-	-	Metales
31	GDP	Aditivo	Dispensado	Investigación	-	-	-	-	±0.001	Carburo de silicio, nitruro de silicio.
32	MAPLE	Aditivo	Dispensado	-	-	0.001-0.01	-	-	-	-
33	BPM	Aditivo	Dispensado	-	-	0.013	18 600	-	±0.025	Zinc, estaño, plomo, cobre, termoplásticos con punto de fusión <420 °C
34	EFAB	Aditivo	Dispensado	.	0.002-0.01	-	-	-	-	Cobre, níquel, plata, oro y aleaciones
35	LENS	Aditivo	Dispensado	Comercial	900 x 1500 x 900	0.02	3 600	5-10	±0.025	Acero inoxidable, Inconel, cobre, aluminio, titanio, cerámicos.
36	FDC	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Dióxido de titanio (TiO ₂), alúmina (Al ₂ O ₃), Sílice (SiO ₂), mullita (3Al ₂ O ₃ - 2SiO ₂)
37	MJS	Aditivo	Dispensado	-	-	0.05-0.1	-	-	-	Metales y aleaciones, cerámicas
38	MJ	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Metales
39	DLDM	Aditivo	Dispensado	.	-	-	-	-	-	-
40	MS	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Metales
41	LCVD	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	±0.0005	-
42	RFP	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Agua
43	MDM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-
44	MJM	Aditivo	Dispensado	Comercial	298 x 185 x 203	0.016	15	-	±0.025	Termopolímeros
45	HVJ	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Pasta de polvo de polímero

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados
46	Robocasting	Aditivo	Dispensado	Comercial	-	-	-	-	<p><i>Cerámicos:</i> óxido de aluminio, titanio de bario, titanio de bario estroncio, vidrio bioactivo, ferrita de cobalto, feldespato, hidroxiapatita, óxido de hierro, caolín, titanio zirconato de plomo, mullita, dióxido de silicio, carburo, nitruro de silicio, óxido de zinc, óxido de circonio.</p> <p><i>Compuestos:</i> Al₂O₃ / Al, Al₂O₃ / Mo, Al₂O₃ / TiCuSil, BaTiO₃ / ZrO₂, Nicrom / ZrO₂, Poroso / Denso Al₂O₃, Poroso / Denso PZT, PZT / polímero, Si₃N₄ / C de nanotubos, ZrO₂ / Al₂O₃, ZrO₂ / mullita.</p> <p><i>Metales:</i> oro, manganeso, molibdeno, níquel, cromo, renio, plata, acero inoxidable, tungsteno.</p> <p><i>Polímeros:</i> epoxi, polímeros termoplásticos.</p>
47	EDSSM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Metales de bajo punto de fusión
48	EFF	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Hidroxiapatita, alúmina, cuarzo, ingredientes orgánicos, materiales piezoeléctricos
49	EPDFF	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Polímero en forma de polvo de tóner
50	MOLD-SDM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-
51	PLD	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Oxido de Ytrio Bario, cobre
52	SALD	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Carbón, cobalto, oxido de silicio, oxido de titanio

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Esesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados	
53	SALDVI	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Aluminio, Nitruro de aluminio (AlN), oxido de aluminio (Al_2O_3), silicio (Si), dióxido de silicio (SiO_2), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC), titanio (Ti), dióxido de titanio (TiO_2), zirconio (Zr), dióxido de zirconio (ZrO_2), hafnio (Hf), wolframio (W), cobalto (Co), hierro (Fe), níquel (Ni), cromo (Cr), cobre (Cu).	
54	MIMIC	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Polímeros, cerámicas y metales	
55	LPIM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	Cerámicos	
56	CC	Aditivo	Dispensado	-	-	101-151	300	-	Cerámicos	
57	IP aka MM	Aditivo	Dispensado	Comercial	150 x 150 x 50	0.00625-0.1	3 000	25-60	± 0.005 - ± 0.025	Polímeros
58	FDMm aka FDMet	Aditivo	Dispensado	Investigación	-	0.7	-	-	-	Metales
59	HPDBNM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	40 000** Gotas/seg	-	-	-
60	PIM	Aditivo	Dispensado	-	-	0.2-20	-	-	-	Acero inoxidable, óxidos cerámicos.
61	3DMW	Aditivo	Dispensado	-	-	0.120	-	-	-	Metales
62	PDM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Polvo metálico
63	PLDM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	Polvo metálico
64	FLC	Aditivo	Dispensado	Investigación y desarrollo	-	-	1-30*** gr/min	1-2	-	Metales
65	TSLR	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-
66	MBS	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-
67	CM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-
68	MESO-SDM	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-
69	PPD	Aditivo	Dispensado	-	-	-	-	-	-	-

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados	
70	SLS	Aditivo	Sinterizado	Comercial	508 x 508 x 760	0.06	42 000	5-15-5	±0.025	<i>Polímeros:</i> nylon, poliestireno <i>Metales:</i> acero y aleaciones, acero inoxidable, acero para herramientas, aluminio, bronce, cromo, cobalto, titanio, <i>Otros:</i> arena verde.
71	DLMS	Aditivo	Sinterizado	Comercial	250 x 250 x 220	0.025	42 000	1.2-7	±0.025	<i>Polímeros:</i> nylon, poliestireno <i>Metales:</i> acero y aleaciones, acero inoxidable, acero para herramientas, aluminio, bronce, cromo, cobalto, titanio, <i>Otros:</i> arena verde.
72	EBM	Aditivo	Sinterizado	Comercial	200 x 200 x 180	0.05	480 000 000	25-35	±0.013	Aceros grado herramienta, aceros de baja aleación, aleaciones de titanio, titanio comercialmente puro, aleaciones de níquel
73	SLM	Aditivo	Sinterizado	Comercial	250 x 250 x 300	0.02	420 000	25-35	±0.013	Cromo, cobalto, acero inoxidable, plata, aleaciones de paladio, titanio, aceros grado herramienta, aluminio, Inconel.
74	SMS	Aditivo	Sinterizado	Comercial	300 x 200 x 800	0.05	0.15-3	20	-	Poliestireno, policarbonato, polietileno, polipropileno, cera, arena.
75	SIS	Aditivo	Sinterizado	Investigación y desarrollo	-	-	-	-	-	Polímeros, bronce
76	ELM	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-	-
77	HSS	Aditivo	Sinterizado	-	-	0.1	-	-	-	-
78	LMS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	1.5	-	Tungsteno, cobre, aluminio, plata, titanio y aceros
79	μ-SLS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-	Metálicos y cerámicos
80	SLMS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-	Polvo de plomo
81	HFSEDS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-	Polvo metálico recubierto de polímero
82	RPBPS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-	-

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados
83	MMSLS	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-
84	SLPR	Aditivo	Sinterizado	-	-	-	-	-	-
85	3DP	Aditivo	Aglutinado	Comercial	750 x 750 x 700	0.05	0.43-0.6	±0.07	Yeso, almidón, sílice, metales
86	TSF	Aditivo	Aglutinado	-	3 353 x 1 829 x 1 219	0.001-0.003	-	±0.0012	Fibra de vidrio, hormigón, espuma de expansión
87	FPM	Aditivo	Aglutinado	-	-	-	-	-	-
88	LCRHLS	Aditivo	Aglutinado	-	-	-	-	-	-
89	RPBlox	Aditivo	Ensamble	Investigación	-	N.A	-	-	Metales, polímeros, madera
90	OcBlox	Aditivo	Ensamble	Investigación	600 x 300 x 200	N.A	9.66 seg/cubo	±0.02	Metales, polímeros
91	SC	Aditivo	Ensamble	Comercial	-	-	-	-	Metales, polímeros
92	GTCF	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	-
93	LISC	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	Células
94	TSMS	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	Gel termosensitivo
95	LDM	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	PLLA, fosfato tricálcico, dioxano
96	OP	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	Células y/o segregados de células
97	AJS	Aditivo	Organismos	Investigación	-	0.2	-	-	Sacarosa desnaturalizada
98	CP	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	Células, proteínas
99	PEM	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	PLLA
100	3DCAT	Aditivo	Organismos	Investigación	-	-	-	-	Biomateriales, células
101	Bio-LP	Aditivo	Organismo	Investigación	-	-	-	-	Biomateriales
102	CNC-RP	Substractivo	Maquinado CNC	-	-	-	-	-	Metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, madera
103	DM	Substractivo	Maquinado CNC	Comercial	300 x 300 x 300	N.A	180 000	±0.01	Cera, plásticos, madera, bronce, aluminio, cobre
104	HSM	Substractivo	Maquinado CNC	-	-	N.A	-	-	Metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, madera
105	RPS	Substractivo	Maquinado por robot	-	-	N.A	-	-	Metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, madera
106	LC	Substractivo	Maquinado láser	-	-	-	≤10	-	Acero. Materiales cerámicos
107	LAE	Substractivo	Maquinado láser	Investigación	-	-	-	-	Silicio

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados
105	RPS	Substractivo	Maquinado por robot	-	-	N.A	-	-	Metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, madera
106	LC	Substractivo	Maquinado láser	-	-	-	≤ 10	-	Acero. Materiales cerámicos
107	LAE	Substractivo	Maquinado láser	Investigación	-	-	-	-	Silicio
108	LIBWE	Substractivo	Maquinado láser	-	-	-	10 nm pulso ⁻¹	-	-
109	LDM	Substractivo	Maquinado láser	-	-	-	-	-	-
110	Robotyping	Modelado	N.A	-	-	-	-	-	Arena de sílice
111	3DWM	Hibrido (aditivo - substractivo)	Dispensado (soldadura 3D- Maquinado CNC)	-	-	0.1-1	-	-	Metales
112	SDM	Hibrido (aditivo- substractivo)	Dispensado/ Substractivo (Maquinado CNC)	-	-	-	1-5 gotas por segundo	± 0.005	Metales
113	DLD-CNC	Hibrido (aditivo- substractivo)	Dispensado/ Substractivo (Maquinado CNC)	-	-	-	-	-	Metales
114	HPDM	Hibrido (aditivo- substractivo)	Dispensado (Plasma)/ Substractivo (Maquinado CNC)	-	-	-	-	-	Metales
115	LGHSM	Hibrido (aditivo- substractivo)	Dispensado/ Maquinado CNC	-	-	-	-	-	-

(-) Datos no disponibles

Tabla 2.27 Datos técnicos de las tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas, (continuación).

Tecnología	Tipo de proceso	Tipo de conformado	Status	Espacio de trabajo (mm)	Espesor mínimo de capa (mm)	Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	Acabado superficial Ra (μm)	Precisión (mm)	Materiales empleados
116	NCD	Hibrido (aditivo-substractivo)	Dispensado (curado)/ Maquinado CNC	-	-	-	-	-	Cerámicos
117	RMS	Hibrido (aditivo-substractivo)	Dispensado/ Maquinado por robot	4 000 x 2 000 x 2 000	-	5-18	-	-	Polímeros
118	UC	Hibrido (aditivo-substractivo)	Soldadura por ultrasonido/ Maquinado CNC	-	-	-	-	-	Metales
119	FIB	Hibrido (aditivo-substractivo)	Dispensado/ Maquinado CNC	-	-	-	-	-	-
120	RLM	Hibrido (aditivo-substractivo)	Apilado/ Maquinado CNC	-	-	-	-	-	Metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, madera
121	CMB	Hibrido (aditivo-substractivo)	Soldadura láser/ Maquinado CNC	-	-	-0.3-4	-	-	Metales soldables
122	LML	Hibrido (aditivo-substractivo)	Dispensado/ Maquinado láser	-	-	-	12 cm/seg	-	-

(-) Datos no disponibles

Capítulo 3

Clasificación y selección de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramiental rápido

En este capítulo se presenta la propuesta de una clasificación de las tecnologías de prototipado herramiental y manufactura rápida, la cual se basa en el proceso físico de fabricación de las piezas. Adicionalmente se presentan cuatro metodologías de selección propuestas, las cuales se basan en diversos criterios de acuerdo a los intereses que pudiera tener el usuario de los sistemas RPM&T.

3.1 Clasificación de las tecnologías RPM&T

Las clasificaciones de las tecnologías RPM&T propuestas en la literatura están basadas en diversos criterios tales como el uso final del prototipo (herramiental, manufactura o prototipo visual), el tipo de proceso físico, y en directas e indirectas. Algunos de estos sistemas de clasificación propuestos llegan a ser subjetivos debido a que una misma tecnología puede involucrarse en dos o más categorías de la misma clasificación, entre estos se encuentran los propuestos en [37], [49]-[52].

Así mismo se han propuesto clasificaciones que toman en cuenta un número limitado de tecnologías, resultando obsoletas en la actualidad debido a que no toman en cuenta gran parte de las tecnologías que han sido desarrolladas, entre estas clasificaciones se ubican las propuestas en [6], [37], [42], [44], [48], [49]-[54]. De igual forma se han propuesto clasificaciones que toman solo en cuenta tecnologías de herramiental rápido como [49] y el tipo de material de construcción empleado para generar el prototipo como las propuestas en [6] y [55]. Estas clasificaciones también resultan limitadas debido a que las tecnologías de prototipado rápido tienen la capacidad de generar prototipos y piezas de uso final, no solo herramientas. Además, las clasificaciones fundamentadas en distinguir el tipo de material empleado no toman en cuenta que existen tecnologías que basan su principio de funcionamiento en la remoción, formado de material y tecnologías híbridas (tecnologías que generalmente añaden y remueven material).

El sistema de clasificación que se propone se basa en el sistema de clasificación presentado en [42], el cual se fundamenta en discriminar las tecnologías de acuerdo a su principio de funcionamiento y proceso físico empleado para conformar la pieza. Esta clasificación evita que las tecnologías puedan caer en dos o más apartados de la misma, permitiendo que se disponga de un sistema de clasificación que carece de ambigüedades, por lo cual resulta un sistema de clasificación sólido y de utilidad. Sin embargo la clasificación propuesta en [42] no toma en cuenta todos los sistemas RP, RM y RT que han sido desarrollados, por lo tanto se propone su revisión y actualización, considerando la inclusión de nuevas tecnologías RP que no son tomadas en cuenta. La clasificación identifica cuatro tipos principales de procesos, los cuales engloban a todas las tecnologías RP, RM y RT. Estos cuatro procesos se describen a continuación.

3.1.1 Procesos de adición

Estos procesos se caracterizan por construir los prototipos o modelos físicos añadiendo material capa por capa. Dentro de los procesos de adición se identifican siete métodos para conformar la pieza o prototipo. Estos métodos son:

- *Procesos de curado*: un polímero foto-sensitivo es expuesto a una fuente de luz para endurecerlo.
- *Procesos de apilado*: hojas delgadas de un material son cortadas de acuerdo al contorno de cada capa y luego son adheridas sobre una capa previa.
- *Procesos de dispensado*: el material de construcción es fundido y después depositado en forma de gotas o como un filamento.
- *Proceso de sinterizado*: el material de construcción, que generalmente es polvo, se sinteriza empleando una fuente de calor para generar la geometría deseada.
- *Procesos de aglutinado*: el material de construcción, que generalmente es polvo, se conglera mediante un aglutinante para producir la geometría de cada capa.
- *Proceso de ensamble*: pequeños volúmenes de material son ensamblados para generar un prototipo.
- *Procesos de organismos*: estos procesos emplean células vivas ensambladas para generar tejidos vivos u órganos.

3.1.2 Procesos de substracción

Estos procesos generan prototipos o piezas mediante la remoción de material de un volumen de materia prima. Tienen la capacidad de producir prototipos de un alto grado de precisión debido a que en los procesos RP de substracción de material los parámetros y valores de mecanizado se encuentran controlados por una computadora, permitiendo que el movimiento de la herramienta de corte pueda alcanzar precisiones que oscilan entre los 0.5 – 0.001 mm. Entre los procesos de substracción se identifican tres grupos.

Los procesos de substracción pueden ser subdivididos en tres grupos:

- *Maquinado CNC*: en el maquinado CNC el material de la pieza de trabajo se remueve mediante una herramienta de corte. Dentro de estos procesos existen equipos con la capacidad de emplear hasta 5 ejes de movimiento. Cualquier equipo CNC tiene la capacidad de hacer prototipos o para manufacturar piezas funcionales, [16].
- *Maquinado con Robot*: estos procesos emplean un robot con un husillo acoplado. A este último una herramienta de corte es empleada para remover material de la pieza de trabajo de forma similar a proceso CNC.
- *Maquinado Láser*: el material de la pieza de trabajo se remueve mediante la acción de un láser.

3.1.3 Procesos de formado

Son aquellos procesos en los cuales el prototipo se crea deformando la materia prima. Actualmente solo se ubica el sistema Robotyping [58], que emplea herramientas de formado para fabricar el prototipo sin recurrir a la adición o substracción de material.

3.1.4 Procesos híbridos

Estos procesos combinan las técnicas aditivas, substractivas y/o de formado en una sola máquina. Generalmente un proceso aditivo y un proceso substractivo es la combinación más utilizada. En este caso el proceso aditivo genera la pieza, y después el proceso substractivo genera la forma final.

3.1.5 Clasificación general

La clasificación de las tecnologías RPM&T que se propone se basa en la propuesta presentada en [42], la cual se fundamenta en distinguir cada tecnología RPM&T de acuerdo con su principio de funcionamiento y el proceso físico empleado para conformar la pieza. Entre las ventajas que presenta esta clasificación se encuentra el evitar que una misma tecnología pueda ubicarse en dos o más apartados de la misma debido a que se basa en el principio de funcionamiento de cada tecnología. Sin embargo esta clasificación solo toma en cuenta 109 de las 124 tecnologías desarrolladas. Por esta razón la clasificación que se propone en la presente sección muestra una actualización y reubicación de ciertas tecnologías con respecto a [42], incluyendo los procesos comerciales, obsoletos y en actual desarrollo,

De acuerdo con lo anterior la Figura 3.1, presenta la clasificación general propuesta de las tecnologías RPM&T, incluyendo los acrónimos de cada tecnología en su respectivo apartado y su significado en la sección de nomenclatura.

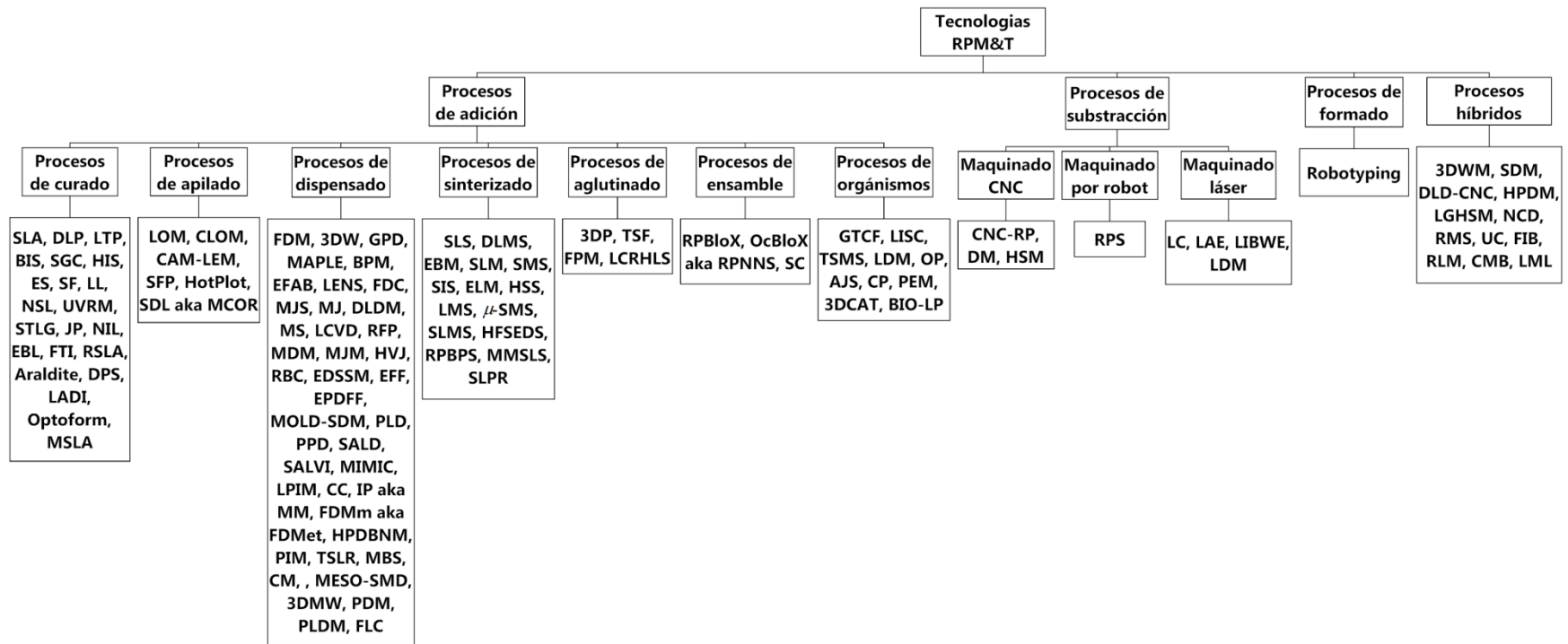


Figura 3.1. Clasificación general de los sistemas RPM&T

3.2 Metodologías de selección

Actualmente existen más de 120 tecnologías RP, RM y RT reportadas en la literatura, algunas disponibles comercialmente, otras en desarrollo, y otras que solo fueron propuestas sin tener éxito comercial.

Se han propuesto en la literatura metodologías de selección (véase sección 1.4.2), que ayudan al usuario a elegir el sistema más adecuado de acuerdo sus requerimientos. Dichas metodologías se basan en el uso final de la pieza [6], o en ponderaciones numéricas que se fundamentan en la perspectiva y criterio del usuario, resultando ser limitadas.

Por lo anterior, en esta sección se proponen cuatro metodologías de selección basadas en criterios que se consideran importantes para el usuario al elegir una tecnología. Solo se consideran los sistemas comerciales ya que resulta ser un grupo más reducido y de acceso a cualquier usuario.

Los criterios de selección propuestos son:

1. Tipo de tecnología, escala y material de la pieza.
2. Material de la pieza.
3. Resistencia mecánica.
4. Costo de la tecnología.

3.2.1 Selección de acuerdo al tipo de tecnología, escala y material de la pieza

La selección de acuerdo al tipo de tecnología, escala y material deseado se muestra en la Figura 3.2. Esta clasificación considera cuatro grandes grupos de acuerdo al uso final de la pieza.

1. Prototipo. Piezas que solo tendrá fines como prototipo de visualización y/o verificación.
2. Manufactura. Piezas que se emplearan como producto final, ya sea como componente de un dispositivo y/o dispositivo final.
3. Herramental. Se refiere a todas aquellas piezas producidas por algún método RP que servirán para la fabricación de herramental.
4. Células y/o andamios. Se refiere a la fabricación de andamios y arreglos celulares para ingeniería tisular.

Debido al gran desarrollo e impacto que actualmente se tiene con los procesos de organismos la empresa EnvisiotecTM comercializa el 3D-Bioplotter el cual combina las tecnologías PEM y 3DCAT para depositar materiales biológicos y células sobre estos. Por tal motivo los procesos que involucran a organismos vivos son tomados en cuenta en la metodología de selección propuesta.

También se toma en cuenta la escala de la pieza deseada, considerando las técnicas comerciales para micro (< 1 mm) y macro (≥ 1 mm) escala, resultando útil para el usuario final debido a la creciente industria de la microfabricación.

El método de selección por tipo de tecnología, escala y material de la pieza evita que el usuario efectúe una selección errónea. Lo anterior debido a que el criterio de selección no se basa en la percepción, ponderación numérica o impresiones del usuario, sino que el proceso de selección presenta las alternativas disponibles partiendo del tipo de prototipo que se desea, tamaño y material.

3.2.2 Selección de acuerdo el material de la pieza

Este criterio de selección, provee información de los materiales que emplean los sistemas RPM&T para fabricar las piezas, y permite al usuario final ubicar el proceso comercial disponible para fabricar piezas del material deseado. Con base en lo anterior se propone el proceso de selección que se presenta en la Figura 3.3.

3.2.3 Selección de acuerdo a resistencia

El proceso de selección de acuerdo a la resistencia se presenta en la Figura 3.4. Este proceso permite al usuario identificar la tecnología RP que empleé un material de construcción que se encuentre dentro del rango de resistencia mecánica deseada para el prototipo. Los intervalos de resistencia mecánica que se involucran en el criterio de selección corresponden a la resistencia a la tensión y se basan en los valores proporcionados por fabricantes de tecnologías RPM&T comerciales, [16], [18], [19], [20], [21] [78] [86], [99], [179].

3.2.3 Selección de acuerdo al costo de la tecnología

La Figura 3.5 muestra el proceso de selección propuesto en base al costo del equipo. Esta metodología de selección se basa en el costo del equipo RP y tiene la finalidad de proporcionar al usuario la capacidad de selección de acuerdo con el capital económico que el disponga o planea utilizar. En este proceso de selección se incluye el nombre de la tecnología así como del fabricante de la misma, tomándose en cuenta varios proveedores de ciertas tecnologías como FDM, debido a que los precios de estos equipos son muy accesibles en comparación con otros procesos. En el sistema de selección se aprecian los equipos más costosos como la tecnología SLS, que oscila entre los \$200,000 a \$1, 000,000 USD, y los equipos económicos como los FDM que su precio comienza en los \$300 USD, [16].

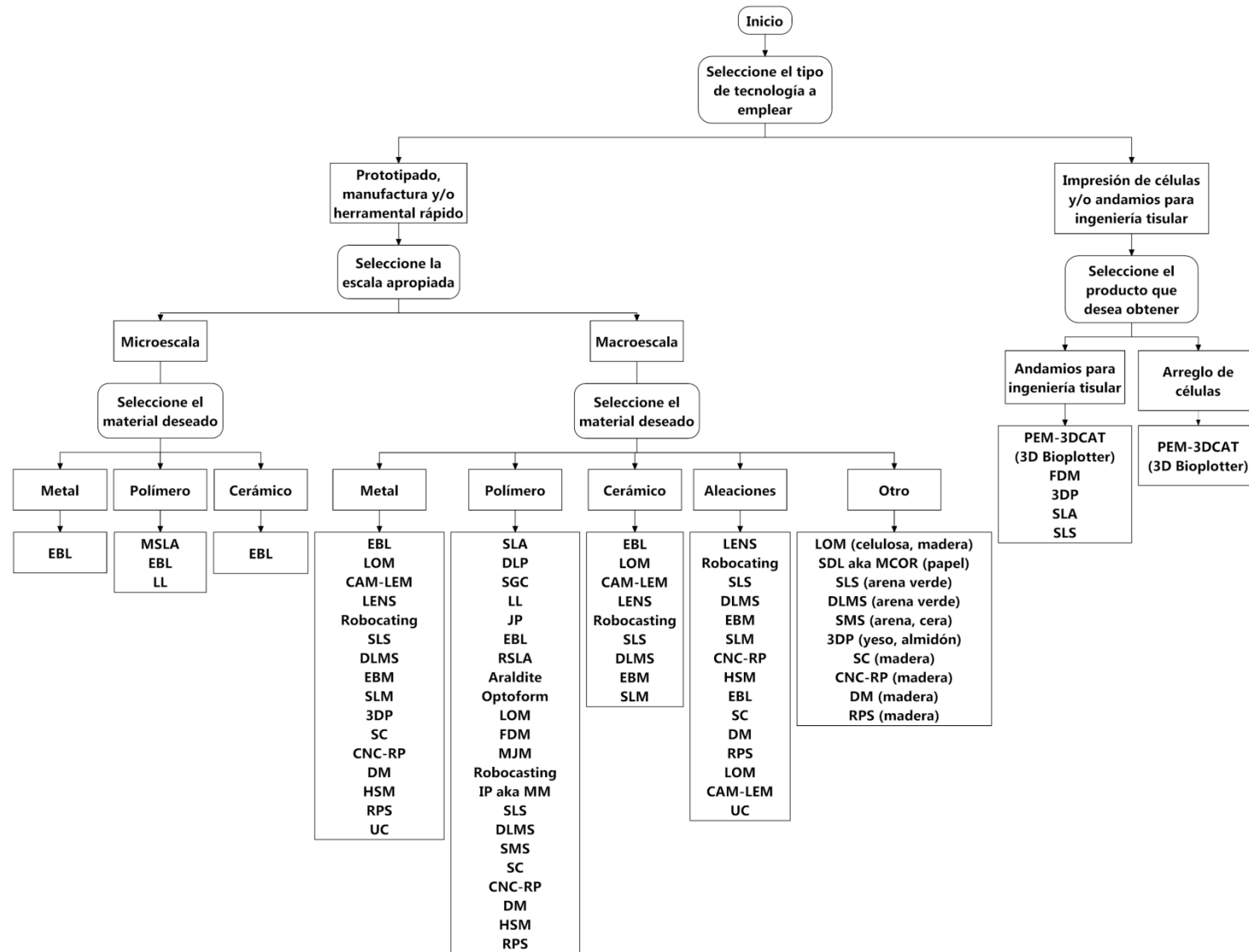
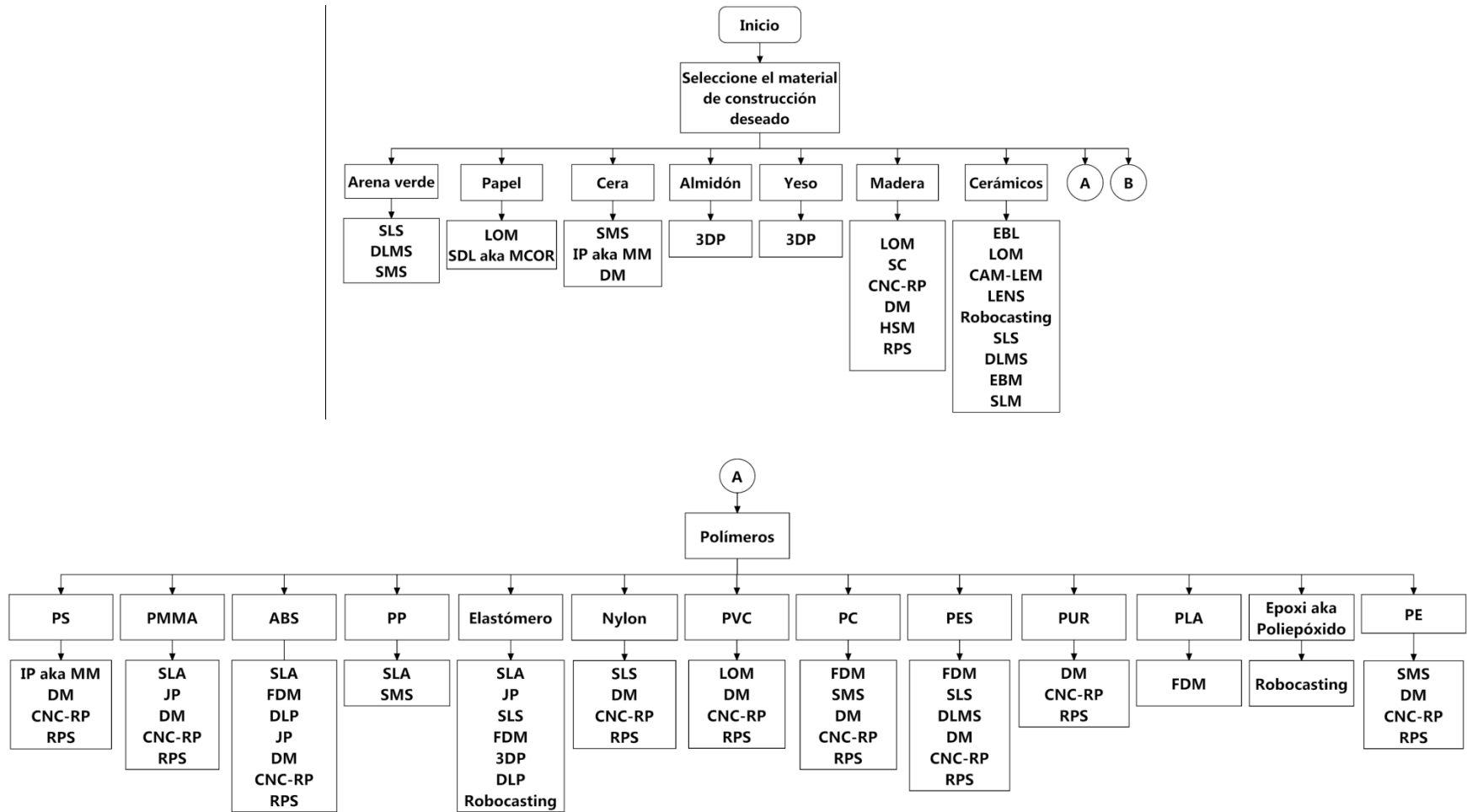


Figura 3.2. Selección de las tecnologías RP, RM y RT según el tipo de tecnología, escala y material de la pieza.



PMMA: acrílico o polimetilmetacrilato, ABS: acilonitrilo butadieno estireno, PP: polipropileno, PS: poliestireno, PUR: poliuretano, PVC: policloruro de vinilo, PC: policarbonato, PES: polietersulfona

Figura 3.3. Selección de acuerdo el material de construcción de la pieza.

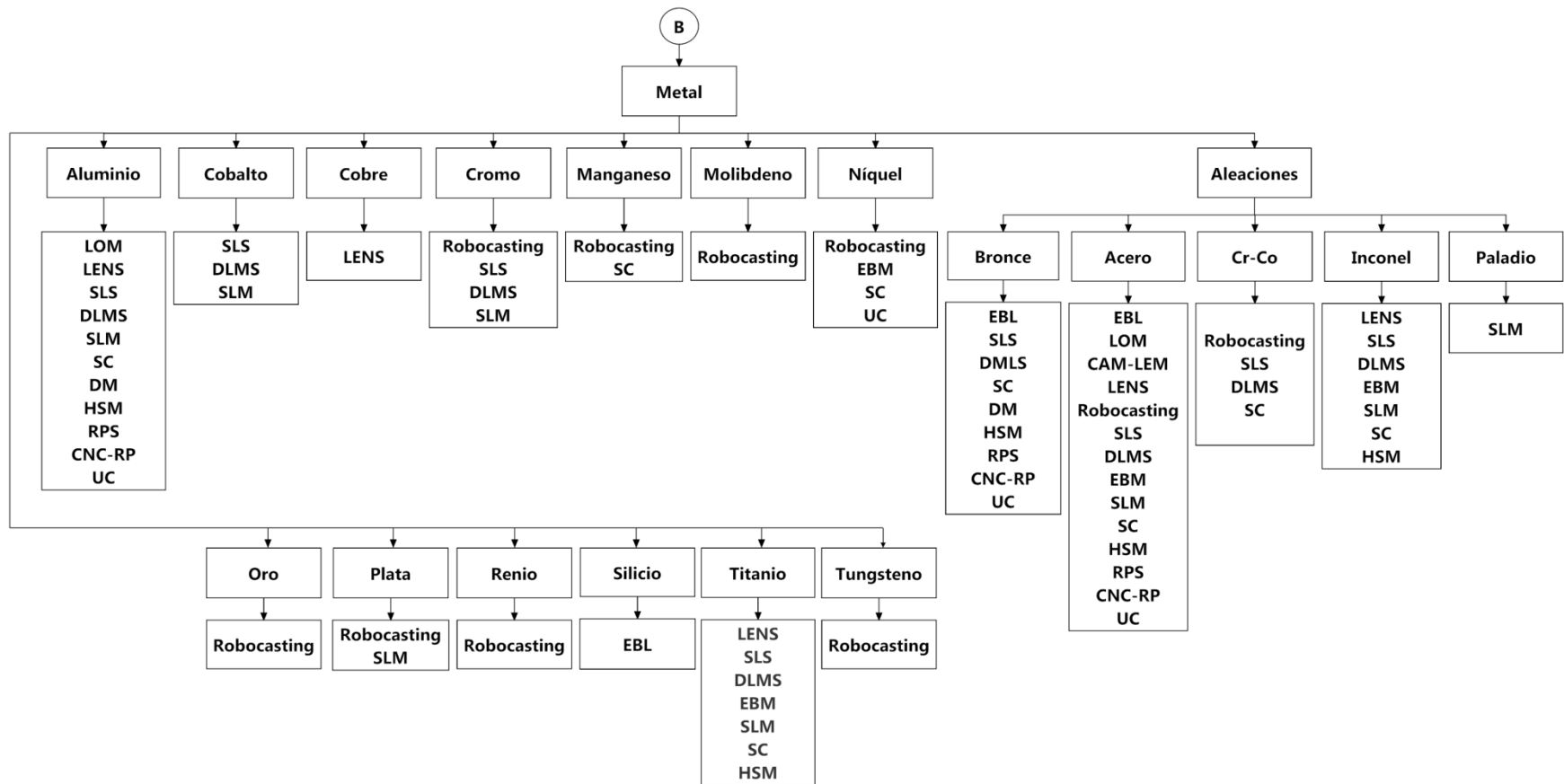


Figura 3.3. Selección de acuerdo el material de construcción de la pieza (continuación).

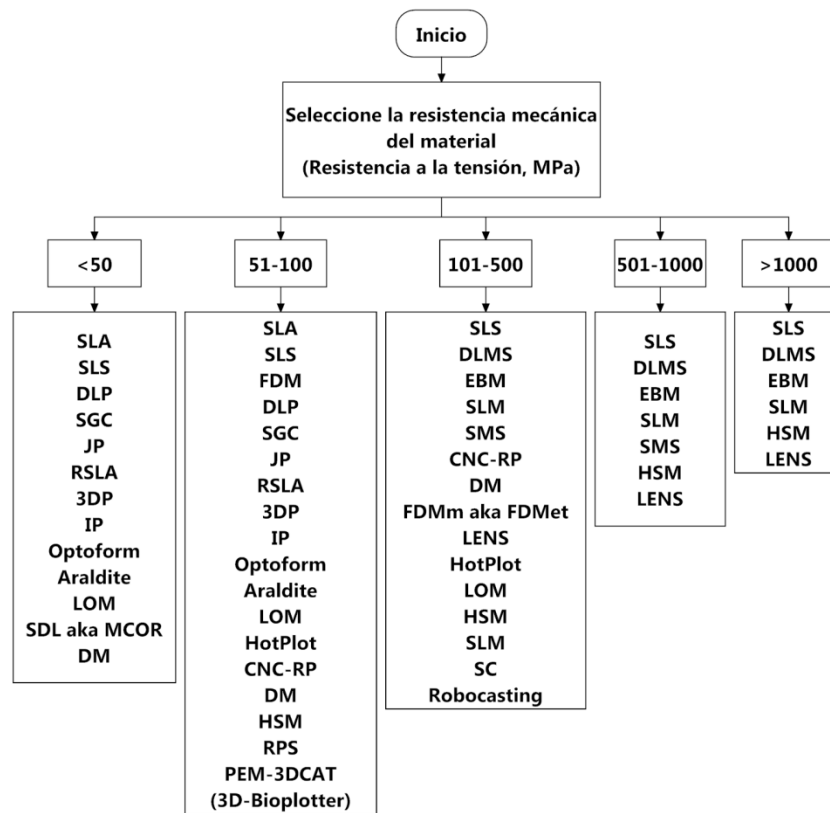


Figura 3.4. Selección de acuerdo con la resistencia mecánica del material, (esfuerzo último a la tensión, MPa).

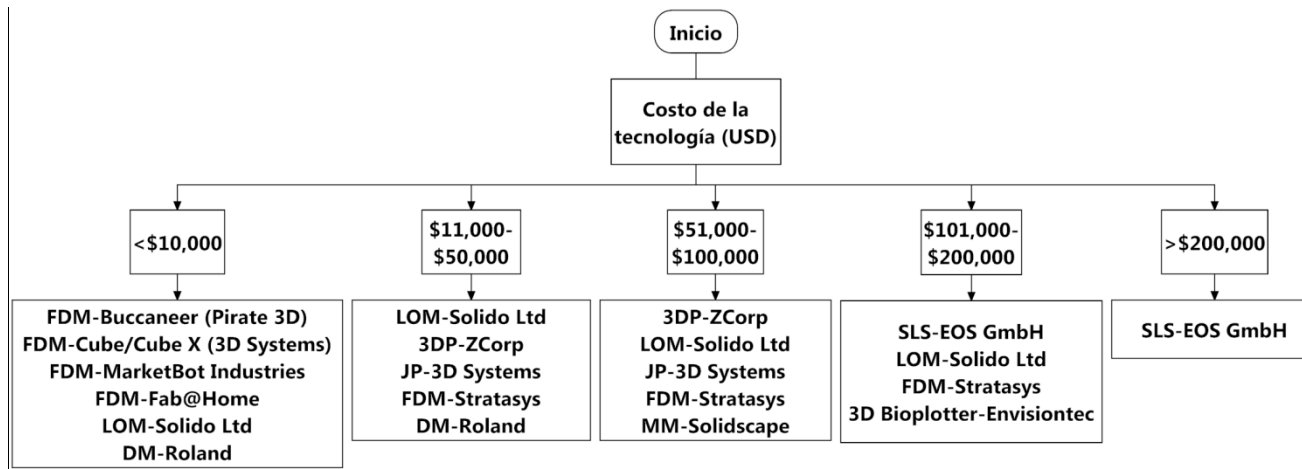


Figura 3.5. Selección de acuerdo al costo de la tecnología (en dólares americanos, USD).

3.3 Discusión

Las metodología de clasificación propuesta busca establecer un sistema que permita a investigadores, científicos y usuarios identificar los tipos de tecnologías RPM&T que han sido desarrolladas. De acuerdo con las cuatro categorías generales en que se clasifican las tecnologías RPM&T (procesos aditivos, substractivos, de formado e híbridos) es sencillo identificar el principio de operación que emplea cada una de ellas para la construcción de prototipos. De igual manera es posible identificar el principio físico empleado para conformar el material con el cual se construye la pieza deseada. La clasificación incluye procesos RP que involucran la construcción de andamios para la ingeniería tisular, así como tecnologías que permiten arreglos celulares. Debido a lo anterior la clasificación propuesta auxiliará a científicos del area médica y áreas afines a ubicar las tecnologías que se han desarrollado al respecto. La clasificación que se presenta incluye técnicas que emplean como principio de funcionamiento el ensamble de secciones que forman una forma cercana a la deseada o la pieza con la geometría final. De igual manera involucra los procesos de formado y los procesos híbridos que no son incluidos en clasificaciones previas a [221]. Sin embargo, en comparación con [221] la clasificación propuesta incluye un mayor número de tecnologías que han sido desarrollados y permite la inclusión de nuevos procesos RP que sean desarrollados en un futuro.

Las metodologías de selección propuestas tienen la finalidad de permitir al usuario encontrar la tecnología que satisfaga los requerimientos de manufactura deseados, en lo que concierne a: materiales, escala de la pieza, aplicación, resistencia mecánica del material empleado y costo del equipo. La Tabla 3.1 muestra las diferencias existentes entre los métodos de selección propuestos en [6], [63], [64] y [221], así como sus ventajas y desventajas en comparación con las metodologías propuestas en el presente trabajo.

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de las metodologías de selección propuestas en comparación con las metodologías publicadas en la literatura.

Metodología de selección propuesta	Comparada contra	Ventajas	Desventajas
Tipo de tecnología, escala y material	[6]	<ul style="list-style-type: none"> Se toman en cuenta la escala de la pieza. Se toma en cuenta el material deseado para la pieza. Se toma en cuenta un mayor número de tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas.
	[63], [64]	<ul style="list-style-type: none"> No se basa en ponderaciones numéricas. No se requiere que el usuario aprenda a emplear la metodología. 	N.A
	[221]*	<ul style="list-style-type: none"> Se toman en cuenta la escala de la pieza. Se toma en cuenta el material deseado para la pieza. Se toma en cuenta un mayor número de tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas.
	[221]**	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un mayor rango de materiales y tecnologías. 	N.A
	[221]***	N.A	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta proveedores y costos de equipo RP.
Materiales empleados	[6]	<ul style="list-style-type: none"> Se toma en cuenta un mayor rango de tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[56], [57]	<ul style="list-style-type: none"> No se basa en ponderaciones numéricas. No se requiere que el usuario aprenda a emplear la metodología. 	N.A
	[221]*	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un mayor rango de materiales y tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[221]**	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un mayor rango de materiales y tecnologías. 	N.A
	[221]***	N.A	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta proveedores y costos de equipo RP.

*Selección de acuerdo al uso final de la pieza, **Selección de acuerdo al material de la pieza, ***Selección de acuerdo al costo de la tecnología, N.A: No aplica o la comparativa no tiene ventajas o desventajas

Tabla3.1. Ventajas y desventajas de las metodologías de selección propuestas en comparación con las metodologías publicadas en la literatura (continuación).

Metodología de selección propuesta	Comparada contra	Ventajas	Desventajas
Resistencia mecánica	[6]	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un rango de resistencia mecánica a seleccionar por parte del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[63], [64]	<ul style="list-style-type: none"> No se basa en ponderaciones numéricas. No se requiere que el usuario aprenda a emplear la metodología. 	N.A
	[221]*	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un rango de resistencia mecánica a seleccionar por parte del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[221]**	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un rango de resistencia mecánica a seleccionar por parte del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta el tipo de material de la pieza, solo su resistencia mecánica.
	[221]***	<ul style="list-style-type: none"> Se incluye un rango de resistencia mecánica a seleccionar por parte del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta proveedores y costos de equipo RP.
Costo de la tecnología	[6]	<ul style="list-style-type: none"> Se incluyen proveedores y costos de equipo RP. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[56], [57]	<ul style="list-style-type: none"> Se incluyen proveedores y costos de equipo RP. 	N.A
	[221]*	<ul style="list-style-type: none"> Se incluyen proveedores y costos de equipo RP. 	<ul style="list-style-type: none"> No se toma en cuenta la concepción de piezas solidas o huecas. No se toma en cuenta el uso final de la pieza.
	[221]**	<ul style="list-style-type: none"> Se incluyen proveedores y costos de equipo RP. 	<ul style="list-style-type: none"> No toma en cuenta el material de construcción empleado para generar la pieza.
	[221]***	<ul style="list-style-type: none"> Se toman en cuenta un mayor número de proveedores de equipo RP. 	N.A

*Selección de acuerdo al uso final de la pieza, **Selección de acuerdo al material de la pieza, ***Selección de acuerdo al costo de la tecnología, N.A: No aplica o la comparativa no tiene ventajas o desventajas

Capítulo 4

Diseño para prototipado, manufactura y herramental rápido

En este capítulo se presenta la propuesta de las consideraciones de diseño que deben tomarse en cuenta al efectuar un proyecto que será manufacturado por tecnologías de prototipado rápido. Debido al gran número de técnicas existentes, es difícil desarrollar filosofías de diseño para cada tecnología en específico. Por tal motivo las consideraciones de diseño propuestas se fundamentan en las capacidades, fortalezas y debilidades que en general tienen las tecnologías RP comerciales.

4.1 Parámetros de diseño

Los sistemas comerciales de prototipado rápido, al igual que las técnicas convencionales de fabricación, poseen ciertas limitantes debido al proceso de conformado del material, el equipo empleado, su principio de funcionamiento y materiales utilizados. Conocer las ventajas y desventajas de los sistemas RP comercialmente disponibles brinda al diseñador la capacidad de realizar un diseño acorde a sus necesidades y capacidades del equipo y tecnología RP seleccionada [222]. Así mismo brindan un punto de partida para proponer los parámetros de diseño para los sistemas de prototipado, herramental y manufactura rápida.

Mediante el análisis de las características y principios de funcionamiento de los sistemas RPM&T disponibles en el mercado, se logró identificar de manera general las fortalezas y debilidades de estos sistemas. Los resultados se muestran en Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Ventajas y desventajas generales de los sistemas RP.

Tipo de tecnología y proceso	Ventajas	Desventajas
Procesos de curado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena precisión. ▪ Buen acabado superficial. ▪ Amplia gama de materiales (Polímeros). ▪ Opera con bajo nivel de ruido y cero emisiones de polvo. ▪ No existe la generación olores. ▪ Existen procesos de curado que son capaces de producir piezas en la escala de los micrones. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requieren estructuras de soporte en salientes y voladizos. ▪ Se deben extirpar los soportes, protuberancias no deseadas. ▪ Requiere postcurado para solidificar completamente el objeto y garantizar su integridad estructural. ▪ Volúmenes limitados de construcción. ▪ Los dispositivos RP de curado generalmente son sistemas de alta complejidad que requieren mantenimiento sustancial. ▪ Efecto de escalonamiento.
Procesos de apilado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los materiales son baratos. ▪ Las técnicas son moderadamente rápidas si las capas son bastante gruesas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si se emplea papel la pieza generada no es muy estable en el tiempo, absorbe la humedad, y los objetos pueden llegar a ser inexactos o deformarse. ▪ Si se emplea papel, las aplicaciones se limitan a prototipos de visualización. ▪ Efecto de escalonamiento. ▪ La precisión y el detalle no están a la par con otros métodos.
Tecnologías aditivas Procesos de dispensado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La máquina puede ser instalada en un entorno de oficina. ▪ Bajos costos de producción y mantenimiento. ▪ La toxicidad del proceso es baja ▪ Bajo consumo de energía. ▪ Bajo costo del sistema y materiales. ▪ Existen sistemas de doble material. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requieren estructuras de soporte en salientes y voladizos. ▪ El proceso es lento en las piezas con gran masa. ▪ El acabado superficial es pobre. ▪ Se puede emplear un rango limitado de materiales. ▪ Cualquier pieza fabricada requerirá por lo menos algún proceso de mecanizado final para obtener el acabado requerido. ▪ Las estructuras de soporte deben eliminarse al finalizar el modelo. ▪ La resistencia mecánica de las piezas es pobre. ▪ Efecto de escalonamiento.
Procesos de sinterizado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dependiendo del material es posible obtener partes totalmente densas. ▪ Alta resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La tecnología es costosa. ▪ Efecto de escalonamiento.
Procesos de aglutinado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proceso de rápida construcción. ▪ Bajo costo de materiales. ▪ Permite generar piezas de color completo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Densidad restringida de las partes. ▪ Las piezas generadas pueden tener una baja resistencia mecánica. ▪ Efecto de escalonamiento.

Tabla 4.1. Ventajas y desventajas generales de los sistemas RP (continuación).

Tipo de tecnología y proceso		Ventajas	Desventajas
Tecnologías aditivas	Procesos de ensamble	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran precisión. ▪ Buen acabado superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso está limitado a ciertas geometrías. ▪ Se debe planear correctamente la secuencia de ensamble. ▪ Se deben seleccionar adecuadamente los elementos y/o formas de sujeción para el ensamble, según la aplicación.
	Procesos de organismos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es posible producir andamios con arreglos de poros abiertos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incapacidad para colocar con precisión las células o agregados de células en un andamio impreso.
Tecnologías substractivas		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran precisión. ▪ Buen acabado superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso está limitado a ciertas geometrías. ▪ No es posible maquinar esquinas rectas. ▪ Se consume mucho tiempo en la generación de la trayectoria de la herramienta. ▪ No es posible efectuar cortes bajo una superficie.

De acuerdo con las ventajas y desventajas anteriormente presentadas, se proponen consideraciones para el proceso de diseño. A estas consideraciones se les denominará como filosofías de diseño para prototipado, herramental y manufactura rápida (design for rapid prototyping, manufacturing and tooling, DFRPM&T) e incluyen:

- Diseño para prototipado rápido de acuerdo a las características geométricas.
- Diseño para prototipado rápido de acuerdo a los requerimientos de calidad.
- Diseño para prototipado rápido de acuerdo a costos y sustentabilidad.

Estas filosofías de diseño se describen a continuación.

4.2 Diseño para RP de acuerdo a las características geométricas

Los sistemas RP son capaces de generar prácticamente cualquier geometría partiendo de un archivo CAD 3D. Sin embargo, existen ciertas limitantes de acuerdo a las capacidades del equipo y alcances del proceso RP empleado, que se deben considerar para satisfacer los requerimientos mínimos sin afectar la generación de la geometría final deseada. Las siguientes consideraciones geométricas se identifican:

- Estructuras de soporte y voladizos.
- Tamaño de la pieza a generar.
- Cavidades y espesores de pared.
- Redondeos, bordes filosos y definición de detalles.
- Orientación de la pieza.
- Orientación de la capa.

4.2.1 Estructuras de soporte y voladizos

Las estructuras de soporte tienen dos propósitos. En primer lugar, se emplean para unir de una manera rígida el prototipo a la plataforma de construcción, Figura 4.1 (a). En segundo lugar, los soportes resisten voladizos de la pieza con la finalidad de evitar derrumbes de las superficies construidas o por construir, Figura 4.1 (b). Sin estructuras de apoyo, una sola capa de material pudiese deformarse, generando errores geométricos. Para completar el proceso de creación de modelos mediante RP las estructuras de soporte deben retirarse después de la fabricación del modelo. Sin embargo, el proceso de retirar las estructuras de soporte puede afectar la calidad de la pieza y su geometría [223].

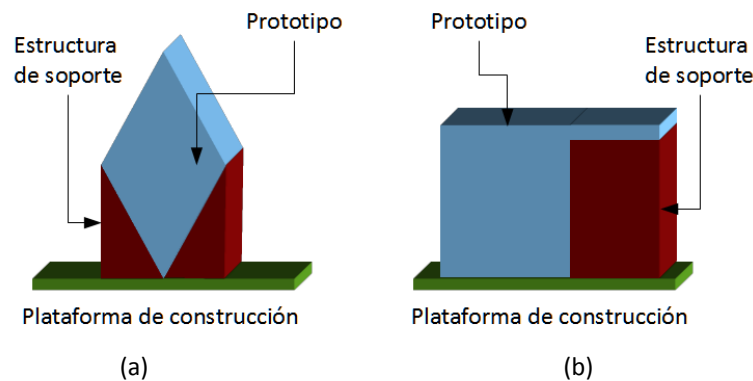


Figura 4.1. Estructuras de soporte: (a) estructura de soporte para unir el prototipo a la plataforma de construcción, (b) estructura de soporte empleada para sostener voladizos.

Los procesos de curado, dispensado y aglutinado requieren estructuras de soporte para construir un prototipo de manera exitosa. Las estructuras de soporte son nervaduras delgadas colocadas generalmente a intervalos propuestos. Dentro de la remoción del material de apoyo se pueden generar desviaciones de tolerancias debido a la eliminación parcial y/o total de los soportes, siendo posible fracturar los pequeños detalles de la pieza.

Existen procesos de dispensado y aglutinado (por ejemplo el proceso PolyJet) que emplean un material de soporte tipo gel para crear una interfaz entre la plataforma de construcción y la pieza. El material de soporte se deposita simultáneamente con el material del modelo y se retira mediante un lavado a presión. Sin embargo, las características pequeñas pueden ser difíciles de mantener cuando la pieza se expone a la pulverización de lavado a presión.

Los procesos de sinterizado en general no requiere ninguna forma de estructura de soporte como tal, ya que el polvo que rodea el material sinterizado actúa como soporte que encierra el prototipo. Cuando se ha completado la pieza, el polvo no sinterizado es retirado cepillando, vibrando o empleando aire a presión. Al igual que los procesos de sinterizado, los procesos de apilado no requieren estructuras de soporte puesto que las hojas de material que rodean al modelo funcionan como soportes, los cuales deben ser desprendidos cuidadosamente al finalizar el proceso de construcción, [223], Figura 4.2.



Figura 4.2. Remoción de las estructuras de soporte de un proceso de apilado.

Recomendaciones para estructuras de soporte y voladizos

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a las estructuras de soporte:

- En caso de que se requieran estructuras de apoyo, se debe considerar la accesibilidad a estas para su posterior remoción, ya que en cavidades con poco o nulo acceso, los soportes permanecerán en el prototipo.
- En caso de una pieza con cavidades selladas, se deben incorporar conductos que permitan retirar el material de soporte no deseado (polvo o líquido).
- Con la finalidad de evitar que el modelo o prototipo se dañe, las estructuras de apoyo deben removerse en pequeñas secciones.
- Evitar o reducir al mínimo el área total de superficies en voladizos.
- Evitar o reducir al mínimo el número de volúmenes completamente cerrados o atrapados.

4.2.2 Tamaño de la pieza a generar

El volumen de trabajo para la fabricación de prototipos está limitado por la capacidad volumétrica de construcción del equipo RP. Si el prototipo es demasiado grande para construirse en una sola pieza, es común dividir el modelo en secciones de acuerdo al espacio de trabajo disponible. Una vez que todas las secciones se construyen, éstas se ensamblan para formar el prototipo. Los modelos

fabricados mediante técnicas de sinterizado, aglutinado y apilado tienden a ser más adecuados para la unión, esto debido a que la porosidad de la pieza favorece la penetración del adhesivo en la superficie de la pieza, formando una unión más fuerte que la que se encuentra cuando se unen las secciones de modelos generados por procesos de curado, [223].

En la Tabla 4.2 se presenta los espacios de construcción de algunos modelos de dispositivos disponibles comercialmente al 2013. A pesar de la amplia disponibilidad del espacio de construcción que actualmente tienen los sistemas RP se sugieren tamaños de construcción promedio en los que existe una mayor disponibilidad de sistemas RP [18]- [21], [224].

Tabla 4.2. Espacio de construcción de algunos sistemas RP disponibles comercialmente.

Fabricante	Modelo	Espacio de construcción (X x Y x Z, mm)	Ref.
3D Systems [®]	Projet SD 6000	250 x 250 x 250	[19]
	Projet SD 7000	380 x 380 x 250	
	Projet 3510	298 x 185 x 203	
	Projet 1000	171 x 203 x 178	
	Projet 1000	171 x 228 x 203	
	Projet 160	236 x 185 x 127	
	Projet 360	203 x 254 x 203	
	Projet 660 Pro	254 x 381 x 203	
	Projet 860 Pro	508 x 381 x 229	
Stratasys [®]	Mojo	127 x 127 x 127	[20]
	uPrint	203 x 152 x 152	
	Objet 24	234 x 192 x 148	
	Objet EdenV 3D	255 x 252 x 200	
	Objet Eden 350/350V	340x340x200	
	Objet Eden 500V	490 x 390 x 200	
	Objet 260 Connex 3D	255 x 252 x 200	
	Objet 350 Connex 3D	342 x 342 x 200	
	Objet 500 Connex	490 x 390 x 200	
	Objet 1000	1000 x 800 x 500	
	Fortus 250 mc	254 x 254 x 305	
Fortus 360 mc	406 x 355 x 406		
Fortus 900 mc	914 x 610 x 914		
EOS [®]	Formiga P110	200 x 250 x 330	[21]
	Eosint 395	340 x 340 x 620	
	Eosint P760	700 x 380 x 580	
	Eosint P800	700 x 380 x 580	
	Eosint M280	250 x 250 x 325	
	Eosint S750	720 x 380 x 380	

Tabla 4.2. Espacio de construcción de algunos sistemas RP disponibles comercialmente, (continuación).

Fabricante	Modelo	Espacio de construcción (X x Y x Z, mm)	Ref.
ZCorp [®]	ZPrinter 150/250	740 x 790 x 1400	[18]
	ZPrinter 350/450	1220 x 790 x 1400	
	ZPrinter 650	1880 x 740 x 140	
	ZPrinter 850	1190 x 1160 x 1620	
EnvisionTec [®]	3D Bioplotter	150 x 150 x 150	[224]
	Perfactory [®] Desktop-Micro	230 x 180 x 580	
	Perfactory [®] Desktop-Micro DDP	40 x 30 x 100	
	Perfactory [®] Desktop-Micro EDU	86 x 64.5 x 100	
	Perfactory [®] Desktop AUREUS	60 x 45 x 100	
	Perfactory [®] Desktop-Mini DDSP	60 x 45 x 100	
	Perfactory [®] Desktop DDSP	100 x 75 x 100	
	Perfactory [®] 3 DDP3	90 x 68 x 230	
	Perfactory [®] DDP4	115 x 72 x 230	
	Perfactory [®] 4 Mini-ERM	84 x 52.5 x 230	
Perfactory [®] 4 Mini XL-ERM	115 x 72 x 160		

Recomendaciones para el tamaño de la pieza a generar

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación al tamaño de la pieza:

- Emplear modelos con dimensiones máximas de construcción entre 150 mm y 380 mm en dirección X, 150 mm y 390 mm en dirección Y, y 150 mm a 380 mm en dirección Z. Estos valores son nominales en los sistemas RP comerciales, sin embargo pueden variar en sistemas especiales.

4.2.3 Cavidades y espesores de pared

En los estudios realizados en [225] para procesos de dispensado se reporta que la estabilidad de los espesores de pared depende del espesor de capa empleado. En el caso de no emplear el espesor de pared adecuado se pueden producir estructuras quebradizas y deformaciones de la geometría. En los procesos de dispensado los orificios y arreglos de orificios se pueden deformar ocasionando desviaciones y tolerancias erróneas a las requeridas. En la Tabla 4.3 se muestran los espesores de pared recomendados para los procesos de dispensado.

Tabla 4.3. Recomendación general de espesores de pared según el espesor de la capa.

Espesor de capa mm (pulg.)	Espesor mínimo de pared mm (pulg.)
0.18 (0.007)	0.71 (0.028)
0.25 (0.01)	1.02 (0.04)
0.33 (0.013)	1.32 (0.052)

En los procesos de sinterizado, es posible fabricar espesores mínimos de pared que oscilen entre 0.3 y 0.4 mm [21]. Sin embargo, con la finalidad de evitar fracturas durante la manipulación de la pieza se aconseja la construcción de espesores de entre 1 y 1.5 mm, [225]

Recomendaciones para cavidades y espesores de pared

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a las cavidades y espesores de pared:

- Los espesores de pared deben ser mínimo cuatro veces más anchos que el espesor de capa empleada en el procesos de dispensado, Figura 4.3 [225].
- El espesor mínimo de pared recomendado es 1 mm (0.4 pulg) en procesos de sinterizado [225].
- En orificios con tolerancias estrechas se deberá efectuar un postprocesado de estos con la finalidad de obtener la tolerancia deseada.
- Orientar los orificios de tal manera que su eje sea perpendicular al lecho de construcción, [226].

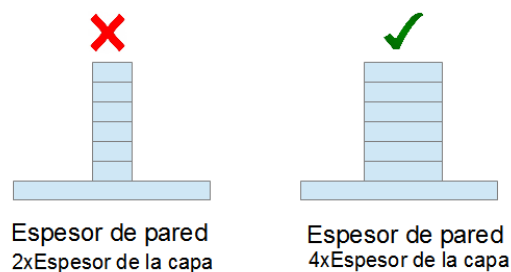


Figura 4.3. Espesor de pared recomendado para los procesos de dispensado.

4.2.4 Redondeos, bordes filosos y definición de detalles

Dentro de las características geométricas que se pueden generar empleando RP, existe el redondeo de aristas y bordes filosos. En los procesos de sinterizado se forma de manera natural un redondeo de 0.4 mm (0.015 pulg.) de radio en vértices de 90° [225].

La definición de detalles geométricos capaces de generarse con los sistemas RP depende en gran medida de la precisión del equipo. En los procesos que emplean un láser, la precisión depende del tamaño del punto láser, tamaño de grano de material y de la precisión del equipo. En los procesos de sinterizado láser es posible producir detalles de 0.254 mm (0.010 pulg.), mientras que en los procesos de curado se pueden obtener características de 0.6 mm (0.025 pulg.) de manera nominal [223], aunque existen sistemas capaces de construir características de hasta 0.03 mm (0.0015 pulg.), [20]. En la mayoría de los sistemas de sinterizado, el láser tiene un tamaño de punto de 0.25 mm (0.010 pulg.), y en los sistemas de curado se tiene un tamaño nominal del punto láser de 0.45 mm (0.018 pulg.), [223].

Recomendaciones para redondeos, bordes filosos y definición de detalles

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a los redondeos, bordes filosos y detalles geométricos:

- En caso de requerirse, redondear los vértices rectos con la finalidad de reducir la concentración de esfuerzos en dichas zonas.
- Los bordes filosos no deben ser menores de 0.8 mm en los procesos de sinterizado, Figura 4.4 [225].

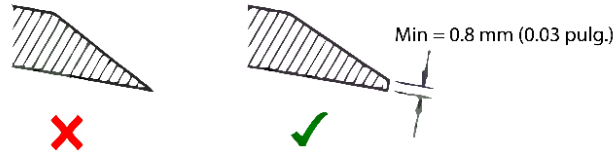


Figura 4.4. Bordes filosos.

- La generación de detalles en los procesos RP es posible, siempre y cuando se encuentren dentro de las capacidades de fabricación del equipo y de acuerdo al tipo de proceso.
- No se deben colocar detalles pequeños que involucren el uso de estructuras de apoyo ya que pudiesen dañarse durante la remoción de dichas estructuras.

4.2.5 Orientación de la pieza

El determinar la orientación óptima de la pieza para su fabricación es un factor esencial en los procesos RP. Debido a que si esta no es óptima se producen errores de acabado superficial, donde es evidente el fenómeno de escalonamiento afectando la rugosidad de la superficie generada. Así mismo se pudiese requerir un mayor volumen de soportes, impactando en el costo de la materia prima [224], [227][228]

Se han estudiado y generado técnicas para encontrar la orientación óptima para la construcción de los modelos. En [229] se reporta un algoritmo que permite orientar la pieza buscando minimizar el efecto de escalonamiento. Un algoritmo de orientación de la pieza, basado en minimizar la altura de construcción del modelo se reporta en [230]. Otro algoritmo similar para los procesos de estereolitografía se reporta en [231], donde se describe un método de obtención de la orientación óptima reduciendo al mínimo el área de contacto con las estructuras de apoyo. En [232] se desarrolló un algoritmo para calcular el número de capas en diferentes orientaciones y así elegir la más conveniente según el tiempo de construcción. También se han propuesto metodologías empleando algoritmos genéticos como en [233] donde se busca obtener la orientación óptima de las piezas teniendo en cuenta sus dimensiones, ésto con el fin de optimizar al máximo el espacio de construcción disponible y reducir al mínimo el tiempo necesario para construir las partes.

De acuerdo con los estudios anteriormente mencionados, los diferentes factores que se consideran al seleccionar la orientación de construcción son [40],[234]:

La altura de la parte y la dirección de fabricación. Para muchos procesos la altura está directamente relacionada con el tiempo total de construcción, y por lo tanto el costo final de la pieza. Suponiendo que el tiempo requerido para la fabricación de una capa es esencialmente el mismo independientemente de la complejidad de la trayectoria a generar, el tiempo para la fabricación depende directamente del número de capas.

La calidad superficial requerida. La orientación de la pieza determina qué caras de la pieza se encuentran sometidas a que ocurra efecto de escalera. En algunos procesos, el poner en contacto total la pieza con la plataforma de construcción reduce en gran medida la calidad de la superficie de las caras que actúan como base de la pieza, aumentando la rugosidad de la superficie. Una mala calidad en las superficies que son de importancia, aumenta el tiempo de acabado y por lo tanto el costo de la pieza.

Superficie de apoyo. El tamaño de la superficie sobre la cual la pieza se apoya en la plataforma de construcción afecta la estabilidad de la parte durante su construcción; esto debido a que si el área de apoyo es pequeña la boquilla inyectora de material pudiese mover la pieza, en el caso de los procesos de dispensado.

Las propiedades mecánicas. Como consecuencia de la fabricación en capas, las piezas producidas son ortotrópicas, es decir, el material de la pieza tiene distintas propiedades a lo largo de la dirección de construcción y en dirección perpendicular.

Número de superficies inclinadas. Las superficies inclinadas (pendientes) pronunciadas generan el efecto de escalonamiento y dependiendo de su orientación pudiesen requerir estructuras de apoyo, lo que afecta el acabado superficial de las piezas generadas y aumenta el costo de material y postprocesamiento.

Recomendaciones para la orientación de la pieza

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la orientación de la pieza:

- Buscar que la altura del modelo sea la mínima sobre la plataforma de construcción, en contraste con sus otras dimensiones.
- Minimizar el volumen de estructuras de apoyo.
- Apoyar la superficie de mayor área del modelo a construir sobre la plataforma de construcción (recomendable sobretodo en procesos de dispensado), considere que la calidad superficial que lograrse resultara en esta zona pudiese no ser muy fina.
- Si se busca reducir el tiempo de fabricación, emplear un sistema adaptativo del espesor de las capas, generándose capas de espesor reducido donde se busque un mejor acabado superficial, capas de mayor espesor donde no sea indispensable, independientemente de que la altura de construcción no resulte ser mínima.
- Maximizar el número de superficies horizontales.
- Maximizar el número de secciones transversales curvas sobre el plano horizontal.
- Minimizar el uso de superficies inclinadas (pendientes), en caso de emplearse orientarlas para que la mayoría se encuentren paralelas al lecho de construcción.
- En volúmenes de revolución, orientar la pieza de tal manera que su eje sea perpendicular al lecho de construcción, [226].

4.2.6 Orientación de la capa y planeación de la trayectoria

La planificación de la trayectoria es una tarea de dominio puro de la capa. La planificación de la ruta se puede considerar que consta de dos componentes: trayectorias interiores y trayectorias. La determinación de la trayectoria de acceso geométrico y los parámetros del proceso asociados con la ruta de acceso se resuelven en la planificación de la trayectoria interior. La trayectoria interior comprende la secuencia en la que el material se deposita con el fin de formar el interior de la capa. Por lo tanto, la planificación de ruta interior es necesaria para casi todos los procesos RP aditivos. La planificación de la trayectoria interior considera varios componentes, como son: la elección del diseño de la trayectoria, la determinación de las coordenadas de ruta, la determinación de separación camino para llenar de manera óptima en el dominio completo, herramienta [40] , [235], [236], [237], [238]. La planificación de la trayectoria también toma en cuenta la dirección en la cual la capa es generada, esto afecta directamente a las propiedades mecánicas de las piezas generadas traduciéndose en ortotropía [40]. Se han propuesto trayectorias espirales y curvas de llenado en espacios huecos, con la finalidad de reducir los efectos de ortotropía producidos y mejorar las propiedades mecánicas de las piezas generadas, [239]; Figura 4.5.

La planificación de la trayectoria exterior controla la exactitud de la geometría externa de la capa manufacturada. La planificación de la trayectoria exterior implica en los procesos híbridos o substractivos el uso de otra herramienta con el fin de dar forma a la parte exterior de una capa a una forma 3D en lugar de la forma estándar de 2.5D. Este agente externo es generalmente una herramienta de eliminación de material. Fresas, rayos láser, cortadores de chorro de agua, etc.; han sido utilizados para realizar esta función.



Figura 4.5. Trayectorias de relleno de espacios huecos.

La necesidad de planificación de la trayectoria en ciertos procesos, como LOM y SGC, se evita por el hecho de que toda la capa es fabricada a la vez. En LOM, las hojas de material se cortan en la forma de la rebanada y son pegadas entre sí, mientras que en SGC toda la capa se expone a la luz UV y al mismo tiempo consigue solidificar, [240], [241], [242].

Recomendaciones para la orientación de la capa y planeación de la trayectoria

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la orientación de la capa y planeación de la trayectoria:

- En el caso que se requieran estructuras sólidas en piezas que tendrán fines de visualización, es recomendable que sean rellenas empleando un patrón abierto con la finalidad de reducir el material empleado y de esta manera reducir su costo.
- En el caso que se requieran estructuras solidas en piezas que serán sometidas a cargas mecánicas, se recomienda emplear un patrón cerrado alternando 90° la generación de cada capa, esto con la finalidad de reducir el efecto de ortotropía generado.
- Si no es posible generar un patrón alternado cada 90° entre capas, generar cada capa de la parte en dirección paralela a la cual la pieza soportará la mayor carga.

4.3 Diseño para RP de acuerdo a los requerimientos de calidad

El uso de láser y fuentes luminosas en los sistemas RP ocasionan a los modelos fabricados riesgos de distorsión, contracciones o pandeo que se pueden traducir en errores de precisión en la geometría de la pieza y que deben tenerse en cuenta en el proceso de diseño. De igual manera, estos errores ocurren en los procesos de dispensado y aglutinado a pesar de no emplear fuentes láser para consolidar el material de construcción. Para lo cual las recomendaciones de diseño referentes a contracción, distorsión, pandeo, al igual que características como acabado superficial, estabilidad de la parte, definición de detalles y de postprocesado se precisan como diseño para RP de acuerdo a los requerimientos de calidad y se detallan a continuación.

4.3.1 Distorsión, contracción y pandeo

La calidad, exactitud y precisión dimensional de las piezas generadas por RP son afectadas por la contracción, distorsión y pandeo, siendo una de las principales limitantes encontradas en las tecnologías de prototipado rápido [243], [244]. Lo anterior se debe a las tensiones internas acumuladas durante el método de fabricación por capas, [245].

En los procesos de curado la polimerización puede dar lugar a la contracción del volumen e inducir la contracción y la distorsión de la parte. Las resinas fotopoliméricas empleadas en los procesos de curado pueden contraerse hasta un 8 % en volumen durante la polimerización [246], sin embargo hoy en día existen resinas fotocurables de baja contracción (hasta un 1 %) [223]. La contracción que experimenta el material fotopolimérico depende en gran medida de la potencia del láser y el espesor de la capa, como se muestra en la Figura 4.6, donde se observa que la contracción en los procesos de curado disminuye con el aumento de la potencia del láser y con la disminución del espesor de la capa, [243][246].

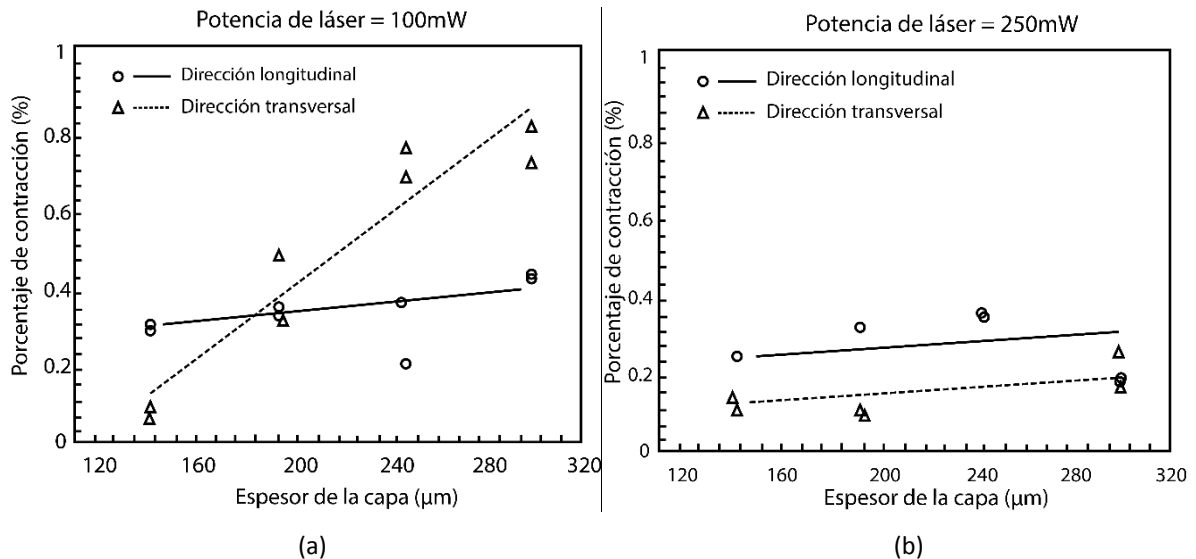


Figura 4.6. Porcentaje de contracción vs espesor de la capa: (a) láser con una potencia de 100 mW, (b) láser con una potencia de 150 mW, (c) láser con una potencia de 200 mW, (d) láser con una potencia de 250 mW [243].

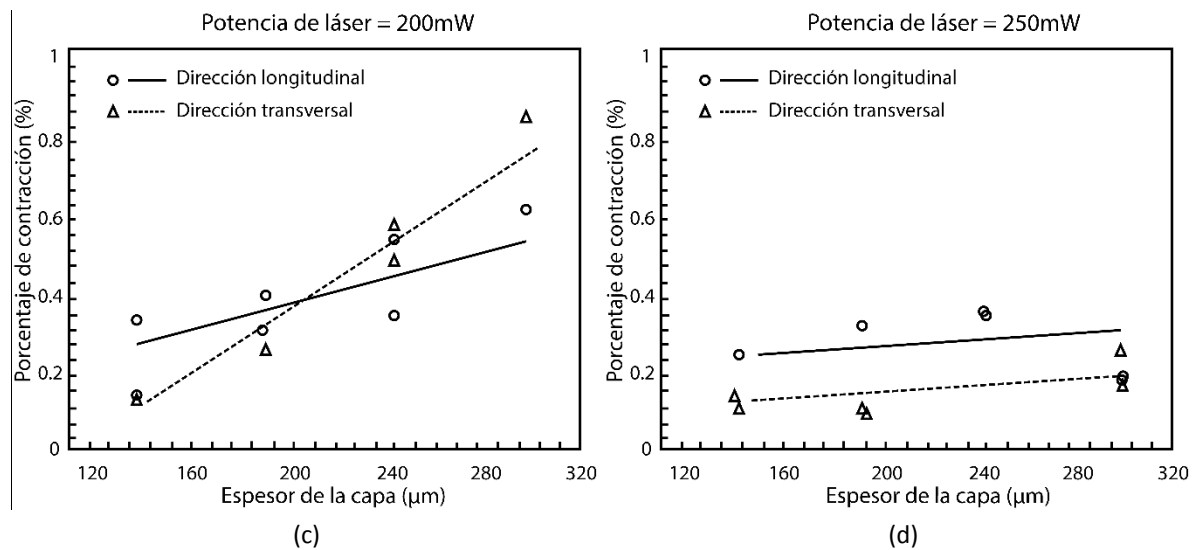


Figura 4.6. Porcentaje de contracción vs espesor de la capa: (a) láser con una potencia de 100 mW, (b) láser con una potencia de 150 mW, (c) láser con una potencia de 200 mW, (d) láser con una potencia de 250 mW, (continuación) [243].

De igual manera, estudios reportados en [245] - [247] concluyen que el fenómeno de contracción en los procesos de curado no solo depende del espesor de capa y la potencia del láser, sino también de la velocidad de escaneo. Lo anterior debido a que la cantidad de contracción disminuye a medida que disminuye la velocidad de escaneo. Normalmente el grado de curado de una línea de escaneado difiere en dirección transversal, debido a la desintegración de la potencia del láser y reflexión del láser al penetrar la resina. Por lo tanto, generalmente la porción superior de la línea de escaneado presenta un alto grado de curado en comparación con la parte inferior, lo que produce que exista una mayor contracción del área adjunta a la capa construida previamente originando tensiones internas que conducen a la distorsión de la pieza, [243].

En lo que refiere a los procesos de sinterizado RP, la contracción, distorsión y pandeo de la parte depende de diversos factores como: la potencia láser, velocidad de escaneo, espaciamiento de escaneo, temperatura de la plataforma y longitud de escaneo. Estudios referentes a la contracción en procesos de sinterizado se reportan en [248], donde se exponen gráficos que muestran el porcentaje de contracción según la variación de los parámetros presentados en la Tabla 4.4. Los gráficos de porcentaje de contracción se presentan en la Figura 4.7.

Tabla 4.4. Niveles de variación de parámetros.

Parámetro	Niveles de cada parámetro			
	1	2	3	4
Potencia del láser (W)	24	28	32	36
Velocidad de escaneo (mm/seg)	3000	3500	4000	4500
Espaciamiento (mm)	0.22	0.24	0.26	0.28
Temperatura de la plataforma (°C)	175	176	177	178
Longitud de escaneo (mm)	30	45	60	75

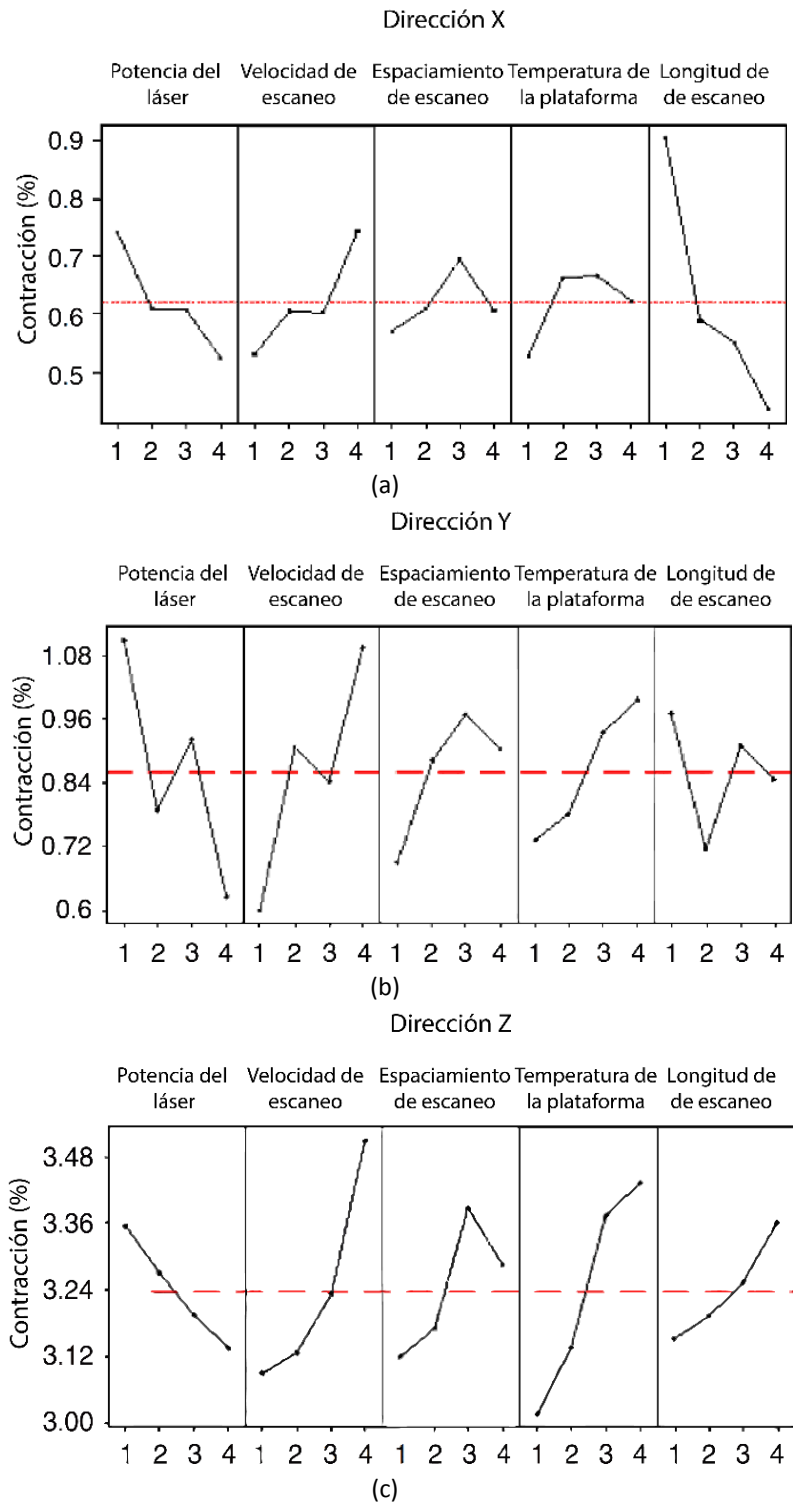


Figura 4.7. Contracción de la parte en los sistemas de sinterizado de acuerdo a distintos parámetros: (a) eje X, (b) eje Y, (c) eje Z.

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa que hay una reducción en el porcentaje de contracción a medida que aumenta la densidad de energía y se disminuye la velocidad de escaneo. El aumento en la densidad de energía provoca el aumento en la penetración de la energía del láser durante el escaneo [249]. Lo anterior origina que la temperatura en el área de escaneo aumente, reduciendo la cantidad de cristalinidad y el porcentaje de contracción [250], [251].

Recomendaciones para contracción, distorsión y pandeo

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la contracción, distorsión y pandeo:

- Seguir los lineamientos y recomendaciones asociadas a las características geométricas previamente presentadas.
- Se recomienda emplear pequeños espesores de capa y una alta potencia de láser o lámpara para disminuir el efecto de contracción, en los procesos que emplean resinas fotocurables.
- Emplear un láser de alta potencia (>36 W, para polímeros), baja velocidad de escaneo (3000 mm/seg, en polímeros) y una baja temperatura en el lecho de construcción (~170 °C, en polímeros).
- Evitar el uso de piezas alargadas, emplear relaciones pequeñas de longitud vs. ancho de la pieza.
- Reducir al mínimo el área total de superficies en voladizos.

4.3.2 Precisión

La precisión de un equipo RP describe la capacidad de este para generar piezas dentro de un rango dimensional específico [252]. La precisión depende de factores como: la configuración del sistema y capacidad del equipo, contracciones y desviaciones del material así como la tolerancia de las mediciones [37], [248] [223], [253]. La mayoría de los sistemas RP disponibles comercialmente disponen de una precisión que oscila entre los 0.020 y 0.100 mm [18] - [21], [224], sin embargo existen sistemas especiales que brindan una mayor precisión [20].

Las tecnologías de curado proporcionan mayor precisión que los procesos de sinterizado, esto debido a que la contracción de las resinas epoxi en los procesos de curado es significativamente menor que la de los materiales plásticos que se pueden emplear en las técnicas de sinterizado. Los materiales epoxídicos de las técnicas de fotocurado experimentan hasta un 1% de contracción durante el proceso de construcción, mientras que los materiales plásticos de los procesos de sinterizado producen contracciones de 3 % a 4 %, mientras que la contracción en los metales depende de su coeficiente de contracción térmica y grado de compactación. Los procesos de sinterizado son menos predecibles y controlables, ya que se basan en el aumento de la temperatura de los polvos a justo por debajo de sus puntos de fusión, por lo que en el caso de no controlar la temperatura de trabajo, se puede ocasionar que polvo no deseado se fusione a la superficie de la pieza [223].

En la Tabla 4.5, se presenta la precisión y capacidad de generación de detalles de los sistemas comerciales típicos disponible hasta el año 2013.

Tabla 4.5. Precisión de equipos comerciales.

Marca	Modelo	Tecnología empleada	Precisión (mm)	Tamaño mínimo de detalles (mm)	Ref.
3D Systems	iPro	SLA	N.D	0.13	[19]
	ProJet	SLA	0.05	0.25 -0.1 (0.64*)	
	sPro	SLS	N.D	0.035	
Araldite Digitalis	Araldite	Araldite	0.05	N.D	[86]
Arcam	ArcamQ	EBM	0.13	N.D	[174]
Envisiontec	Perfactory	DLP	0.050	N.D	[224]
EOS	M270	DLMS	0.025	N.D	[21]
	M280	DLMS	0.025	N.D	
	EOSINT S750	SLS	0.12	N.D	
	FORMIGA p	SLS	0.12	N.D	
JEOL	JBX-6300FS	EBL	0.000005	N.D	[254]
MCOR	Iris	MCOR	0.12	N.D	[99]
Optomec	LENS (450, 850-R)	LENS	0.025	N.D	[109]
Roland	MDX-540/540s	DM	0.05	N.D	[206]
Stratasys	Objet	JP	0.020-0.0085	N.D	[20]
	Objet (24, 30)	JP	0.1	N.D	
	Eden 260	MJM	0.020-0.085	N.D	
	Connex	MJM	0.020-0.085	N.D	
	Fortus	FDM	0.0015 (0.241 **)	N.D	
ZCorp	ZPrint (850, 650)	3DP	N.D	0.1	[18]
	ZPrint (450, 350)	3DP	N.D	0.15	
	ZPrint (250, 150)	3DP	N.D	0.4	

* Espesor mínimo de paredes verticales; **Stratasys Fortus 250mc

Recomendaciones para precisión

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la precisión:

- Seguir los lineamientos y recomendaciones de contracción, distorsión y pandeo del diseño para RP presentadas previamente.
- Se sugiere para los procesos de sinterizado poseer un estricto control en la temperatura de la cámara, potencia de salida de láser, y la retención de calor en el polvo previamente sinterizado.
- En los procesos de sinterizado el polvo de la superficie próxima de la pieza no debe ser empleado nuevamente, debido a que puede generar piezas con dimensiones erróneas y un acabado superficial desfavorable.

4.3.3 Acabado superficial

El valor de la rugosidad (R_a) como una medida del acabado superficial en los sistemas RP, depende de la superficie a ser medida, la orientación de construcción de la pieza, el espesor de la capa y el postprocesamiento.

Los usuarios de sistemas RP reportan que la cara superior de los prototipos tiene un acabado más suave. Esto es debido a que el acabado superficial en el inferior de la pieza se ve afectado por las estructuras de apoyo. En el caso de que la pieza requiera estructuras de soporte, éstas son retiradas en el postprocesado de la pieza, dejando áreas ásperas y agujeros en la superficie inferior del modelo construido [223].

En su mayoría los procesos RP se basan en la adición de material en capas, y la pieza final se conforma mediante curado, apilado, dispensado, sinterizado, aglutinado o ensamble del material de construcción, debido a esto se produce el efecto escalera o de escalonamiento el cual compromete el acabado superficial y rugosidad de la pieza, Figura 4.8 [255].

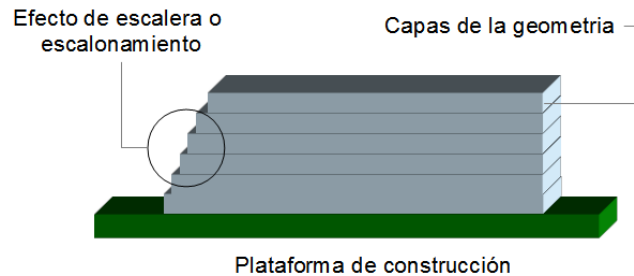


Figura 4.8. Efecto de escalera o escalonamiento de las tecnologías aditivas.

El efecto de escalera varía en función del ángulo de la superficie y el espesor de la capa [227],[228]. De acuerdo a estos parámetros se puede deducir teóricamente la rugosidad media de la superficie, R_a mediante la (4.1 propuesta en [255], donde L es el espesor de la capa, θ el ángulo de la superficie y ϕ el ángulo del perfil de la superficie, Figura 4.9 y Figura 4.10.

$$R_a = \frac{L}{2} \left| \frac{\cos(\theta - \phi)}{\cos \phi} \right| \quad (4.1)$$

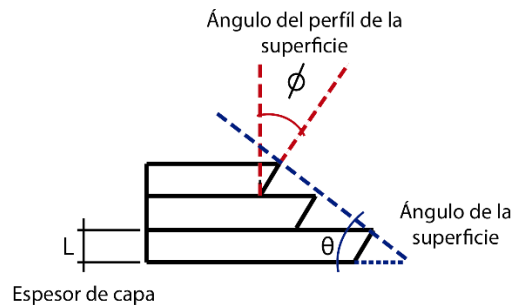


Figura 4.9. Parámetros empleados para calcular la rugosidad media de una superficie empleando RP [255].

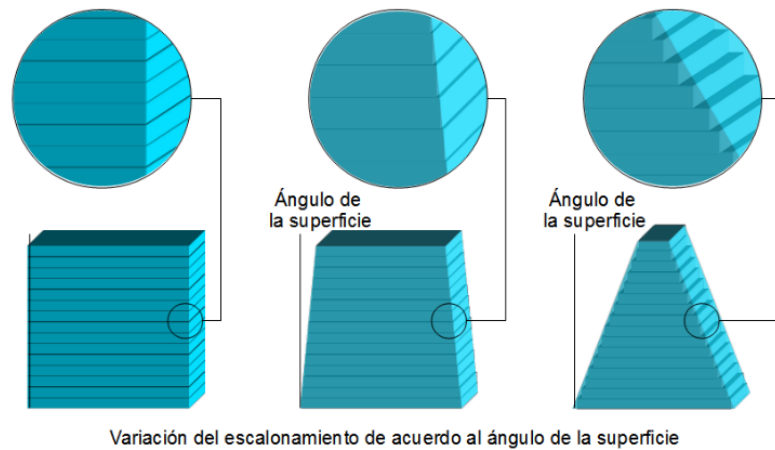


Figura 4.10. Variación del efecto escalera según el ángulo de la superficie.

A través de la Ecuación 4.1, es posible representar gráficamente la relación entre los principales factores del proceso de manufactura aditiva y la rugosidad de la superficie media de los cambios en el ángulo de la superficie, Figura. Cuando el espesor de la capa aplicada es de 0.025-0.1 mm, los ángulos del perfil de la superficie varían de 5-15° y depende de las propiedades del material y las características del sistema RP, de igual forma el ángulo de la superficie varía entre 0° y 180° según la geometría de la pieza. Los valores anteriormente mencionados se emplean generalmente en las tecnologías RP. La Figura (a) muestra la variación de la rugosidad de la superficie de acuerdo a los cambios en el ángulo del perfil de la superficie y la Figura (b) la distribución de rugosidad según la variación del espesor de la capa y el ángulo de la superficie.

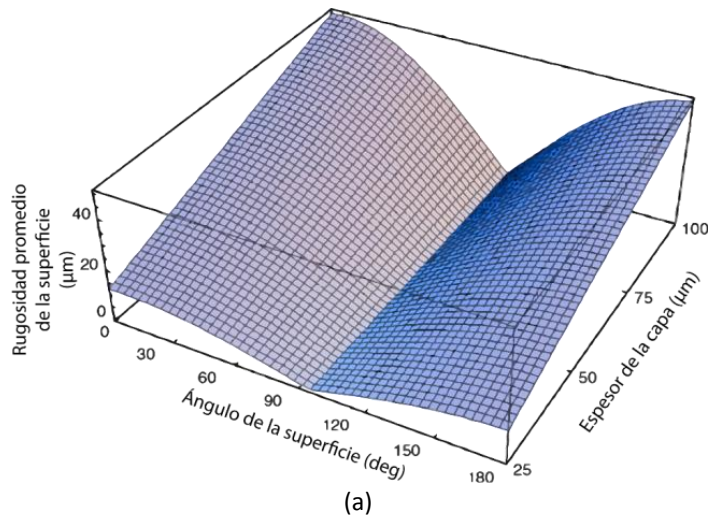
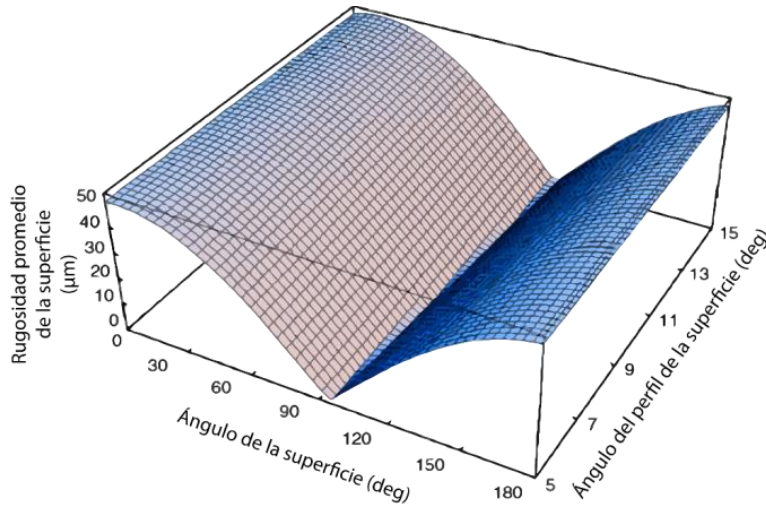


Figura 4.11. Distribución de la rugosidad superficial media (teórica) en los procesos aditivos: (a) distribución de rugosidad según la variación del ángulo de superficie y el ángulo del perfil de la superficie, (b) distribución de rugosidad superficial según la variación del ángulo de la superficie y el espesor de la capa.



(b)

Figura 4.11. Distribución de la rugosidad superficial media (teórica) en los procesos aditivos: (a) distribución de rugosidad según la variación del ángulo de superficie y el ángulo del perfil de la superficie, (b) distribución de rugosidad superficial según la variación del ángulo de la superficie y el espesor de la capa (continuación).

De acuerdo al valor de rugosidad se tienen distintas clases de acabado superficial. La Tabla 4.6 presenta los valores típicos de acabado superficial y su aplicación [222].

Tabla 4.6. Valores típicos de rugosidad superficial [222].

Descripción	Valor N ISO 1302:1992	Ra (μin)	Ra (μm)	Aplicación típica
Muy Rugoso	N11	1000	25	Elementos libres de cargas y esfuerzos.
Rugoso	N10	500	12.5	Elementos no críticos en cuanto a cargas y esfuerzos.
Medio	N9	250	6.3	Superficie común para los componentes.
Promedio	N8	125	3.2	Adecuada para el apareamiento de superficies sin movimiento.
Mejor que el promedio	N7	63	1.6	Uso para superficies deslizables, piezas sometidas a cargas, exceptuando ejes y elementos sometidos a vibraciones.
Fino	N6	32	0.8	Elementos sometidos a altas concentraciones de esfuerzos, ej: engranes, etc.
Muy fino	N5	16	0.4	Elementos sometidos a cargas cíclicas donde se requiere una alta precisión.
Extremadamente fino	N4	8	0.2	Rodamientos de alta calidad, se requieren operaciones de bruñido/pulido.
Superfino	N3	4	0.1	Partes de alta precisión, se requiere operación de lapeado.

En lo concerniente a procesos de sinterizado, las paredes laterales de las piezas pueden presentar estrías entre las capas generadas, obteniéndose superficies rugosas y porosidades. Lo anterior debido a que el sinterizado del polvo ocurre cercano al punto de fusión del material y el material en polvo que no se sinteriza, crea espacios vacíos entre las partículas. Además, el exceso de calor generado durante el proceso de sinterización puede causar una mayor degradación en el acabado superficial, pues ocasiona que material no deseado se pegue a la superficie de la pieza. Dependiendo de la aplicación del prototipo, el acabado de la superficie resultante puede ser aceptable sin ningún trabajo de acabado, [248]

Recomendaciones para acabado superficial

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación al acabado superficial:

- Efectuar un cálculo teórico de la rugosidad antes de comenzar con la fabricación del modelo, y comparar el resultado obtenido con los valores típicos de rugosidad (Tabla 4.6), con la finalidad de conocer si la pieza a fabricar cumple con los requerimientos de rugosidad deseados según la aplicación.
- Emplear espesores de capa pequeños (cercaos a 25 μm), y ángulos de superficie cercanos a 90°, con la finalidad de obtener una baja rugosidad en la superficie y reducir el efecto de escalonamiento.
- Reducir al mínimo las superficies con pendientes.
- En caso de requerirse, efectuar una etapa de postprocesamiento que permita mejorar el acabado superficial en las regiones donde se ubicaron las estructuras de apoyo, empleando técnicas convencionales como, lijado, pulido, rectificando, etc., siempre y cuando no se ponga en riesgo la geometría y dimensiones de la pieza.

4.3.4 Estabilidad

Se debe asegurar la estabilidad de la pieza durante su proceso de construcción y una vez concluida su fabricación; esto con la finalidad de conservar sus características geométricas y dimensionales. Factores como las estructuras de soporte, la orientación de la pieza, condiciones ambientales y material de construcción juegan un papel importante en la estabilidad estructural y geométrica durante y después de la construcción de la pieza.

En los procesos de sinterizado una vez que se retira la pieza totalmente fría se tiene una pieza dimensionalmente estable, a diferencia de los procesos de curado donde las partes son susceptibles a la contracción adicional y fluencia después de su construcción. Por lo tanto, una medida de la pieza tomada una semana después de la producción puede variar con respecto a las tomadas inmediatamente después de que se completó la parte. Agentes como el calor, la humedad y los productos químicos afectan a las piezas de resinas fotocurables. Aunque estos procesos producen una parte más precisa, la exposición a cualquiera de estos elementos puede tener un impacto de desviaciones de tolerancias [223]

Recomendaciones para estabilidad

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la estabilidad de la pieza:

- Con la finalidad de garantizar la estabilidad de la parte durante la construcción, orientar la superficie de mayor área de la pieza sobre la plataforma de construcción.

- Se debe garantizar el curado total de las piezas generadas mediante procesos aditivos de curado.
- En los procesos de apilado y procesos que emplean papel, madera o fécula de maíz (impresoras 3D) como material de construcción, recubrir la pieza posterior a su construcción con un sellador a base de poliuretano con la finalidad de brindar protección contra la humedad al modelo.
- Las estructuras de apoyo deben removerse en pequeñas secciones, con la finalidad de evitar que el modelo se dañe.

4.3.5 Postprocesado

Las operaciones de postprocesado involucran la remoción de estructuras de apoyo, la mejora del acabado superficial, conferir tolerancias al modelo (principalmente en orificios) y garantizar su estabilidad estructural después de su construcción. Las operaciones de postprocesamiento se requieren generalmente en los procesos de curado, sinterizado, apilado y aglutinado,[223].

Recomendaciones para postprocesado

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación al postprocesado:

- Las estructuras de apoyo deben removerse en pequeñas secciones, con la finalidad de evitar que el modelo se dañe.
- En orificios con tolerancias estrechas se deberá efectuar un postprocesado de estos con la finalidad de obtener la tolerancia deseada.
- Se debe garantizar el curado total de las piezas generadas mediante procesos aditivos de curado. En los procesos de apilado y procesos que emplean papel, madera o fécula de maíz (impresoras 3D) como material de construcción, se recomienda recubrir la pieza con un sellador a base de poliuretano con la finalidad de brindar protección contra la humedad al modelo.
- En el caso de requerirse, efectuar una etapa de postprocesamiento que permita mejorar el acabado superficial en las regiones donde se ubicaron las estructuras de apoyo, empleando técnicas convencionales como, lijado, pulido, rectificando, etc., siempre y cuando no se ponga en riesgo la geometría y dimensiones de la pieza.

4.4 Diseño para RP de acuerdo a sustentabilidad

El diseño de acuerdo a sustentabilidad consiste en la creación de productos que maximicen su impacto económico y social, y minimicen los efectos perjudiciales que puedan tener en el medio ambiente. Una filosofía de diseño que puede ayudar a lograr este objetivo es luchar por el diseño de productos que se convierten en objetos de deseo duraderos, contruidos de materiales reciclables, y con un profundo vínculo entre el producto y el usuario. Los productos que cumplen este criterio suelen tener una vida útil mucho mayor, y este aumento de la longevidad, reduce el impacto negativo de los productos sobre el medio ambiente. La fabricación aditiva permite a los diseñadores la libertad casi ilimitada de diseño, y permite la personalización en masa de bienes de consumo, ofreciendo la posibilidad de crear este tipo de objetos duraderos. Además, la fabricación aditiva ya está empezando a ser utilizada en productos médicos de alto valor, tales como audífonos, implantes médicos, y las industrias de la aviación, automotriz y marina. Por lo que satisfacer las filosofías de diseño permite desarrollar a su máximo el potencial de las técnicas RPM&T. De igual forma permite generar un producto que cumple con los requerimientos de un triple resultado: economía, ambiente y sociedad; convirtiéndolo en sustentable, [256].

A continuación se presentan parámetros de diseño que permiten fabricar modelos reduciendo sus costos y aumentando su resistencia al ambiente, lo que permite maximizar el impacto económico, social y reducir los efectos de daño ambiental.

4.4.1 Costo de la parte

El costo de la parte depende directamente del costo del material, el tiempo de construcción y las operaciones de postprocesado requeridas. El costo de material es considerado como la principal preocupación del costo de construcción al seleccionar la orientación de la pieza. El costo del material se puede calcular con base al volumen de material utilizado y el precio por unidad de material. Para los procesos que emplean estructuras de apoyo, el costo correspondiente a material consumido debe incluir dos partes: la cantidad de material utilizado para construir la pieza y la cantidad de material utilizado para construir las estructuras de apoyo.

En los procesos que no requieren estructuras de soporte (por ejemplo SLS y LOM), el costo correspondiente al material consumido depende de la materia prima empleada para el modelo y de si la materia prima circundante a la pieza se puede reutilizar. En el caso que la materia prima circundante a la pieza no sea reutilizable el costo de ésta deberá involucrarse en el costo total de la pieza. En los procesos de apilado el material circundante no puede ser reutilizado, en este caso, el material consumido es proporcional a la altura de la parte., [257].

Recomendaciones para el costo de la parte

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación al costo de la pieza:

- Seguir los lineamientos y recomendaciones correspondientes a: estructuras de soporte y voladizos, orientación de la pieza, orientación de la capa y planeación de la trayectoria, acabado superficial, y postprocesado.
- Maximizar el reciclado de material en los procesos que así lo permitan, (procesos que no requieran estructuras de apoyo).

4.4.2 Resistencia al ambiente

Dentro de la diversidad de aplicaciones que tienen los procesos RPM&T, se debe garantizar la resistencia de las piezas ante diversos factores ambientales como la resistencia a la temperatura, la humedad y la exposición a productos químicos o ambientes corrosivos.

Los materiales poliméricos empleados en procesos de sinterizado tienen propiedades similares a los termoplásticos; estas propiedades incluyen resistencia a la exposición ambiental. Así mismo los metales empleados para la construcción de piezas en los procesos de sinterizado son capaces de ser expuestos a diversos agentes químicos tales como ácidos, bases, alcoholes, hidrocarburos, éteres y cetonas, [223].

Por su parte, los fotopolímeros empleados en las tecnologías de curado así como los materiales empleados en técnicas de aglutinado ofrecen menor resistencia a la exposición ambiental, y no deben ser sometidos a ambientes húmedos y a temperaturas superiores a 50°C (122 °F), o productos químicos. No obstante aunque se han desarrollado nuevos materiales que han reducido drásticamente la sensibilidad a la humedad, se pueden presentar cambios en sus propiedades cuando se exponen a la inmersión en líquidos o se exponen a temperaturas por encima del 50°C ocasionando que las partes se ablanden, permitiendo la deformación y la distorsión, [223]

Recomendaciones para la resistencia al ambiente

Las siguientes recomendaciones de diseño se proponen en relación a la resistencia al ambiente:

- Se debe garantizar el curado total de las piezas generadas mediante procesos aditivos de curado. En los procesos de apilado y procesos que emplean papel, madera o fécula de maíz (impresoras 3D) como material de construcción, se recomienda recubrir la pieza con un sellador a base de poliuretano con la finalidad de brindar protección contra la humedad al modelo.
- No exponer las piezas fabricadas a productos químicos abrasivos.
- Se debe aplicar un recubrimiento (pintura) a toda aquella pieza fabricada de metales sensibles a la corrosión.
- No exponer a una temperatura mayor de 50°C (122 °F) a todas aquellas piezas que fueron elaboradas empleando procesos de curado y aglutinado.

Capítulo 5

Desarrollo e implementación de plataforma “RPMT Reviewer”

En el presente capítulo se presenta el desarrollo e implementación de una aplicación que incluye una base de datos de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido.

5.1 RPMT Reviewer

RPMT Reviewer es una aplicación desarrollada en C# que contiene una base de datos con toda la información de cada una de las tecnologías RPM&T presentadas en el capítulo 2. La aplicación proporciona al usuario la capacidad de conocer los parámetros característicos de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramental rápido partiendo desde su clasificación. RPMT Reviewer está disponible en los idiomas inglés y español. También en RPMT Reviewer se han implementado los algoritmos de selección presentados en el capítulo 3, así como las filosofías de diseño para RPM&T (DFRPM&T) presentadas en el capítulo 4.

En las siguientes secciones se describe la funcionalidad del sistema RPMT Reviewer.

5.2 Inicio y menú principal de acceso

El acceso a la aplicación se efectúa de la misma manera que otros programas, dando doble clic sobre su icono. Al iniciar RPMT Reviewer, emerge la ventana conocida como “Splash screen” que indica la apertura del software, esta ventana emplea una barra que indica el nivel de carga de la base de datos, Figura 5.1.

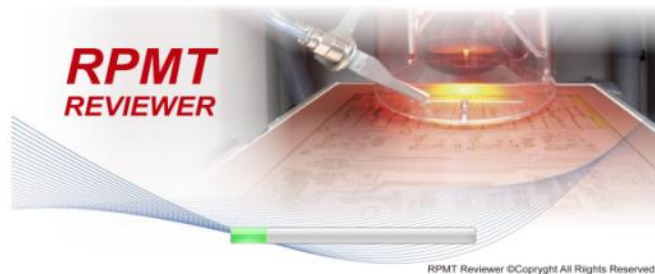


Figura 5.1. Ventana “Splash screen” de RPMT Reviewer.

Inmediatamente después de que el software se ha cargado en la memoria RAM del sistema, aparece la primera ventana de RPMT Reviewer, donde el usuario selecciona el idioma de su elección, inglés o español, Figura 5.2.



Figura 5.2. Selección de idioma.

Una vez seleccionando el idioma, la aplicación se conecta a las variables que contienen la información correspondiente a cada tecnología RP. Esto resulta de gran utilidad debido a que es posible acceder de manera remota a un servidor que contenga las variables de datos de cada tecnología RPM&T. El software despliega un aviso que indica el momento en el cual la conexión ha sido exitosa, Figura 5.3.

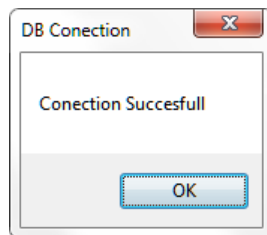







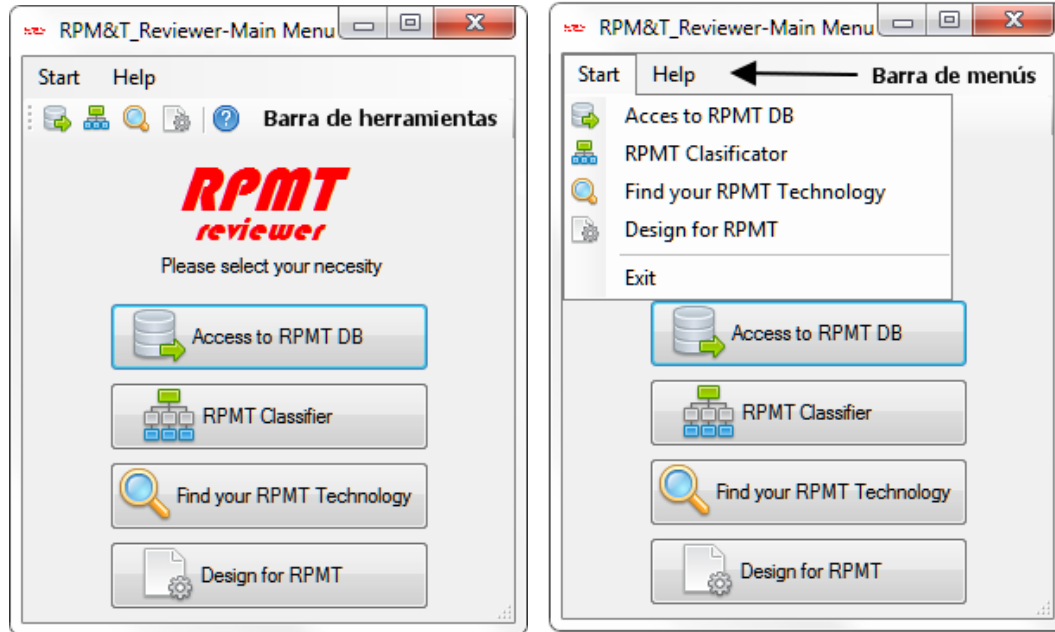
Figura 5.3. Aviso de conexión exitosa.

Posteriormente aparece el menú principal en el idioma seleccionado, Figura 5.4 (a). En este menú aparecen varios iconos los cuales se describen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Descripción de iconos que contiene el menú principal de “RPMT Reviewer”.

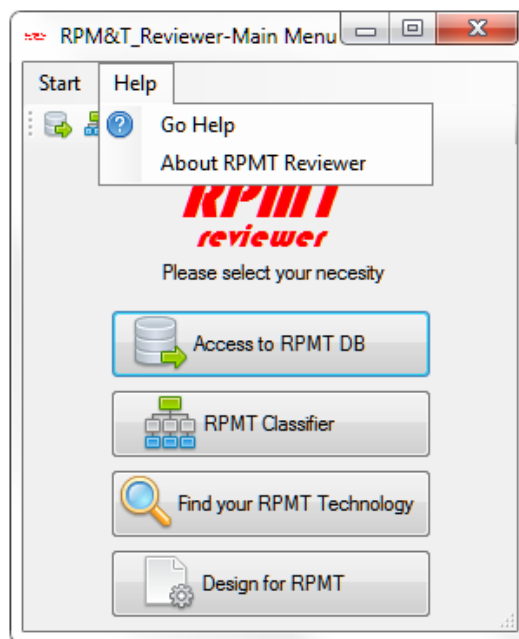
Icono	Descripción
 Access to RPMT DB	Permite el acceso a la base de datos y a la información de los parámetros característicos de las tecnologías RPM&T.
 RPMT Classifier	Permite el acceso a la clasificación de las tecnologías RPM&T.
 Find your RPMT Technology	Accede a las metodologías de selección.
 Design for RPMT	Accede a las filosofías de diseño para RPM&T propuestas.
 Go Help	Brinda ayuda referente al manejo de la aplicación RPMT Reviewer.

La aplicación permite el acceso a los diversos iconos a partir de la interfaz gráfica de la ventana del menú principal, y de la barra de herramientas y menú, Figura 5.4 b y c.



(a)


(b)



(c)

Figura 5.4. Menú principal: (a) interfaz gráfica y barra de herramientas, (b) barra de menús, pestaña Start, (c) barra de menús, pestaña Help.

5.3 Base de datos (Access to RPMT DB)

El icono  **Access to RPMT DB**, permite al usuario acceder a la base de datos de las tecnologías RPM&T. La ventana contiene un formulario donde se encuentra de manera organizada la información de cada una de las tecnologías incluyendo sus parámetros característicos Figura 5.5. El formulario de la base de datos permite la navegación entre tecnologías empleando la barra de navegación que se ubica en la parte superior de la ventana. De igual manera es posible generar un reporte que contiene la información de todas las tecnologías existentes, a partir del icono **Report** ubicado en el extremo superior derecho de la ventana. La información que contiene el formulario se muestra en la Tabla 5.2.

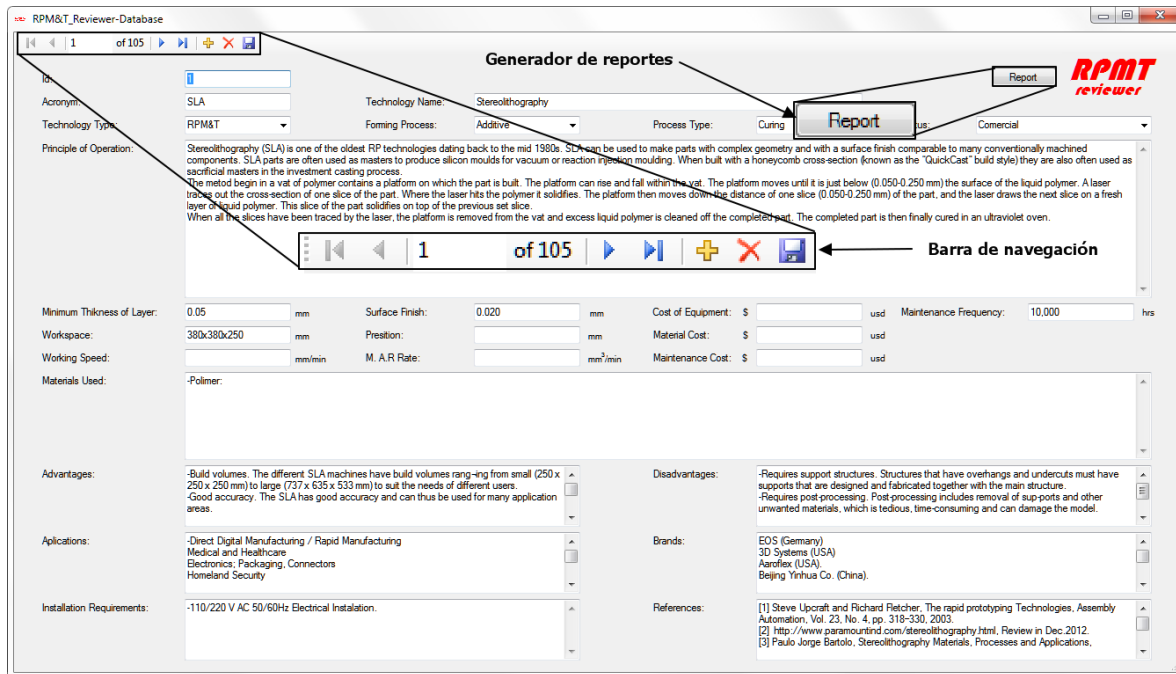


Figura 5.5. Interfaz gráfica de la base de datos.

Tabla 5.2. Información contenida en el formulario.

Campo	Descripción
ID	Se refiere al identificador numérico dentro de la base de datos.
Acronym	Se refiere a la nomenclatura empleada para identificar la tecnología.
Technology name	Nombre de la tecnología.
Technology type	Identifica si la tecnología corresponde a prototipado, manufactura y/o herramental rápido.
Forming process	Identifica el proceso empleado para conformar el producto final (adición, sustracción, formado o híbrido).
Process type	Identifica el proceso por el cual el material se conforma para generar el modelo (curado, dispensado, sinterizado, etc.).
Status	Se refiere a la situación comercial actual de la tecnología pudiendo ser comercial, obsoleta, solamente publicada o investigación y desarrollo.
Principle of operation	Describe el principio de funcionamiento de la tecnología.

Tabla 5.2. Información contenida en el formulario (continuación).

Campo	Descripción
Minimum thikness layer	Se refiere al espesor mínimo de capa que puede generar la tecnología.
Surface finish	Indica el valor de rugosidad que las piezas alcanzan al utilizar la tecnología.
Cost of equipment	Se refiere al costo promedio del equipo.
Maintenance frequency	Se refiere a la frecuencia de mantenimiento promedio que debe tener el equipo.
Workspace	Se refiere al espació de construcción promedio disponible.
Presition	Se refiere a la precisión promedio del equipo.
Material cost	Indica el costo promedio del material.
Working speed	Indica el promedio de velocidad de trabajo de la tecnología.
Material added or removal rate (M.A.R Rate)	Se refiere a la velocidad volumétrica promedio de adición o remoción de material.
Maintenance cost	Se refiere al costo promedio de mantenimiento para el equipo.
Advantages	Se refiere a las ventajas de la tecnología.
Disadvantages	Se refiere a las desventajas de la tecnología.
Aplications	Indica las aplicaciones disponibles para la tecnología.
Brands	Se refiere a las marcas y fabricantes del equipo, según la tecnología empleada.
Installation requirements	Se refiere a los requerimientos de instalación para el uso de la tecnología.
References	Menciona la bibliografía correspondiente a cada tecnología RPM&T y sus parámetros característicos.

5.3.1 Generación de reportes

La aplicación RPMT Reviewer permite generar un reporte de los parámetros característicos de todas las tecnologías RPM&T. Al momento de hacer clic en **Report**, el reporte se desplegara en una nueva ventana la cual permite el acceso a las páginas del reporte desde una barra de navegación ubicada en la parte superior, Figura 5.6. Dentro de la barra de navegación se encuentran disponibles las opciones de impresión y configuración de página, Figura 5.7a. De igual manera incluye la opción de exportar el reporte a un archivo con extensión .pdf, .doc y/o .xls, permitiendo al usuario su posterior edición, Figura 5.7 b.

RPM&T Reviewer
English Report
Analysis, Classification and Review of RPM&T Technologies

ID	Acronym	Technology Name	Technology Type	Forming Process	Process Type	Status	Principle of Operation	Minimum Thickness (mm)	Workspace	Working Speed	Surface Fin
1	SLA	Stereolithography	RPM&T	Additive	Curing	Commercial	Stereolithography (SLA) is one of the oldest RP technologies dating back to the mid 1960s. SLA can be used to make parts with complex geometry and with a surface finish comparable to many conventionally produced components. SLA parts are often used as masters to produce silicon moulds for vacuum or reaction injection moulding. When built with a polyurethane cross-section (known as the "Gildacast" build style) they are also often used as sacrificial masters in the investment casting process. The method begins in a vat of polymer containing a platform on which the part is built. The platform can rise and fall.	0.05	300x300x400		0.020
Barra de navegación											
2	DLP	Digital light processing	RPM&T	Additive	Curing	Commercial	DLP process begins at the basic process by means of converting a CAD file to STL format and then transferring the STL data to the system to build the model. Resins are cured by photo-polymerization. The photo-polymerization process is created by an image projection technology called digital light processing technology (DLP™) from Texas Instruments and it requires mask projection to cure the resin layer by layer. In DLP™ technology, the key device is the digital micromirror device (DMD), the producer of image. DMD is an optical semi-conductor and each DMD chip has hundreds of thousands of mirrors arranged in a rectangular array on its surface to steer the process with great accuracy. This means that each mirror is represented as one pixel in a projected image and therefore the resolution of an image depends on the number of mirrors [1]. The 3D data model in the STL format acquired is sliced within the software and each sliced layer is converted into a stripe of the bit which the mask image is generated. The stripe image consists of black and white areas while represents the material and black represents the void. When the image is projected onto the resin with DLP, the illuminated white portion will cure the resin while the black areas will not. To build the part in a layer-by-layer manner, DLP undergoes a simple process where the 3D model of a solid model is first created with a commercial CAD system. For medical applications, data acquired the user (like magnetic resonance imaging) or CT (computed tomography) systems can be processed directly. Unlike almost all other RP systems that build the model from bottom up, DLP system builds the model top down. The build or carrier is first immersed into a shallow trough of any life-based photo-polymer resin sitting on a transparent contact window. The mask is projected from below the build area onto the resin to cure it. Once the resin is cured, the build platform is raised a single layer, the thickness being dependent on the thickness. After the platform is raised, it peels the model away from the transparent contact window. This allowing fresh resin to flow in through capillary action. The next layer is then built in a similar manner without the need for preparation or leveling for each layer. The key difference of the DLP system with other RP systems are the use of mask projection for photo-polymerization and the part is moved upwards with each completed cured layer instead of moving downwards in other systems. Once the model is built, the user simply has to peel the model off from the platform as the model is stuck to the carrier platform during the entire process.	0.025	175x13x200		
3	LTP	Liquid Thermal Polymerization	RP	Additive	Curing	Research and Development	This process is similar to the SLA except that the resin is heat sensitive and an infrared laser is used to create small cubic cells containing the part (voids). With this difference is obtained as the voxel size is affected by heat dissipation, which may also cause unwanted distortion and shrinkage in the part. However, the problems of this method are smaller than those occurring in the SLA, and that are comparable. This system is still under investigation.	N/D	N/D	N/D	N/D
4	BIS	Beam Interference Solidification	RP	Additive	Curing	Published	This process is based on the point-by-point solidification of photosensitive polymers (contained in a transparent vat) at the intersection of two laser beams having different wavelengths. The first laser excites the liquid polymer to the intermediate metastable state which is subsequently polymerized by the radiation from the second laser. The process is associated with various technical limitations such as insufficient absorption of laser intensity at higher depths, shadowing effect of already solidified materials, and diffusion of laser light leading to difficulties in obtaining the precise intersection of the beam.	N/D	N/D	N/D	N/D

Figura 5.6 Reporte generado.

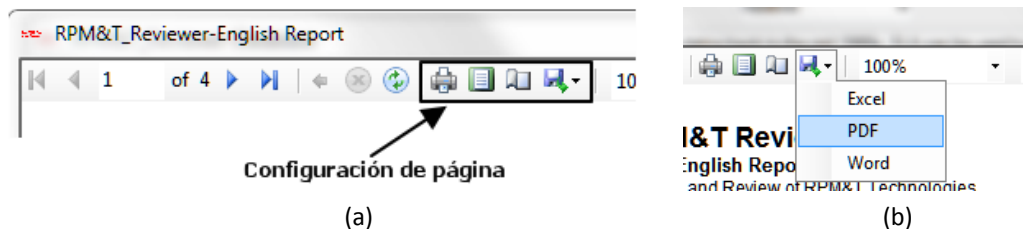


Figura 5.7. Barra de navegación: (a) configuración de la página, (b) formatos disponibles para exportar el reporte.

5.4 Clasificación (RPMT Classifier)

El acceso a la clasificación de las tecnologías RPM&T se realiza dando clic en el icono **RPMT Classifier** del menú principal de la aplicación. Al hacer clic se abrirá una ventana que presenta a manera de menú el nivel superior de la clasificación de las tecnologías RPM&T, Figura 5.8 (a). El menú correspondiente a la clasificación permite el acceso a niveles inferiores de la misma, mostrando los tipos y tecnologías existentes, Figura 5.8 (b) a (d). El usuario puede acceder a la información detallada de cada una de las tecnologías dando clic en el la opción **More details** que se ubica junto al nombre de cada tecnología, Figura 5.8 (d), donde se accede a un documento que contiene los parámetros característicos de la tecnología seleccionada.

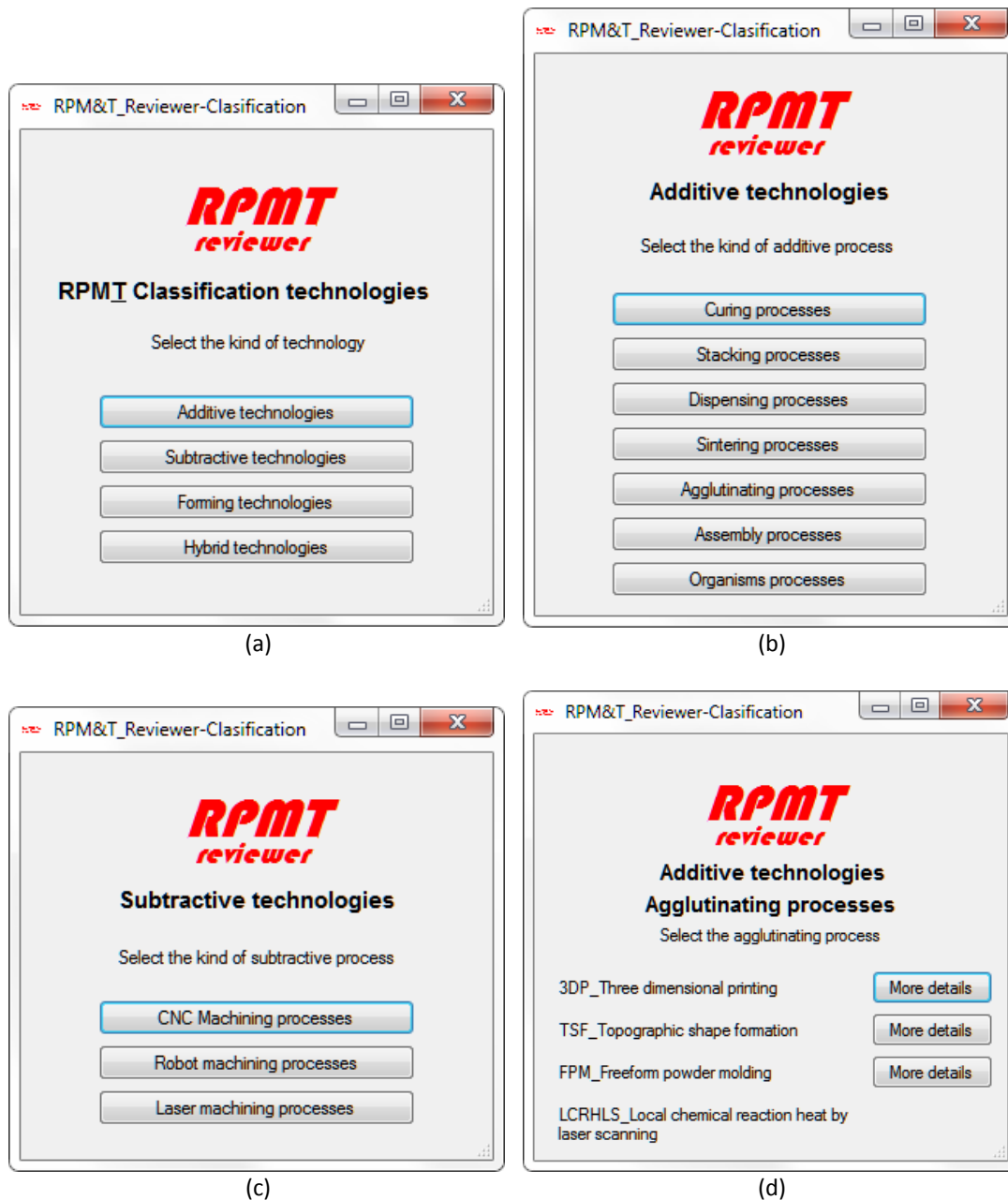



Figura 5.8. Interfaz gráfica del apartado de clasificación: (a) menú de clasificación, (b) clasificación de tecnologías aditivas, (c) clasificación de tecnologías subtractivas, (d) procesos de aglutinado.

5.5 Selección (Find your RPMT Technology)

Al hacer clic en el icono  **Find your RPMT Technology** del menú principal el usuario accede a los criterios de selección que le permiten encontrar la tecnología RPM&T que más se adecue a sus necesidades, Figura 5.9(a). Los criterios de selección disponibles corresponden a las metodologías de selección propuestas en la [sección 3.2](#). Al elegir la metodología de selección el usuario ve las opciones disponibles en ventanas posteriores, como se puede observar en la Figura 5.9 (b) y (c).

Dentro de la metodología de selección por resistencia mecánica, se encuentra disponible el icono de **Available materials**, que permite al usuario conocer las hojas de datos técnicos de los materiales comercialmente disponibles para el rango seleccionado, Figura 5.9 (d). Al pulsar este último icono se abre una ventana del explorador donde se almacenan los documentos que contienen la información de los materiales disponibles de varios proveedores, y donde el usuario puede acceder a ellos cómodamente.

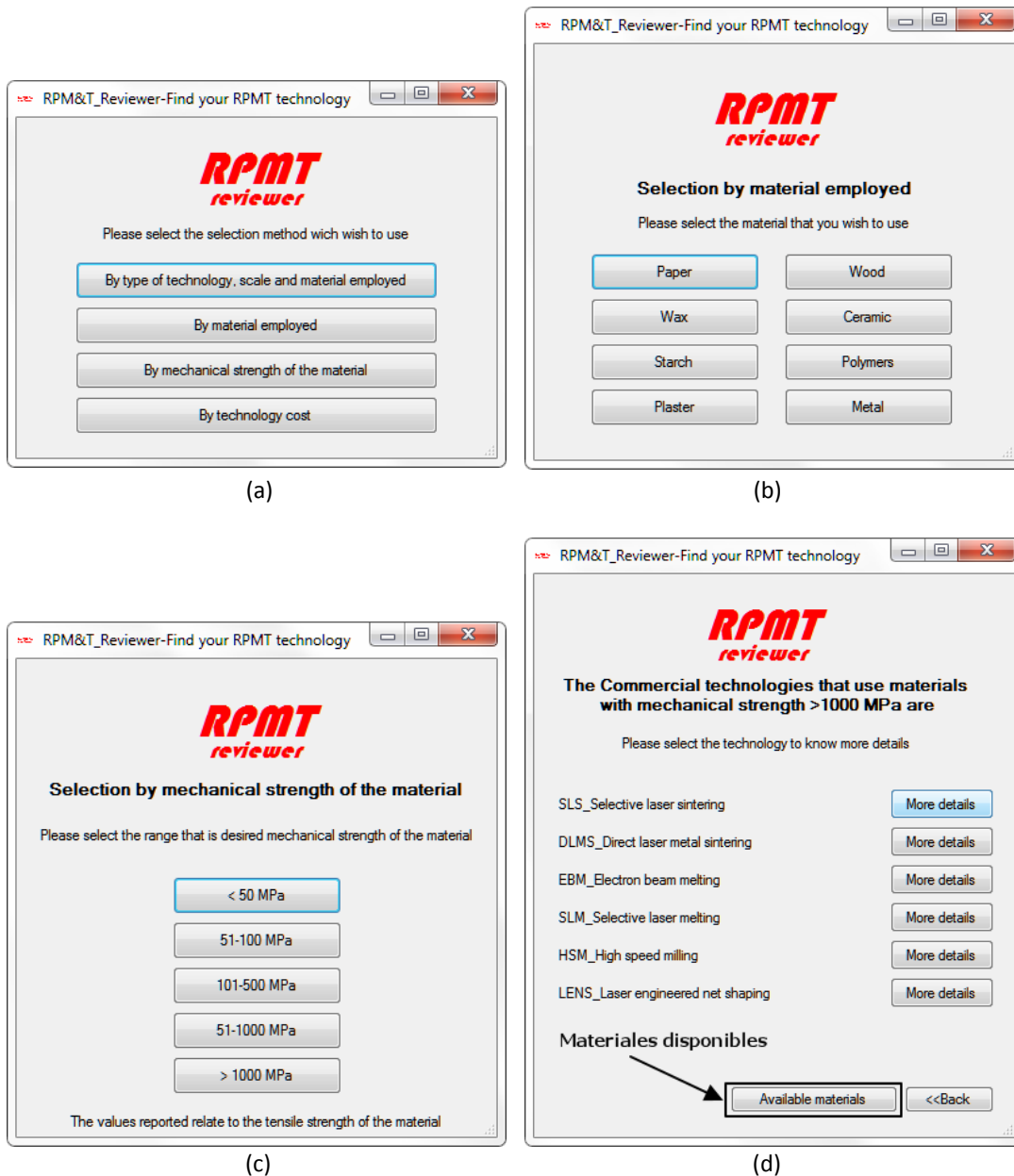
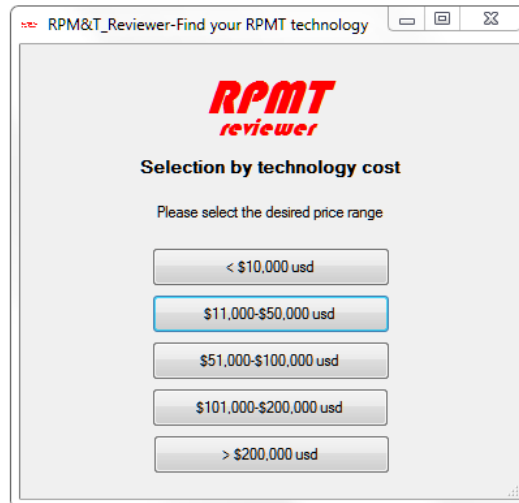



Figura 5.9. Interfaz gráfica del apartado de selección: (a) menú correspondiente al apartado de selección, (b) selección de acuerdo al material que se desea emplear, (c) selección de acuerdo a la resistencia mecánica del material, (d) tecnologías comerciales que emplean materiales con una resistencia mecánica >1000 MPa, (e) selección de acuerdo al costo de la tecnología.



(e)

Figura 5.9. Interfaz gráfica del apartado de selección: (a) menú correspondiente al apartado de selección, (b) selección de acuerdo al material que se desea emplear, (c) selección de acuerdo a la resistencia mecánica del material, (d) tecnologías comerciales que emplean materiales con una resistencia mecánica >1000 MPa, (e) selección de acuerdo al costo de la tecnología, (continuación).

5.6 Filosofías de diseño (Design for RPMT)

El acceso a las filosofías de diseño para prototipado, herramental y manufactura rápida se efectúa haciendo clic en el icono  **Design for RPMT** del menú principal de la aplicación. Al hacer clic aparece el menú correspondiente a las filosofías de diseño, donde el usuario selecciona el grupo de filosofías que desea conocer, Figura 5.10. Al hacer clic en el grupo de filosofías deseado, el usuario selecciona el grupo de directrices de diseño que desee conocer, Figura 5.11 (a) y (b).

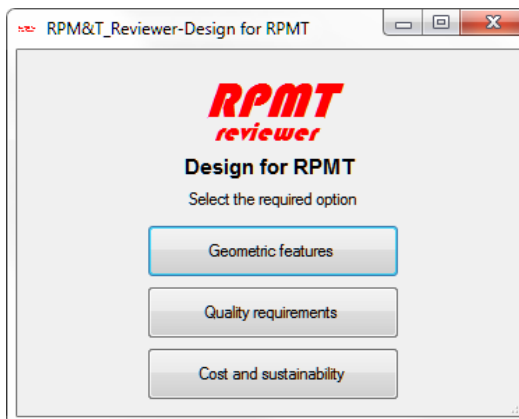


Figura 5.10. Menú del apartado de DFRPMT.

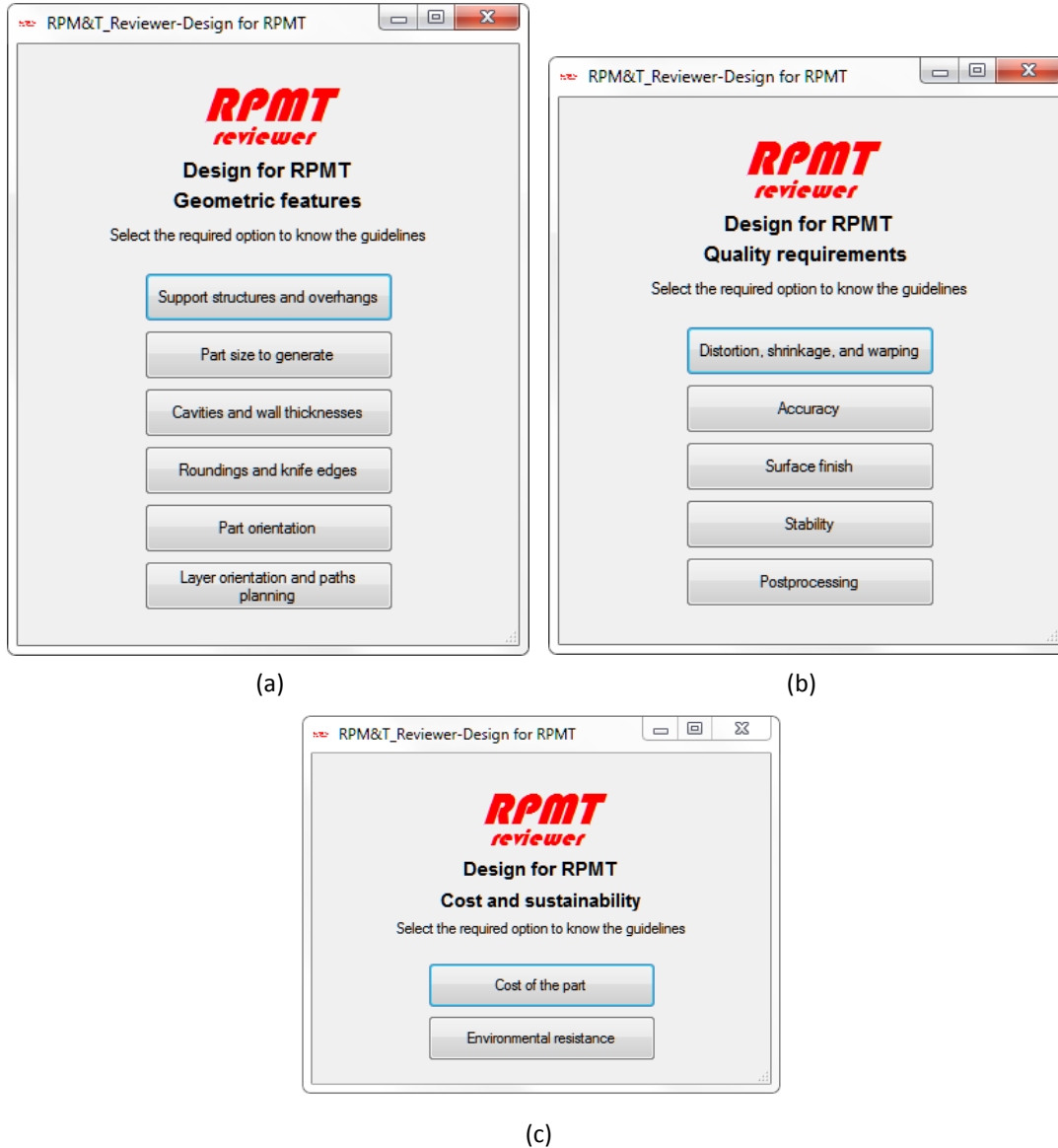


Figura 5.11. Grupo de directrices de diseño para RPM&T: (a) diseño según las características geométricas, (b) diseño de acuerdo a los requerimientos de calidad, (c) diseño de acuerdo a costo y sustentabilidad.

Al efectuar clic en cada una de las opciones disponibles se ingresa a un documento en formato pdf que contiene los lineamientos requeridos para efectuar un diseño óptimo de acuerdo al grupo de filosofías seleccionado, Figura 5.12.

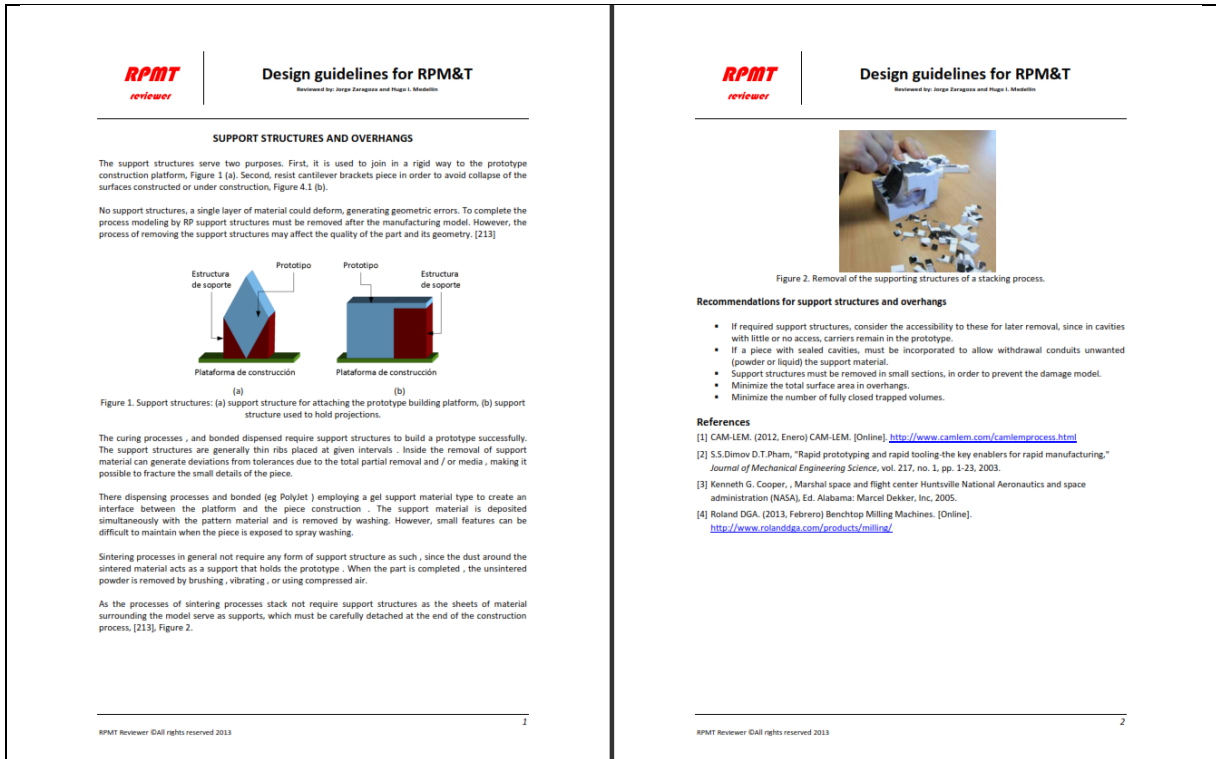


Figura 5.12. Documento que contiene los lineamientos requeridos para efectuar un diseño óptimo de acuerdo al grupo de filosofías seleccionado.

Conclusiones

Con el desarrollo del presente trabajo de tesis se ha logrado realizar una revisión y análisis de las técnicas de prototipado, manufactura y herramienta rápida. Como resultado de esta investigación se obtuvo la descripción de más de 120 técnicas RPM&T comerciales y en desarrollo, así como sus parámetros característicos de desempeño. En general se puede decir que todas las técnicas RPM&T cuentan con procesos de desarrollo particulares, lo que aumenta la variabilidad en su desarrollo y obtención de buenos resultados en términos de costos, acabado y tolerancias de las piezas finales. La revisión efectuada es de utilidad para investigadores, científicos y profesionistas, pues brinda un punto de partida para la selección o el desarrollo de nuevas tecnologías RPM&T, así como el perfeccionamiento de las ya existentes.

Objetivos alcanzados

Los objetivos alcanzados con el trabajo son:

- Se efectuó una revisión y análisis de las técnicas de prototipado, manufactura y herramienta rápida, donde se revela que cerca del 30% de las 124 técnicas ubicadas en la literatura se encuentran disponibles comercialmente.
- Se obtuvo la descripción de más de 120 técnicas RPM&T, comerciales y en desarrollo, así como sus parámetros característicos, que sirvieron como base para la clasificación y propuesta de criterios de selección, así como la propuesta de filosofías de diseño para RPM&T.
- Se catalogaron las tecnologías RPM&T en base al tipo de proceso y principio de conformado de material, obteniéndose una clasificación objetiva que evita que dos o más tecnologías se ubiquen en diferentes apartados a la vez.
- Se propusieron metodologías de selección que involucran solo las tecnologías comerciales y se basan en el uso final de la pieza, costo, material y resistencia mecánica.
- Se desarrollaron filosofías de diseño para RPM&T enfocadas a las tecnologías comercialmente disponibles.
- Se desarrolló una aplicación computacional que permite el acceso a la información correspondiente a cada tecnología RPM&T revisada, así como a la clasificación, criterios de selección y filosofías de diseño propuestas.

Contribuciones del trabajo

- *Una revisión completa de las tecnologías de prototipado, manufactura y herramienta rápida:*
Revisión que incluye un total de 124 técnicas RPM&T, siendo actualmente la revisión que incluye un mayor número de tecnologías en comparación con las publicadas en la literatura hasta la fecha.
- *Clasificación de las tecnologías en base a diversos criterios:*
Clasificación que involucra todos los sistemas RPM&T desarrollados, en actual desarrollo, comerciales y obsoletos. A la fecha es la clasificación más completa.

- *Desarrollo de metodologías de selección de las tecnologías RPM&T en base a diversos criterios:*
Se proponen cuatro metodologías de selección que involucran los sistemas RPM&T comerciales. Estas metodologías de selección no se basan en la percepción y criterio del usuario, como algunas de las reportadas en la literatura.
- *Desarrollo de filosofías de diseño para prototipado, manufactura y herramienta rápida (DFRPM&T):*
Filosofías de diseño que permiten al personal de diseño y manufactura conocer los lineamientos y directrices que se deben tener en cuenta al momento de efectuar el diseño de un producto o prototipo que se fabricara empleando tecnologías RPM&T.
- *Desarrollo de aplicación de base de datos (RPM&T Reviewer):*
Permite al usuario acceder a la descripción de las tecnologías reportadas, así como a la clasificación, metodologías de selección y filosofías de diseño para RPM&T.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se visualiza las siguientes actividades a desarrollar:

- Continuar con la revisión de las tecnologías RPM&T para identificar las nuevas tecnologías que sean desarrolladas, así como la evolución y avances en las existentes, lo anterior con la finalidad de mantener actualizada la revisión, clasificación y metodologías de selección.
- Investigar e identificar nuevos fabricantes de sistemas RPM&T.
- Complementar la clasificación propuesta tomando en cuenta el desarrollo de nuevas tecnologías RPM&T y nuevos procesos de conformado.
- Proponer nuevas metodologías de selección y complementar las metodologías propuestas con anterioridad.
- Efectuar un análisis de los prototipos generados por medio de tecnologías RPM&T, con la finalidad de conocer nuevas limitantes que no han sido identificadas en las tecnologías de prototipado rápido.
- Añadir nuevas filosofías de diseño para RPM&T y complementar las ya existentes, tomando en cuenta el desarrollo y evolución que exista a la fecha de análisis de los sistemas de prototipado rápido.
- Hacer disponible la aplicación “RPM&T Reviewer”, a estudiantes, profesionales, industriales e investigadores que deseen conocer las tecnologías RPM&T disponibles.
- Desarrollar una aplicación referente a los sistemas RPM&T que se encuentre disponible para su uso en las nuevas tecnologías de comunicación (teléfonos celulares, tabletas electrónicas, etc.).

Bibliografía

- [1] Richard Fletcher, Steve Upcraft, "Tutorial: The rapid prototyping technologies," *Assembly Automation Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 318-330, 2003.
- [2] Ming C. Leu, David W., Rosen David, L. Bourell, *Roadmap for additive manufacturing identifying the future of freeform processing*, The University of Texas at Austin, Ed.: Laboratory for Freeform Fabrication, Advanced Manufacturing Center, 2009.
- [3] S.O. Onuh, "Rapid prototyping integrated systems," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 220-223, 2001.
- [4] D.Y. Yang, I. Horváth, "Rapid technologies: solutions for today and tomorrow," *Computer-Aided Design Journal*, vol. 34, pp. 679-682, 2002.
- [5] Beno Benhabib, *Manufacturing: Design, Production and Integration*, Marcel Dekker Inc., Ed.: CRC, 2003.
- [6] R.S. Gault, D.T. Pham, "A comparison of rapid prototyping technologies," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, no. 10-11, pp. 1257-1287, 1998.
- [7] P.Bert Erdel, *High-Speed Machining.*: Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [8] Engelbert Westkämper, *Digital manufacturing in the global era.*: Springer Link US, 2007.
- [9] Han Imre, J. Broek, and Debasish Dutta Horváth, "Editable physical concept models: opportunities and challenges," *Int Journal CAD-CAM and Comput Graph*, vol. 15, no. 2, pp. 409-426, 2001.
- [10] Kathryn A. Ingle, *Reverse engineering.*: Mc Graw Hill Profesional Publishing, 1994.
- [11] Sulzer Ltd. (2012, Septiembre) Sulzer. [Online]. <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/Pumps-Services/Maintenance-and-Support-Services/Reverse-Engineering>
- [12] Samba Co. (2012, Septiembre) Samba opening windows to a wider world. [Online]. <http://www.samba.org/>
- [13] Joachim, Stefan Haas, and José Teixeira Rix, *Virtual prototyping: virtual environments and the product design process.*: Kluwer Academic Print on Demand, 1995.
- [14] SimX Ltd. (2012, Septiembre) Sinx simulation, modelling and expertise. [Online]. <http://www.simx.co.uk/>
- [15] Pulak Mohan, N. Venkata Reddy, and Sanjay G. Dhande Pandey, "Slicing procedures in layered manufacturing: a review," *Rapid prototyping journal*, vol. 9, no. 5, pp. 274-288, 2003.
- [16] Castle Island's. (2012, Septiembre) Worlwide guide to rapid prototyping. [Online]. <http://www.additive3d.com/home.htm>
- [17] G. Kattethota, M.R. Roberts C Henderson, "Manufacturability evaluation for rapid fabrication: A system for traditional machining and layered manufacturing planning," in *CAD Conference*, Neuchatel, Switzerland, 1999, pp. 22-24.
- [18] 3DSystems. (2012, Septiembre) ZCorp. [Online]. <http://www.zcorp.com/es/home.aspx>
- [19] 3DSystems. (2012, Septiembre) 3D Systems. [Online]. <http://www.3dsystems.com/>

- [20] Stratasys Ltd. (2012, Septiembre) Stratasys for a 3D world. [Online]. <http://www.stratasys.com/>
- [21] EOS GmbH Electro Optical Systems. (2012, Septiembre) EOS e-Manufacturing Solutions. [Online]. <http://www.eos.info/en>
- [22] J. Corney, T. Lim, B.B.C Davies, J.M. Ritchie, Hugo Medellín, "Automatic Subdivision and Refinement of Large Components for Rapid Prototyping Production," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 249-258, 2007.
- [23] Terry Wohlers, "Wohlers Report," Annual Worldwide Progress Report, 2007.
- [24] Terry Wohlers, "Wohlers Report," Annual Worldwide Progress Report, 2011.
- [25] Blogspot. (2012, Octubre) Product design and development. [Online]. <http://pddnet.blogspot.mx/>
- [26] Anna Kochan, "Rapid prototyping helps Renault F1 Team UK improve championship prospects," *Assembly Automation*, vol. 23, no. 4, pp. 336-339, 2003.
- [27] Biomedical modeling Inc. (2012, Octubre) Biomodel. [Online]. <http://www.biomodel.com/>
- [28] Yongnian Yan, Renji Zhang, Xiaohong Wang, Zhuo Xiong, "Organism manufacturing engineering based on rapid prototyping principles," *Rapid Prototyping journal*, vol. 11, no. 3, pp. 160-166, 2005.
- [29] R.J.M. Hague, P.M. Dickens, N. Hopkinson, *Rapid Manufacturing An Industrial.*: John Wiley & Sons, 2006, vol. 1.
- [30] Protocam Inc. (2012, Agosto) Protocam, excellence in rapid prototyping. [Online]. http://www.protocam.com/html/rapid_manufacturing.html
- [31] S. Ashley, "From CAD art to rapid metal tools," *Mechanical Engineering Journal*, pp. 82-87, March 1997.
- [32] K.R. Denton, "The economics of rapid tooling and prototyping," in *The sixth international conference on rapid prototyping*, 1995, pp. 179-188.
- [33] 3D Prototyping Co. (2012, Octubre) 3D Prototyping. [Online]. <http://www.3dprototyping.com.au/Rapid-Tooling.html>
- [34] C.K Chua, K.H. Hong, S.L. Ho, "Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study," *International Journal of Advanced MAnufacturing Technology*, vol. 15, pp. 604-608, 1999.
- [35] Terry Wohlers, "Rapid prototyping-The future," *Wholers associates*, vol. 1, no. 6, pp. 33-38, 1994.
- [36] Xue Yan and P. Gu, "A review of rapid prototyping technologies and systems," *Computer Aided Design*, vol. 28, no. 4, pp. 307-318, 1996.
- [37] J.P.S. van Griethuysen, R. Glardon, N.P. Karapatis, "Direct rapid tooling: a review of current research," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 77-89, 1998.
- [38] Erik Radstok, "Rapid tooling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 164-168, 1999.
- [39] A.Matuszak, A.Rosochowski, "Rapid tooling: the state of the art," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 106, no. 1, pp. 191-198, 2000.
- [40] A. Marsan, D. Dutta, P. Kulkarni, "A review of process planning in layered manufacturing," *Rapid*

Prototyping Journal, vol. 6, no. 1, pp. 18-35, 2000.

- [41] F.B.Prinz, D.Rosen, L.Weiss, D.Dutta, "Latered manufacturing: current status anf future trends," in *DOI: Transactions of the ASME*, 2001, pp. 60-71.
- [42] P.Lal, W.Sun, "Recent development on computer aided tissue engineering-areview," *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 67, pp. 85-103, 2002.
- [43] J.T.Czernuszka, E.Sachlos, "Making Tissue engineering scaffolds work, review on the application of solid freeform fabrication technology to the production of tissue engineering scaffolds," *European cells and materials*, vol. 5, pp. 29-40, 2005.
- [44] Terry Wohlers, Therese Philippi Douglas Freitag, *Rapid prototyping: state of the art*. Chicago, Illinois: Manufacturing Technology Information Analysis Center, 2003.
- [45] R.Schindel, J.P.Kruth, Gideon Levy, "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 589-609, 2003.
- [46] S.S.Dimov, D.T.Pham, "Rapid prototyping and rapid tooling-the key enablers for rapid manufacturing," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, no. 1, pp. 1-23, 2003.
- [47] K.F. Leong K.F, C.S. Lim, C.K. Chua, *Rapid prototyping: principles and aplications*, World Scientific, Ed. USA: Nayang Technological University in Singapore, 2003.
- [48] K.H. Hong, S.L. Ho, C.K. Chua, "Rapid Tooling Technology. Part 2. A Case Study Using Arc Spray Metal Tooling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, pp. 609-614, 1999.
- [49] M.Shiomi, K.Osakada, T.Laoui, E.Costa, "Rapid manufacturing of metal components by laser forming," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 1459-1468, 2006.
- [50] Kab Fai Leong, Cha Sing Lim, Chee Kai Chua, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 3rd ed.: World Scientific Publishing Co, 2010.
- [51] Dominik Rietzel, Florian Kühnlein, Robert Feulner, Gerrit Hülдер, Ernest Schmachtenberg, Bettina Wendel, "Additive processing of polymers," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 293, pp. 799-809, 2008.
- [52] Jose Esau Pedraza, Hugo Medellin, "Rapid prototyping and manufacturing, a review of current tecnologies," in *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Lake Buena Vista, Florida, 2009, pp. 1-13.
- [53] J.PKruth, S.Kumar, "Composites by rapid prototyping technology," *Materials and Design Journal*, vol. 31, pp. 850-856, 2010.
- [54] S.Suryakumar, Vishal Pushpa, Sreenathbabu Akula, K.P.Karunakan, "Low cost integration of additive and substractive precess for hybrid layered manufacturing," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010.
- [55] Alain Bernard, S.Suryakumar, Lucas Dembinski, Georges Taillandier, K.P. Karunakaran, "Rapid manufacturing of metallic objects," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 264-280, 2012.
- [56] Mieke Vandenhaute, Jorg Schelfhout, Sandra Van Vlierberghe, Peter Dubruel, Thomas Billiet, "A

- review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering," *Biomaterials*, vol. 33, pp. 6020-6041, 2012.
- [57] Terry Wohlers, "Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry," Wohlers Associates, Inc., Annual Worldwide Progress Report 2012.
- [58] Walter Schaaf, "Robotyping-new rapid prototyping processes for sand moulds using industrial robotsAssemblu," *Assembly Automation Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 321-329, 2000.
- [59] C.K.Chua, C.W.Lee, C.Feng, K.Totong, C.M.Cheah, "Rapid and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting," *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 25, pp. 308-320, 2005.
- [60] N.G.Bennet, S.O. Onuh, I.H.Mulyadi, "Reliminary investigation of surface roughness and dimensional accuracy of Thermojet and SLA parts," in *Third national conference on rapid prototyping, tooling and manufacturing*, 2002, pp. 39-46.
- [61] P.D.Hilton. P.F. Jacobs, *Rapid tooling, technologies and industrial applications*. USA: Marcel Dekker Inc., 2000.
- [62] G. Mitchell, P.J.Bartolo, "Stereo-thermal lithography: a new principle for rapid prototyping," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 150-156, 2003.
- [63] K. Jain, P.K. Lokesh, "Selection of rapid prototyping technology," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 5, no. 2, pp. 75-84, 2010.
- [64] A. Armillotta, "Selection of layered manufacturing techniques by an adaptive AHP decision model," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 3, pp. 450-461, 2008.
- [65] David M. Anderson, *Design for manufacturability and concurrent engineering*.: CIM Press, 2004.
- [66] 3DSystems. (2012, Diciembre) Stereolithography, make the rapid prototyping easy. [Online]. <http://www.stereolithography.com/design-tips.php>
- [67] J.B. Paulo, *Stereolithography Materials, Processes and Applications*.: Springelink, 2011.
- [68] Custompart Co. (2012, Septiembre) Custompart. [Online]. <http://www.custompartnet.com/>
- [69] Envisiontec. (2013, Octubre) Envisiontec DLP Technology Overview. [Online]. <http://envisiontec.com/technology-overview/>
- [70] P. Sandi, Harimka Narendra, B.Dahontre, *Laser Fabrication and Machining of Materials*., 2008, ch. 9, pp. 353-361.
- [71] T.Assion, R. Clasen Nold, J. Zeiner, "Electrophoretic deposition as rapid prototyping method," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 5, pp. 1163-1170, 2010.
- [72] W. Bauer, R. Knitter, P.Woias, T. Haneman, "Rapid Prototyping and Rapid Tooling Techniques for the Manufacturing of Silicon, Polymer, Metal and Ceramic Microdevices," *Forschungszentrum Karlsruhe, Institut f. Materialforschung III*, vol. 1, pp. 187-218, 2006.
- [73] The University of Utha. (2012, Noviembre) The rapid prototyping home page. [Online]. <http://home.utah.edu/~asn8200/rapid.html>
- [74] Workshop of Photonics Femtosecond laser micromachining system, User's Manua, 2011.

- [75] Menlo Systems GmbH 2012. (2012, Octubre) Menlo: Precision made in Germany. [Online]. <http://www.menlosystems.com/>
- [76] Dong-Pyo Kim, Tae-Woo Lim, Sang-Hu Park, Dong-Yol, Yang Tuan, Anh Pham, "Three-Dimensional SiCN Ceramic Microstructures via Nano-Stereolithography of Inorganic Polymer Photoresists," *Advanced multifunctional materials journal*, vol. 16, pp. 1235-1241.
- [77] Toru Takeuchi, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Yusuke Kajihara, "Development of a nano-stereolithography system using evanescent light for submicron fabrication," in *Congress of American Society for Precision Engineering*, Tokyo, Japan, 2006.
- [78] Objet Inc. (2012, Diciembre) Objet. [Online]. <http://objet.com/3d-printers>
- [79] L.Jay Guo, "Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements. *Advanced Materials Journal*," vol. 19, pp. 495-513.
- [80] Peter R. Krauss, J Preston, Stephen Renstrom, Y. Chou, "Nanoimprint lithography. NanoStructure Laboratory," *American Vacuum Society, Department of Electrical Engineering, University of Minnesota*, 1996.
- [81] Philip Coane, "Introduction to Electron Beam Lithography," Louisiana Tech University, Institute for Micromanufacturing. , .
- [82] Technical Univesity of Denmark. (2013, Enero) Technical Univesity of Denmark. [Online]. http://www.fotonik.dtu.dk/English/Research/ResearchActivities/NanoDevices_research/Technology.aspx
- [83] K. Chen,C.D. Chen, K.J Tseng, "Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development," *Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 26, no. 2, pp. 141-149.
- [84] Murakami Tamotsu, Nakajima Naomasa, Kamimura Akiya, "Research on Refrigerative Stereolithography. Accurate Fabrication with High Degree of Freedom by Sol-Gel Transformable Resin and UV-Blocking Layer," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, vol. 66, no. 649, pp. 3201-3206, 2000.
- [85] Rapid Today. (2013, March) New Rapid Manufacturing Machine Stirs Hope. [Online]. <http://www.rapidtoday.com/araldite.html>
- [86] Huntsman. (2013, March) Araldite® Digitalis® literature. [Online]. http://www.huntsman.com/advanced_materials/a/Home/Rapid%20Manufacturing/Araldite_R%20Digitalis_R%20literature_FAQ
- [87] S. Narang, P. Guerit, S. Liu, D. Twait, Fish Khandelwal, R. Ventura, "Freeform Fabrication of Functional Silicon Nitride Components by Direct Photo Shaping," in *Materials research society simposium proceedings*, vol. 625, 2000, pp. 81-90.
- [88] Ming-Hung Chung, Jun-Yi Ruan, Fei-Bin Hsiao, Yung-Chun Lee, "A Theoretical Model for Laser Assisted Direct Imprinting (LADI)," in *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS'07. 2nd IEEE International Conference*, 2007, pp. 493-496.
- [89] Sebastian Storch, Florian Nissen, Gerd Witt, Martin Augsburg, "Rapid prototyping with ceramic-filled epoxy resin by optoforming," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 225-231, 2004.

- [90] Sebastien Amaud Bertsch, "Microstereolithography:," in *Materials research society symposium proceedings*, Boston, 2002, pp. 3-15.
- [91] A. Barry, Roy J. Rayne, C.M. Carl, Wu Bender, "Solid Freeform Fabrication of a Telescoping Actuator Via Laminated Object Manufacturing," in *In 24th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures-B: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 240, 2009, p. 143.
- [92] A. Daekeon, Jin-Hwe Kweon, Jinho Choi, Seokhee Lee, "Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 2, pp. 339-346, 2012.
- [93] L. Dodin, S. Tu, Gary Kalmanovich, "Curved-layer Laminated Object Manufacturing," in *Proceedings of the 7th International Conference on Rapid Prototyping*, 1997.
- [94] Arthur Newman, H. Heuer, S. Wyatt, Brian Mathewson, James D. Cawley, "Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials," *Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials*, vol. 75, no. 5, pp. 75-79, 1996.
- [95] S. Hebbbar, R. Zheng, W. Newman, "CAD and Control Technologies for Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1997, pp. 643-651.
- [96] CAM-LEM. (2012, Enero) CAM-LEM. [Online]. <http://www.camlem.com/camlemprocess.html>
- [97] Yong Zheng, Sangeun Choi, Brian Mathewson, Wyatt Newman, , "Engineering Materials Utilizing Thick, Tangent-Cut Layers," 1997.
- [98] Terry Wohlers, "The World of Rapid Prototyping," in *Proceedings of the Fourth International Conference On Desktop Manufacturing*, San Jose, California, 1992.
- [99] MCOR Technologies. (2013, Abril) MCOR. [Online]. <http://www.mcor technologies.com/>
- [100] A.V. Giordano, F. Veniali Boschetto, "Surface roughness prediction in fused deposition modelling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-16, 2013.
- [101] REPRAP Co. (2013, Enero) RepRap. [Online]. <http://reprappro.com/Gallery>
- [102] M.S. Pridham, R.C. Cobb, I. Gibson, Dixon Dickens, "Rapid prototyping using 3-D welding," *Procedures of Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 280-290, 1992.
- [103] D.B Chrisey, A. Pique, H.D. Young, R.Modi, M.Bucaro, Jones Meehan, B.J. Spargo, B.R Ringelsen, "Generation of mesoscopic patterns of viable escherichia coli by ambient laser transfer," *Biomaterials Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 161-166, 2002.
- [104] Kenneth G. Cooper, "Rapid prototyping technology, selection and application", *Marshal space and flight center Huntsville National Aeronautics and space administration (NASA)*, Ed. Alabama: Marcel Dekker, Inc, 2005.
- [105] Adam L. Cohen, A. Christopher, Ezekiel Bang, J. J. Kruglick, Mohamed Gad, "EFAB™ Technology: MEMS Handbook, Design and Fabrication", 2006, ch. 6.
- [106] Uri Frodis, Fan-Gang Tseng, Gang Zhang, Florian Mansfeld, M. Peter, Adam Wil, L. Cohen, "EFAB: low-cost automated electrochemical batch fabrication of arbitrary 3D microstructures," in *The International Society for Optical Engineering conference*, 1999.

- [107] Robert P. Mudge, Nicholas R. Wald, "Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair," *Welding Journal*, Enero 2007.
- [108] University of Northern Iowa. (2012, Noviembre) Major RP techniques. [Online]. http://www.uni.edu/~rao/rt/major_tech.htm#top
- [109] Optomec. (2013, Noviembre) Optomec. [Online]. <http://www.optomec.com/Additive-Manufacturing-Systems/Laser-Additive-Manufacturing-Systems>
- [110] Jing Wenbin Cao, Changchun Ge, Yongsheng Tan, Yan Zhang, Qunxing Fei Zhao, "Research on laser engineered net shaping of thick-wall nickel-based alloy parts," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 24-28, 2009.
- [111] K. Gary, Eric Schlienger Lewis, "Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition," *Materials & Design*, vol. 21, no. 4, pp. 417-423, 2000.
- [112] Sandia National Laboratories. (2012, Noviembre) LENS news releases. [Online]. <http://www.sandia.gov/media/lens.htm>
- [113] Bandyopadhyay B. Onagoruwa, "Fused deposition of ceramics (FDC) and composites," *chool of Mechanical and Materials Engineering Washington State University Pullman*, vol. 2001, pp. 2916-2920, 2001.
- [114] W. Han, F. Mohammadi, A. Safari, S.C. Danforth, N. Langrana, M.A. Jafari, "A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 161-175, 2000.
- [115] S.C Danforth, M. Jafari, A. Safari, M. Allahverdi, "Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, no. 10-11, pp. 1485-1490, 2001.
- [116] Matthias Greul, Theo Pintat, Michael Greulich, "Fast functional prototypes via multiphase jet solidification," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 20-25, 1995.
- [117] J.L Beuth, M. Griffith, A. Vasinonta, "Process maps for predicting residual stress and melt pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, no. 1, pp. 101-109, 2007.
- [118] F. Liou, H. Pan, "Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process," *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 168, no. 2, pp. 230-244, 2005.
- [119] Kevin Slattery, Mary Kinsella, Wright-Patterson, Joseph Newkirk, Hsin-Nan Chou, Robert Landers, Frank Liou, "Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 236-244, 2007.
- [120] R.C. Cobb, J.I. Segal, "Optimising arc sprayed metal tooling for injection moulding," *First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research*, pp. 189-199, 1995.
- [121] L.J. Grant, "Sprayed metal prototype moulds," *Iastic Design Forum*, pp. 36-39, 1994.
- [122] AM Philpot (Hard Chrome) Ltd. (2012, Diciembre) AM Philpot (Hard Chrome) Ltd. [Online]. <http://www.amphardchrome.co.uk/metal-spraying.php>
- [123] D. Jean, W.J. Lackey, C. Duty, "Laser chemical vapour deposition: Materials, modelling, and process control," *International materials reviews*, vol. 46, no. 6, pp. 271-287, 2001.

- [124] W. Jack Lackey, Chad E. Duty, Daniel Jean, "Temperature controlled laser chemical vapor eposition (LCVD) using thermal imaging," *Assembly Automation Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 293-299, 2005.
- [125] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology: Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology.*: CRC Pressl Llc, 2011, vol. 2.
- [126] J. Meinschien, G. Mollekopf, K. Schuster, H. Stafast, F. Falk, "CNx thin films prepared by laser chemical vapor deposition," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 46, no. 1-3, pp. 89-91, 1997.
- [127] Guanghua Sui, Ming C. Leu, Frances D. Bryant, "A study on effects of process parameters in rapid freeze prototyping," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 19-23, 2003.
- [128] Ming C. Leu, Zhiming Ji, Yongnian Yan, Wei Zhang, "Rapid freezing prototyping with water," *Materials and Design*, vol. 20, no. 2-3, pp. 139-145, 1999.
- [129] Zhuo Xiong, Yunyu Hu, Shenguo Wang, Renji Zhang, Chao Zhang Yongnian Yan, "Layered manufacturing of tissue engineering scaffolds via multi-nozzle deposition," *Materials Letters*, vol. 57, pp. 2623-2628, 2003.
- [130] Rafiq Noorani, *Rapid prototyping.*: Wiley, 2006.
- [131] TurkCADCAM Firma Rehberi. (2012, Noviembre) TurkCADCAM. [Online]. <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/tech-deposition-spraying.html>
- [132] Sandia National Laboratories. (2013, Enero) Robocasting: Sandia develops new way to fabricate ceramics. [Online]. <http://www.sandia.gov/media/robocast.htm>
- [133] F. K. Feenstra, S. Finke, "Solid freeform fabrication by extrusion and deposition of semi-solid alloys," *Journal of Materials Science*, vol. 37, no. 15, pp. 3101-3106, 2002.
- [134] Yoonjae Lee, Shoufeng Yang, Yang Hao, Julian Evans, Clive Parin, Xuesong Lu, "Extrusion freeforming of millimeter wave electromagnetic bandgap (EBG) structures," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 42-51, 2009.
- [135] Anirban Dutta, James E. Fay Ashok V. Kumar, "Electrophotographic printing of part and binder powders," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 10, no. 1, p. 7'13, 2004.
- [136] F. B. Prinz, K. Ramaswami, M. Terk, L. E. Weiss, R. Merz, "Shape Deposition," in *Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin*, Austin, 1994, pp. 1-8.
- [137] F. Prinz, L. Weiss, "Method for Fabrication of Three-Dimensional Articles," 5,301,415, April 12, 1994.
- [138] S.Kang, J. Kietzman, F.B.Prinz, J.L. Lombardi, L.E. Weiss, A.G.Cooper, "Automated fabrication of complex molded parts using mold shape deposition manufacturing," *Materials and design*, vol. 20, no. 2, pp. 83-89, 1999.
- [139] Andor Technology. (2013, Enero) An introduction to Pulsed Laser Deposition. [Online]. <http://www.andor.com/learning-academy/pulsed-laser-deposition-an-introduction-to-pulsed-laser-deposition>
- [140] Pulsed Laser Deposition (PLD). (2013, Enero) Pulsed Laser Deposition (PLD). [Online]. <http://pulsedlaser.net/index.html>
- [141] Y.L. Lee, M.S. Shaarawi, H.L. Marcus, J.M. Sanchez, K.J. Jakubenas, "Selective area laser deposition of titanium oxide," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 66-70, 1997.

- [142] James V. Tompkins, H.L. Marcus, "Selective area laser deposition of Silicon Carbide," in *Proceedings of the Fourth Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas in Austin*, 1993, pp. 9-11.
- [143] R. Carnes, H.G. Wheat, H.L. Marcus, G. Zong, "Solid Freeform Fabrication by Selective Area Laser Deposition," in *Solidfreeform Fabrication Proceedings The University of Texas*, Austin, 1990, pp. 83-90.
- [144] C. Deckard, J. Beaman, "Advances in manufacture, Integration and Processes," in *Proceedings of the 15th Conference on Production Research and Technology, University of California at Berkeley*, 1989, pp. 623-630.
- [145] J.E. Crocker, S. Harrison, L. Sun, L. Shaw, H.L. Marcus, "Using SALDVI and SALD with multi-material structures," *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 50, no. 21, pp. 21-23, 1998.
- [146] B.R. Tompkins, J.V. Birmingham, H.L. Marcus, "Silicon Carbide Shapes by Selected Area Laser Deposition Vapor Infiltration," in *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1994, pp. 348-355.
- [147] R. Wilke, D. W. Johnson, S. Büttgenbach, A. Llobera, "Polymer Microlenses With Modified Micromolding in Capillaries (MIMIC) Technology," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2628-2630, 2005.
- [148] Andreas Janshoff, "Micropatterned solid-supported membranes formed by micromolding in capillaries," *European Biophysics Journal*, vol. 29, no. 7, pp. 549-554, 2000.
- [149] Rama Nageswaran, F.A. Bruce, "Low pressure injection molding process for near net shape, hot gas filter components," in *26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: B: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 23, no. 4, John Wiley & Sons, Inc., pp. 51-59, 2002.
- [150] Melanie P. Bodiford, Kevin H. Burks, Ed. Ethridge, Dennis Tucker, Won Kim, Houssam Toutanji, Michael R. Fiske, Behrokh Khoshnevis, "Lunar Contour Crafting – A Novel Technique for ISRU Based Habitat Development," in *American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference*, 2005, pp. 1-12.
- [151] Behrokh Khoshnevis, Jing Zhang, "Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting," *Automation in Construction*, vol. 29, pp. 50-67, 2013.
- [152] Satish Bukkapatnam, Hongkyu Kwon, Jason Saito, Behrokh Khoshnevis, "Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials," *Rapid prototyping journal*, vol. 7, no. 1, pp. 32-41, 2001.
- [153] University of Southern California. (Enero, 2013) Contourcrafting: robotic construction system. [Online]. <http://contourcrafting.org/>
- [154] Behrokh Khoshnevis, Jing Zhang, "Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting," *Automation in Construction*, vol. 29, pp. 50-67, January 2013.
- [155] Stratasys Company. (2013, Octubre) Solidscape. [Online]. <http://www.solid-scape.com/products/3d-wax-printers-rapid-prototyping-services-dimension-3d-printers>
- [156] MicroFab Technologies Inc. (2013, Octubre) MicroFab. [Online]. <http://www.microfab.com/>
- [157] W.Q. Song, S. Masood, "Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modeling," *Materials & Design*, vol. 25, no. 7, pp. 584-594, 2004.
- [158] David Espalin, David Roberson, Bob Zinniel, Francisco Medina, Ryan Wicker Jorge Mireles, "Fused Deposition Modeling".

- [159] David Espalin, David Roberson, Bob Zinniel, Francisco Medina, Ryan Wicker Jorge Mireles, "Fused Deposition Modeling of Metals," 2012.
- [160] A.B. Shapiro, "High Precision Droplet Based Net-Form Manufacturing," 1999.
- [161] Horii Toshihide, Soshu Kiriwara, Yoshinari Miyamoto, "Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding," *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp. 1093-1097, 2009.
- [162] Haiou Zhang, Jipeng Xu, Guilan Wang, "Fundamental study on plasma deposition manufacturing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 171, no. 1, pp. 112-118, 2002.
- [163] Ying-Ping, Ju-Hua Huang, Hai-Ou Zhang, Gui-Lan, Wang Qian, "Direct rapid high-temperature alloy prototyping by hybrid plasma-laser technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 208, no. 1, pp. 99-104, 2008.
- [164] M.U. Islam, L. Xue, "Free-form laser consolidation for producing metallurgically sound and functional components," *Journal of laser applications*, vol. 12, no. 4, pp. 160-165, 2000.
- [165] Chee-Kai Chua, Kah-Fai Leong, Wai-Yee Yeong, "Indirect fabrication of collagen scaffold based on inkjet printing technique," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 229-237, 2006.
- [166] C. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering," 4,863,538, September 5, 1989.
- [167] K. D Prasad, V. Yarlagadda, S. Narayanan, "Determination of temperature distribution in metallic layer during selective laser sintering using FEM," in *1st International Conference on Manufacturing and Management*, 2005, pp. 73-78.
- [168] Anish Sachdeva, Sharanjit Singh, Vishal S. Sharma, "Investigating surface roughness of parts produced by SLS process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12, 2013.
- [169] pro2pro Ltd. (2013, Enero) Pro2pro. [Online]. <http://www.pro2proLtd.co.uk/photo-gallery/Selective-Laser-Sintering/>
- [170] 3T RPD Ltd. (2013, Enero) Direct Metal Laser Sintering (DMLS). [Online]. <http://www.3trpd.co.uk/dmls.htm>
- [171] UBM Tech. (2013, Enero) Rapid prototypes move to metal components. [Online]. <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4013703/Rapid-prototypes-move-to-metal-components>
- [172] J. Starly, B., Raman, S. Christensen, A. Parthasarathy, "Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 3, no. 3, pp. 249-259, 2010.
- [173] A. Glad, C-G. Gustafson, L-E. Rännar, "Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 128-135, 2007.
- [174] Arcam AB. (2013, Octubre) CAD to Metal-ARCAM AB. [Online]. <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-a2/>
- [175] Wilhelm Meiners, Andrei Diatlov, Sebastiann Bremen, "Selective Laser Melting A manufacturing technology for the future," *Laser Technik Journal*, vol. 9, no. 2, 2012.
- [176] Realizer GmbH. (2013, Enero) Realizer selective laser melting. [Online]. <http://www.realizer.com/>

- [177] Realizer. (2013, Octubre) Realizer-Selective Laser Melting. [Online]. <http://www.realizer.com/>
- [178] Renishaw. (2013, Octubre) Laser melting systems. [Online]. <http://www.renishaw.com/en/laser-melting-systems--15240>
- [179] Sintermask GmbH. (2013, Enero) Sinterimask. [Online]. <http://www.sintermask.com/technology.php?cmd=0>
- [180] Bahram Asiabanpour, Mehdi Mojdeh, Kurt Palmer, Behrokh Khoshnevis, "SIS – a new SFF method based on powder sintering," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 30-36, 2003.
- [181] Loughborough University. (2013, Enero) The HSS manufacturing process. [Online]. <http://www.lboro.ac.uk/microsites/enterprise/e2hs/technology/HSS/HSS-process.html>
- [182] Robby Ebert, Horst Exner, Peter Regenfuss, "Laser Micro Sintering a Versatile Instrument for the Generation of Microparts," *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. (www.laser-journal.de)*, 2007.
- [183] S. Saedodin, Y. Shanjan, A. Mirahmadi, "Feasibility study of high frequency plasma aided rapid prototyping," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, pp. 722-728, 2007.
- [184] D.E. Bunnell, "Fundamentals of selective laser sintering of metals," The University of Texas, Austin, PhD thesis 1995.
- [185] Y. Ueda, Y. Shirakawa, J. Hidaka, A. Shimosaka, "Sintering mechanism of two spheres," *Kona Journal*, vol. 21, pp. 219-233, 2003.
- [186] Zongyan, He Jack, G. Zhou, "A new rapid tooling technique and its special binder study," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 82-88, 1999.
- [187] Voxeljet. (2013, Octubre) Voxeljet. [Online]. <http://www.voxeljet.de/>
- [188] Exone. (2013, Octubre) Exone-Digital Part Materialization. [Online]. <http://www.exone.com/>
- [189] M. Bohner, C. Roth, A. Ernstberge, R. Heuberger, N. Doebelin, R. Müller, R.A. Butscher, "Printability of calcium phosphate powders for 3D printing of tissue engineering scaffolds," in *Powder based three-dimensional printing of calcium phosphate structures for scaffold engineering.*, 2013, ch. 8, p. 47.
- [190] Sivad Inc. (2013, Enero) 3D Printers. [Online]. http://www.sivadinc.com/products/3d_Printers.html
- [191] NC State University. (2013, Enero) What Is 3D Printing? And How Does It Work? [Online]. <http://web.ncsu.edu/abstract/technology/3d-printing/>
- [192] ProtoMED. (2013, Enero) Three-Dimensional Printing (3 DP Models). [Online]. <http://www.protomed.net/products/3d-print-model.html>
- [193] Charles R. Gilmant, Wojciech Z. Misiolekt, Daniel F. Walczyk, Stephen J. Rockt, "Freeform Powder Molding for Rapid Tooling," 1996.
- [194] J.R Corney, J.M. Ritchie, B.J. Davies, T.Lim, "RPBloX rapid prototyping-More than just layers," *Proc. DETC*, vol. 2, 2002.
- [195] J. R. Corney, J. B. C. Davies, T. Lim, and J. M. Ritchie H. Medellín, "Octree-Based Production of Near Net Shape Components," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 457-466, July 2008.

- [196] CIRTES Research and Development. (2013, Abril) Stratoconception, Procédé Original de Prototypage, Outillage et Fabrication Rapides. [Online]. <http://www.stratoconception.com/>
- [197] Yongnian Yan, Shenguo Wang, Renji Zhang, Chao Zhang, Zhuo Xiong, "Fabrication of porous scaffolds for bone tissue engineering via low-temperature deposition," *Scripta Materialia*, vol. 46, no. 11, pp. 771-776, June 2002.
- [198] Thomas Boland, Thomas Trusk, Gabor Forgacs, Roger R. Markwald, Vladimir Mironov, "Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering," *Trends in Biotechnology*, vol. 21, no. 4, pp. 157-162, 2003.
- [199] Dichen Li, Bingheng Lu, Yiping Tang, Minglin Sun, Zhen Wang, Zhongzhong Chen, "Fabrication of artificial bioactive bone using rapid prototyping," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 327-333, 2004.
- [200] Kah Fai Leong, Tze Chiun Lim, Kerm Sin, Chian Cong, Bang Pham, "Rapid freeze prototyping technique in bio-plotters for tissue scaffold fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 246-253, 2008.
- [201] Yongnian Yan, Renji Zhang, Lei Sun, Zhuo Xiong, "Fabrication of porous poly(l-lactic acid) scaffolds for bone tissue engineering via precise extrusion," *Scripta Materialia*, vol. 45, no. 7, pp. 773-779, October 2001.
- [202] Xiaohong Wang, Yuqiong Pan, Haixia Liu, Jie Cheng, Zhuo Xiong, Feng Lin, Rendong Wu, Renji Zhang, Qingping Lu, Yongnian Yan, "Fabrication of viable tissue-engineered constructs with 3D cell-assembly technique," *Biomaterials*, vol. 26, no. 29, pp. 5864-5871, 2005.
- [203] P. Wu, H. D. Ladouceur, B. R. Ringeisen, J.A. Barron, "Biological laser printing: a novel technique for creating heterogeneous 3-dimensional cell patterns," *Biomedical microdevices*, vol. 6, no. 2, pp. 139-147, 2004.
- [204] R. Rosen, J. Jones-Meehan, B. J. Spargo, S. Belkin, B. R. Ringeisen, J.A. Barron, "Biological laser printing of genetically modified Escherichia coli for biosensor applications," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 20, no. 2, pp. 246-252, 2004.
- [205] Richard A. Wysk, Matthew Frank, B. Joshi Sanjay, "CNC-RP: A Technique for Using CNC Machining as a Rapid Prototyping Tool in Product/Process Development," Department of Industrial and Manufacturing Engineering, The Pennsylvania State University, 2002.
- [206] Roland DGA. (2013, Febrero) Benchtop Milling Machines. [Online]. <http://www.rolanddga.com/products/milling/>
- [207] Y.H. Chen, W.C. Tse, "A robotic system for rapid prototyping," in *International Conference on Robotics and Automation*, 1997, pp. 1815-1821.
- [208] M. Wiedmaier, T. Rudlaff, H. Hügel, "Laser processing integrated into machine tools - design, applications, economy," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 27, no. 12, pp. 1149-1164, 1995.
- [209] Tadataké Sato, Aiko Narazaki, Ryozi Kurosaki, Hiroyuki Niino, Yoshizo Kawaguchi, "Rapid prototyping of silica glass microstructures by the LIBWE method: Fabrication of deep microtrenches," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 182, pp. 319-324, 2006.

- [210] Sehyung Park, Doosun Choi, Haesung Jee, Yong-Ak Songa, "3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 1057-1062, 2005.
- [211] Lee E. Weiss, Fritz B. Prinz, "Novel applications and implementations of shape deposition manufacturing," *Naval research reviews*, vol. 50, pp. 19-26, 1998.
- [212] Xinhong Xiong, "A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 53-56, 2008.
- [213] Sung-Geun Kim, Woo-Kyun Jung, Hyung-Jung Kim, Sung-Hoon Ahn, Won-Shik Chu, "Fabrication of micro parts using nano composite deposition system," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 276-283, 2007.
- [214] Y. Song, Y.H. Chen, "The development of a layer based machining system," *Computer-Aided Design*, vol. 33, pp. 331-342, 2001.
- [215] C. Robinson, Y. Yang, B.E. Stucker, G.D. Janaki Ram, "Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 226-235, 2007.
- [216] Solidica Inc. Ann Arbor Dawn R. White, "Ultrasonic consolidation of aluminum tooling," *Advanced materials & processes journal*, pp. 64-65, January 2003.
- [217] Robert Puers, Steve Reyntjens, "A review of focused ion beam applications in microsystem technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 11, no. 4, pp. 287-300, 2001.
- [218] SESCOI USA Inc. (2013, Febrero) Layer milling for rapid prototyping - WorkNC-LMP shows the way. [Online]. <http://www.sescoi.com/press-releases/Layer%20milling%20for%20rapid%20prototyping%20-%20WorkNC-LMP%20shows%20the%20way>
- [219] Mold making Technology TM. (2013, Abril) Controlled Metal Build Up Process for Generation, Modification. [Online]. <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/0406spotlight.html>
- [220] K.N. Jaikumar, G. Saiprasanna, M. Hegler, J. Maxwell Williams, "The Laser Microchemical Lathe: Rapid Freeform Part Fabrication from the Vapor Phase," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrications Symposium*, 1999, pp. 543-551.
- [221] Hugo I Medellin, J. Esau Pedraza, "Análisis y clasificación de las tecnologías de prototipado y manufactura rápida," Facultad de Ingeniería, UASLP, SLP, Thesis 2010.
- [222] Linda C. Schmidt, George E. Dieter, *Engineering Design*, 4th ed.: Mc Graw Hill, 2000.
- [223] Todd Grimm, "Stereolithography, Selective laser sintering and Polyjet: Evaluating and Applying the Right Technology," Accelerated Technologies Inc, Austin, Texas, 2002.
- [224] EnvisionTec Ltd. (2013, Junio) Envisiontec. The benchmark in 3D printing. [Online]. <http://envisiontec.com/>
- [225] Solid Concepts Inc. (2013, Mayo) Solid Concepts Inc. [Online]. <http://www.solidconcepts.com/>
- [226] N. Venkata, P.M Reddy, S. G. Dhande Pandey, "Part deposition orientation studies in layered manufacturing," *Journal of materials processing technology*, vol. 185, no. 1, pp. 125-131, 2007.

- [227] Ravi Janardan, Michiel Smid, Jörg Schwerdt, Jayanth Majhi, "Multi-criteria geometric optimization problems in layered manufacturing," in *Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry. ACM*, 1998, pp. 19-28.
- [228] Kunwoo Lee, Junghoon Hur, "The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 247-254, 1998.
- [229] N. Dutta, D. Sreeram, "Determination of optimal orientation based on variable slicing thickness in layered manufacturing," The University of Michigan, Ann Arbor, MI, Technical Report UM-MEAM-94-14, 1994.
- [230] J.Y., Lee, K. and Park, J.C Kim, "Determination of optimal orientation in stereolithographic rapid prototyping," Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University, Seoul, Technical Report 1994.
- [231] N. Dutta, D Seth, "On the computation of part orientation using support structures in layered manufacture," The University of Michigan, Ann Arbor, MI, Technical Report UM-MEAM-TR-94-15, 1994.
- [232] M. Bagchi, A. Bablani, "Quantification of errors in rapid prototyping processes, and determination of preferred orientation of parts", in *Transactions of the NAMRI of SME Vol. XXIII*, 1995, pp. 319-324.
- [233] J.Fadel, G. Kirschman, C Wodziak, "A genetic algorithm for optimising multiple part placement to reduce build time," in *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton*, Dayton, OH, 1994.
- [234] J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa, "Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography," *Rapid Prototyping Journal* , vol. 1, no. 4, pp. 12-23, 1995.
- [235] W.R. Chang, "CAD/CAM for the Selective Laser Sintering Process," University of Texas, Austin, TX, MS Thesis 1989.
- [236] H.E. Kimura, F. Mandorli, F. Cugini, U. Otto, "Extension of feature-based CAD systems using TAE structures to support integrated rapid prototyping," in *Proceedings of the Computers in Engineering Conference and the Engineering Database Symposium, ASME*, 1995, pp. 779-793.
- [237] S.J. Wozny, M.J. Rock, "Utilizing topological information to increase scan vector generation efficiency," in *Solid Freeform Fabrication Symposium 1991*, Austin, TX, 1991, pp. 28-36.
- [238] J.K. Hall, J.L. Chari, "Robust prototyping," in *Solid Freeform Fabrication Symposium 1993*, Austin, TX, 1993, pp. 135-142.
- [239] R.Eujin, Ian Campbell, and Deon de Beer Pei, "Entry-level RP machines: how well can they cope with geometric complexity?," *Assembly Automation*, vol. 31, no. 2, pp. 153-160, 2011.
- [240] B. Barlow, J.W Badrinarayan, "Effect of processing parameters in SLS of metal-polymer powders," in *Solid Freeform Fabrication Symposium 1995*, Austin, TX, 1995, pp. 55-63.
- [241] E. Koch, M. Menon, U. Fodran, "Mechanical modeling build styles," in *Solid Freeform Fabrication Symposium 1996*, Austin, TX, 1996, pp. 419-442.
- [242] N. Dutta, D. Kulkarni, "Deposition strategies and resulting part stiffness in layered manufacturing," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 121, no. 1, pp. 93-103, 1996.

- [243] L.J.Y. H. Fuh, A.Y.C. Nee, E.T. Kang, T. Miyazawa, C.M. Cheah Lu, "Origin of shrinkage, distortion and fracture of photopolymerized material," *Materials research bulletin*, vol. 30, no. 12, pp. 1561-1569, 1995.
- [244] Richard Lawrance, P. Chartoff Flach, "A Simple Polymer Shrinkage Model Applied to Stereolithography," in *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, Austin, TX, 1994, pp. 225-233.
- [245] D. Rapti, E. Gdoutos, A. Aggelopoulos D. Karalekas, "Investigation of shrinkage-induced stresses in stereolithography photo-curable resins," *Experimental mechanics*, vol. 42, no. 4, pp. 439-444, 2002.
- [246] P.T. Bolan, B.A., R.P. Chartoff Weissman, "Measurements of Linear Shrinkage and the Residual Stresses Developed During Laser Photopolymerization," in *Proc. 4th Int. Conf. on Rapid Prototyping*, Dayton, OH, 1992, pp. 103-112.
- [247] J. Rodrigues, R.P. Chartoff J.S Ullett, "Linear Shrinkage of Stereolithography Resins," in *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 1994, pp. 225-232.
- [248] N. Pulak, M. Pandey Raghunath, "Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 6, pp. 985-995, 2007.
- [249] C.M. Cheah, J.Y.H. Fuh, L. Lu, W.L. Wang, "Influence of process parameters on Stereolithography part shrinkage," *Materials & Design Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 205-213, 1998.
- [250] R.M. Ogorkiewicz, *Engineering Properties of Thermoplastics*.: Wiley, 1970.
- [251] C.R. Deckard, J.D. Williams, "Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process," *Rapid Prototyping Journal* , vol. 4, no. 2, pp. 90-100, 1998.
- [252] Stratasys Inc. Bonnie Meyer, "The accuracy myth," Stratasys Inc., 2011.
- [253] Xiangwei Wang, "Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 129-133, 1999.
- [254] JEOL. (2013, Marzo) JEOL Solutions for Innovation. [Online]. <http://www.jeol.co.jp/en/>
- [255] Daekeon, Hochan Kim, Seokhee Lee Ahn, "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3, pp. 593-606, 2007.
- [256] O. Singamneni, S. Reay, S. Withell, A. Diegel, "Tools for sustainable product design: additive manufacturing," *Journal of Sustainable Development*, vol. 3, no. 3, pp. 68-75, 2010.
- [257] H. T. Loh, Y. S. Wong, F. Xu, "Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 54-60, 1999.
- [258] P. Hilton, "Making the leap to rapid tool making," *Mechanical Engineering Journal*, pp. 75-77, July 1995.
- [259] Rapid prototyping and engineering applications a toolbox for prototype development, *Frank W.Liou*.: CRC Press, 2008.
- [260] Rudolf Zauner, "Micro powder injection moulding," *Microelectronic engineering*, vol. 83, no. 4, pp. 1442-1444, 2006.

- [261] George Dieter, *Engineering design: A materials and processing approach*, 1st ed.: Mc Graw Hill, 1983.
- [262] Georges Fadel, Dietmar Frank, "Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 6, no. 5, pp. 339-345, 1995.
- [263] A.E. Tontowi, T.H.C. Childs, "Selective laser sintering of a crystalline and a glass-filled crystalline polymer: experiments and simulations," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 215, pp. 1481-1495, 2001.
- [264] Y.S. Wong, J.Y.H. Fuh Y. Ning, "Effect of control of hatch length on material properties in the direct laser sintering process," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 219, pp. 15-25, 2005.
- [265] R.P. Chartoff, L. Flach, "Laser Scan Rates and Shrinkage in Stereolithography," in *Proc. 4th Int. Conference on Rapid Prototyping*, Dayton, OH, 1993, pp. 239-247.
- [266] P. Richard, Lawrence Flach, Peter Weissman, "Material and process parameters that affect accuracy in stereolithography," in *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Center for Materials Science and Engineering, Mechanical Engineering Department and Chemical Engineering Department*, The University of Texas at Austin, 1993, pp. 245-252.

Anexos

A. Proveedores de información científica referente las tecnologías RPM&T

- Biomaterials Journal, <http://www.journals.elsevier.com/biomaterials/>
- International Journal of Machine Tools and Manufacture, <http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-machine-tools-and-manufacture/>
- International Journal of Rapid Manufacturing, <http://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijrapidm>
- International Journal on Advanced Materials and Technologies, <http://www.praiseworthyprize.com/ireamt.htm>
- Journal of Intelligent Manufacturing, <http://link.springer.com/journal/10845>
- Journal of Manufacturing Science and Engineering, <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/journal.aspx>
- Rapid Prototyping Journal, <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?issn=1355-2546>
- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, <http://www.springer.com/engineering/production+engineering/journal/170>
- Journal of Materials Processing Technology, <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-materials-processing-technology/>
- Computers & Industrial Engineering, <http://www.journals.elsevier.com/computers-and-industrial-engineering/>
- Journal of Manufacturing Systems, <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-manufacturing-systems/>
- Journal of Mechanical Design, <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/journal.aspx>
- Assembly Automation, <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?issn=0144-5154>
- Materials & Design, <http://www.journals.elsevier.com/materials-and-design/>

*Las direcciones web presentadas se encuentran disponibles a su año de revisión: Junio 2013

B. Proveedores de información referente a las tecnologías RPM&T

- AIMME - Instituto Tecnológico Metalmeccánico, <http://www.aimme.es/english/aimme/areas/producto>
- Bremen Institute for Industrial Technology, http://www.biba.uni-bremen.de/groups/rp/rp_page.html
- Case Western Reserve University, <http://dora.eeap.cwru.edu/camlem/>
- Cheshire Henbury, <http://www.cheshirehenbury.com/rapid/>
- ComputerGen Implants Ltd., <http://www.maxfac.com/>
- Delcam International, http://www.delcam.com/applications/rapid_prototyping.htm
- Ennex Corporation, <http://www.ennex.com/>
- Fraunhofer Institute for Chemical Technology, <http://www.rapidprototyping.fraunhofer.de/>
- Javelin 3D LLC, <http://www.javelin3d.com/>
- Katholieke Universiteit Leuven, <http://www.mech.kuleuven.be/pp/research/rapidprototyping>
- Laboratory for Manufacturing Systems, <http://lms.mech.upatras.gr/>
- Laser Engineered Net Shaping, <http://www.sandia.gov/mst/technologies/net-shaping.html>
- Medical Modeling Corporation, <http://www.medicalmodeling.com/>
- Metal printing process, <http://www.mpp.no/main.htm>
- Michigan State University, <http://www.egr.msu.edu/rpl/>
- New River Community College, <http://www.nr.edu/cadd/>
- Penn State, <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/rapidpro/>
- PRISM (Partnership for Research In Space Modeling), <http://prism.asu.edu/>
- Rapid Prototyping Center, <http://www.louisville.edu/speed/rpc/>
- Rapid Prototyping Laboratory, <http://www-rpl.stanford.edu/>
- Research Center for Advanced Manufacturing, <http://www.seas.smu.edu/rcam/>
- RP4Baghdad, <http://www.rp4baghdad.org/>
- Shape Deposition Laboratory, <http://www.cs.cmu.edu/~sdm/>
- T.A. Grimm & Associates, Inc., <http://www.tagrimm.com/>
- The Rapid Prototyping and Manufacturing Institute, <http://rpm.marc.gatech.edu/>
- The Rapid Prototyping Center, <http://www.rpc.msoe.edu/>
- Tufts University, <http://www.tufts.edu/as/tampl/me/rapid.html>
- University of Connecticut, <http://www.ims.uconn.edu/~hmarcus/>
- Virtual & Rapid Prototyping Lab., <http://isc.mst.edu/research/researchlist.html#virtual>
- Wohlers Associates Inc., <http://www.wohlersassociates.com/>
- Wolff Ingenieurburo, <http://www.lobonet.de/tech-mall/wolff>

*Las direcciones web presentadas se encuentran disponibles a su año de revisión: Junio 2013

C. Fabricantes de equipo RPM&T

- 3D systems (EUA), <http://www.3DSystems.com>
- 3D-Micromac AG (Alemania), <http://3d-micromac.com/>
- Aaroflex (EUA), <http://www.aaroflex.com/>
- AeroMet, <http://www.aerometcorp.com/>
- Araldite Digitalis,
http://www.huntsman.com/advanced_materials_former/a/Home/Rapid%20Manufacturing/Araldite_R%20Digitalis_R%20literature_FAQ
- Arcam AB, <http://www.arcam.com>
- Beijing Yinhua Co. (China), <http://www.tiertime.com/en/>
- Chubnippon Ind. (Japón), <http://www.chubu3d.com/>
- CMET Inc. (Japón), <http://www.cmet.co.jp/eng/>
- Concept Laser GmbH, <http://www.concept-laser.de>
- D-MEC Ltd. (Japón), <http://www.d-mec.co.jp/eng/>
- EOS GmbH (Alemania), <http://www.eos-gmbh.de>
- Fabrisonic LLC (EUA), <http://www.fabrisonic.com/>
- Fochif Mechatronics Technology Co., (China), <http://www.fochif.com/>
- HöganäsAB (Suecia), <http://www.hoganas.com/>
- Inno-shape GmbH (Alemania), <http://www.inno-shape.de/>
- JEOL (Japón), <http://www.jeol.co.jp/en/>
- Mcor Technologies (Irlanda), <http://www.mcor technologies.com/>
- Meiko RPS Co. (Japón), <http://www.meiko-rps.com/indexe/jphome.html>
- Nanoscribe (Alemania), <http://www.nanoscribe.de/>
- Objet (Israel), <http://www.stratasys.com/>
- Optomec Inc. (EUA), <http://www.optomec.com>
- Phenix Systems (Francia), <http://www.phenix-systems.com>
- POM Group Inc. (EUA), <http://www.pomgroup.com/>
- Raith (China), <http://www.raith.com/>
- Realizer (Alemania), <http://www.realizer.com/>
- RepRap (Reino Unido), <http://www.reprapcentral.com/vmchk.html>
- Robocasting Enterprise (EUA), <http://www.robocasting.net/>
- Sintermask (Alemania), <http://www.sintermask.com/>
- Solidscape (EUA), <http://www.solid-scape.com/>
- Stratasys, Inc (EUA), <http://www.stratasys.com/>
- Unirapid Inc. (Japón), <http://unirapid.com/ur3.html>
- Viridis3DLLC (EUA), <http://www.viridis3d.com/>
- Voxeljet Technology GmbH (Alemania), <http://www.voxeljet.de/>
- Workshop of Photonics (Lituania), <http://www.wophotonics.com/>
- Wuhan Benha Mechanical & Electrical Co. (China).
- ZCorp (EUA), <http://www.zcorp.com/en/home.aspx>
- Zimmermann , <http://www.f-zimmermann.com/fzimmermann.html>

*Las direcciones web presentadas se encuentran disponibles a su año de revisión: Junio 2013