

MANUFACTURA POR CAPAS: PROTOTIPADO RÁPIDO

RESUMEN: La manufactura por capas (layered manufacturing / LM) comprende una serie de tecnologías de reciente desarrollo y rápida evolución que crean modelos tridimensionales reales (prototipos o productos terminados) capa por capa empleando variedad de procesos y materiales. Este trabajo es una recopilación de información al respecto, con el fin de evaluar el potencial que dichas tecnologías ofrecen al crecimiento y desarrollo de la industria.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. Manufactura por capas (LM)
 - 1.1. Estereolitografía (SL)
 - 1.2. Sinterizado selectivo láser (SLS)
 - 1.3. Fabricación laminada (LOM)
 - 1.4. Deposición de hilo fundido (FDM)
 - 1.5. Híbridos y nuevas tecnologías
2. Panorama mundial
3. Panorama nacional
4. Conclusiones y recomendaciones

ANEXO A: MATERIALES LM (ESTADOS INICIAL Y TERMINADO)

ANEXO B: EQUIPOS LM (CARACTERÍSTICAS GENERALES)

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

Tecnologías LM

La manufactura por capas (LM) es un proceso de fabricación desarrollado a partir de 1987 por 3DSystems (EEUU) que se conoce como prototipado rápido (rapid prototyping). Su desarrollo inicialmente buscó satisfacer la necesidad de crear rápidamente modelos tridimensionales reales que permitieran al diseñador una interacción conceptual y/o funcional con el producto durante las etapas de diseño, dichos modelos se llaman prototipos. Los prototipos se fabricaron entonces en resina polimérica fotosensible inicialmente en estado líquido, el modelo se forma capa por capa, solidificando cada capa mediante la aplicación puntual de radiación UV siguiendo las trayectorias establecidas para la creación de dicha capa y procediendo luego a la solidificación de la siguiente sobre esta. La tecnología descrita se conoce como estereolitografía (stereolithography / SL). Posteriormente se han desarrollado otras tecnologías que han permitido el uso de diversos materiales, entre ellas resaltan el sinterizado selectivo láser (selective laser sintering / SLS) que sinteriza polvos con radiación puntual producida por láser para la formación de las capas, la fabricación laminada (laminated object manufacturing / LOM) que crea las capas de láminas de papel cuyo contorno se corta con láser de precisión adheridas unas a otras, la deposición de hilo fundido (fused deposition modeling / FDM) en la que cada capa se crea por un hilo de polímero fundido que es extruído por una boquilla que sigue la trayectoria establecida para la formación de la capa, la fotopolimerización por UV (solid ground curing / SGC) que a diferencia de la SL solidifica la capa entera irradiando luz UV a través de una máscara que contiene el patrón de dicha capa o la impresión 3D (3D printing / 3DP) o proyección aglutinante (direct shell production casting / DSPC) que emplea la tecnología de inyección de tinta tradicional en la impresión para inyectar aglutinante puntualmente en polvos siguiendo las trayectorias definidas para formar cada capa. La historia del desarrollo de estas tecnologías se presenta en la tabla 1. La tabla 2 presenta las características generales de manera comparativa de las principales tecnologías que componen el campo de la manufactura por capas (LM).

Aplicaciones LM

El desarrollo de esta variedad de tecnologías de prototipado rápido y su ágil evolución hizo ver al diseñador la posibilidad de elaborar no solamente prototipos sino de fabricar directamente productos terminados mediante el uso de esta herramienta, hoy se pueden clasificar sus principales aplicaciones en prototipado rápido (rapid prototyping — RP), fabricación rápida de modelos y moldes (rapid tooling — RT) y manufactura rápida (rapid manufacturing — RM), es allí cuando hablamos de la manufactura por capas (LM).

Objetivo y método

Se pretende con este trabajo contextualizar al lector en el campo de la manufactura por capas (LM) describiendo los procesos y materiales involucrados en las principales tecnologías e identificando

las principales empresas que las utilizan y los productos y servicios que estas ofrecen, lo anterior como resultado de una búsqueda en Internet, la información técnica y comercial se extrajo de las páginas de los principales fabricantes y usuarios de LM. Posteriormente se realiza una evaluación preliminar del potencial que dicha tecnología representa para la industria colombiana y se dan una serie de conclusiones y recomendaciones al respecto.

TABLA 1. Historia del desarrollo de la manufactura por capas ^[1].

AÑO	TECNOLOGÍA	ESTADO INICIAL DEL MATERIAL	EMPRESA COMERCIAL
1986	Estereolitografía Stereolithography — SL	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1987	Manufactura de partículas disparadas Ballistic particle manufacturing — BPM	Material fundido o semifundido	BPM
1988	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Helisys Cubic Technologies
1988	Fabricación automática diseño controlado Design controlled automatic fabrication — De5CAF	Resina fotosensible en estado líquido	Light sculpting
1988	Forma fundida (método de deposición de soldadura) Shape melting (weld deposition)	Material fundido o semifundido	Babcock & Wilcox
1989	Sinterizado selectivo láser Selective laser sintering — SLS	Material particulado	DTM 3DSystems
1990	Fotopolimerización por UV Solid ground curing — SGC	Resina fotosensible en estado líquido	Cubital (Israel)
1991	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Kira (Japón) Solidimension 3DSystems
1991	Inyección de fotopolímero Jetted photopolymer	Resina fotosensible en estado líquido	Brother Kogyo Kabushiki Kaisha (Japón)
1992	Deposición de hilo fundido Fused deposition modelling — FDM	Material fundido o semifundido	Stratasys
1992	Partículas disparadas con material soporte Inkjet whit second support material	Material fundido o semifundido	3DSystems Solidescape
1992	Modelado multibojilla Multijet modeling (Thermal SL) — MJM	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1993	Proyección aglutinante Direct shell production casting — DSPC	Material particulado	Soligen
1993	Impresión tridimensional 3D printing — 3DP	Material particulado	Zcorp Prometal
1993	Partículas metálicas disparadas Liquid metal jet printing — LMJP	Material fundido o semifundido	Incre
1998	Fusión por rayo de electrones Electron beam melting — EBM	Material particulado	Arcam limited (UK)
2000	Conformado láser de material particulado Laser powder forming — LPF	Material particulado	Optomec
2001	Prototipado rápido congelado Rapid freeze prototyping — RFP	Agua en estado líquido	New Jersey Institute of Technology
2001	Variante de estereolitografía Stereolithography (variant) — SL	Resina fotosensible en estado líquido	University of Connecticut
2003	Variante de sinterizado selectivo láser Selective laser sintering (variant) — SLS	Material particulado	Speed part RP AB (Suecia)
2003	Sinterizado selectivo por inhibición Selective inhibition sintering — SIS	Material particulado	University of Southern California

TABLA 2. Características generales representativas de las principales tecnologías en manufactura por capas ^[2].

	SL	SLS	LOM	FDM	SGC	3DP
Dimensiones máximas (cm)	19x19x25 25x25x25 50x50x60	030x38	25x33x38	30x30x30	35x50x50	40x50x60
Ventajas	Velocidad Precisión	Materiales Autosoporte	Velocidad Precisión Material	Limpia Materiales Velocidad	Precisión Prop.mec.	Velocidad Precio Color
Desventajas	Soportes Postproceso	Tamaño Peso Acabado	Contamina	Acabado	Tamaño Peso Precio	Tamaño Peso Acabado
Precio (US\$)	95000 185000 385000	350000 a 400000	75000	180000	490000	30000 a 70000
Materiales	Polímero	Polímero Metal Cerámico	Polímero	Polímero	Polímero	Polímero Cerámico
Precio (US\$/lb)	75a110	30a60 25a30	5a8 9	115a185	75a110	0.35 0.6

1. MANUFACTURA POR CAPAS (LM)

Definición general

La manufactura por capas (LM) comprende un conjunto de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad que permiten la obtención de piezas sólidas a partir de modelos o prototipos virtuales creados con casi cualquiera de los programas CAD (diseño asistido por computador) de modelamiento tridimensional disponibles en el mercado, en tiempo relativamente corto, bajo consumo de energía (eléctrica) y contaminación casi nula (pocas emisiones, poco ruido).

El desarrollo de la manufactura por capas (LM) inicia en el desarrollo de tecnologías de prototipado rápido (rapid prototyping), creadas para permitir a los diseñadores interactuar rápidamente (en comparación con los demás procesos de fabricación) y a bajo costo con prototipos conceptuales de los productos que diseñan. El gran crecimiento en la utilización de estas herramientas y el mejoramiento de sus prestaciones las ha llevado hasta la fabricación de productos terminados además de prototipos. Las principales aplicaciones de LM hoy en día pueden clasificarse en tres grandes grupos: 1° Prototipado rápido (rapid prototyping / RP), 2° Herramientas rápidas (rapid tooling / RT) y 3° Manufactura rápida (rapid manufacturing / RM); RT comprende la fabricación de patrones y modelos para fundición e inyección, e inclusive, la fabricación de moldes y RM comprende la fabricación de productos de consumo masivo, es un campo bastante amplio que incluye aplicaciones en sectores industriales como el automotriz o inclusive el biomédico. Lo anterior se debe a la diversidad de materiales y procesos que la LM comprende. Este trabajo pretende estudiar el potencial de esta tecnología aplicada a los campos de herramientas y manufactura rápida (RT / RM), dada la poca aplicación actual del prototipado real conceptual en Colombia.

Prototipado rápido (RP)

Aún así es importante resaltar la importancia que tiene la promoción del prototipado como herramienta de diseño para el desarrollo del sector industrial nacional pues permite la optimización del proceso de desarrollo de los diversos productos desde su fase conceptual hasta su fase comercial obteniendo así productos de mejor calidad.

El prototipado es una herramienta de diseño que permite la optimización iterativa de los productos, mejorando sus aspectos estéticos, ergonómicos, evaluando aspectos de fabricabilidad o evaluando la compatibilidad de diferentes piezas, en general realizando una serie de pruebas conceptuales o funcionales al prototipo, que difiere del producto en su escala, material o proceso de fabricación, pero que permite la evaluación y mejora iterativa del producto por retroalimentación generada en la interacción del diseñador, fabricante o usuario con el prototipo. Los prototipos pueden ser virtuales o reales, el prototipado virtual permite disponer del modelo tridimensional del producto en el computador mediante la aplicación de herramientas CAD de modelamiento para hacer simulaciones, cálculos, análisis por elementos o volúmenes finitos, pruebas de materiales o en condiciones de trabajo, modificación de formas y dimensiones, renderizados o animaciones. Los prototipos reales pueden ser conceptuales o funcionales según las propiedades que en él se

deseen evaluar. El prototipado virtual ha venido adquiriendo fuerza y reconocimiento como valiosa herramienta de diseño en Colombia, el prototipado real es una herramienta bien conocida por todos los diseñadores y muy aplicada en Colombia pero con el uso de prototipos funcionales, el uso de prototipos reales conceptuales no es para nada común en este entorno.

Proceso general LM

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

1° Prototipado virtual: creación del modelo CAD

2° Preparación del modelo y del equipo

3° Fabricación de la pieza

4° Postproceso.

Prototipado virtual ^[3]

Existen muchos programas CAD que permiten el modelado de sólidos entre ellos SolidWorks, SolidEdge e Inventor, estos programas utilizan diversos métodos de representación de sólidos construidos en el manejo matemático de superficies y curvas y su representación, estos métodos incluyen: estructura de alambre (wire frame), modelos primitivos o parametrizados, descomposición por celdas, enumeración de ocupación espacial, octrees, modelado de forma libre (free form modeling), geometría constructiva sólida (constructive solid geometry), representación límite de cuerpos (boundary representation / BRep) o representación por barrido (sweep). Las propiedades deseables para el diseñador, a la hora de seleccionar su software de modelamiento para la utilización de un equipo de manufactura por capas (LM) pueden ser: la representación no debe ser ambigua, la representación debe codificar cualquier sólido de igual manera, debe contar con un dominio lo suficientemente grande, evitar las aproximaciones en el modelo, hacer imposible la creación de un modelo inválido, facilidad para crear representaciones, los modelos deben mantener su unión durante rotación y traslación, crear archivos compactos, permitir el uso de algoritmos de cómputo y lo más importante, que permita la conversión de dichos archivos al formato .STL (formato estandarizado en los equipos de tecnología LM).

Preparación del modelo y del equipo ^[3]

El formato .STL es un método simple de almacenar información acerca de objetos tridimensionales desarrollado por 3DSystems (EEUU), es el formato estándar de transferencia de archivos CAD. Un archivo .STL describe un modelo por medio de la superficie que lo encierra (BRep) con carácter aproximada, pues la descompone en pequeños triángulos definidos cada uno por sus tres vértices y un vector unitario normal al plano del triángulo que define si la superficie es interior o exterior, los cuatro vectores son especificados por doce coordenadas espaciales debidamente referenciadas a un origen común. Durante la conversión del modelo a archivo .STL en el programa CAD ocurren diversos errores: truncamiento, normales inconsistentes, normales incorrectas, vacíos, muros internos, caras degeneradas o intersecciones incorrectas, lo anterior ha dado pie al desarrollo de programas de reparación que se encargan de identificar y corregir errores en los archivos .STL.

El equipo posee un programa CAD/CAM (diseño y manufactura asistidos por computador) encargado de la preparación del modelo, esto consiste en tomar el archivo .STL corregido y someterlo a los procesos de orientación, rebanado, generación de soportes y planeación de trayectorias. La orientación es el posicionamiento de la pieza en el espacio de trabajo y la determinación de la dirección de fabricación de la pieza, tiene implicaciones en el tiempo y costo de la operación, exactitud, acabado y propiedades mecánicas de la pieza y necesidad de soportes. El rebanado es la intersección del modelo con planos perpendiculares a la dirección de fabricación separados una distancia igual al grosor de la capa que permite el equipo, el programa calcula la recta de intersección con cada triángulo cortado y une todas las rectas para determinar el contorno de cada capa para la obtención de la pieza. Los soportes son utilizados para servir de apoyo temporal a salientes de la pieza, mantener su estabilidad, sostener paredes horizontales o inclinadas o prevenir la contracción, no todas las tecnologías requieren la generación de soportes, pero en las que sí el programa permite generalmente el control de los parámetros de generación. La planeación de trayectorias consiste en buscar la forma en que serán construidos los contornos y las capas de la pieza, afecta el tiempo de la operación, exactitud, acabado y propiedades mecánicas de la pieza. Al finalizar este proceso el programa del equipo ha permitido el análisis del archivo CAD .STL y la creación de un archivo CAM en términos CNC (control numérico

computacional) que contiene toda la información que define los parámetros de proceso como son: las trayectorias “x-y” (continuas o discontinuas) que seguirá el cabezal para crear la capa, el descenso “z” de la mesa que soporta las capas creadas, la velocidad de los movimientos y los demás parámetros propios de cada tecnología como intensidad de radiación o presión de inyección.

Fabricación de la pieza

Los movimientos del cabezal y la mesa del equipo son guiados y controlados por tornillos accionados por servomotores controlados a su vez por el PLC (controlador lógico programable) programado con el archivo CAM por el programa CAD/CAM del equipo; la precisión en el posicionamiento esta dada, entre otros, por el paso del tornillo; la velocidad de los movimientos se controla manipulando la frecuencia de los pulsos eléctricos que provocan el giro del motor.

La manufactura por capas (LM) es un proceso de fabricación de tipo aditivo, a diferencia del mecanizado y otros procesos de remoción de material los que el avance de materia prima a producto terminado se obtiene quitando material al inicial, en este dicho avance se obtiene agregando material al inicial capa por capa, lo que lo distingue de otros procesos de fabricación en los que todo el material se agrega casi en bloque como moldeo por inyección. Esto último genera gran diferencia en las propiedades de los productos fabricados por diferentes procesos. Los productos fabricados por procesos de manufactura por capas (LM) presentan alta anisotropía, más que por las capas en sí, por las trayectorias, pues estas crean una serie de interfaces cara / cara al interior del producto.

La fabricación de las piezas varía de un equipo a otro según sea la tecnología que se aplica, la variedad de procesos y materiales que ofrecen las principales tecnologías de LM serán el objetivo de estudio de las siguientes secciones.

Vale la pena resaltar que tres de las principales tecnologías de LM incluyen en su proceso la utilización de tecnología láser (luz amplificada por estimulación simulada de radiación). Los láser son dispositivos que permiten la emisión de haces de radiación con gran variedad de propiedades estrechamente controladas, por lo tanto sus aplicaciones son muy diversas, en el campo de LM se utiliza láser para propiciar la polimerización de resinas poliméricas inicialmente en estado líquido (SL), la sinterización de polvos metálicos o cerámicos (SLS), la fusión de polvos poliméricos (SLS) o para cortar los contornos de las capas en hojas de papel o de polímero reforzado (LOM). El tipo de láser utilizado en cada proceso se describe como parámetro de proceso más adelante para cada tecnología, estos varían desde radiaciones UV a IR con diversas intensidades.

Postproceso

Dependiendo de la tecnología aplicada o de las propiedades requeridas de la pieza se hace necesario el postproceso de los productos de LM, esto puede incluir remoción de soportes, taladrado, acabado superficial, recubrimientos, tratamiento térmico, limpieza, pintura, aplicación de variedad de revestimientos y otros. La necesidad de postprocesamiento se estudiará para cada tecnología en las siguientes secciones.

1.1 Estereolitografía (SL)

Proceso SL

La figura 1 ilustra de manera esquemática el proceso de fabricación de la pieza con la tecnología SL. Consta de un recipiente que contiene un volumen determinado de resina polimérica fotosensible que polimeriza al ser irradiada con energía UV emitida por el láser; el sistema óptico consta del dispositivo láser y el equipo de deflexión (lentes y espejos), es el responsable de la orientación y velocidad en la formación de las trayectorias x-y que generan cada capa. El movimiento vertical es responsabilidad del sistema de elevación de la plataforma, que tras la solidificación de cada capa desciende una altura igual al espesor de capa para iniciar la formación de la siguiente. La figura muestra además un dispositivo dispersor responsable de homogenizar la capa de resina previa a su exposición a la radiación. Las piezas obtenidas pueden requerir de un postcurado o procesos de remoción de soportes. La creación de soportes para superficies horizontales es necesaria por ser un proceso en estado líquido.

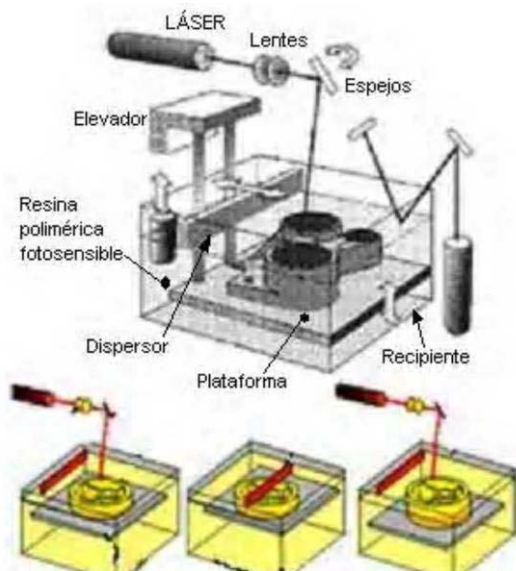


Figura 1. Esquemas proceso SL

Materiales SL

Los fotopolímeros ofrecidos por 3DSystems y Sony/D-MEC para estereolitografía ^[4], ^[5] son resinas en estado líquido de densidades entre 1.1 y 1.6g/cm³ y viscosidades variables de 150 a 1800cps (ver las tablas A1, A2, A3 y A4 en el ANEXO A), la cantidad de energía de exposición necesaria para la polimerización y la profundidad de penetración no son características propias del material, son importantes variables de proceso que están estrechamente relacionadas con el sistema óptico utilizado y por tanto con el equipo en sí. Las piezas terminadas son sometidas a gran variedad de ensayos de caracterización de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, dimensionales, de apariencia y demás que sean necesarias para establecer la calidad esperada de los productos, dichas propiedades son las que caracterizan el comportamiento del material en condiciones de trabajo; 3DSystems y Sony/D-MEC ^[4], ^[5] reportan los resultados de dichos ensayos haciendo referencia a la norma ASTM que los rigió, se reportan resistencias a la tensión de 22 a 85MPa, límites elásticos de 1100 a 11700MPa, elongaciones del 0.56 al 25% y durezas entre 81 y 92ShoreD; temperaturas de deflexión a 66psi de 49 a 284°C, temperaturas de transición vítrea de 58 a 103°C y coeficientes de expansión térmica por debajo de la temperatura de transición vítrea entre 33 y 107µm/mm°C y por encima de la temperatura de transición de entre 81 y 190µm/mm°C. Para algunos materiales se reportan las propiedades con postcurado, su influencia sobre las propiedades es notable al comparar con las mismas medidas en la pieza sin tratamiento. Este gran ramillete de propiedades representa un gran potencial para los fotopolímeros caracterizados, los fabricantes aseguran que pueden reemplazar materiales como el ABS, polipropileno, policarbonado o nylon en sus aplicaciones.

Equipos SL

La figura 2 muestra tres equipos desarrollados por tres importantes compañías, 3DSystems (norteamericana) ^[4], Sony / D-MEC (japonesa) ^[5], Fockele & Shwarze (alemana) ^[6]. Las compañías reportan las principales características de sus equipos (ver la tabla B1 en el ANEXO B), ellas incluyen tamaño máximo de la pieza que se puede fabricar que varía de 25x25x25cm a 100x80x50cm para equipos que pesan de 470 a 2920kg, información del sistema óptico, el tipo de láser es generalmente de estado sólido con potencias de 100 a 2000mW, velocidades de trazo de 2 a 25m/s y espesores de capa de 0.005 a 0.2mm; reportan además información acerca del equipo de deflexión (tipo y mecanismo de funcionamiento), del mecanismo elevador (velocidad de ascenso / descenso durante operación), de la cuba o recipiente que contiene la resina (volumen, intercambiable), del software de preparación (tipo de programa, utilidades) y de componentes adicionales opcionales que ofrecen como hornos para postprocesamiento, máquinas lavadoras o equipos para el transporte de los modelos (ver figura 3). Con respecto al software cabe anotar que los equipos vienen provistos de una CPU (unidad central de procesamiento) que consta de un procesador convencional (Pentium, Athlon, otros) con velocidad normal 2.8 — 3GHz y con administrador de programas convencional también (generalmente Windows NT), de manera que el

programa de preparación trabaja lenguaje común a Windows y ofrece interfaz usuario-equipos con entorno tradicional de ventanas y barras de herramientas al que ya se está acostumbrado, el equipo viene dotado entonces de monitor de buena resolución, teclado, mouse y puertos de red para control remoto.

Aplicaciones SL

A continuación se listan algunos de los productos fabricados por SL clasificados según su aplicación, los numerales remiten a la figura 4 que presenta las imágenes ilustrativas ^{[4], [5], [7]}.



Figura 2. Equipos SL: a) ViperHA (3DSystems), b) Acculas (Sony! D-MEC), c) Realizer (F&S)



Figura 3. Equipos accesorios SL. a) Cuba de doble cámara, b) Lavadora, c) Horno UV para postcurado, d) Carro transportador que permite a una sola persona manipular fácilmente varias piezas.

Manufactura rápida:

- a. Componentes funcionales para ensamblar en interfaces usuario-equipos en electrodomésticos, automóviles y variedad de máquinas y dispositivos de uso diario.
- b. Carcasas, cubiertas o compartimientos ergonómicos para dispositivos electrónicos y electrodomésticos en general.
- c. Componentes para ensamble a presión, conexión o acople en variedad de dispositivos.
- d. Componentes funcionales en juguetes y juguetería en general.
- e. Componentes traslucidos o transparentes en variedad de dispositivos.
- f. Aplicaciones médicas en instrumentación, investigación o seguridad ocupacional.
- g. Aplicaciones en artes plásticas.

Fabricación rápida de modelos y moldes:

- h. Modelos para fabricación de moldes para procesos de moldeo por vaciado o inyección en general, incluyendo modelos para procesos de fundición en arena, yeso o cerámica, moldeo por concha o moldeo al vacío. Modelos en general.
- i. Modelos para la fabricación en moldes de silicona de modelos de cera para procesos de fundición a la cera perdida.

Prototipado rápido:

- j. Prototipos para marketing de productos.
- k. Prototipos conceptuales para diseño iterativo de productos.
- l. Prototipos funcionales para experimentación y evaluación de propiedades de productos.
- m. Fabricación de preseries de productos que serán fabricados en masa para evaluación de parámetros.



Figura 4. Productos de

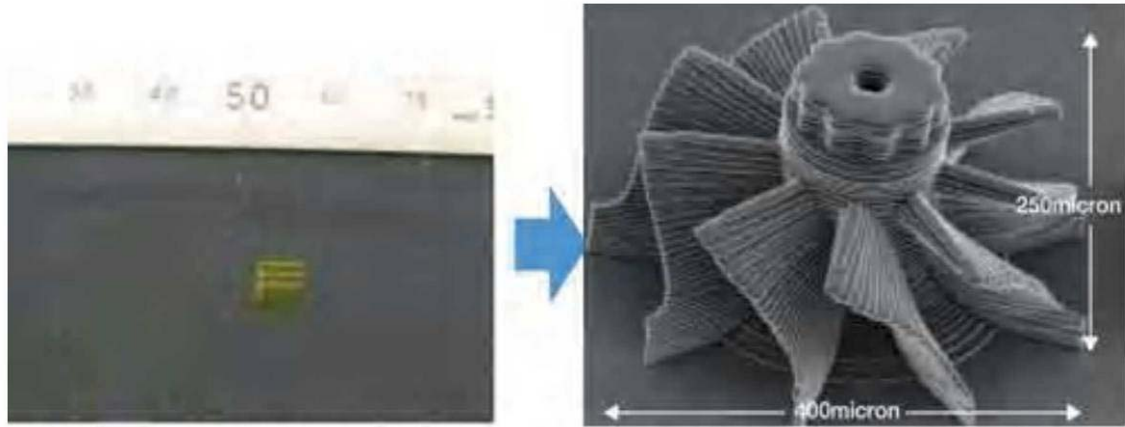
manufactura rápida (RM) fabricados por SL.

Actualidad SL

La diversidad de materiales poliméricos hasta ahora expuestos y productos SL presentados tienen propiedades similares a las de polímeros como ABS, polipropileno, policarbonato, nylon 6:6 o resinas epóxicas después de conformado por procesos tradicionales de moldeo o maquinado, permitiendo velocidades y costos de producción, propiedades físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas y condiciones de acabado superficial y apariencia muy competitivas. La figura 4 ilustra la diversidad de posibilidades, en 4(a) se puede apreciar un panel de pasacintas y un panel de instrumentos de un vehículo, ambos fabricados obviamente a escala real, la estatua de Kouros ^[7] en 4(g) tiene una altura de 1,86m, en 4(h) e (i) se ilustran modelos a escala real de parachoques y rim de vehículo, 4(j) ilustra con los procesos de recubrimiento permiten la creación de prototipos para marketing de gran utilidad. La actualidad de la estereolitografía implica el uso de nanocomposites (polímeros reforzados) y aplicaciones de microfabricación, la figura 5 ilustra una aplicación de este tipo ^[5].



Figura 4 (continuación). Variedad de modelos y prototipos fabricados por SL.



a.) 18 rotores, tiempo de fabricación 1 hora b.) 1 rotor visto por microscopia electrónica
 Figura 5. Microfabricación por SL (equipo Acculas de Sony/D-MEC) ^[5].

Tecnologías afines

El constante trabajo alrededor del desarrollo de LM y de aplicaciones de fotopolímeros ha llevado a la aparición de tecnologías como la fabricación automática diseño controlado (design controlled automatic fabrication — De5CAF — lightsculpting / 1988), la fotopolimerización por UV (solid ground curing — SGC — cubital /1990), la inyección de fotopolímero (jetted photopolymer — brother Kogyo Kabushiki Kaisha — 1991), el modelado multibocilla (multijet modeling — 3DSystems — 1992). Las dos primeras difieren de la tecnología descrita en el hecho de que polimerizan cada capa a la vez, irradiando la energía necesaria para la solidificación a través de una mascarilla que contiene el patrón que define la forma de la capa, difieren entre ellas por la forma como se crea la mascarilla; el proceso se describe en la figura 6, la máscara es generada en un proceso de electrofotografía (xerografía), al mismo tiempo se aplican a la pieza las nuevas capas de resina fotosensible y cera (material de soporte) cuyo espesor de capa es homogenizado antes de pasar a la celda de irradiación donde la pieza es sometida a una descarga de energía a través de la máscara, luego pasa a limpieza por succión de material residual y enfriamiento antes de empezar de nuevo el ciclo, es de esperarse piezas de mejores propiedades por tener menos interfaces cara — cara en su interior y son piezas que generalmente no requieren de postcurado por la intensidad de aplicación de energía propia del proceso. La tecnología De5CAF difiere de la SGC en que la generación de máscaras se hace empleando una impresora láser corriente. La inyección de fotopolímeros y el moldeado multibocilla serán temas de la sección 2.5, pero también representan una extensión del uso de resinas fotosensibles en la manufactura por capas.

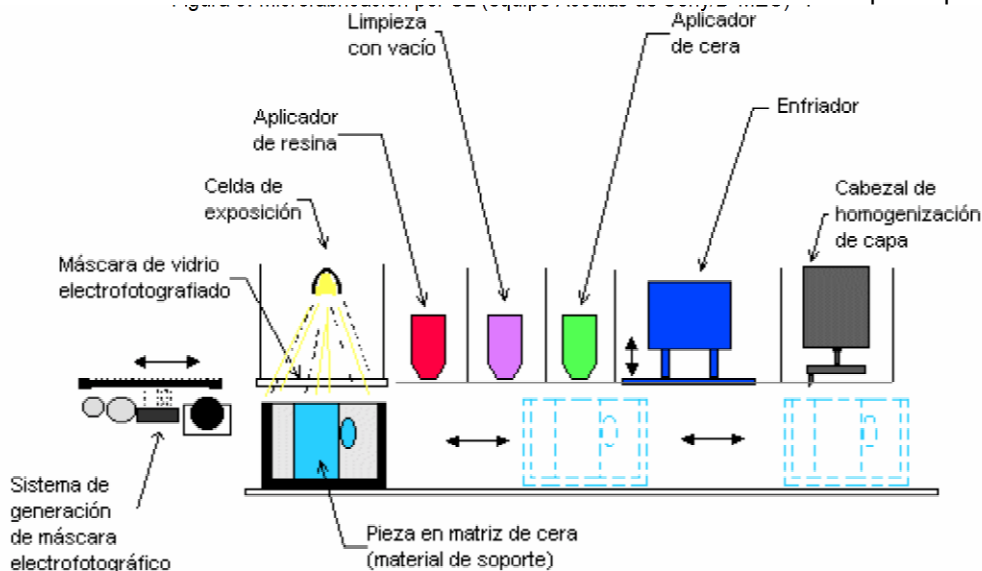


Figura 6. Esquema proceso SGS

1.2 Sinterizado Selectivo Láser (SLS)

Proceso SLS

La figura 7 ilustra de manera esquemática el proceso de fabricación de la pieza con SLS. Consiste en depositar proceso de la tecnología una capa de polvo sobre la plataforma que se encuentra a una temperatura ligeramente inferior a la Cabezal de homogenización de capa temperatura de fusión del material de trabajo, seguidamente un láser sinteriza los puntos seleccionados siguiendo las trayectorias establecidas por el programa de preparación para crear la pieza. La sinterización implica el calentamiento del polvo a una temperatura por debajo del punto de fusión para generar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza, este mecanismo difiere de la fusión, pero con un control riguroso de los parámetros puede obtenerse el grado de fusión deseado. El aporte de nuevas capas se realiza mediante un proceso de alimentación en el que un pistón impulsa el polvo a la superficie donde un rodillo se encarga de esparcirlo uniformemente sobre la plataforma para formar la capa a sinterizar, este proceso se repite una y otra vez hasta formar la pieza. Al igual que los equipos de estereolitografía estos cuentan con sistema óptico compuesto por el dispositivo láser y el equipo de deflexión y con sistema de elevación computarizado preciso que controla el ascenso y descenso de plataforma y pistones. Las piezas SLS pueden o no someterse a postprocesamiento para mejorar su calidad, los procesos de infiltración permiten la obtención de piezas totalmente densas y afectan fuertemente sus propiedades. Su fabricación generalmente no necesita de soportes dado que el material siempre se encuentra en estado sólido.

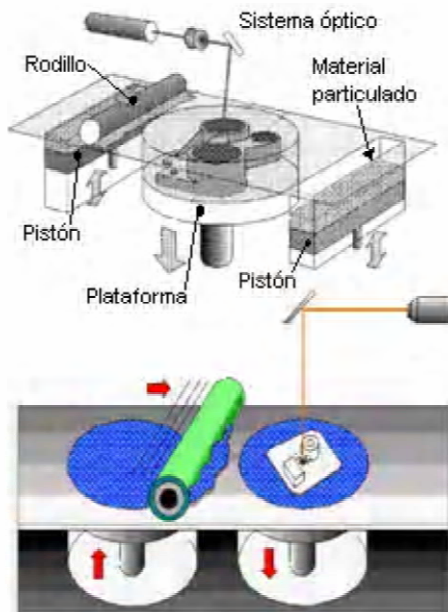


Figura 7. Esquema proceso SLS

Materiales SLS

Los materiales Duraform® y Laserform®, materiales polimérico y metálico respectivamente, que ofrece la compañía 3DSystems para SLS ^[4], son polvos con tamaños medios de 48 a 93µm y puntos de fusión 63 a 192°C para los polvos poliméricos (ver las tablas A4 y A5 en el ANEXO A), las piezas terminadas reportan resistencias a la tensión entre 1.8 y 44MPa para polímeros y entre 435 y 610MPa para metales, igualmente módulos de elasticidad de 7.4 a 5910MPa y de 137 a 138GPa, elongaciones de 1.5 a 130% para polímeros y de 2 a 10% para metales. Las piezas terminadas tienen un grado de porosidad propia del proceso y admiten infiltración para mejora de propiedades e incremento de densidad, los fabricantes reportan comparaciones en las propiedades de algunos materiales con o sin infiltración.

Equipos SLS

La figura 8 es un esquema de la distribución de equipos en un sistema SLS ^[4], en el se visualiza la ubicación recomendada de los componentes que son: el equipo SLS en sí (dos de los equipos de las empresas 3DSystems — EEUU y Electro Optical Systems — Alemania se presentan en la figura 9^{[4], [8]}), el carro transportador especial que viaja entre las estaciones térmica, de remoción y

el equipo SLS continuamente, en la estación térmica se precalienta la plataforma, en el equipo se fabrican las piezas y en la estación de remoción se separan del polvo sobrante para enviar este a la estación de reciclaje donde se mezcla con polvo nuevo proveniente de la estación de materia prima, el polvo mezclado alimenta el equipo. El equipo puede tener incorporados o independientes enfriador y generador de nitrógeno, la figura 9 muestra un dispositivo generador de nitrógeno ofrecido por 3DSsystems como equipo accesorio y un horno para postprocesamiento de las piezas terminadas, sinterizado e infiltración.

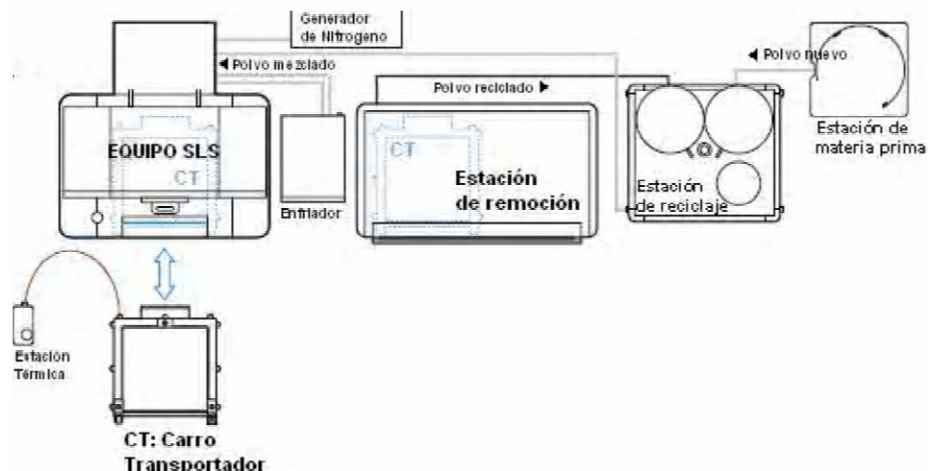


Figura 8. Vista en

planta de la distribución de equipos en un sistema SLS ^[4].

EOS ^[8] y 3DSsystems ^[4] reportan las principales características de algunos de sus equipos SLS (ver la tabla B2 en el ANEXO B), utilizan láser generalmente de CO₂ de potencias entre 50 y 200W, velocidades de trazo de 3 a 10m/s y permiten espesores de capa de 0.02 a 0.2mm; estos equipos pueden fabricar piezas de 25x25x21.5cm los de menor capacidad a 70x38x58 los de mayor y requieren espacios de instalación de hasta 5x5x3m.



(a)



(b)

Figura 9. Equipos SLS: a) EOSINT® P700 (EOS — Alemania) ^[8], b) Sinterstation® PRO (3DSsystems) ^[4].



Figura 9 (continuación). Equipos accesorios SLS (3DSYSTEMS) ^[4]: a) Generador de nitrógeno, b) Horno Laserform®.

Aplicaciones SLS

La tecnología SLS presenta aplicaciones similares a las de SL en manufactura rápida, pero introduce materiales metálicos y cerámicos a la gama de posibilidades: componentes funcionales, carcasas, cubiertas, compartimientos, componentes para ensamble a presión, conexión o acople, componentes funcionales en juguetes y juguetería en general. En fabricación rápida de modelos y moldes, la aparición de los nuevos materiales implica la posibilidad de fabricación directa de moldes. En el prototipado rápido se obtienen prototipos cada vez más realistas y funcionales e igualmente se potencia la fabricación de preseries y la manufactura rápida en sí. La figura 10 presenta algunas aplicaciones de SLS por 3DSYSTEMS y EOS.



Figura 10. Productos fabricados por SLS.

Actualidad SLS

Las piezas obtenidas en polímero simulan igual que en SL las propiedades de piezas moldeadas u obtenidas por mecanizado de bloques de ABS, polipropileno, poliestireno o poliamida además de materiales elastómeros termoplásticos (Duraform® FLEX, figura 10) y ceras de fundición, este

último aspecto implica que ahora se puede fabricar el modelo para fundición a la cera perdida directamente del archivo CAD en polímeros SLS similares, se pueden infiltrar con cera para mejores prestaciones. Infiltraciones en polímeros permiten diversidad de colores (figura 10). Además, el desarrollo de un composite por la infiltración de Aluminio ha permitido obtener piezas en polímero con el acabado y la apariencia del aluminio fundido (Duraform® AF). El equipo EOSINT® S750 de EOS (Alemania) se desarrollo para la sinterización de arena para la fabricación directa de moldes de arena sin necesidad de modelo, de igual manera los aceros infiltrados con cobre (Laserform ST100) permiten la fabricación de matachos y moldes para inyección y vaciado de polímeros o metales de bajo punto de fusión.

Tecnologías afines

La fusión por rayo de electrones (electron beam melting — EBM) es similar a SLS, reemplaza el rayo láser por un rayo de electrones mejorando la eficiencia y reduciendo los costos y la contaminación, la figura 11 presenta un acople fabricado con este proceso y luego mecanizado. El conformado láser de material particulado (laser powder forming — LPF) y tecnologías similares como Laser Engineered Net Shaping - LENS de Sandia Corp. y Direct Metal Deposition System - DMDS de Optomec difieren de la tecnología SLS en que emplean un cabezal de deposición para aplicar metal en polvo haciéndolo pasar por el foco de un rayo láser que lo funde inmediatamente antes de su aplicación, la figura 12 ilustra el proceso descrito y la figura 13 presenta unas válvulas de titanio f 3das por LENS.



Figura 11. Producto fabricado

por EBM

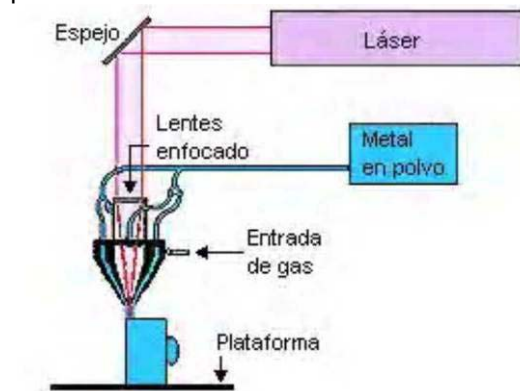


Figura 12. Esquema proceso LPF



Figura 13. Producto fabricado por LENS

1.3 Fabricación Laminada (LOM)

Proceso LOM

La figura 14 muestra que el material inicial es una hoja delgada enrollada en un rodillo alimentador conectada a un rodillo colector pasando sobre la plataforma de trabajo, el material es generalmente papel encolado (bañado en resina polimérica) que al ser posicionado sobre la plataforma es apisonado por un rodillo caliente de tal manera que la nueva capa de material se adhiera a la anterior. El equipo esta compuesto por una serie de sistemas, el sistema óptico compuesto por el dispositivo láser, equipo de deflexión (lentes y espejos) y el cabezal óptico x-y, se encarga del corte

del contorno de cada capa a una profundidad igual al espesor de la hoja de material, el sistema alimentador se encarga de proveer el material para cada capa a una temperatura preestablecida y recolectar parte del desperdicio de materia prima, el sistema elevador de la plataforma desciende un espesor de hoja a cada paso del proceso y por el último el sistema laminador que consta de un rodillo caliente se encarga de presionar cada nueva capa sobre la anterior permitiendo la adherencia entre ellas. No es necesario el uso de soportes, el proceso es en estado sólido.



Figura 14. Esquemas proceso LOM

Materiales LOM

El material SMS®402 de Helisys / Cubic Technologies ^[9], empresa norteamericana creadora y comercializadora de la tecnología LOM, es papel encolado en polímero termoplástico para adherencia (ver la tabla A6 en el ANEXO A). La empresa reporta las propiedades mecánicas a tensión y compresión teniendo en cuenta la dirección de acción de los esfuerzos, bien sean normales o paralelos a las capas, es evidente la anisotropía de las piezas terminadas, la resistencia a la tensión normal es de 1.4MPa contra 26MPa en dirección paralela, a compresión normal 115MPa y paralela 15MPa. Cubic Technologies ^[9] ofrece una serie de productos para limpieza y lacas para terminado de los productos que pueden utilizarse en postprocesamiento de las piezas terminadas.

Equipos LOM

Los principales equipos LOM ofrecidos por Helisys / Cubic Technologies (EEUU) ^[9], utilizan láser CO₂ de 25 a 50W con velocidades de corte de 46cm/s, el sistema alimentador admite espesores entre 0.08 y 0.25mm, ejerce una presión para adherencia cercana a los 18kg y puede alimentar a temperaturas entre 66 y 399°C (ver la tabla B3 en el ANEXO B), fabrican equipos con capacidades máximas en tamaño de pieza a fabricar desde 28x18x15cm hasta 81x56x51cm, dichos equipos pueden pesar desde 320 hasta 1430kg y requerir áreas de instalación de hasta 5x4m. La figura 15 muestra un equipo LOM.



(a)



(b)

Figura 15. Equipos LOM: a) Helisys 2030H (EEUU) ^[9], b) Kira

Corp. PLT A3 (Japón) ^[10].

Aplicaciones LOM

Las aplicaciones de esta tecnología se ven restringidas por las propiedades de los materiales empleados, los productos obtenidos presentan un terminado semejante al de la madera, en la figura 16 pueden apreciarse algunas piezas. En manufactura rápida sus aplicaciones son más de tipo estético u ornamental que funcional, mientras que en fabricación rápida de modelos se fabrican buenos modelos para fundición en arena con la excelente precisión propia de las tecnologías CAD/CAM de la manufactura por capas, produce además excelentes prototipos conceptuales para evaluación de forma y marketing.



Figura 16. Productos fabricados por LOM.

Actualidad LOM

Los equipos Helisys permiten diversidad de materiales en forma de hoja continua enrollada, el desarrollo de dichos materiales a llevado a la producción de láminas de polímero y composites para incrementar así el potencial de esta tecnología ^[9], el material SMS®042 es papel encolado de alto desempeño, el papel estándar es más pobre en sus propiedades mecánicas mientras que los polímeros y nuevos composites ofrecen diversidad de mejoras en lo que a aplicaciones se refiere.

Tecnologías afines

Las empresas 3DSYSTEMS (EEUU) y Kira Corp. desarrollaron los equipos InVision® LD 3D printer y la serie PLT respectivamente, que aplican la tecnología Paper Lamination Technology — PLT, similar a LOM pero difiere en el proceso de corte porque ya no es láser, es mecánico (con cuchilla), además la aplicación del adhesivo incorporó procesos xerográficos, la figura 17 ilustra el proceso. La figura 15 presenta un equipo PLT de Kira Cora. La figura 18 presenta el equipo InVisionR LD 3D printer y algunos productos fabricados con el, el material VisiJet® LD100 es un polímero distribuido en rollos de diámetro 20cm y altura 21cm que pesan cerca de 8kg, la hoja tiene un espesor de 0.15mm, este es un ejemplo del estado de entrega de la materia prima en LOM y PLT.

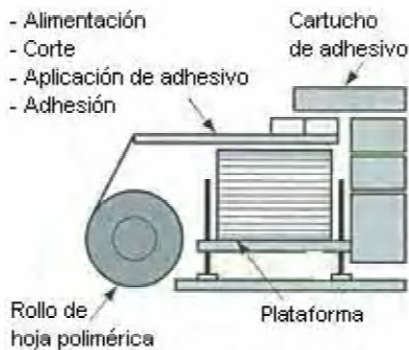


Figura 17. Esquema proceso PLT y sheet lamination

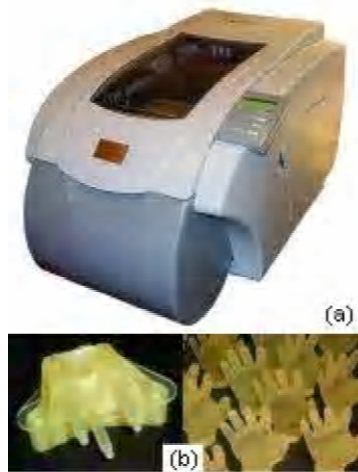


Figura 18. a) Equipo Sheet Lamination: InVision® LD, b) Productos fabricados por sheet lamination con material VisiJet® LD100 (3DSYSTEMS - EEUU) ^[9].

1.4 Deposición de Hilo Fundido (FDM)

Proceso FDM

Las tecnologías que faltan por describir en este informe difieren de las anteriores en que no utilizan tecnología láser dentro de su proceso de fabricación. La figura 19 ilustra el proceso FDM, una boquilla que se mueve en el plano x-y horizontal deposita un hilo de material a 1°C por debajo de su punto de fusión, este hilo se solidifica inmediatamente sobre la capa precedente, dicho hilo proviene de un rollo que alimenta el cabezal, éste último calienta el filamento hasta fundirlo y controla la salida de este filamento sobre la superficie en construcción con un juego de rodillos alimentadores. El cabezal se encuentra sobre una pieza metálica que se mueve en el plano XY dando forma al modelo a fabricar, el filamento una vez depositado en la estructura se demora menos de 0.1 segundos en enfriarse, permitiendo así que se pueda depositar rápidamente la siguiente capa. La necesidad de crear soportes para superficies horizontales es evidente pues no

hay material alrededor de la pieza terminada, los soportes se hacen en otro material fácil de remover empleando una boquilla adicional como se ve en la figura 19. La gráfica ilustra además un detalle del cabezal en el que puede apreciarse esquemáticamente la disposición de los calentadores y los rodillos alimentadores. Al igual que todas las tecnologías descritas en este informe FDM cuenta con preciso control CNC para todos los sistemas que componen sus equipos, movimientos x-y de la plataforma, velocidad de alimentación con rodillos accionados por servomotor, temperatura de deposición y demás parámetros de proceso. Los empleados postprocesamiento para mejora de propiedades además de los procesos comunes de limpieza, acabado y remoción de soportes.

Materiales FDM

La compañía Stratasys (norteamericana) ^[11] presenta las principales propiedades mecánicas y térmicas de los materiales FDM que ofrece, son polímeros comunes en manufactura, policarbonato, ABS y polifenilsulfona con resistencias a la tensión de 22 a 55MPa, módulos de elasticidad de 1625 a 2070MPa, elongaciones del 3 al 6% (ver la tabla A7 en el ANEXO A), las propiedades reportadas son muy sensibles a las condiciones de proceso y la orientación del modelo, al igual que en las demás presentadas en este informe, esto obedece al tema de anisotropía generada en la manufactura por capas antes expuesto. El policarbonato está disponible en color blanco, el policarbonato ISO en blanco o translúcido, la polifenilsulfona en marrón, el policarbonato — ABS en negro y el ABS viene en negro, azul, rojo, verde, amarillo o gris, es evidente el abanico de posibilidades que este hecho evitando postprocesamiento.

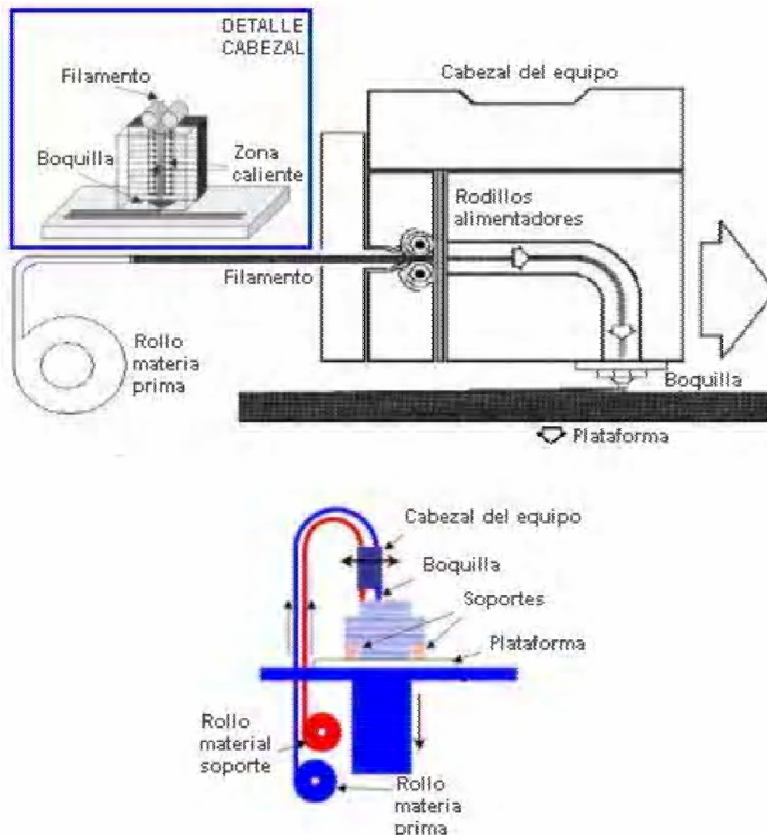


Figura 19. Esquemas proceso

FDM

Equipos FDM

La figura 20 presenta dos equipos FDM de Stratasys ^[11]. Stratasys es la única compañía fabricante y distribuidora de FDM, tecnología desarrollada por ellos. Los equipos permiten el empleo de distintos materiales, de este depende el espesor de capa al que se debe ajustar el equipo cambiando la boquilla, este espesor de capa varía de 0.125 a 0.25mm. Estos equipos tienen capacidades máximas en tamaño de pieza a fabricar desde 20x20x30cm hasta 60x50x60cm,

dichos equipos pueden pesar desde 130 hasta 1135kg y ocupar espacios desde 0.7x0.9x1m hasta 2.2x1.1x2m (ver tabla B4 en el anexo B).



Figura 20. Equipos FDM: arriba Prodiy, abajo Maxum, ambos de Stratasy

Aplicaciones FDM

La diversidad de aplicaciones de FDM es tan variada como los materiales que aplica, las aplicaciones en manufactura, fabricación de modelos y prototipado son similares a las de SL. La figura 21 ilustra algunas de estas aplicaciones.



Figura 21. Productos fabricados por FDM.

Actualidad FDM

Stratasy no se detiene en investigación y desarrollo de nuevos materiales aplicables a su tecnología de manufactura por capas, su más reciente producto fue el material resultado de la mezcla de policarbonato y ABS que mejora las prestaciones del ABS.

Tecnologías afines

El inicio del desarrollo de la tecnología manufactura de partículas disparadas (Ballistic particle manufacturing — BPM) es anterior inclusive al desarrollo FDM, los equipos constan de un cabezal x — y con múltiples boquillas aspersoras que disparan pequeñas gotas de material fundido a la plataforma o a la capa anterior de manera que solidifiquen y endurezcan al impacto, la figura 22 ilustra el proceso. La empresa Solidscape introduce la tecnología de partículas disparadas con material de soporte (inkjet with second support material), la figura 23 describe el proceso, un cabezal homogenizador retira el material residual por fresado y succión por vacío. La empresa Ince y la University of Texas entre otras organizaciones han venido trabajando la tecnología de partículas metálicas disparadas (liquid metal jet printing - LMJP).

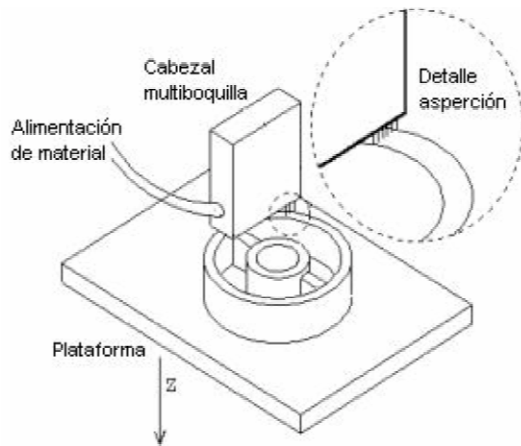


Figura 22. Esquema proceso BPM

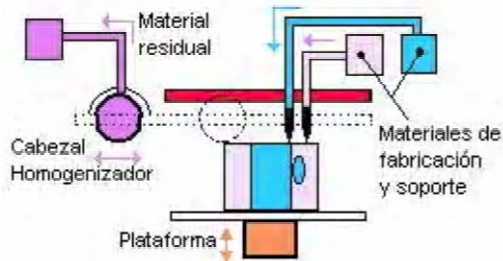


Figura 23. Esquema proceso inkjet with second support

material

1.5 Híbridos y Nuevas Tecnologías

Proceso 3DP

El Massachusetts Institute of Technology (MIT) desarrollo una nueva tecnología LM para la fabricación rápida de modelos en arena para fundición pretendiendo mejorar las prestaciones ofrecidas por la tecnología SLS, último desarrollo en el campo en ese momento, crearon así la tecnología de proyección aglutinante (direct shell production castin / DSPC) distribuida por Soligen (EEUU) ^[12] El proceso DSPC se ilustra en la figura 24, (a) el sistema alimentador del equipo se encarga de depositar material particulado sobre la plataforma y esparcirlo usando un rodillo, dicho polvo puede ser sílice o alúmina, (b) posteriormente el sistema de impresión mediante un cabezal con múltiples boquillas inyecta resina aglutinante formando el patrón que define la capa, luego descendiendo la plataforma y se inicia nuevamente el proceso hasta (c) terminar el molde que queda inmerso en el polvo sin aglutinar, es tratado térmicamente para dar rigidez y luego (d) es removido el polvo sobrante.

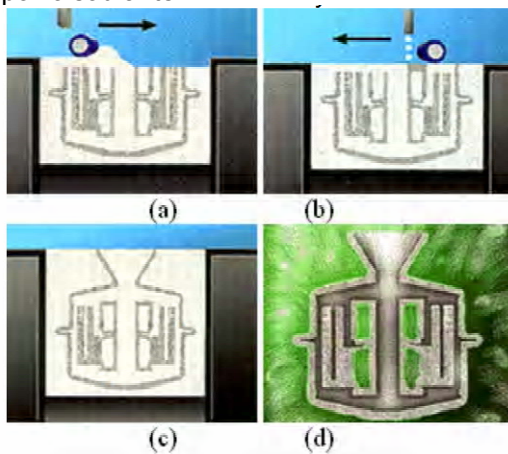


Figura 24. Esquema proceso DSPC

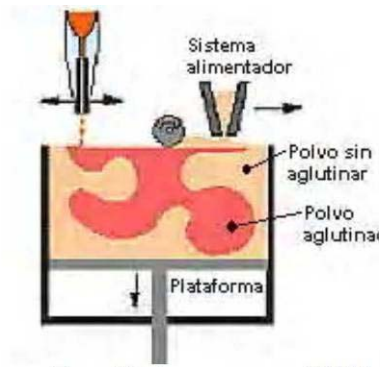


Figura 25. Esquema proceso HD3DP.

La empresa ZCorp. (EEUU) ^[13] lanza una tecnología LM que llama impresión tridimensional de alta definición (high definition 3D printing — HD3DP) que lleva la 3DP a un nuevo nivel al introducir gran variedad de materiales poliméricos, el proceso HP3DP se ilustra en la figura 25. Las tecnologías descritas resultan de combinar SLS y BPM.

La empresa 3DSystems ^[4] desarrolló la tecnología modelado con múltiple boquilla (multi jet modeling — MJM o thermojet) similar a la desarrollada por Brother Kogyo Kabushiki Kaisha (Japón) llamada inyección de fotopolímero (jetted photopolymer), en esta el equipo consta de un cabezal con varias boquillas spray que rocían diminutas gotas de resina fotosensible sobre la plataforma donde quedan expuestas a radiación UV que promueve la polimerización formando la pieza capa por capa, el proceso es ilustrado en la figura 26. Como puede verse estas tecnologías resultan de combinar SL y BPM.

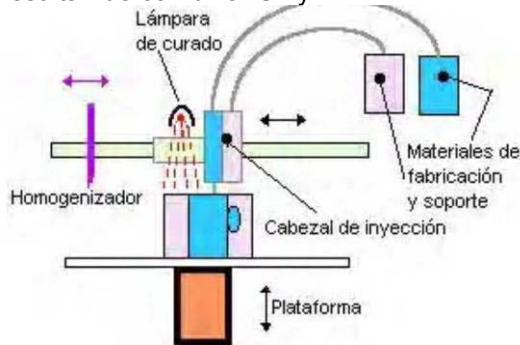


Figura 26. Esquema proceso MJM

Las tecnologías descritas hasta ahora en esta sección corresponden a las denominadas impresión tridimensional (3D printing — 3DP).

La tecnología sinterizado selectivo por inhibición (selective inhibition sintering — SIS) desarrollada por la University of Southern California, ilustrada en la figura 27, resulta nuevamente de combinar las tecnologías SLS, BPM y algunos principios de SGC, ahora no se inyecta aglutinante sino inhibidor y se expone la capa a sinterización por radiación térmica en una cámara infrarroja, posteriormente se retira el material residual liberando la pieza fabricada.

La tecnología prototipado rápido congelado (rapid freeze prototyping — RFP) permite la creación capa por capa de prototipos a partir de modelos CAD, pero el material que emplea es hielo, por lo cual su practicidad es principalmente académica, la figura 28 presenta un equipo de esta tecnología.

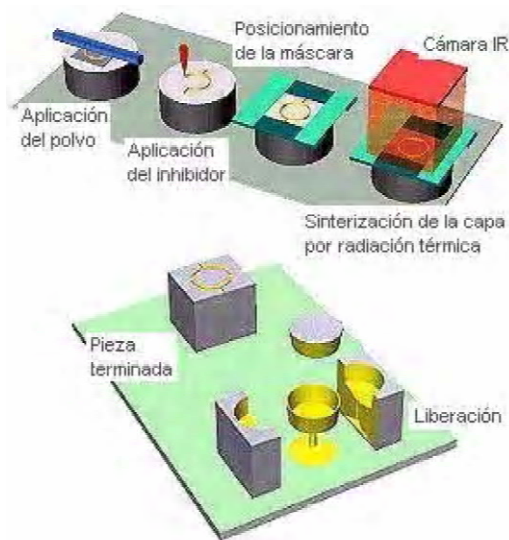


Figura 27. Esquema proceso SIS



Figura 28. Esquema tecnología RFP

2. PANORAMA MUNDIAL

En principio las tecnologías LM pretendían cambiar la forma de diseñar introduciendo al mercado las innovadoras herramientas de prototipado rápido, pero ágilmente empezaron a mostrar sus aplicaciones en los campos de la fabricación de moldes y modelos y de piezas terminadas en general, desbancando al moldeado por inyección en series de baja cantidad y a los procesos de mecanizado en aplicaciones de alta complejidad, llegaron a ser herramienta de manufactura en aplicaciones de complejidad o tamaño que no pueden conseguirse mediante otros métodos, a partir de este momento empezaron a mostrar su potencial y a mostrar participación representativa en el mercado. El desarrollo de LM va acompañado por la tendencia global a la automatización de los procesos y a potenciar el trabajo productivo del personal profesional de las organizaciones. A futuro se ve a la manufactura por capas desplazando a todas las tecnologías de fabricación tradicionales de moldeado y mecanizado, pero esto requiere de fuerte investigación y desarrollo con participación multidisciplinaria.

Terry Wohlers es el presidente de Wohlers Associates y autor del Wohlers Report, este es un estudio de mercado que se realiza anualmente desde 1993 incluyendo todas las facetas de la manufactura por capas: negocios, productos, mercado, tecnologías, investigación y aplicaciones. En su primera parte "antecedentes" cubre la historia de la manufactura por capas y lista las empresas que emplean esta tecnología y las aplicaciones que le dan. En la segunda parte analiza el crecimiento de la industria desde dos puntos de vista fundamentales: equipos vendidos y piezas

fabricadas, presenta datos detallados de crecimiento en ventas y producción y compara con tecnologías similares como centros de mecanizado y reporta proyecciones estadísticas a futuro. En la tercera parte centra su exposición en los fabricantes de equipos LM y en los equipos en sí, cada empresa reporta sus avances, el reporte presenta al final un panorama para inversionistas. En la cuarta parte expone los consumidores de tecnología LM y las aplicaciones haciendo una clasificación por países. En la quinta parte se centra en el rapid tooling y en la sexta parte en el rapid manufacturing, toca los temas relacionados con tecnologías, equipos, materiales, innovaciones y productos en general, hace referencia además implicaciones estratégicas y de producción que justifican el uso de LM y por último presenta una serie de retos y necesidades de investigación en todos los campos de LM. Las últimas tres partes del libro las dedica a exponer lo más reciente en investigación y desarrollo y en resumir ha donde se dirige todo en lo referente a LM. La obra tiene un costo de US\$495 y es una importante herramienta bibliográfica para aquel que se interese en invertir recursos en el campo de la manufactura por capas.

Al año 2001 se habían vendido ya 1320 equipos de LM instalados el 42.8% en EEUU, el 18.7% en Japón y el 4.7% en China y al 2003 se habían fabricado un total de 4.83 millones de piezas en el mundo. Las figuras 29, 30 y 31 tomadas de la página de Wholers Associates grafican el crecimiento que LM ha experimentado en los últimos 20 años y la distribución mundial de su uso.

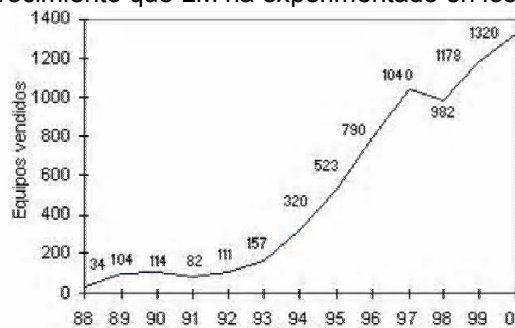


Figura 29. Crecimiento en ventas de equipos LM de 1988 a 2000.

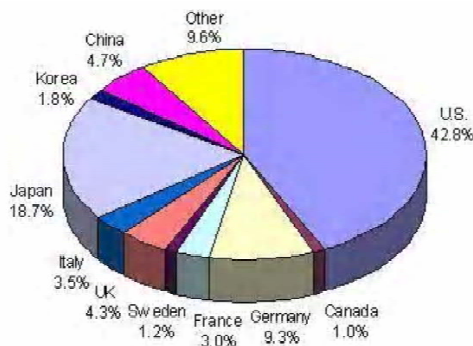


Figura 30. Distribución mundial de las instalaciones LM.

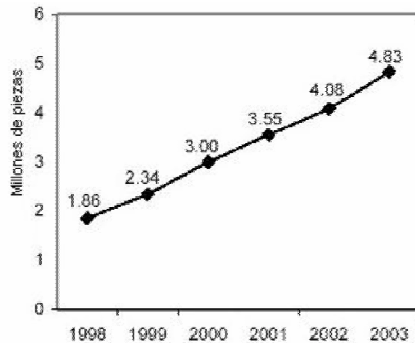


Figura 31. Crecimiento en ventas de productos LM desde 1998 hasta 2003.

Existen infinidad de sitios web dedicados a la recopilación de información referente a la tecnología LM como <http://home.att.net> donde encuentra el museo de patentes de prototipado rápido con información sobre cada una, <http://www.cc.utah.edu> en su rapid prototyping home page ofrece gran

cantidad de vínculos y artículos en todo el campo de LM desde 1995, o inclusive la página <http://wohlersassociates.com> ofrece gran variedad de información.

Rapid prototyping home page es básicamente una lista de 379 vínculos organizados de la siguiente manera: 20 corresponden a los sistemas comerciales de prototipado, nombran la tecnología y el lugar de desarrollo y remiten a las páginas de las principales empresas comercializadoras de cada una; 19 remiten a las páginas de los principales distribuidores (no fabricantes) de tecnologías LM, hacen referencia a las marcas que representan a su lugar de ubicación; 225 remiten a las páginas de las principales empresas comercializadoras de los servicios LM, reportan los equipos que poseen y su país y ciudad de ubicación; 5 remiten a las páginas de los principales consultores del sector y donde tienen sus oficinas; 26 remiten a las páginas de las principales universidades e institutos vinculados a la investigación y desarrollo en el campo de LM; 17 remiten a las páginas de las editoriales de las principales publicaciones, libros, artículos y conferencias de LM; 26 remiten a las páginas de empresas y organizaciones dedicadas a las aplicaciones LM en biomedicina, hacen referencia a la aplicación en sí y al lugar de desarrollo; 5 remiten a páginas de personas u organizaciones dedicadas a las aplicaciones artísticas de LM; 11 remiten a empresas productoras de software para equipos LM; 7 remiten a las páginas de las principales asociaciones del sector de LM en el mundo y los últimos 18 vínculos remiten a diversidad de páginas de interés en el campo de LM. Todas estas páginas están en constante actualización, de igual manera el listado es actualizado semanalmente incluyendo nuevas páginas. Las 225 empresas que ofrecen sus servicios LM en este listado pertenecen 173 a América (161 a EEUU, 7 a Canadá, 2 a México, 2 a Brasil y 1 a Argentina), 32 a Europa (6 a Gran Bretaña, 5 a Holanda, 4 a Italia, 3 a Suecia, 2 a Francia, 2 a Alemania, 2 a Hungría, 2 a Finlandia, 1 a Bélgica, 1 a Suiza, 1 a Austria, 1 a Noruega, 1 a Bulgaria y 1 a Dinamarca), 12 a Asia (2 a Rusia, 3 a Hong Kong, 1 a China, 1 a Taiwán, 1 a Tailandia, 2 a India, 1 a Arabia Saudita y 1 a Israel) y 3 a Australia.

En general, las empresas que ofrecen servicios LM son empresas que disponen de uno o más equipos de una o más tecnologías LM, dichas empresas pretenden comercializar todo el potencial de sus herramientas pero en la mayoría de los casos es notable la tendencia hacia alguna de las aplicaciones RP, RT o RM. Por ejemplo, la empresa mexicana con sede en Monterrey llamada Vitro Global Design^[14] resalta su tendencia al prototipado rápido (RP) ofreciendo a sus clientes un paquete completo de servicios de diseño, mercadotecnia y apoyo tecnológico por parte de un equipo multidisciplinario compuesto por arquitectos, diseñadores industriales y gráficos, comunicadores, mercadotecnistas, ingenieros mecánicos, de sistemas y especialistas en manufactura y en propiedad intelectual, utilizan la tecnología SLS para prototipado conceptual y funcional; igualmente la empresa Able Industrial Design & Technology^[15] utiliza SL y FDM para ofrecer los servicios de diseño mecánico, ingeniería inversa, fabricación de maquetas, prototipado rápido y prototipado conceptual en general, pero entran además en el campo de aplicación de manufactura rápida (RM) ofreciendo productos poliméricos terminados y preseries cortas empleando tecnologías de moldeo como vaciado en moldes de silicona (moldeo de PU) o moldeo de inyección por reacción (RIM) obteniendo los modelos con sus herramientas LM aplicadas a la fabricación rápida de modelos y moldes (RT); igualmente la empresa Belga Materialise^[7] ofrece los servicios de RP de prototipado conceptual y funcional con herramientas SL, SLS, FDM y 3DP con diversidad de capacidades, en la aplicación RM ofrecen el uso de sus herramientas LM pero le suman mecanizado CNC, moldeo de PU, RIM, moldeo en yeso-goma y moldeo a la cera perdida, en todas obteniendo los modelos con sus herramientas LM en su aplicación RT; por otro lado la empresa Rapid Product Development Group^[16] con sede en California, EEUU y Tijuana, México ofrece el uso de sus herramientas SL, SLS, FDM y 3DP para prototipado, asistencia al diseño de productos en general y fabricación de pequeñas series, pero en producción de grandes series cuentan con las herramientas tradicionales de moldeo por inyección y conformado en dados; La empresa norteamericana Soligen^[12] especializó su tecnología DSPC para la aplicación RT fabricando moldes en arena para moldeo de metales; empresas como Accelerated Technologies^[17] (EEUU) se distinguen por su gran capacidad de producción, esta cuenta con 7 equipos SLS y 8 SL; o General Pattern Co.^[18] con 11 SL, equipos LOM y SGC, sus servicios principales son en aplicaciones RP y RT; o los suecos GT Prototyper AB^[19] con 3 SL, 2 SLS y 2 FDM; por otro lado la empresa Robtec^[20] con sede en Sao Paulo, Brasil y oficinas en Montevideo, Uruguay y Buenos Aires, Argentina cuenta con 3 equipos SL, 3 SLS y 1 3DP ofrece servicios en diseño y mercadeo de producto, RP, RT y fabricación de preseries para toda Latinoamérica y Render ABS

Prototypes^[21] ofrece su herramienta FDM para aplicaciones de diseño, mercadeo y RP en Rosario, Argentina. En general se puede hacer la siguiente clasificación: empresas creadas en base a su tecnología LM y empresas tradicionales que han potencializado sus servicios con la introducción de LM a sus procesos. En el primer caso las empresas ofrecen todos los servicios que ofrece el(los) equipo(s) que poseen, en el segundo caso empresas de tradición en diseño o manufactura (procesos de moldeado o mecanizado) optimizan la eficiencia de sus procesos e incrementan su mercado potencial ofreciendo nuevas posibilidades.

Empresas como Artis — prototipagem^[21] (Brasil) o Biomedical Modeling Inc.^[22] (EEUU) se han creado alrededor de la aplicación de LM y tecnologías de escaneo digital y láser en Biomedicina, los modelos se emplean para implantes e injertos de huesos, visualización, planeación y ensayo precirugía para implantes dentales, cirugía craneofacial, extracción de tumores, neurocirugía, cirugía plástica y reconstructiva, maxilofacial, oral y dental, torácico y cardiovascular, ortopédica, espinal y de manos y muñecas. La figura 32 ilustra algunas de estas aplicaciones. Otras personas o instituciones se han dedicado a las aplicaciones artísticas de los equipos de tecnología LM.



Figura 32. Modelos SL para biomedicina por Biomedical Modeling

Inc.^[22]

Algo que es común a las empresas descritas es que aprovechan el potencial informático y de automatización que incluye la tecnología LM, el cliente puede diseñar la pieza en su PC, conectarse a la red, ingresar a la página de la empresa proveedora del servicio LM, enviar el diseño en cualquier formato, recibir la cotización en segundos, pagar con tarjeta y recibir prototipos conceptuales en horas o prototipos funcionales, piezas terminadas o preseries en horas o días.

La Asociación Alianza Global de Prototipado Rápido (Global Alliance of rapid prototyping association — GARPA^[23]) es una de las principales organizaciones encargadas de las presentaciones técnicas en conferencias industriales, la publicación de estudios de casos de aplicación, los eventos de negocios y el intercambio formal e informal de información, su reunión anual de 2006 se llevó a cabo en Helsinki, Finlandia. Por otro lado del 14 al 16 de agosto de 2006 en Austin, Texas (EEUU) el Laboratory for Free Form Fabrication de la University of Texas^[24] llevó a cabo su 17° Simposio de la Fabricación Sólida de Libre Forma en el que tocaron temas como el modelado sólido, el control computarizado, los sistemas de diseño, las interacciones material-radiación, ciencia e ingeniería de los materiales, procesos y postprocesos en la fabricación de libre forma (manufactura por capas). Vale la pena resaltar que aunque la mayoría de tecnologías son comercializadas por empresas privadas fueron las universidades e instituciones técnicas y tecnológicas las responsables de su desarrollo y nunca se han desvinculado de él, en sus páginas reportan continuamente sus avances y desarrollos alcanzados.

3. PANORAMA NACIONAL

En Colombia hay tres organizaciones vinculadas a la tecnología LM, la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá en su laboratorio del Centro de Estudios InterFacultades (CEIF) tiene un Stratasys Titan FDM, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) tiene un Stratasys Vantage FDM y la multinacional IMOCOM tiene un Zcorp. Z402 (3DP) y son representantes de ZCorp. en Colombia. El CEIF ha liderado los esfuerzos por introducir la tecnología LM desde 2002, el Ing. Ernesto Córdoba Nieto ha dirigido trabajos de grado que promueven la investigación y el desarrollo de LM, ellos incluyen el Estudio del Preproceso para RP en Máquina SH-TITAN 1^[3] e Inspección de la Calidad en el Proceso FDM^[25], en ambos trabajos se realizan y analizan interesantes experimentos en miras de caracterizar importantes propiedades mecánicas, superficiales y en

general de acabado, exactitud y precisión de las piezas terminadas en el equipo FDM del laboratorio del CEIF y la influencia en dichas propiedades de la manipulación de algunos parámetros de proceso.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La manufactura por capas (LM) es un grupo de tecnologías de reciente desarrollo (20 años) que aceleradamente se ha venido convirtiendo en una importante tecnología de fabricación, esto se demuestra por su crecimiento en ventas, tanto de equipos como de servicios y productos terminados, al grado de empezar a desplazar a los procesos tradicionales en ciertas aplicaciones y de permitir el desarrollo de aplicaciones que solo con esta tecnología se ha podido dar.

El mundo entero, liderado por los países más industrializados, ha venido acompañando el desarrollo de LM y cada vez más países se van vinculando a esta iniciativa. Existen hoy diversidad de personas, organizaciones, instituciones y empresas involucradas con el desarrollo de LM, entre ellas vale la pena resaltar el trabajo de Terry Wholers y la asociación GARPA. A nivel nacional vale la pena resaltar el trabajo del CEIF de la UNal y de la empresa IMOCOM.

El potencial que LM representa para la industria y la academia colombiana es incalculable, de manera general podemos mencionar:

Optimización de los procesos de diseño de diversidad de productos, integrando la herramienta de prototipado conceptual y funcional y del diseño iterativo, agilizando la producción de prototipos, maquetas y preseries que permitan la interacción de diseñadores, fabricantes y usuarios con los prototipos para su rápida retroalimentación y que ofrezcan valiosas herramientas de marketing y publicidad. Optimizar el proceso de diseño se traduce en productos de mejor calidad y menos pérdidas al prever mejor los procesos de fabricación.

Formación de empresas dedicadas a la comercialización y venta ágil de prototipos y maquetas para diseño conceptual, diseño funcional o marketing para las empresas diseñadoras del país.

Adaptación de las empresas diseñadoras (diseño mecánico, industrial, arquitectónico, gráfico, artístico, publicitario, etc...) al uso de herramientas de tecnología de punta para la diversificación y optimización de sus procesos, productos y servicios.

Optimización de los procesos de manufactura basados en el moldeo agilizando la obtención de modelos y moldes e incrementando su potencial de complejidad, desplazando los procesos tradicionales de mecanizado por reducción de tiempos y costos.

Formación de empresas dedicadas exclusivamente a la fabricación rápida de modelos y moldes para los fundidores y moldeadores del país, que formen redes de comunicación que permitan el despacho ágil de los productos.

Potencialización de las empresas fundidoras o moldeadoras por adaptación de tecnologías que optimicen sus procesos y productos y que les permitan ampliar su abanico de posibilidades al incluir las series cortas en su catalogo de productos y servicios.

Optimización general de los procesos de manufactura, logrando la obtención de piezas más complejas, más pequeñas, con mayor precisión, en menos tiempo, a menos costo y generando menos contaminación.

Formación de las primeras empresas manufactureras del futuro en las que se confunde la planta y la oficina, la producción es totalmente automática, dirigida por computador y las máquinas son limpias y silenciosas.

Formación de empresas dedicadas al servicio LM en el campo de la Biomedicina, ofreciendo sus productos en los sectores odontológico, cirujano y de laboratorio.

Una serie de proyectos de investigación y desarrollo puede llevarse a cabo en universidades e instituciones tecnológicas con el fin de buscar interdisciplinariedad y promoción al uso de nuevas tecnologías:

Selección o desarrollo de software CAD y CAM para automatización de procesos industriales (Ing. Electrónica/de Control/de Sistemas).

Selección o desarrollo de circuitos de control en máquinas herramientas (Ing. Electrónica/de Control).

Selección de mecanismos de movimiento controlado como servomotores (Ing. de Control).

Selección o desarrollo de dispositivos láser para diversas especificaciones, corte o polimerización principalmente (Ing. Física).

Caracterización de los materiales LM, selección o desarrollo de ellos (Ing. Mecánica/Química/Física).

Caracterización de los procesos LM y determinación de los principales parámetros de proceso y su influencia sobre las propiedades finales del producto (Ing. Mecánica/Química/Física).
Diseño y construcción de equipo LM dadas las especificaciones y los parámetros de proceso establecidos.

Estudio de mercado detallado acerca del potencial real de la manufactura por capas en Colombia (Ing. Industrial/Administrativa).

Evaluación financiera del proyecto de compra e implementación de equipos y tecnología LM vs. Tecnologías tradicionales de manufactura (Ing. Industrial/Administrativa).

Análisis y proyección de las aplicaciones biomédicas de LM en el país (Ing. Biológica/Industrial/Administrativa).

Análisis y proyección de las aplicaciones artísticas, publicitarias y de marketing LM en el país (Artes Plásticas/Arquitectura/Ing. Industrial/Ing. Administrativa).

A título personal opino que las aplicaciones y beneficios de LM no solo es incontable sino que va aumentando vertiginosamente en el mundo, es necesario que Colombia se vincule de manera más intensa a este proceso de modernización de la manufactura sino queremos terminar llenos de basura vieja en este entorno de apertura económica en el que nos encontramos. Regionalmente estamos muy atrás en lo que a LM se refiere, prácticamente no se comenta ni siquiera en los cursos de CAD/CAM que se imparte a los ingenieros mecánicos de la sede, es necesario promover un cambio de actitud al respecto. Considero que este es el momento para empezar a abonar el terreno y a prepararnos para la venida de una revolución tecnológica en la manufactura. Espero que este trabajo realmente haya contextualizado a lector en el campo de la manufactura por capas y haya creado consciencia acerca del potencial que esta representa para la industria y la academia colombianas. Invito al lector a visitar los sitios reportados en las referencias, a profundizar los conocimientos en su campo de interés y a comunicarse conmigo al e-mail: igardila@unalmed.edu.co para conocer su opinión y su interés.

ANEXO A: MATERIALES LM (ESTADOS INICIAL Y TERMINADO)

TABLA A1. Propiedades de las resinas fotosensibles de 3DSystems y Sony / D-MEC para SL, en estado líquido.

Empresa	Designación del material		Estado líquido			
			Densidad Líquida @25°C	Viscosidad @30°C	Profundidad penetración	Exposición Crítica
			(g/cm ³)	(cps)	(µm)	(mJ/cm ²)
Sony / D-MEC	SCR®	701	1.13	340 ²	191	33
		710	1.19	500 ²	135	13
		735	1.13	470 ²	160	23
		740	1.13	430 ²	120	16
		11120	1.12	260	160	12
		751	1.13	360 ²	139	20
		950	1.1	590 ²	79	5
		9100	1.11	560	130	6.8
		9120	1.13	450	140	10.9
	802	1.59	480 ²	152	9	
3DSystems	ACCURA®	25 plastic	1.14	250	107	10.5
		50 plastic	1.15	600	114	9.0
		60 plastic	1.13	150-180	160	7.6
		45HC plastic	1.14	475	130	7.4
		Bluestone plastic	1.7	1200-1800	104	6.9
		Amethyst	1.1	350	94	14.4
		SI 10 viper	1.1	485	160	13.8
		SI 10 7000	1.1	485	173	15.5
		SI 40 (Nd) viper	1.1	485	168	21.7
		SI 40 (Nd) 7000	1.1	485	173	20.1
		SI 40 (Hc / Ar) 250	1.1	485	120	13.9
		SI 40 (Hc / Ar) 500	1.1	485	107	11.3
		Accugen (Nd)	1.1	500	112	10.8
		Accugen (Hc / Ar) 250	1.1	485	100	7.27
		Accugen (Hc / Ar) 500	1.1	485	112	7.4
	Accudur	1.1	485	127	13.2	

² @25°C

TABLA A2. Propiedades mecánicas de los fotopolímeros de SL de Sony / D-MEC, en estado terminado.

Material		Estado terminado / Propiedades mecánicas						
		Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	Elongación a fluencia	Resistencia a la flexión	Módulo de flexión	Resistencia al impacto izod	Dureza
		ASTM D638	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D2240
		(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(J/m)	(ShoreD)
SCR®	701	75	3300	6	104	3100	25-27	87
	710	66	2700	10	85	2500	32-38	81
	735	45	2510	6.8	83	2530	29-33	-
	735 ³	67	2720	6	97	2570	34-39	-
	740 ²	62	3000	3	110	2800	29	-
	11120	47	2650	20	63	2040	30	81
	751	80	3400	5	115	3300	-	88
	950	51	2000	8	75	2600	-	85
	9100	28-32	1100-1400	14-17	42-62	1200-1500	32-43	-
	9120	30-32	1200-1500	15-25	41-46	1300-1500	48-53	-
	802 ²	85	9200	2	120	8900	-	92

³ postcurado

TABLA A2 (continuación). Propiedades mecánicas de los fotopolímeros de SL de 3DSystems, en estado terminado.

Materiales		Estado terminado / Propiedades mecánicas						
		Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	Elongación a fluencia	Resistencia a la flexión	Módulo de flexión	Resistencia al impacto izod	Dureza
		ASTM D638	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D2240
		(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(J/m)	(ShoreD)
ACCURA®	25	38	1590-1660	13-20	55-58	1380-1660	19-24	80
	50	48-50	2480-2690	5.3-15	72-77	2210-2340	16.5-28.1	86
	60	58-68	2690-3100	5-13	87-101	2700-3000	15-25	86
	45HC	59-61	2760-2960	4.8-5.4	94-101	2760-2900	11-16	87
	Bluestone	66-68	7600-11700	1.4-2.4	124-154	8300-9800	13-17	92
	Amethyst	22-38	3514-3996	0.56-1.04	87-125	3652-3721	9-12	87
	SI 10 viper	62-63	3048-3255	3.1-5	89-97	2827-3102	18.7-27.7	86
	SI 10 7000	72-76	3186-3532	4.9-5.6	109-115	2978-3186	14.9-17.1	86
	SI 40 (Nd) viper	57.2-58.7	2628-3321	4.8-5.1	93.4-96.1	2836-3044	22.5-27.2	82
	SI 40 (Nd) viper ⁴	73.9-74.2	2908-3321	4.8-5.1	116.2-118.3	3113-3182	22.5-30.9	84
	SI 40 (Nd) 7000	61.5-61.7	2840-3048	4.9-5.1	92.8-97	2618-2756	22.3-29.9	86
	SI 40 (Nd) 7000 ⁴	69.6-73.8	2909-3186	4.7-6.4	106.7-110.1	2840-2909	22.3-29.9	86
	SI40(Hc/Ar) 250	64.9-65.7	3169-3238	4.4-5.5	106.7-110.2	3169-3238	16.6-18.7	90
	SI40(Hc/Ar) 250 ⁴	75.2-75.7	3100-3309	5.3-8.2	110.9-112.3	3100-3186	12.8-23	90
	SI40(Hc/Ar) 500	61.5-62.2	2840-3048	4.1-4.3	101.8-106.7	3186-3255	22.3-29.9	87
	SI40(Hc/Ar) 500 ⁴	75-76.7	3047-3532	5.9-7.5	117-119.1	3186-3255	22.3-29.9	87
	Accugen(Nd)	67	3030	4.6	79	1930	17.1	82
	Accugen(Hc/Ar) 250	64-65	2840-3117	4.6-5.6	91-92	2494-2632	20.2-24.5	86
	Accugen(Hc/Ar) 500	55-57	2701-2978	5.8-7.8	80-83	2147-2286	20.2-21.3	84
	Accudur	50	2280	15	63	1720	25.1	82

⁴ postcurado

TABLA A3. Propiedades térmicas de los fotopolímeros de SL de 3DSystems, en estado terminado.

Materiales		Temperatura de deflexión		Coeficiente de expansión térmica		Temperatura de transición vítrea – T _g
		ASTM D648		ASTM E831-93		ASTM D3418
		(°C)		(µm/m°C)		(°C)
		@66psi	@264psi	T<T _g	T>T _g	
ACCURA®	25	58-63	51-55	107	151	60
	50	49-53	43-46	73	164	62
	50°	74-80	-	-	-	-
	60	53-55	48-50	71	153	58
	45HC	58	51	72	160	66-87
	45HC°	103	-	-	-	-
	Bluestone	65-66	65	33-44	81-98	71-83
	Bluestone°	267-284	-	-	-	-
	Amethyst	77	62	57	133	103
	SI 10 viper	56	46	63.7	175	61.7
	SI 10 7000	59	53	63.8	164	61.7
	SI 40 (Nd) viper	51	43	99.6	185	65.6
	SI 40 (Nd) viper°	101	82	60.8	167	74.9
	SI 40 (Nd) 7000	54	49	73.5	188	62
	SI 40 (Nd) 7000°	114	89	61.7	189	72
	SI40(Hc/Ar) 250	61	55	61	147	76
	SI40(Hc/Ar) 250°	120	105	53.7	103	99
	SI40(Hc/Ar) 500	54	49	89.2	190	75.9
	SI40(Hc/Ar) 500°	114	89	80.6	157	90
	Accugen(Nd)	-	-	72	176	73
	Accugen(Hc/Ar) 250	59	50	69.5	107	40
	Accugen(Hc/Ar) 500	57	51	62	108	40
	Accudur	-	-	79	174	54

⁵ postcurado

TABLA A4. Propiedades de los polvos de 3DSystems para SLS, material particulado.

Material		Material sólido particulado							
		Propiedades físicas					Propiedades térmicas		
		Densidad	Tamaño medio	Distribución tamaño 90%	Peso específico	Absorción humedad	Punto fusión	Temperatura Deflexión ¹¹	
		ASTM D4164	Difracción láser	Difracción láser	ASTM D792 @20°C	ASTM D570 @23°C	DSC	ASTM D648	
		(g/cm ³)	(µm)	(µm)	(g/cm ³)	(%)	(°C)	(°C)	
Dura Form®	PA ⁹	0.59	58	25-92	0.97	0.41	184	177	86
	GP ⁹	0.84	48	10-96	1.4	0.3	185	175	110
	EX ⁹	-	-	-	1.01	0.48	-	188	48
	FLEX ⁹	0.44	85	21-138	-	-	192	-	-
	AF ⁹	0.69	-	-	-	-	-	180	137
Laser Form®	A6 ¹⁰	-	-	-	7.8	-	-	-	-
	ST100 ¹⁰	-	-	-	7.7	-	-	-	-
	ST200 ¹⁰	-	-	-	6.7	-	-	-	-
CastForm® ⁹		0.46	62	25-106	0.86	0.06	<63	33	40
Somos201 ⁹		0.58	93	23-190	0.91	-	156	-	-

⁹ polimérico, ¹⁰ metálico, ¹¹ propiedad en estado terminado

TABLA A5. Propiedades mecánicas de los polvos sinterizados de SLS de 3DSystems, en estado terminado.

Material		Estado terminado / Propiedades mecánicas							
		Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	Elongación a fractura	Módulo de flexión	Resistencia al impacto izod		Acabado superficial cara superior	
		ASTM D638	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D256			
		(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J/m)		(μm)	
						Con entalla	Sin entalla	Sin pulir	Pulido
Dura Form®	PA	44	1600	9	1295	214	429	9.5	0.13
	GP	38.1	5910	2	3300	96	101	6.2	1
	EX	37	1517	47	1310	64	>854	-	-
	FLEX	1.8	7.4	110	5.9	-	-	-	-
	FLEX ¹²	2.3	9.2	151	7.8	-	-	-	-
	AF	35	3960	1.5	3517	-	130	-	-
Laser Form®	A6	610	138000	2-4	-	-	-	-	-
	ST100	510	137000	10	-	-	-	-	-
	ST200	435	137000	6	-	-	-	-	-
CastForm®		2.84	1604	-	-	<11	14	13	3
Somos201		-	15.5	110	13.4	-	-	-	-
Somos201 ¹²		-	17.3	130	14.1	-	-	-	-

¹² infiltrado

TABLA A6. Propiedades del principal material LOM de Helisys (EEUU), propiedades de la hoja y de la pieza.

Propiedad		Material Helisys SMS®042
Espesor hoja	(mm)	1
Densidad	(g/cm ³)	0.9
Coeficiente expansión Térmica	(μm/m°C)	N ¹³ 185
		P ¹⁴ 4
Resistencia interna hoja	(J)	390
Resistencia interlaminar	(N/m)	151
Resistencia a la tensión	(MPa)	N 1.4
		P 26
Módulo de elasticidad	(MPa)	N -
		P 2524
Resistencia compresión	(MPa)	N 115
		P 15
Módulo de compresión	(MPa)	N 0.4
		P 2.2
Elongación a compresión	(%)	N 40.4
		P 1.01
Temperatura Transición Vítre	(°C)	30
Temperatura de deflexión	(°C)	77

TABLA A7. Propiedades de los materiales FDM de Stratasys (EEUU), propiedades de la pieza.

Material	Estado terminado / Propiedades mecánicas y térmicas						
	Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	Elongación a fractura	Módulo de flexión	Resistencia al impacto izod	Temperatura de deflexión	Temperatura de transición vítrea
	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D638	ASTM D790	ASTM D256	ASTM D648	ASTM D3418
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J/m) Con entalla Sin entalla	(°C)	(°C)
Polycarbonato	52	2000	3	2137	53.4 267	127	161
Polycarbonato ISO	52	1744	5	2193	53.4 -	127	161
ABS	22	1627	6	1834	- -	96	104
PC-ABS	34.8	1837	4.3	1863	123 326	96	110
Polifenilsulfona	55	2068	3	2206	58.7 -	189	230

ANEXO B: EQUIPOS LM (CARACTERÍSTICAS GENERALES)

TABLA B1. Características de los principales equipos de SL de las principales compañías.

Equipo		LÁSER				EQUIPO				PIEZA
		Tipo	Pot.	Frec.	Long. onda	Vel. máx. trazo	Espesor de capa	Dimensiones aprox.	Masa aprox.	Dimensiones máx.
			(mW)	(kHz)	(nm)	(m/s)	(mm)	(m)	(kg)	(cm)
SCS ^{®6}	1000HD	He-Cd	-	-	-	2	0.02-0.15	1.5x1.1x1.6	710	30x30x27
	6000	Semiconductor estado sólido	200	25	-	7.5	0.05-0.2	1.5x1.1x1.6	710	30x30x25
	8100	Semiconductor estado sólido	1000	60	-	10	0.1-0.2	1.9x1.2x2	1700	61x61x50
	8100D	Semiconductor estado sólido	1000	60	-	10	0.1-0.2	1.9x1.2x2	1750	61x61x50
	9000	Semiconductor estado sólido	800	60	-	20	0.1-0.4	2.4x1.7x2.8	2920	100x80x50
	Acculas	LD	-	-	405	-	0.005-0.01	1x1x1.7	600	15x15x5
SLA ^{®7}	5000	Estado sólido Nd:YVO ₄	216	-	355	5	0.05-0.1	1.9x1.2x2	1500	50x50x59
	7000	Estado sólido triple frecuencia	800	-	355	9.5	0.025-0.125	1.9x1.2x2	1550	50x50x60
	viper	Estado sólido Nd:YVO ₄	100	-	355	-	0.02-0.1	1.4x0.8x1.8	470	25x25x25
	viper HA	Estado sólido Nd:YVO ₄	100	-	355	-	0.05-0.1	1.4x0.9x1.8	565	25x25x50
	viperPro	Estado sólido triple frecuencia Nd:YVO ₄	2000	-	355	25	0.05-0.15	2.2x1.6x2.2	2400	150x75x50
F&S ^{®8}	Realizer	Semiconductor estado sólido	150	-	355	-	-	0.8x0.8x2.2	-	50x40x30

⁶ Sony / D-MEC (Japón), ⁷ 3DSsystems (EEUU), ⁸ Fockele & Schwarze (Alemania)

TABLA B2. Características de los principales equipos de SLS de EOS y 3DSystems.

Empresa	Equipo		LÁSER		EQUIPO			PIEZA
			Tipo	Pot.	Vel. máx. trazo	Espesor de capa	Espacio de instalación recomendado	Dimensiones máx.
				(W)	(m/s)	(mm)	(m)	(cm)
EOS ^[8]	EOSINT [®]	P385	CO ₂	50	5	0.1-0.15	4.3x3.9x3	34x34x62
		P700	CO ₂	2x50	5	0.1-0.15	4.8x4.8x3	70x38x58
		S750	CO ₂	2x100	3	0.2	4.5x4.6x2.7	72x38x38
		M270	Fibra Yb	200	7	0.02-0.1	3.5x3.6x2.5	25x25x21.5
3DSystems	Sinterstation [®]	Pro140	CO ₂	70	10	0.1-0.15	-	55x55x46
		Pro230	CO ₂	70	10	0.1-0.15	-	55x55x75
		HiQ	CO ₂	30	5	-	-	38x33x46
		HiQ+HS	CO ₂	50	10	-	-	38x33x46

TABLA B3. Características de los principales equipos de LOM de Helisys / Cubic Technologies (EEUU) [9] y Kira Corp. (Japón).

Empresa	Equipo	LÁSER		EQUIPO							PIEZA
				Sistema óptico	Sistema elevador	Sistema alimentador			Peso	Espacio requerido	
		Tipo	Pot.	Vel. trazo	Presc.	Temp. del alimentador	Presión	Espesor hoja admisible			Dimensiones máx.
			(W)	(m/s)	(mm)	(°C)	(kg)	(mm)	(kg)	(m)	
Helisys	1015 Plus	CO ₂	25	0.46	0.05	66-343	18	0.08-0.25	454	3.7x3.7	38x25x36
	2030 H	CO ₂	50	0.46	0.05	66-399	18	0.08-0.25	1429	4.9x3.7	81x56x51
Kira Corp.	Katana	-	-	-	-	-	-	0.1-0.15	320	-	28x18x15
	PLT A3	-	-	-	-	-	-	0.1-0.15	550	-	40x28x30
	PLT A4	-	-	-	-	-	-	0.1-0.15	450	-	28x19x20

TABLA B4. Características de los principales equipos de FDM de Stratasys (EEUU).

Equipo	EQUIPO			PIEZA
	Espesor de capa	Masa	Dim. máx.	Dim. máx.
	(m/s)	(kg)	(m)	(cm)
Prodigy	0.178 0.245 0.330	128	0.7x0.9x1.0	20x20x30
Vantage i, X, S	0.127 0.178 0.245	726	1.3x0.9x1.9	35x25x25
Vantage SE	0.127 0.178 0.245	726	1.3x0.9x1.9	40x35x40
Titan	0.127 0.178 0.254	726	1.3x0.9x2.0	40x35x40
Maxum	0.127 0.178 0.254	1134	2.2x1.1x2.0	60x50x60

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://home.att.net>
- [2] Toro Aguirre Alfonso Ignacio, Integración tecnológica de prototipado rápido dentro del laboratorio de manufactura integrada por computador, T.D.G. Ing. Industrial U. Diego Portales, Santiago Chile 2004.
- [3] Ramírez Moreno, Cotrino Ahumada, Estudio del preproceso para prototipado rápido en la máquina SH-TITAN1, T.D.G. (Ing. Mecánica). Ing. Mecánica UNal, Bogotá Colombia 2003.
- [4] <http://www.3dsystems.com>
- [5] <http://www.d-mec.co.ip>
- [6] <http://fockeleundschwarze.de>
- [7] <http://www.materialise.be>
- [8] <http://www.eos.info>
- [9] <http://www.cubicletechnologies.com>
- [10] <http://www.kiracorp.co.ip>
- [11] <http://www.stratasys.com>
- [12] <http://www.soligen.com>
- [13] <http://www.zcorp.com>
- [14] <http://www.vitroglobaldesign.com>
- [15] <http://www.prototype.com.hk>
- [16] <http://www.rpdq.com>
- [17] <http://www.atirapid.com>
- [18] <http://www.generalpattern.com>
- [19] <http://www.qtp.se>
- [20] <http://www.robtec.com>
- [21] <http://www.rendersrl.com.ar>
- [22] <http://www.artis.com.br>
- [23] <http://www.biomodel.com>
- [24] <http://www.qarpa.org>
- [25] <https://utwired.engr.utexas.edu>
- [26] Vargas Henríquez Lisandro, Inspección de la calidad superficial en el prototipado rápido, proceso FDM, T.D.G. Maestría en Materiales y Procesos UNal, Bogotá Colombia 2004.

AUTOR: Ing. Juan Gonzalo Ardila Marín, Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

COLOMBIA, MEDELLÍN, NOVIEMBRE DE 2007