

Cd. Universitaria, 07 de mayo de 2018.

Comité Editorial

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
P R E S E N T E

Apreciable Comité Editorial:

Por este conducto, los autores del Informe Técnico titulado “Consideraciones para la construcción de partes con la tecnología de Manufactura Aditiva de Modelado por Deposición de Material Fundido”, nos permitimos atender los comentarios de los revisores, indicando las siguientes acciones:

Comentarios 1er revisor:

- Se modificó el título, en lugar de las siglas FDM: “Modelado por Deposición de Material Fundido”.
- Se revisaron las citas del texto, y ahora se hace referencia de manera explícita a los trabajos de tesis incluidos.
- Se modificó la resolución de la figura 3.1.

Comentarios 2do revisor:

- Se retiraron las palabras título, autores y afiliación en la página del resumen.
- Se modificó la distribución de espacios en el índice para evitar la pagina 5 vacía.
- Se incluyó la tesis referida del año 2015.



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Consideraciones para la construcción de partes con la tecnología de Manufactura
Aditiva de Modelado por Deposición de Material Fundido

Informe Técnico

Leopoldo Ruiz Huerta
Alberto Caballero Ruiz
Adolfo Ortega Rodríguez
Roque Yañez Sanvicente
Yara Cecilia Almanza Arjona

Diciembre 2017

Proyecto de Investigación de financiamiento interno y externo

Se agradece el financiamiento recibido por
parte de los siguientes proyectos:

PAPIME PE106417
PAPIME PE104014
CONACyT LN280867
CONACyT LN294415

Consideraciones para la construcción de piezas con la tecnología de Manufactura Aditiva FDM

Leopoldo Ruiz Huerta, Alberto Caballero Ruiz, Adolfo Ortega Rodríguez, Roque Yañez Sanvicente, Yara Cecilia Almanza Arjona

Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.

Resumen

Durante las últimas dos décadas, las tecnologías de Manufactura Aditiva han tenido un gran desarrollo por su capacidad para lograr formas complejas con rapidez y simplicidad en su operación, partiendo de modelos digitales en tres dimensiones. Lo anterior ha generado en la industria mundial un creciente interés por explotar sus capacidades en nichos que anteriormente eran específicos de otros procesos, denominándose así como tecnologías de Manufactura Digital Directa (DDM, por sus siglas en inglés), debido a que ofrecen la capacidad de ser empleadas tanto en la construcción de partes funcionales así como de productos de uso final. La tecnología de Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM, por sus siglas en inglés) ya es utilizada con este propósito y posee gran potencial para el procesamiento de polímeros termoplásticos. Sin embargo, esta tecnología aún debe ser entendida por los diseñadores para aprovechar sus ventajas y disminuir sus limitaciones, generando así partes robustas y confiables que cumplan con especificaciones y requerimientos funcionales. Por lo tanto, en este informe se presentan una serie de recomendaciones para el diseño de partes y su construcción mediante el proceso FDM. En primer lugar se describe la tecnología y se explican los parámetros de manufactura del proceso; posteriormente se exponen las recomendaciones de diseño y construcción con el objetivo de apoyar en la revisión del proceso de diseño y en la selección de los parámetros de manufactura por capa.

Índice

Introducción.....	4
1 La tecnología de Manufactura Aditiva	
FDM.....	5
1.1 Manufactura Aditiva.....	5
1.2 El proceso FDM.....	6
1.2.1 Parámetros de Manufactura.....	7
2 Objetivos y Alcances.....	13
2.1 Objetivos.....	13
2.2 Alcances.....	13
3 Recomendaciones para el diseño de partes a construir mediante la tecnología FDM.....	14
3.1 Recomendaciones generales.....	14
3.2 Recomendaciones para cada etapa del proceso FDM.....	16
3.2.1 Diagrama de flujo para la manufactura de una pieza mediante la tecnología FDM.....	16
3.2.2 Modelo Digital.....	18

3.2.3	Revisión del diseño	19
3.2.4	Modelador/Máquina FDM	20
3.2.5	Materiales y espesor de capa	21
3.2.6	Orientación de construcción	23
3.2.7	Manipulación del archivo dentro de Insight	25
3.2.8	Soporte	25
3.2.9	Estilo de llenado y contorno	27
3.2.10	Air gap, ancho y ángulo de filamento	28
3.2.11	Puntos de inicio	29
3.2.12	Pausas e insertos	30
3.2.13	El área de construcción	30
3.3	Recomendaciones para la selección de parámetros de manufactura	31
3.3.1	Requerimientos de la pieza	31
3.3.2	Relaciones entre los parámetros de manufactura	31
	Conclusiones	35
	Referencias bibliográficas	

..36

Introducción

El presente informe técnico es el resultado de estudiar las capacidades del proceso de Manufactura Aditiva FDM, con objeto de generar información que acerque la tecnología a los diseñadores y, aprovechar así, la capacidad instalada dentro del área de Manufactura Aditiva del Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT) del CCADET.

El informe se encuentra dividido en dos partes; en la primera de ellas se abordan los conceptos de Manufactura Aditiva (coloquialmente conocida como impresión 3D), se describe el proceso FDM y se explican sus parámetros de construcción. La segunda parte consta de una serie de recomendaciones de carácter general, resultado de la recopilación de información obtenida de diversas fuentes y del estudio de numerosos trabajos de investigación. Igualmente contiene recomendaciones específicas, producto de una serie de pruebas desarrolladas en el MADiT. Ambas series de recomendaciones se complementan mediante el seguimiento de un diagrama de flujo para la manufactura de una pieza con la tecnología FDM, con objeto de apoyar en la revisión del diseño y, de ser posible, enriquecerlo antes de su construcción.

Las recomendaciones están enfocadas en definir la funcionalidad de la parte a construir, conocer las fortalezas y limitaciones de la tecnología para modificar, en caso de ser necesario, un diseño antes de su manufactura, establecer criterios para la selección de materiales, tamaño de boquilla, orientación de construcción y demás parámetros de construcción.

1 La tecnología de Manufactura Aditiva FDM

1.1 Manufactura Aditiva

La Manufactura Aditiva es definida por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) como el proceso de unir materiales para construir objetos desde un modelo digital en tres dimensiones, usualmente capa por capa, en oposición a los métodos de manufactura por desprendimiento de material. El término *Manufactura Aditiva* se emplea de manera oficial en la industria sustituyendo a otros como: fabricación aditiva, procesos aditivos, técnicas aditivas, manufactura aditiva por capas, manufactura rápida, manufactura por capas y fabricación de forma libre (Wohlers 2012). Otro término ampliamente utilizado entre los usuarios y fabricantes de estas tecnologías es el de *Impresión 3D*, definido por la ASTM como la fabricación de objetos mediante el depósito de material utilizando un cabezal de impresión, boquilla o alguna otra tecnología de impresión. Denominación particularmente asociada a máquinas de bajo perfil (Wohlers 2012). De esta manera, la Manufactura Aditiva incluye a las tecnologías antes conocidas como de prototipado rápido, denominadas así por su capacidad de construir modelos físicos para validar nuevos diseños de manera casi inmediata.

La Manufactura Aditiva es utilizada para construir modelos físicos, prototipos, patrones y moldes para fundición de metales, herramentales, dispositivos, partes funcionales y de uso final. Su enfoque ha sido dirigido principalmente a la manufactura de partes de reemplazo y piezas únicas, productos personalizados y ergonómicos, ediciones especiales y bajas producciones de piezas con geometrías complejas. La manufactura aditiva se emplea para productos de los mercados: medico, industrial, de consumo y militar, por mencionar algunos. En la Figura 1.1 se muestra un panorama general presentado por Wohler's Report en el 2014, de los sectores de aplicación de la manufactura aditiva (Wohlers 2014).

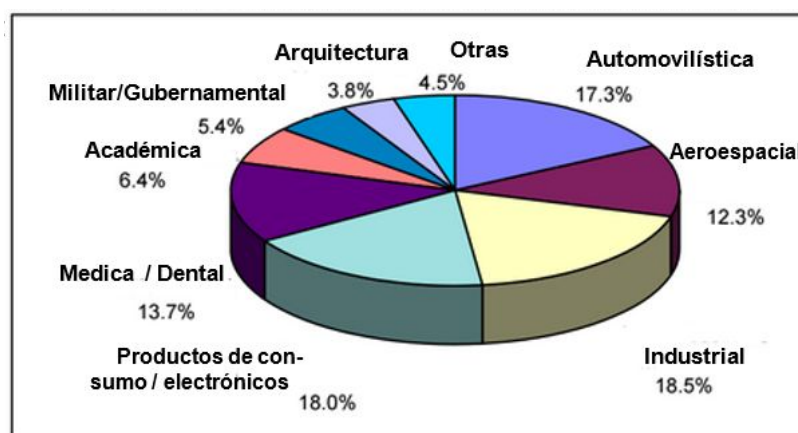


Figura 1.1 Sectores de aplicación de la manufactura aditiva (Wohlers 2014)).

Estas tecnologías simplifican de manera sustancial los procesos de producción, ya que para su operación generalmente necesitan únicamente detalles dimensionales básicos y un poco de conocimiento de la tecnología y los materiales (Gibson et al. 2010). Otro

beneficio importante radica en la libertad y flexibilidad que aporta al diseño de partes. El proceso de diseño se simplifica, enfocándose en los requerimientos funcionales más allá de las restricciones que imponen los procesos de manufactura tradicionales (Wohlers 2012).

1.2 El proceso FDM

El Modelado por Deposición de Material Fundido fue desarrollado en 1988 por Scott Crump, cofundador de Stratasys Inc., y patentado en 1992. Esta tecnología pertenece a la categoría de extrusión dentro de la Manufactura Aditiva y consiste básicamente en una máquina de estructura tipo pórtico o puente con control numérico computarizado que utiliza un cabezal para depositar filamentos de materiales termoplásticos de manera controlada y selectiva creando capas (Figura 1.2). En cada capa, boquillas de extrusión separadas para modelo y soporte dentro del cabezal, derriten y depositan el material en un estado fundido sobre una plataforma dentro de un ambiente controlado. Los filamentos una vez depositados se enfrían y unen formando la pieza. Para el depósito de las siguientes capas, la plataforma realiza un desplazamiento hacia abajo igual al espesor de capa. El término *manufactura por capa* hace referencia a las características del filamento depositado y sus trayectorias.

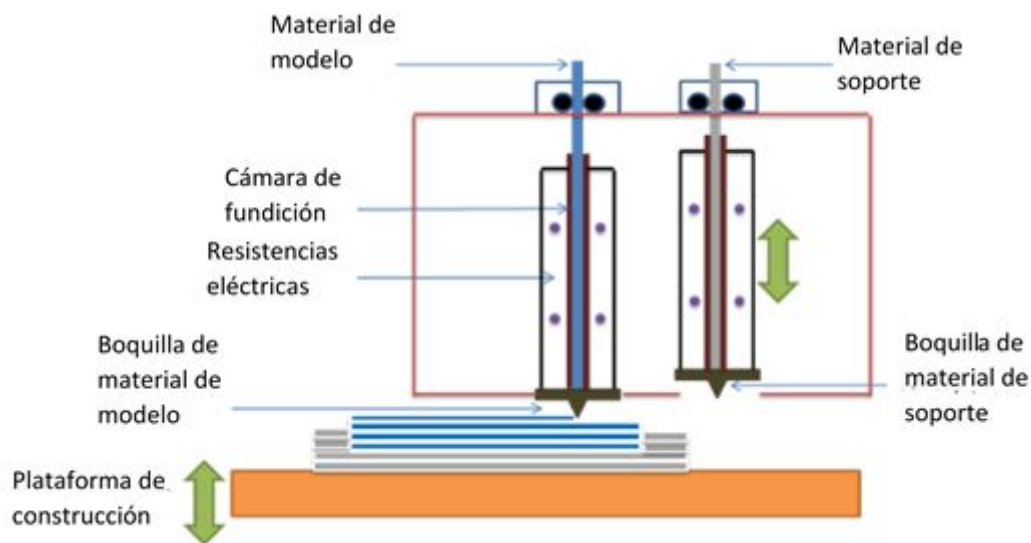


Figura 1.2 Esquema del cabezal de extrusión de una máquina FDM.

Una vez terminada la construcción es necesario remover el material de soporte de la pieza ya sea arrancándolo o disolviéndolo en una mezcla de agua y detergente. El proceso requiere de mínima interacción humana y está basado fundamentalmente en la química de la superficie, la energía térmica y un proceso de manufactura por capa (Ahn et al. 2009).

La mayor fortaleza del proceso FDM radica en la variedad de materiales termoplásticos y las propiedades mecánicas que logran sus construcciones. Las piezas fabricadas usando esta tecnología se encuentran entre las más resistentes construidas por cualquier proceso de Manufactura Aditiva en base a polímeros (Gurr & Mülhaupt

2012). Es por ello que es posible comparar los sistemas FDM con algunos de los sistemas convencionales de inyección de plástico cuando se trata de propiedades mecánicas, acabado superficial, etc. (Mahesh et al. 2004)

Las desventajas de la tecnología FDM se describen en términos de la velocidad de construcción, precisión y densidad de material (Gibson y Rosen, 2010). Las boquillas son circulares por lo que es imposible generar esquinas, y de manera general, las formas producidas son dependientes de la boquilla, características de aceleración y desaceleración del cabezal, y del comportamiento viscoelástico del material al momento de su solidificación. Otros aspectos importantes radican en la naturaleza anisotrópica de las construcciones y su acabado superficial.

1.2.1 Parámetros de Manufactura

La tecnología FDM, como cualquier otra tecnología de manufactura aditiva, necesita procesar información geométrica para convertirla en trayectorias de construcción y comandos de instrucciones para la máquina. El proceso comienza con un modelo sólido en tres dimensiones del objeto a construir en formato STL, el cual debe ser computacionalmente traducido a una descripción geométrica por medio de capas. Esta representación del modelo en capas es utilizada para generar las trayectorias de deposición que seguirá el cabezal extrusor y demás, comandos necesarios para que la máquina deposite los filamentos con las condiciones requeridas por la tecnología. En este informe, dichas condiciones se dividen en parámetros pre-establecidos por el sistema y en parámetros de manufactura por capa.

(a) Parámetros pre-establecidos en el sistema.

- Temperatura de extrusión.
- Temperatura de la cámara donde se depositan los filamentos.
- Velocidad de deposición.

Estos parámetros son supeditados a la elección de los materiales, donde cada tipo de material requiere de parámetros específicos de procesamiento. Al momento de seleccionar el material, el sistema automáticamente establece las temperaturas del proceso de extrusión y la velocidad de deposición acorde a las características reológicas del polímero, lo que también limita el tamaño de boquilla para lograr la extrusión dentro de los intervalos funcionales del proceso. Los materiales de soporte se dividen en dos tipos: solubles y básicos, estos últimos deben ser arrancados de la construcción una vez terminada la pieza. Hasta el momento, no todos los materiales de modelo son compatibles con materiales de soporte solubles, lo cual acota las posibilidades geométricas alcanzables ya que al momento de remover el material de soporte, la pieza podría dañarse o simplemente no permitir el acceso para la remoción del soporte.

En la actualidad, la compañía Stratasys ofrece las máquinas de proceso FDM Fortus® (Anon n.d.), que son las que se encuentran disponibles en el MADiT. En estos sistemas, los materiales de construcción (modelo y soporte) se encuentran enrollados en forma de filamentos en contenedores herméticos que mantienen al polímero aislado de

humedad y polvo, estos contenedores llamados “canister”, se insertan en ranuras destinadas a alojar específicamente material de modelo o material de soporte. La Tabla 1.1 muestra los materiales de modelo, el tamaño de boquilla para su extrusión y el tipo de material de soporte compatible disponibles para el presente estudio.

Tabla 1.1 Material de modelo, tamaño de boquilla disponible para su extrusión y tipo de material de soporte disponible para el sistema Fortus.

Material	Boquillas	Tipo de Soporte
ABS-M30	T10, T12, T16, T20	Soluble
ABSi	T10, T12, T16, T20	Soluble
ABS-ESD7	T12, T16	Soluble
ABS-M30i	T10, T12, T16, T20	Soluble
PC	T12, T16, T20	Básico/Soluble
PC-ABS	T10, T12, T16, T20	Soluble
PC-ISO	T12, T16, T20	Básico
Ultem 9085	T16, T20	Básico
PPSF/PPSU	T16, T20	Básico

Una vez seleccionados los materiales deben establecerse los parámetros de manufactura por capa. A continuación se describen estos parámetros.

(b) Parámetros de manufactura por capa.

- Espesor de capa.

Las capas son delgadas secciones transversales horizontales (plano x-y) resultantes de rebanar (laminar) el modelo según su orientación y espesor seleccionado. Cada tamaño de boquilla se encuentra configurada en el sistema para extruir un solo espesor de capa. En la Tabla 1.2 se muestra el tamaño de boquilla con el espesor de capa correspondiente.

Tabla 1.2 Tamaño de boquilla y espesor de capa correspondiente.

Boquilla a	Espesor de capa (mm)
T10	0.1270
T12	0.1778
T16	0.2540
T20	0.3302

En la Figura 1.3, se observa la misma pieza seccionada con diferentes espesores de capa, la pieza a) presenta un mayor número de capas en comparación con la pieza b), esto debido a la diferencia del espesor de capa con las que se seccionaron ambas piezas.

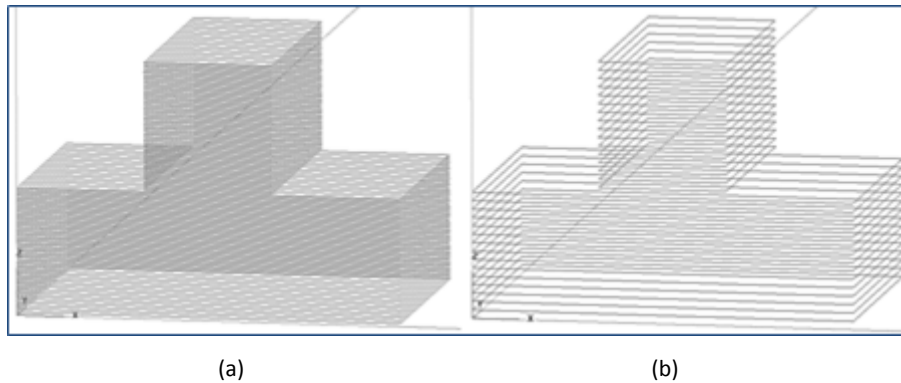


Figura 1.3 Pieza seccionada con dos espesores de capa diferentes, (a) 0.127[mm] y (b) 0.3302 [mm].

- Orientación.

La orientación de un modelo está en función de su geometría, define el área proyectada (plano x-y) y la altura (eje z). Esta orientación específica de construcción influye en el tiempo de manufactura, cantidad de material de modelado y soporte, acabado superficial y precisión dimensional (Sood et al. 2009). Así pues, la orientación determina el número de capas a depositar, es decir, entre mayor sea la altura mayor será el número de capas de un espesor determinado.

- Estilo de soporte.

El soporte es todo aquel material necesario para la construcción del modelo pero que no forma parte de su geometría. La cantidad de material de soporte y las trayectorias en que es depositado, son calculadas automáticamente para cumplir con los requerimientos que imponen el tipo de material (e.g. soluble o no) y la geometría del modelo.

- Ancho de filamento.

Es el ancho con que el filamento depositado (raster en el idioma inglés) sigue las trayectorias para formar el contorno y rellenar una región interna. En la Figura 1.4 se muestra la representación de una posible estrategia para depositar una capa y las características de las trayectorias de depósito.

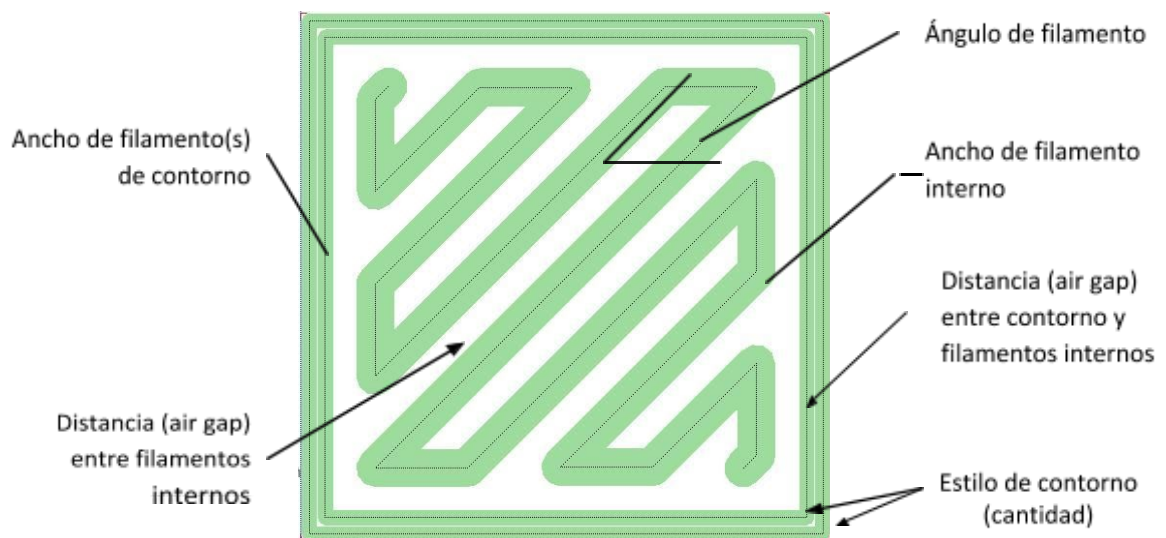


Figura 1.4 Características de los filamentos depositados en una capa.

Cada tamaño de boquilla posee un intervalo específico de anchos de filamentos que es capaz de depositar, en función al material de modelo. La Tabla 1.3 muestra los materiales, el tamaño de boquilla y el intervalo de anchos de filamentos que la máquina es capaz de extruir.

Tabla 1.3 Ancho de filamento en mm para cada tamaño de boquilla.

MATERIAL	T10	T12	T16	T20
ABS-M30 ABSi ABS-M30i PC-ABS	0.2032-0.5782	0.3048-0.7298	0.4064-0.8314	0.4572-0.9822
PC PC-ISO	ND	0.254-0.679	0.4064-0.8814	0.4572-0.9822
ABS-ESD7	ND	0.3048-0.7298	0.4064-0.8314	ND
Ultem 9085	ND	ND	0.4064-0.7814	ND
PPSF/PPSU	ND	ND	0.4064-0.7814	0.4572-0.9822

- Estilo de contorno.

Es la cantidad de filamentos depositados para conformar el exterior de la sección transversal. En la Figura 1.5 se muestran dos estilos de llenado.

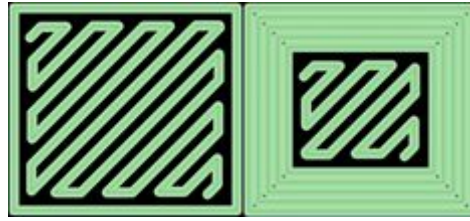


Figura 1.5 Diferentes estilos de contorno para una misma pieza, simple (izquierda) y múltiple (derecha).

- Distancia entre filamentos.

Es la distancia (*air gap* en el idioma inglés) entre dos filamentos adyacentes en una misma capa. Esta distancia puede variar en un intervalo negativo o positivo, dependiendo de las necesidades de la pieza. En la Figura 1.6 se muestran las diferentes configuraciones del espacio entre filamentos. Las distancias entre filamentos que son posibles de modificar son: la distancia entre filamentos internos, la distancia entre los filamentos internos y los filamentos del contorno y la distancia entre los filamentos del contorno en caso de elegir el caso de múltiples contornos.

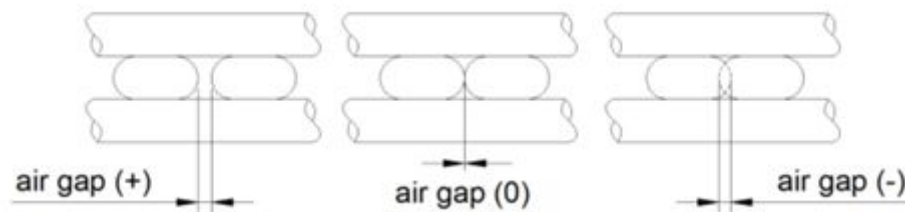


Figura 1.6 Posibles configuraciones de distancia entre filamentos dentro de una construcción FDM (Ortega Rodríguez 2014).

- Estilo de llenado.

Existen tres tipos de llenado interior pre-definidos para construir una pieza: Sólido-normal (*Solid-normal*), Espaciado (*Sparse*) y Espaciado doble-densidad (*Sparse-double dense*). El estilo sólido-normal es un llenado sin espacios (*air gap*) entre filamentos adyacentes, donde los filamentos se depositan perpendicularmente a los depositados en la capa anterior. El estilo espaciado es un llenado hueco con una distancia determinada entre filamentos, formando solo una red interna unidireccional para otorgar rigidez estructural a la pieza. El estilo denso espaciado-doble es un llenado similar al espaciado con la diferencia de ser conformado por filamentos bidireccionales en cada capa. La Figura 1.7 muestra, de manera general, los tres estilos de llenado.

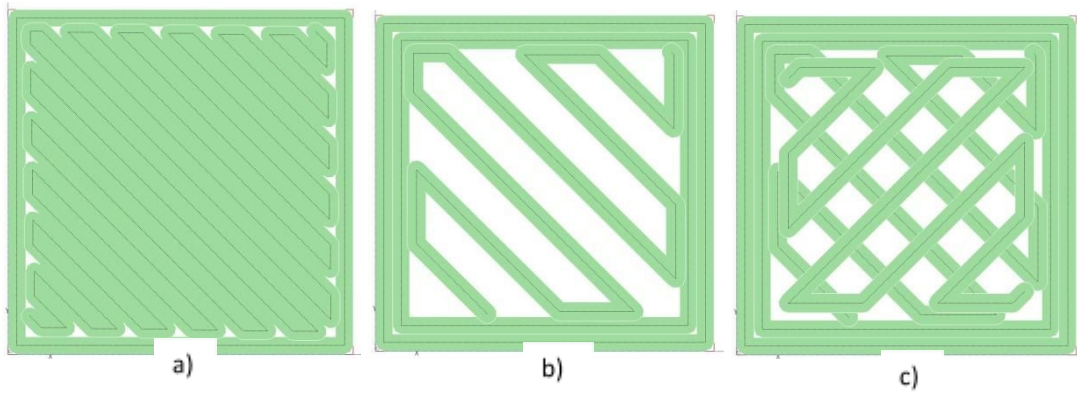


Figura 1.7 Estilos de llenado a) sólido, b) espaciado y c) espaciado, doble-densidad.

- Estilo visible de superficie.

Existe la opción para elegir entre un acabado superficial normal y un módulo de acabado superficial mejorado. Mientras que en el estilo normal sólo se pueden elegir los anchos de filamentos de contorno e internos, dejando al descubierto los huecos generados por los cambios de dirección en el llenado interior, en el estilo mejorado se cuenta con opciones para elegir los anchos de filamentos que permanecerán visibles debido al efecto de escalonamiento generado por la inclinación de la superficie.

El modo mejorado, emplea anchos de filamento pequeños en las trayectorias de construcción de las superficies visibles exteriores. Las superficies visibles pre-establecen un *air gap* negativo entre sus filamentos con objeto de eliminar los huecos.

- Ángulo de filamento.

Es la dirección del filamento con relación al eje “x” de la plataforma de construcción (Figura 1.8). El ángulo puede variar entre 0 y 90°.

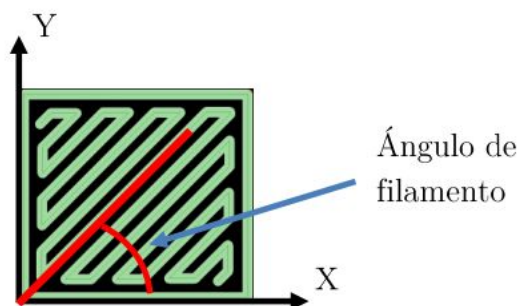


Figura 1.8 Ángulo de filamento.

2 Objetivo y Alcances

2.1 Objetivo

El objetivo del presente estudio es proporcionar la información que apoye en el proceso de diseño y selección de parámetros de manufactura, que afectan las características geométricas y tiempo de construcción en el proceso aditivo FDM.

2.2 Alcances

- i. Generar información acerca de la influencia de los parámetros de manufactura que impactan en las características geométricas de la pieza y el tiempo de construcción.
- ii. Proporcionar información acerca de las restricciones geométricas mínimas y su relación con los parámetros de manufactura.
- iii. Proponer una serie de pasos para la selección de parámetros de manufactura.

3 Recomendaciones para el diseño y construcción de partes mediante la tecnología FDM

3.1 Recomendaciones Generales

Existen en la literatura (Sood et al. 2009; Comb 2015; Boschetto et al. 2012) algunas recomendaciones de diseño para la fabricación de partes mediante el uso de los procesos de Manufactura Aditiva. De manera incipiente, estas recomendaciones han sido denominadas como Diseño para Manufactura Aditiva (DfMA, por sus siglas en inglés), en concordancia al Diseño para Manufactura (DfM), método que ofrece una extensa recopilación de ejemplos de buenas y malas prácticas para el diseño de producto respecto a muchos procesos de manufactura tradicionales como moldeo por inyección, estampado, fundición, forja y maquinados (Bourell *et al*, 2009). La Manufactura Digital Directa, término que hace referencia a las tecnologías de Manufactura Aditivas enfocadas a construir partes funcionales y productos de uso final, también ha generado una serie de consejos enfocados al diseño de producto acorde a las nuevas y crecientes posibilidades que ofrecen estas tecnologías.

Como inducción, se presentan de forma somera estos conceptos, tomados principalmente de autores como: Gibson y Rosen (2010) y Comb de Stratasys Inc. (2015). En la Tabla 3.1 se presentan las posibilidades y ventajas que otorga la manufactura aditiva al diseñador.

Tabla 3.1 Recomendaciones básicas para el diseñador para el uso manufactura aditiva (Ashby et al. 2004; Wohlers 2012).

Posibilidades y ventajas que otorga la manufactura aditiva
Permite el uso de geometrías complejas para cumplir con los requerimientos del diseño, sin que esto conlleve a retrasos o aumento en costos con respecto a geometrías simples.
Ofrece la posibilidad de diseños consolidados: la integración de características o partes para lograr una pieza de mayor complejidad y evitar procesos extras de ensambles. Sin embargo, también otorgan la posibilidad de segmentar una pieza en varias partes sin que esto signifique un aumento en costos como resultado de un mayor número de herramientas.
Permite ignorar las limitaciones impuestas por los procesos de manufactura tradicionales y enfocarse completamente en la funcionalidad y desempeño del producto, sin embargo, cada tecnología de Manufactura Aditiva trae consigo sus propias restricciones y es importante su comprensión para el mejor aprovechamiento.
Otorga la posibilidad de una iteración constante para el refinamiento del diseño, además de ser ideales para la manufactura “Justo a tiempo” (JIT, por sus siglas en inglés).
Habilita la creación de partes con complejidad jerárquica: microestructuras y mesoestructuras controladas en distintas zonas dentro de la construcción de una misma pieza.

En específico, la tecnología FDM encuentra su mejor aplicación en los siguientes casos (Stratasys 2011):

1. Diseños complejos.
 - o Con gran variedad de formas.
 - o Formas orgánicas, personalizadas y ergonómicas.
2. Partes con tamaño de pequeño a moderado.
 - o Ideal pero no excluyente para tamaños:
Mayores a 25mm x 25mm x 25mm
Menores a 405mm x 355 mm x 405mm
(Obtenido su mejor desempeño en áreas mayores a 225mm x 225mm)
 - o Bajo volumen de demanda o manufactura personalizada.
 - o Producción de lotes piloto, puente o finales.
 - o Capacidad en volumen; en general de 1 a 1000 piezas
3. Partes susceptibles a muchas revisiones y cambios.
 - o Cuando sean deseables modificaciones iterativas en el diseño.
 - o Cuando exista un gran número de opciones de configuración para un volumen pequeño de productos.
4. Partes compatibles con los materiales ofrecidos por la tecnología.
 - o Polímeros termoplásticos; Verificar que cumplan con los requerimientos del diseño con respecto a las propiedades mecánicas, propiedades eléctricas, resistencia química y resistencia térmica.
5. Partes con intervalos de precisión alcanzable.
 - o Sin aplicar un maquinado secundario, usar para aplicaciones que requieran tolerancias de 0.13mm o mayores.
 - o En la mayoría de los casos, un maquinado secundario mejora la precisión y logra cumplir requerimientos de tolerancias más cerradas.

Estos conceptos tienen la intención de auxiliar en la estrategia de discriminación para determinar si el proceso de manufactura FDM es adecuado para la manufactura de la pieza (Ashby et al. 2004).

3.2 Recomendaciones para cada etapa del proceso FDM

Los parámetros de la tecnología FDM mantienen tal correlación entre ellos, que convierten a la manufactura por FDM en un proceso multi-paramétrico dependiente, es decir, si se modifica un parámetro, éste puede modificar a otros parámetros que mantengan relación con el primero, además de que se tendrán diferentes resultados (Górski et al. 2013). Por ejemplo si escogemos una boquilla T10 en lugar de una T16, se tendrá una afectación en los anchos de filamento que son posibles extruir, el flujo volumétrico, el ángulo de auto-sustentación, entre otros; además de esto se tendrán resultados diferentes de tiempo de construcción y acabado superficial.

Así, la generación de recomendaciones para la selección de los parámetros de manufactura, requiere de la previa identificación de las correlaciones que existen entre los diferentes parámetros de construcción.

En ésta sección se presenta en primer lugar la descripción detallada del proceso de manufactura en FDM, con la finalidad de presentar recomendaciones específicas en cada paso. Posteriormente se analiza la interacción de los parámetros de manufactura para identificar el efecto que tienen sobre la geometría y tiempo de construcción de las piezas. Finalmente se presenta una propuesta de secuencia general para la elección de los parámetros de construcción.

3.2.1 Diagrama de flujo para la manufactura de una pieza mediante la tecnología

El diagrama de flujo, mostrado en la Figura 3.1, presenta la secuencia necesaria para construir una pieza mediante la tecnología FDM en equipos fortus® de Stratasys Inc. El diagrama es concebido para presentar en orden las recomendaciones que ayuden en la revisión del diseño de la pieza y apoyen en la selección de los parámetros de manufactura por capa.

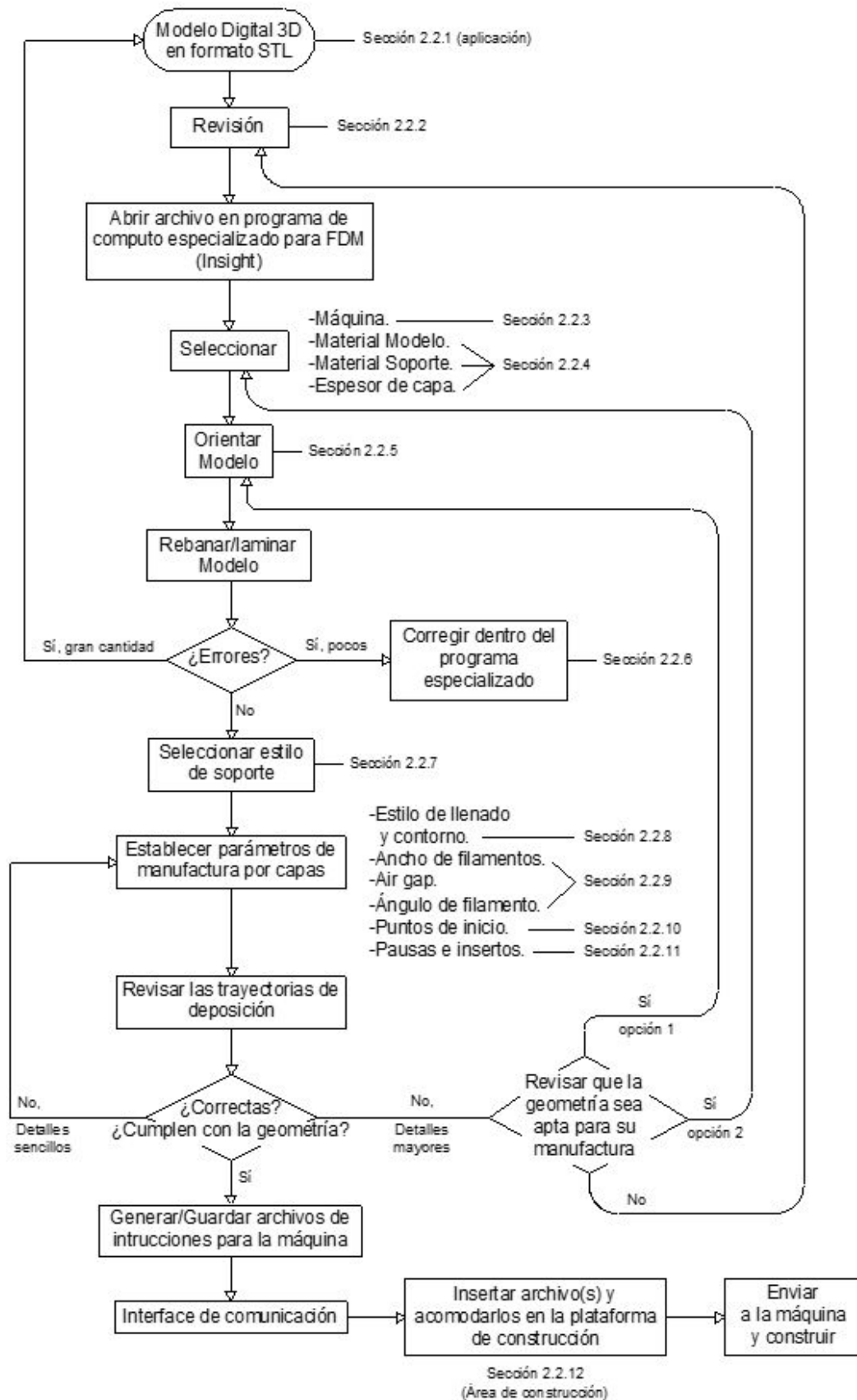


Figura 3.1 Diagrama de flujo para la construcción de una pieza mediante la tecnología FDM.

3.2.2 Modelo Digital 3D

Definición de la aplicación o funcionalidad de la pieza a construir.

Como primer paso se recomienda definir el uso de la construcción, con el objeto de puntualizar sus atributos, determinar los requerimientos de mayor importancia y sugerir parámetros de manufactura a cuidar debido a su influencia en ellos. Con este propósito, se toman las 4 categorías de aplicación definidas por Stratasys Inc.; las primeras dos están dirigidas a asistir en el proceso de diseño, mientras que las otras dos se encuentran enfocadas a la Manufactura Digital Directa. La Figura 3.2 muestra estas categorías de aplicación.

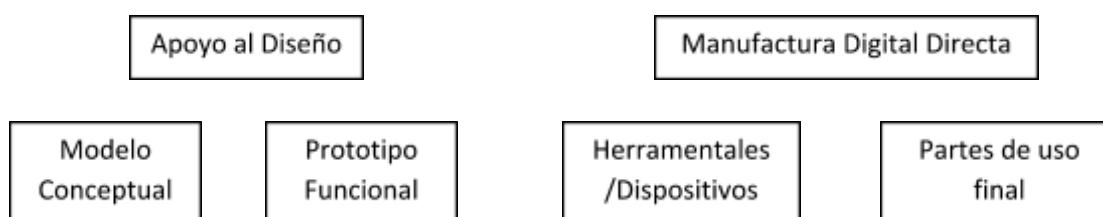


Figura 3.2 Categorías de aplicación para las piezas manufacturadas mediante la tecnología FDM.

Modelo conceptual: Son aquellos empleados en las primeras etapas del diseño y que están enfocados en auxiliar en la visualización del producto y en la comunicación dentro del proceso de diseño, cumpliendo con requerimientos geométricos de construcción y de ensamblaje. Parámetros críticos: tamaño de boquilla y orientación.

Prototipo funcional: Son aquellos que tienen como objetivo probar el funcionamiento del producto para validar su diseño y posible manufactura, cumpliendo con requerimientos de resistencia y desempeño. Parámetros críticos: tamaño de boquilla, orientación, material de modelo, estilo de llenado y ancho de filamento.

Herramental/Dispositivo: Son todos aquellos aditamentos enfocados en asistir al proceso de manufactura de otras piezas, empleados para producir, inspeccionar, depositar o manejar las piezas manufacturadas. Parámetros críticos: Orientación, material de modelo, estilo de llenado, tamaño de boquilla y ancho de filamento.

Parte de uso final: Son aquellas partes, subensambles o productos vendidos al usuario o puestos directamente en servicio como pieza terminada. Parámetros críticos: tamaño de boquilla, orientación, materiales de modelo y soporte, estilo de llenado, ancho de filamento y estilo de soporte.

Cabe mencionar que cada diseño tendrá características y atributos específicos, siendo los requerimientos asociados a cada una de las categorías, sugerencias para ayudar al diseñador a hacer el puente entre su diseño y las variables del proceso. Las tolerancias de construcción están en función de la máquina FDM elegida y por lo general éstas son de ± 0.13 mm (Hiemenz 2011).

3.2.3 Revisión del Diseño

- ❖ Conocer las limitaciones del proceso FDM.

Se recomienda evitar esquinas, paredes delgadas (ver especificaciones Tabla 4), detalles de alta resolución y superficies con ángulos de inclinación dentro de la “región indeterminada” (Ahn et al. 2009). Aunque algunas de estas restricciones pueden ser solventadas modificando los parámetros de manufactura por capa, o con la aplicación de un post-proceso, se recomienda evitarlas con objeto de no aumentar costos. Debido al principio del proceso, que consiste en depositar filamentos capa por capa para construir una pieza, tanto las esquinas como la resolución están restringidas al diámetro mínimo que es capaz de extruir, es decir, al tamaño de boquilla.

A continuación se especifican las demás restricciones.

Espesor de pared:

El espesor de pared mínimo está en función del espesor de capa definido para la construcción, es decir, del tamaño de boquilla seleccionado. Se deben considerar las posibles combinaciones entre boquillas y materiales (ver Tabla 1.1), pues existen restricciones al respecto. La Tabla 3.2 muestra las recomendaciones del fabricante.

Tabla 3.2 Espesores de pared mínimos y recomendados para la tecnología FDM.

Espesor de pared para construcciones FDM			
Boquilla	Espesor de capa	Espesor mínimo de pared	Espesor mínimo recomendado
T 10	0.127mm	0.41mm	0.56mm
T 12	0.178mm	0.61mm	0.64mm
T 16	0.254mm	0.81mm	1.04mm
T 20	0.330mm	0.81mm	1.12mm

En el modelo CAD, se deben evitar formas estrechas o ángulos de salida en paredes delgadas. Esto debido a que la tecnología FDM utiliza una extrusión de filamento continuo de ancho determinado en cada curva, y el cambio gradual en el ancho de la pieza causa espacios vacíos. Para prevenir los espacios vacíos, Stratasys recomienda generar formas de espesor constante en el plano XY. El espesor puede variar en diferentes elevaciones de Z, pero debe hacerse con discreción, pues el efecto de “escalonamiento” (Ahn et al. 2009) limita los cambios graduales (ángulos de salida). Utilizar en el diseño múltiplos del espesor de capa y múltiplos pares del ancho de filamento para el grosor de las paredes de la pieza, facilitará su correcta definición.

Ángulos de inclinación:

De acuerdo con algunos autores (Boschetto et al. 2012), los parámetros de mayor influencia en el acabado superficial son el espesor de capa y el ángulo de inclinación de la superficie, ya que ambos determinan el efecto de escalonamiento.

La región indeterminada, comprendida entre los ángulos de 1 a 30° y de 150-179° con respecto a la horizontal (Ahn et al. 2009), debe ser evitada y favorecer inclinaciones en el intervalo de entre 45 y 90° con objeto de obtener un mejor acabado superficial y evitar un post-proceso abrasivo para su mejora.

Por otra parte, la tecnología tiene la capacidad de generar ángulos auto-soportados, es decir, aquellos que no necesitan de soporte durante su construcción. Debido a que el tiempo de construcción y el costo de material se incrementan al emplear soportes, resulta ventajoso minimizarlos. De acuerdo a Stratasys Inc. (2011), el ángulo de auto-soporte preestablecido se encuentra en un intervalo de entre 40° y 45°, por lo que se recomienda, si el diseño lo permite, revisar el modelo para identificar cualquier superficie cercana a este intervalo de ángulos y ajustarlos. De manera alternativa, el ángulo de auto-soporte puede ser modificado como parte de los parámetros de manufactura. Según Stratasys Inc. (2011), en general es seguro realizar un ajuste de -5° a -10° respecto al preestablecido en el sistema.

3.2.4 Modelador/Máquina FDM

- ★ Seleccionar la máquina o sistema FDM que cumpla con los requerimientos del diseño.

Existe una amplia variedad de máquinas FDM construidas por Stratasys, Inc. desde las de bajo costo, pequeña escala y mínimo rango de interacción en el proceso hasta las más versátiles y sofisticadas. Las principales diferencias radican en el control de la temperatura y en los tamaños de boquillas y materiales disponibles. Actualmente el fabricante divide sus máquinas en tres series:

- ❖ *Ideas.*
- ❖ *Design.*
- ❖ *Production.*

La serie *Ideas* consiste en los modelos Mojo y Uprint, mientras que a la serie *Design* pertenece el Modelo *Dimension*. Ambas series son catalogadas como impresoras 3D de escritorio y están enfocadas principalmente a la construcción de prototipos conceptuales para asistir en el proceso de diseño.

Por su parte, la serie *Production*, está dirigida a aplicaciones de mayores demandas como modelos para validación de productos finales, prototipos funcionales para pruebas y Manufactura Digital Directa. Por ello requiere de máquinas más versátiles, con mayor control sobre los parámetros de procesamiento y opción para emplear distintos materiales. Las máquinas Fortus®, con las que se cuenta en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT), perteneciente al CCADET dentro de la UNAM, componen dicha serie y son las de mayor perfil por su tamaño, velocidad de construcción, precisión e intervalo de materiales. Tienen la capacidad de operar con diferentes espesores de capa mediante el uso de boquillas intercambiables con distintos diámetros. Un mayor diámetro de boquilla puede extruir una mayor cantidad de material y emplear un menor número de capas, acortando así el tiempo de construcción.

3.2.5 Materiales y espesor de capa

- ★ Seleccionar el material y el espesor de capa (tamaño de boquilla) de acuerdo con la categoría de aplicación.

En la generación de modelos conceptuales se recomienda emplear un material suave como el ABS, con la capacidad de ser extruido por todos los tamaños de boquillas y susceptible a una gran variedad de post-procesos. Por otra parte, cuando el desempeño del producto es importante, se debe comenzar por elegir el material, teniendo en cuenta algunos criterios establecidos por el fabricante de la tecnología.

Criterios para la selección de material:

- Propiedades del material.

Las demandas operacionales de la pieza deben ser consideradas en términos de sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. Para mayor información de las propiedades mecánicas referirse a la sección Orientación de Construcción y hojas de datos del fabricante.

- Material de soporte.

La tecnología FDM ofrece dos tipos de materiales de soporte: desprendibles y solubles. El material de modelo seleccionado determina la posibilidad de material de soporte disponible (Tabla 1.1). Así pues, se debe considerar si las ventajas que aporta un soporte soluble (desprendimiento automático sin necesidad de un proceso extra y con pocas preocupaciones sobre el acceso para su remoción) son necesarias. De ser así, seleccionar un material de modelo que tenga la opción de emplear soporte soluble. De otra forma, el material de soporte deberá ser desprendido manualmente, con los riesgos que esto conlleva.

- Espesor de capa.

El material de modelo también determina los espesores de capa que pueden ser utilizados (Tabla 1.2), y éste a su vez determina los anchos de filamento disponibles (Tabla 1.3).

Selección del espesor de capa

El espesor de capa influye en el tiempo de construcción, calidad del acabado superficial, resolución de formas e inclusive en la resistencia de la pieza. Por lo tanto, para tomar esta decisión se debe analizar cada uno de los factores mencionados. De manera general, el fabricante realiza las siguientes recomendaciones al respecto.

Espesores de capa más delgados:

- ✓ Producen superficies más suaves (lisas).
- ✓ Requieren de mayor número de capas, lo que incrementa el tiempo de

construcción.

- ✓ Combinados con anchos de filamento delgados logran: figuras con una resolución más fina y un mejor llenado (densidad) de paredes delgadas.

Espesores de capa más gruesos:

- ✓ Producen menores tiempos de construcción.
- ✓ Requieren de menor número de capas, lo que incrementa el efecto de escalonamiento.
- ✓ Combinados con anchos de filamentos gruesos logran: mayor velocidad de deposición y construcción, así como construcciones más fuertes.

Las imágenes de la Figura 3.3 muestran los efectos de escalonamiento, producidos por cada uno de los espesores de capa, en dos ángulos complementarios de construcción.

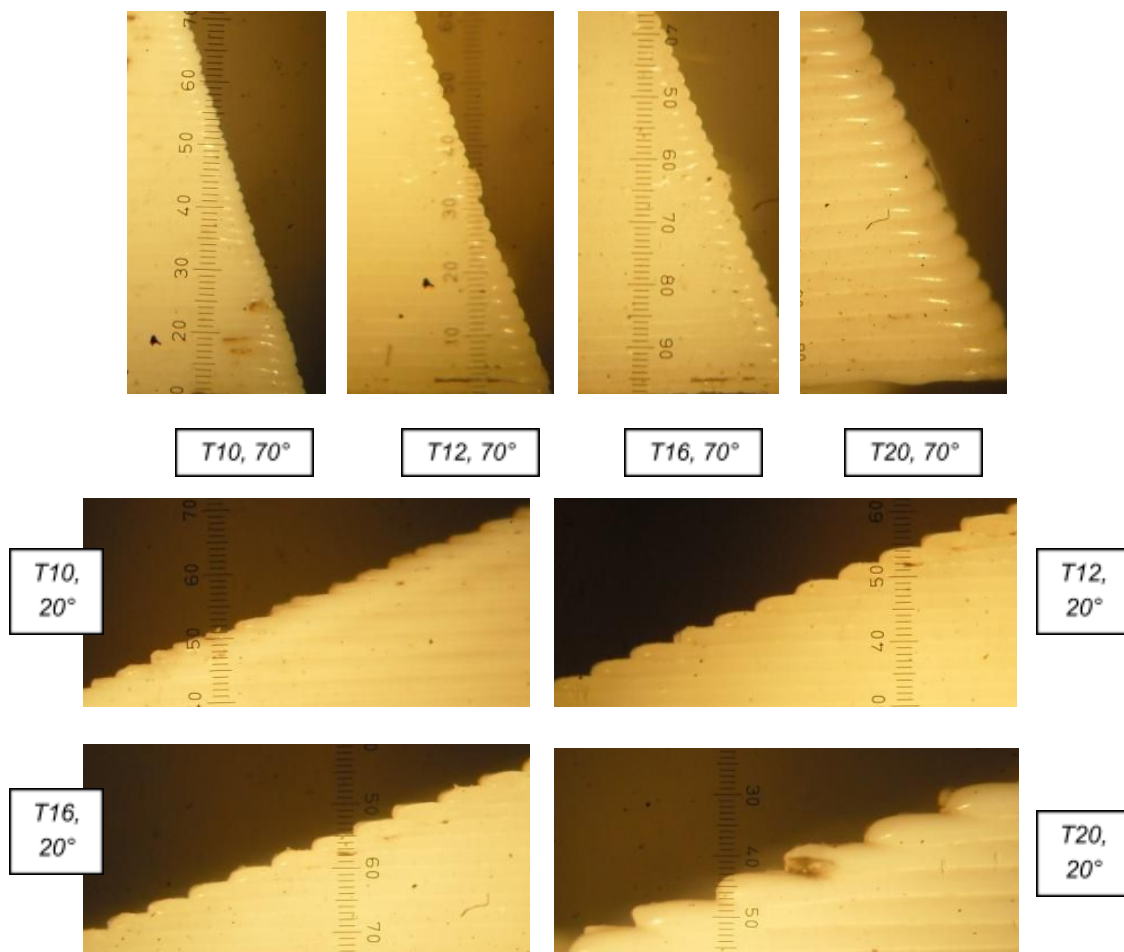


Figura 3.3 Imágenes de ángulos a 20° y 70° respecto a la horizontal, tomadas en un microscopio Iroscope® modelo NZ-14-TU con aumento de 20x. Modelos construidos a una misma orientación y con cada uno de los tamaños de boquilla en material de modelo ABS-M30.

Resulta importante señalar que la tecnología FDM es un proceso dependiente de la temperatura, por lo que seleccionar materiales de temperaturas de extrusión alta

aumentará el grado de procesamiento y el tiempo de construcción. De manera más específica, se recomienda diseñar para espesor de capa de 0.254mm, tamaño de boquilla T16, ya que ésta presenta la mejor velocidad de deposición y, para algunos materiales, mejores flujos volumétricos que la boquilla T20. La Figura 3.4 muestra un gráfico comparativo del flujo volumétrico respecto al tamaño de boquilla en los materiales ABS-M30, PC y PC-ABS.

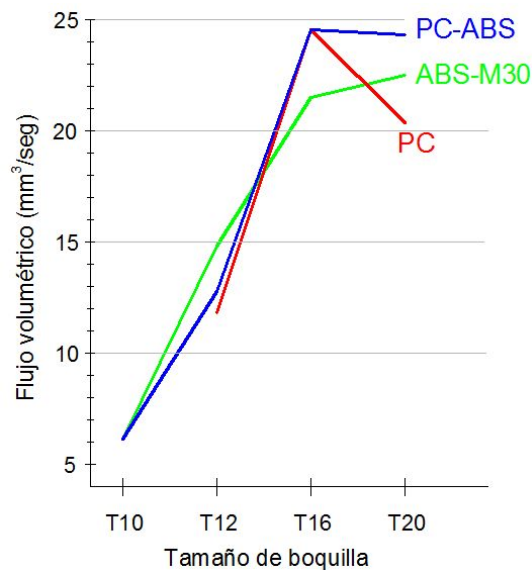


Figura 3.4 Gráfica de flujo volumétrico respecto al tamaño de boquilla para los materiales de modelo ABS-M30, PC y PC-ABS; el flujo volumétrico es calculado para un mismo ancho de filamento para todas las boquillas y materiales.

3.2.6 Orientación de construcción

- ★ Contemplar desde el diseño de la pieza la orientación de construcción, ya que es el parámetro de manufactura de mayor influencia en la tecnología FDM.

En medida de lo posible y sin afectar al proceso creativo, la recomendación es diseñar con una intención de orientación para la construcción, o en su defecto, señalar al usuario de la tecnología cuáles son los principales requerimientos de desempeño de la pieza y, sugerir así, una posible orientación para su construcción.

El fabricante de la tecnología ha generado algunas consideraciones para orientar la pieza (Stratasys Inc., 2011):

- ✓ Resistencia.
 - Orientar la parte de tal forma que las cargas sean perpendiculares a las capas de construcción.

Con objeto de identificar la orientación de construcción y su influencia en la resistencia mecánica, en la Figura 3.5 se muestran probetas FDM para ensayos de tracción y sus curvas resultantes. Las curvas esfuerzo-deformación muestran

dependencia de la estructura como resultado de la orientación de construcción (Bagsik et al. 2010).

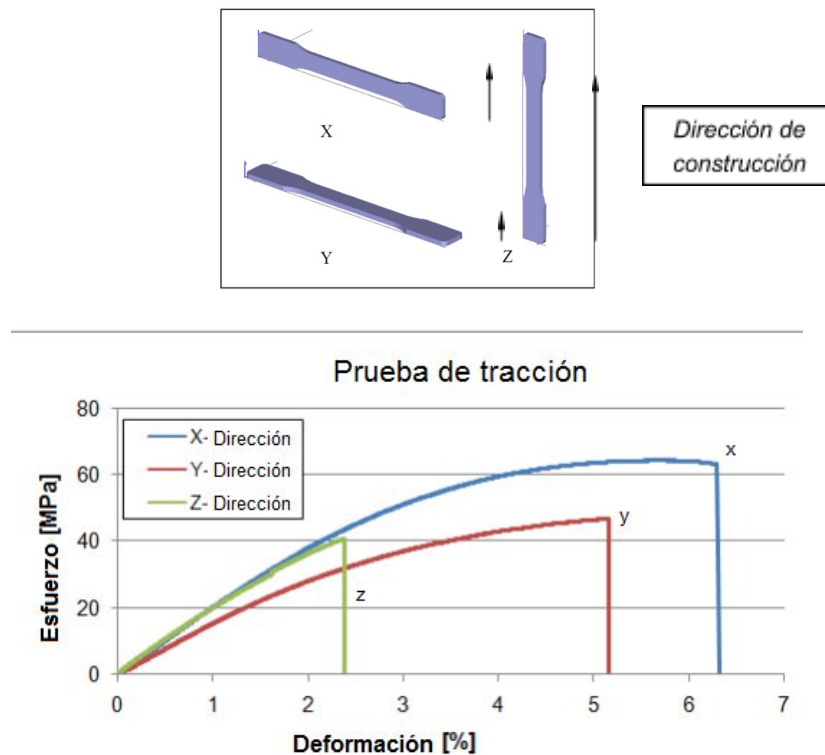


Figura 3.5 Orientación de construcción y curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las distintas probetas (Bagsik et al. 2010).

- ✓ Acabado superficial.
 - Orientar la parte de manera que los contornos se ubiquen en el plano XY.
- ✓ Tiempo de construcción.
 - Orientar para:
 - Minimizar la altura de la construcción.
 - Reducir el volumen de material de soporte.
 - Minimizar el número de capas que contengan ambos materiales.

El número de capas en una pieza depende del espesor de capa y la orientación de la pieza. Si el número de capas es mayor, resultará en gradientes de temperatura mayores, lo cual aumenta la difusión entre filamentos adyacentes dando como resultado una mayor resistencia. Sin embargo, gradientes de temperatura altos también causan distorsión dentro de una capa o entre capas, es decir, aumentar el número de capas incrementa el número de ciclos térmicos (calentar y enfriar) lo que provoca acumulación de esfuerzos residuales y, por lo tanto, distorsión, fracturas entre capas (delaminación) o fallas en la fabricación, resultando así una disminución de la resistencia.

- ✓ Permeabilidad

Aunque no es recomendable utilizar la tecnología para el manejo de fluidos, en caso de ser necesario, se recomienda construir con una orientación que requiera el menor

número de capas. De manera más específica, una geometría elíptica, construida con el eje mayor paralelo a la horizontal, como se muestra en la Figura 3.6, se sugiere para ayudar a disminuir la filtración.

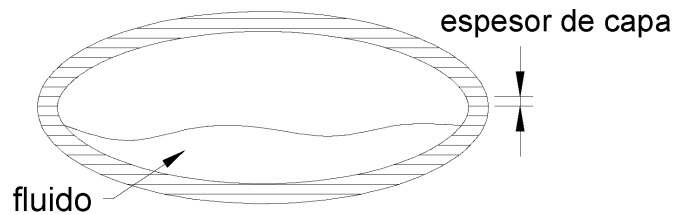


Figura 3.6 Forma sugerida para transportar o contener líquidos con una construcción FDM.

3.2.7 Manipulación del archivo dentro de Insight

- ★ Utilizar el programa de cómputo especializado *Insight* para la corrección de contornos generados por el rebanado/laminación del modelo, es recomendado para cantidades pequeñas de errores en geometrías sencillas.

A continuación se mencionan algunas de las herramientas con las que cuenta el programa:

- Borrar curvas y segmentos de curvas. Las curvas son elementos del contorno, el cual es determinado por la intersección del plano de la sección transversal a construir (capa) y los triángulos del archivo STL. Dichas intersecciones son instrucciones para formar curvas completas y continuas para cada contorno.
- Unir curvas.
- Dividir curvas.
- Cerrar curvas abiertas.
- Generar offsets de las curvas.
- Mover, rotar, copiar y espejar curvas.
- Dibujar círculos, curvas y rectángulos.
- Añadir textos.

3.2.8 Soporte

- ★ Considerar al soporte no sólo como un requerimiento necesario para lograr formas, sino como una herramienta del proceso.

La mayor parte de los autores se refieren al soporte como una debilidad de la tecnología. Aunque el soporte impone algunas restricciones también aporta ventajas al utilizarlo como apoyo para lograr detalles de baja dimensión, modificar el acabado superficial y al utilizarlo como material de construcción con la facultad de ser disuelto en una solución acuosa.

Por otra parte, se recomienda utilizar la habilidad para construir soporte con material

de modelo y así conseguir disminuir tiempos de construcción al evitar los cambios de boquilla en todas las capas y sus respectivos retrasos.

- ✓ Soporte aplicado en detalles de baja dimensión.

Para detalles de baja dimensión el tipo de material de soporte es importante. Debido a que la carga térmica influye de manera determinante en la estabilidad geométrica, más aún si se trata de un detalle de bajas dimensiones, una opción para su construcción es utilizar el estilo de soporte envolvente, el cual rodea la construcción evitando su escurrimiento y logrando mantener su forma. Se recomienda seleccionar materiales de modelo compatibles con materiales de soporte solubles cuando se requiera construir partes con bajas dimensiones para facilitar el desprendimiento del soporte sin deteriorar la pieza.

3.2.9 Estilo de llenado y contorno

- ★ Comprender y utilizar la habilidad de la tecnología FDM para generar construcciones de densidad variable.

La habilidad de la tecnología para generar piezas que contengan regiones con diferentes estilos de construcción, aporta nuevas posibilidades al diseñador y da claras ventajas con respecto a los procesos tradicionales de manufactura. Dos ventajas, señaladas por el fabricante de la tecnología, son la optimización de peso y resistencia, así como la optimización de tiempo y costo variando la densidad. Se recomienda utilizar esta habilidad de la tecnología como un incentivo para crear formas más eficientes.

Los estilos de construcción predefinidos para el llenado interno de la pieza deben ser seleccionados acorde a las siguientes características (Stratasys Inc., 2011):

- ✓ Resistencia.
- ✓ Peso.
- ✓ Consumo de material.
- ✓ Tiempo de construcción.

Se recomienda emplear un estilo sólido para obtener:

- Mayor fortaleza.
- Mayor peso.
- Mayor consumo de material de modelado.
- Tiempos de construcción más largos.

Se recomienda emplear un estilo espaciado para obtener:

- Piezas más débiles.
- Piezas más ligeras.
- Menor consumo de material.

- Tiempos de construcción menores.

Se recomienda emplear un estilo espaciado-doble para obtener:

- Piezas más fuertes al estilo espaciado.
- Piezas ligeramente más pesadas.
- Ligeramente más de consumo de material.
- Ligeramente más de tiempo de construcción.

Por otra parte, debido a que los paquetes de diseño aún no se adaptan a las nuevas demandas y posibilidades de los procesos de Manufactura Aditiva, para lograr un control avanzado en la densidad, el fabricante de la tecnología sugiere realizar cambios en el modelo CAD de forma que se habilite la posibilidad de procesar regiones dentro de la pieza con métodos de construcción diferentes (Stratasys Inc., 2011). La idea es, básicamente, seccionar el archivo CAD en las partes que se deseen con distinta densidad y generar archivos STL separados para cada uno de ellas; posteriormente, deberán ser procesados por separado cada uno de los archivos dentro del paquete de cómputo especializado Insight y, finalmente unirlos para su construcción.

El estilo de contorno y el ancho del contorno son parámetros que deben ser conocidos por el diseñador, aunque es el usuario de la tecnología quien está en posibilidad de sacar provecho de ellos en beneficio de la pieza. De acuerdo a Stratasys Inc., utilizar los parámetros predefinidos en el estilo de contorno y en ancho de contorno en todas las figuras de una pieza procesada en FDM, puede resultar en porosidades y espacios de aire. Estos vacíos actúan en detrimento de la resistencia en detalles de paredes delgadas y pueden hacer la diferencia en detalles de bajas dimensiones. Eliminar los vacíos incrementa la resistencia. Para lograrlo, se debe aplicar trabajo de grupos específicos con valores definidos por el usuario en la construcción y ancho de caparazón externo, contornos y figuras individuales (Stratasys Inc., 2011).

3.2.10 Air gap, ancho y ángulo de filamento

- ★ Los parámetros de manufactura por capa no pueden ser seleccionados independientemente ya que la interacción entre ellos juega un rol importante en las propiedades mecánicas de las construcciones (Sood et al. 2010). Por esta razón, se presentan a continuación algunas recomendaciones referentes a los parámetros: ancho de filamento, air gap y ángulo de filamento (ver también sección 3.2.5).

Ancho de filamento:

Filamentos anchos resultan en acumulación de esfuerzos térmicos a lo largo del ancho de la construcción. Sin embargo, esta acumulación de esfuerzos resulta en mayores temperaturas cerca de las superficies de contacto, lo que promueve la difusión molecular y resulta en la formación de uniones más fuertes.

- ✓ En detalles de baja dimensión utilizar anchos de filamentos medios.

Los filamentos de ancho medio son lo más recomendables. Un detalle de baja dimensión depende del ancho de filamento del contorno y del espesor de capa, por ello, un ancho de filamento muy delgado es susceptible a no lograr una buena

adhesión con el resto de la construcción, mientras que un filamento grueso es probable que no cumpla con el contorno además de generar mayor carga térmica y con ello, provocar distorsión geométrica.

Una opción es construir el detalle por separado con un tamaño de boquilla menor al del resto de la construcción, para después unirlos. Los medios para unir piezas construidas mediante la tecnología FDM se encuentran ampliamente descritos por el fabricante de la tecnología en sus manuales técnicos de aplicación (Stratasys, Inc., 2009).

Air gap:

Una distancia entre filamentos (air gap) de cero o menor, distancias menores a -0.07mm no deben ser utilizadas ya que provocan distorsión geométrica (Ahn et al. 2002), mejora la difusión entre filamentos adyacentes pero puede disminuir la capacidad para disipar el calor así como disminuir el área total para formar la unión (Sood et al. 2009). Así pues, una distancia entre filamentos de cero es lo más recomendable.

Ángulo de filamento:

Ángulos de filamento que resulten en filamentos largos aumentan la acumulación de esfuerzos a lo largo de la dirección de depósito teniendo como resultado distorsión y, por lo tanto, uniones débiles (Sood et al. 2010). Así pues, ángulos de filamento que resulten en filamentos cortos son preferibles. Sin embargo, por encima de la longitud de los filamentos resultante, se recomiendan ángulos de filamento inclinados a lo largo de la dirección de la carga para ofrecer una mayor resistencia mecánica.

3.2.11 Puntos de inicio

- ★ Considerar dentro del diseño, una zona donde posicionar las costuras (seams en el idioma inglés) dejadas por los inicios y finales de la deposición.

Los inicios y finales de la deposición resultan en huellas perceptibles que van en detrimento del acabado superficial; La Figura 3.7 muestra estas particularidades. Es recomendable establecer una zona donde posicionarlos, ya sea para su fácil remoción o para generar una concavidad donde alojarlos y, evitar así, un post-proceso para eliminarlos.



Figura 3.7 Costuras presentadas en una construcción FDM.

3.2.12 Pausas e insertos

- ★ Conocer esta habilidad de la tecnología FDM para aprovechar sus ventajas.

El proceso FDM tiene la habilidad para genera pausas durante la manufactura y permitir insertar elementos, tradicionalmente metálicos, dentro de las piezas en construcción.

- ✓ Lo anterior puede ser realizado siempre que el objeto, una vez insertado, forme una superficie plana con un tope real de altura igual al alojamiento programado (Stratasys Inc., 2009).

3.2.13 El área de construcción

- ★ Establecer una superficie mínima de construcción y aprovechar al máximo el espacio de la plataforma de construcción.

Acorde al fabricante de la tecnología, el empaquetado, es decir, el acomodo de varias piezas dentro de la plataforma de construcción, es una operación básica y de rutina pero lo suficientemente importante para ser mencionada.

Las recomendaciones al respecto son:

- ✓ Anidar, apilar y traslapar piezas para optimizar el empaquetamiento y con ello los recorridos del cabezal extrusor (Stratasys Inc., 2011).
- ✓ Construir en áreas mayores a $50 \times 10^3 \text{mm}^2$ para los tamaños de boquilla T12, T16 y T20. Para el tamaño de boquilla T10, emplear áreas mayores a $20 \times 10^3 \text{mm}^2$. Lo anterior debido a que por encima de estas áreas, el tiempo consumido por la mecánica de purga y limpieza de la boquilla extrusora, no impacta en el tiempo total de la construcción.

3.3 Recomendaciones para la selección de parámetros de manufactura

La Manufactura Aditiva por FDM es un proceso multiparamétrico dependiente, por lo que resulta indispensable identificar la interacción de los parámetros de construcción y el efecto que tienen sobre el tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales. En la Figura 3.7 se presenta un esquema que propone dicha interacción.

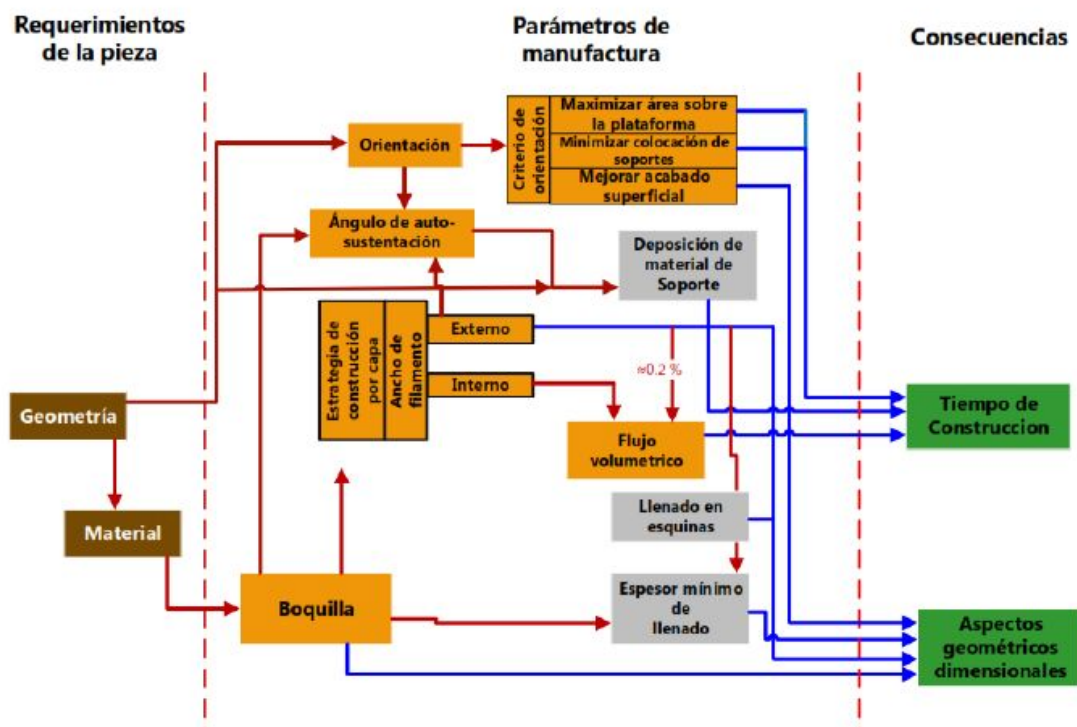


Figura 3.7 Esquema de los elementos del proceso FDM y sus interacciones (Yáñez Sanvicente 2015).

El esquema consta de 3 secciones, en la primera parte de color café están las entradas al proceso que generalmente son los datos proporcionados por el usuario. En la segunda sección en color naranja, se encuentran los parámetros a través de los cuales es posible modificar las características de construcción y por lo tanto, obtener diferentes consecuencias en la construcción, mismas que se encuentran en la última parte en color verde. Los cuadros en color gris representan características de la selección de los parámetros de manufactura que tienen impacto en las consecuencias finales.

3.3.1 Requerimientos de la pieza

Quien demanda el uso de la tecnología de manufactura aditiva generalmente proporciona su pieza en un archivo extensión STL, el cual contiene un mallado triangular que define la geometría de la pieza a construir, además de este archivo, el segundo elemento de interés en las entradas del proceso de construcción, es la elección del material que cumple con las especificaciones de diseño, por lo que se estos dos parámetros de entrada, el material es el primer elemento que queda seleccionado, basándose en sus características y propiedades mecánicas. Utilizando la geometría de la pieza como parámetro de entrada una vez definido el material, se da entrada al proceso de selección de parámetros de manufactura.

3.3.2 Relaciones entre los parámetros de manufactura

En esta sección se detallarán las relaciones entre los parámetros de construcción que sugiere la Figura 3.7.

La geometría y sus implicaciones

La relación entre la geometría y la orientación (Figura 3.8) tiene gran relevancia en la selección de los parámetros de manufactura, y tiene las siguientes implicaciones en el tiempo de construcción:

La combinación de geometría, orientación y ángulo de auto-sustentación determinan las superficies que requerirán material de soporte (depositar material de soporte incrementa el tiempo de construcción).

- La dirección de construcción de la pieza determina también el número de capas que requerirá depositar la máquina para completar la pieza y esto tendrá un impacto en el tiempo de construcción.



Figura 3.8 Relación geometría-orientación, sus consecuencias y resultados (Yáñez Sanvicente 2015).

- Sí la orientación establecida presenta áreas delgadas sobre la plataforma de construcción (por ejemplo, paredes delgadas), éstos estarán restringidos por el espesor mínimo de llenado que puede depositar la combinación de boquilla y ancho de filamento.
- Las esquinas con ángulos menores a 90 grados que se encuentren en planos paralelos a la plataforma de construcción, tendrán un error de llenado dependiendo de la combinación de boquilla, ancho de filamento y el valor angular.
- El efecto de escalonamiento se presentará en las superficies inclinadas respecto al eje Z.

Aunque se puede utilizar un criterio propio de orientación, el software propone los siguientes criterios:

1. Minimizar material de soporte.
 - Busca la orientación que reduzca la cantidad de material de soporte a depositar (Impacto en tiempo de construcción, reducirlo).
2. Máxima área horizontal.
 - Maximiza el área horizontal para hacer más eficiente la deposición. Busca la orientación que tenga la mayor área posible paralela al plano x-y (Impacto en tiempo de construcción, reducirlo).
3. Rotar para ajustar al volumen permitido de construcción.
 - En caso de que la pieza exceda la dimensión permitida en algún eje.
4. Rotar sobre Z para encontrar la mínima dimensión de la pieza sobre el eje x.
 - Ayuda a optimizar el área que ocupa la pieza en la plataforma de construcción.
5. Mejor acabado superficial (Impacto en los aspectos mínimos dimensionales).
 - Produce una orientación no-ortogonal para balancear el acabado superficial entre todos los lados y detalles de la pieza.

Secuencia:

- 1) Orienta la parte más larga de la pieza sobre el eje x.
- 2) Rota la pieza 45 grados sobre el eje x.
- 3) Rota la pieza 22.5 grados sobre el eje z.
- 4) Rota la pieza sobre el eje y 45 grados.

Cada criterio de orientación tiene un objetivo diferente, ya sea la reducción del tiempo de construcción o la mejora del acabado superficial, estos criterios nos permiten establecer la orientación de la pieza buscando un objetivo concreto.

El material y sus implicaciones

La relación entre el material y la boquilla se encuentra en que no todos los materiales se pueden extruir con todas las boquillas, por lo tanto es una limitante en la extrusión de los materiales. En la Tabla 3.3 se muestran las boquillas que están habilitadas para cada material.

Tabla 3.3 Boquillas habilitadas para la extrusión de materiales FDM.

Material Modelo	Boquilla Modelo Fortus® 400mc	Boquilla Modelo Fortus® 900mc	Material de soporte
ABSi	T10, T12, T16, T20	T12, T16, T20	SR-20
ABS-M30 ABS-M30i	T10, T12, T16, T20	T12, T16, T20	SR-20 SR-30
ABS-ESD7	T12, T16	T12, T16	SR-30
ASA	T10, T12, T16, T20	T12, T16, T20	SR-30
Nylon 12	T12, T16, T20	T12, T16, T20	SR-100
PC-ABS	T10, T12, T16, T20	T12, T16, T20	SR-20
PC	T12, T16, T20	T12, T16	SR-100
PC PC-ISO	T12, T16, T20	T12, T16, T20	PC_S
Ultem 9085	T16	T16, T20	ULT_S
PPSF	T16, T20	T16	PPSF_S

En la Figura 3.9 se muestran las relaciones de la combinación material más boquilla respecto al tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales. La consecuencia de la combinación material-boquilla es el espesor de capa que extruye cada boquilla, además de esto cada boquilla tiene su propio rango de parámetros para la estrategia de construcción por capa. La estrategia de construcción por capa se refiere a la elección de parámetros de trayectoria como son: Espesor de capa, estilo de llenado, número de contornos, ángulo de filamento y distancia entre filamentos. Para el diagrama de la Figura 3.9, únicamente se toma en cuenta el ancho de filamento interno y externo, ya que ambos tienen impacto en el tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales (Górski et al. 2013).

Tanto el ancho de filamento interno como externo, mantienen una relación importante con los resultados de la pieza, la relación más importante se encuentra entre el ancho de filamento externo y las áreas mínimas de llenado sobre la plataforma de construcción y el llenado en esquinas; ya que el espesor de llenado mínimo y el llenado en esquinas condicionarán el ancho de filamento externo que se seleccione. Por otra parte, el flujo volumétrico mantiene una relación con el ancho de filamento interno. Flujos volumétricos grandes se traducen en construcciones más rápidas y viceversa.

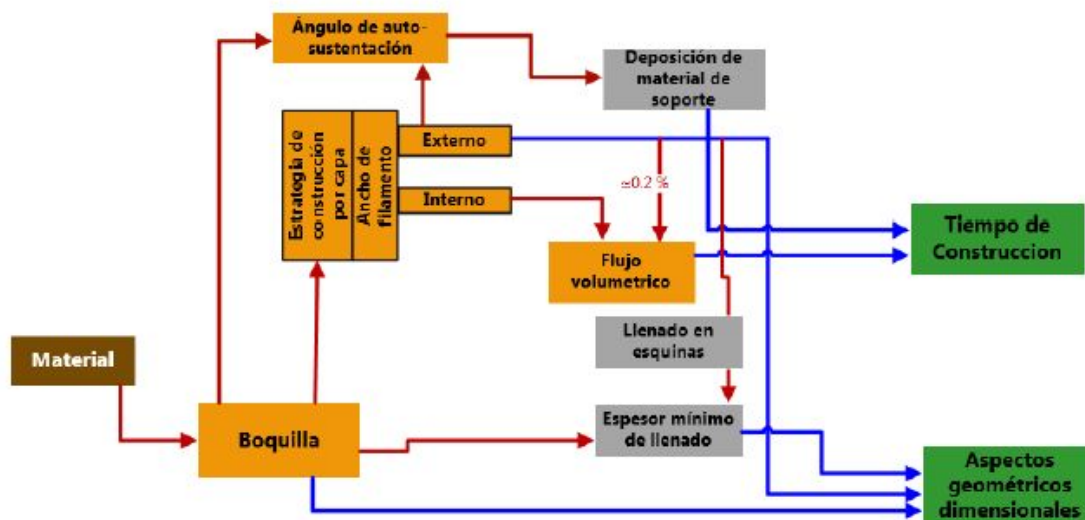


Figura 3.9 Material como parámetro de entrada (Yáñez Sanvicente 2015).

Consecuencias de los parámetros de manufactura

Los parámetros de manufactura seleccionados tienen consecuencias en el tiempo de construcción y los aspectos geométricos, es importante mencionar que el tiempo de construcción junto con el precio de los volúmenes de materiales, conforman el costo de las piezas, por lo que reducir el tiempo de la construcción se traduce en un ahorro en el costo de la pieza. Cuando los aspectos geométricos dimensionales son la prioridad en la construcción de la pieza, es necesario ajustar los parámetros de manufactura para cumplir con la geometría de la misma.

El análisis del comportamiento de los parámetros de manufactura y su efecto en el tiempo de construcción y acabado superficial, sugieren las siguientes relaciones:

- ❖ Análisis de llenado en espesores delgados y equinas.
- ❖ Flujo volumétrico en función del ancho de filamento.
- ❖ Ángulo de autosustentación cuando se deposita material de soporte.
- ❖ Tiempo de acondicionamiento entre boquillas en la extrusión.

Los parámetros que tienen mayor influencia en el acabado geométrico de las piezas son:

- ❖ La boquilla
- ❖ El ancho de filamento

Cuando se modifican estos dos parámetros, se tienen repercusiones en los elementos de proceso, ya que estos dos parámetros determinan la mayoría de las características de la construcción como son: un correcto llenado en las geometrías de baja dimensión (espesores mínimos y esquinas), un buen acabado superficial y una geometría acorde con el diseño; además de que estas características tienen impacto en los resultados (e.g. tiempo de construcción y características geométricas dimensionales) (Górski et al. 2013).

Conclusiones

Este informe muestra los resultados obtenidos durante el proceso de investigación y operación de los equipos de Manufactura Aditiva de tecnología FDM Fortus® de Stratasys. Como consecuencia de este mismo informe, es posible afirmar que los procesos involucrados para la construcción de piezas en dichos equipos es multiparamétrica; de tal suerte que nuevos estudios pueden complementar estas recomendaciones orientadas al diseñador con la finalidad de aprovechar las capacidades propias de los equipos en mejores resultados estéticos y funcionales, mientras se disminuye el impacto que el factor tiempo representa en el costo de construcción.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento recibido por parte del proyectos PAPIME IN104014 PE106417, CONACyT LN280867 y a las facilidades prestadas por el área de Manufactura Aditiva del MADiT, CCADET.

Referencias Bibliográficas

- Ahn, D. et al., 2009. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15), pp.5593–5600.
- Ahn, S.H. et al., 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping*. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540210441166>.
- Anon, Stratasys Production Series. *Stratasys*. Available at: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/production-series> [Accessed November 22, 2017].
- Ashby, M.F. et al., 2004. Selection strategies for materials and processes. *Materials & design*, 25(1), pp.51–67.
- Bagsik, A., Schöppner, V. & Klemp, E., 2010. FDM part quality manufactured with Ultem* 9085. In *14th international scientific conference on polymeric materials*. pp. 307–315.
- Boschetto, A., Giordano, V. & Veniali, F., 2012. Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9-12), pp.945–956.
- Comb, J., 2015. How to Design Your Part for Direct Digital Manufacturing. *white paper, Stratasys inc, viewed*.
- Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B., 2010. Introduction and Basic Principles. In *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US, pp. 20–35.
- Górski, F., Kuczko, W. & Wichniarek, R., 2013. Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling technology. *Advances in Science and Technology Research Journal*, (Vol. 7, nr 19), pp.27–35.
- Gurr, M. & Mülhaupt, R., 2012. 8.04 - Rapid Prototyping. In M. Editors-in-Chief: Krzysztof & M. Martin, eds. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Amsterdam: Elsevier, pp. 77–99.
- Hiemenz, J., 2011. 3D printing with FDM: How it Works. *Stratasys Inc*, 1, pp.1–5.
- Mahesh, M., Wong, Y.S. & Fuh, J., 2004. Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. *Rapid Prototyping*. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdf/10.1108/13552540410526999>.
- Ortega Rodríguez, A., 2014. *Tesis: Investigación de las capacidades de la tecnología de manufactura aditiva fdm*. Universidad Nacional Autónoma de México. Available at: <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?id=oai:tesis.dgbiblio.unam.mx:000708194>.
- Sood, A.K., Ohdar, R.K. & Mahapatra, S.S., 2009. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & design*, 30(10), pp.4243–4252.

- Sood, A.K., Ohdar, R.K. & Mahapatra, S.S., 2010. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & design*, 31(1), pp.287–295.
- Stratasys, I., 2011. FDM for End-Use Parts: Tips and Techniques for Optimization, Technical application guide.
- Wohlers, T., 2014. Wohlers report. *Wohlers Associates Inc.* Available at: <http://www.wohlersassociates.com/2001-Executive-Summary.pdf>.
- Wohlers, T.T., 2012. *Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual*, Wohlers Associates.
- Yáñez Sanvicente, R., 2015. *Tesis: Consideraciones para el diseño de piezas que serán construidas utilizando la Tecnología de Manufactura Aditiva FDM*. Ingeniería Mecatrónica. UNAM.
- Wohlers, Terry T. 2012. *Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual*. Wohlers Associates.