



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Consideraciones para el diseño de piezas que
serán construidas utilizando la Tecnología de
Manufactura Aditiva FDM.

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A

Yáñez Sanvicente Roque

DIRECTOR: Dr. Leopoldo Ruiz Huerta México, 2015



México, D.F. Noviembre 2015

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Vicente Borja Ramírez
Vocal: Dr. Leopoldo Ruíz Huerta
Secretario: Dr. Leopoldo Adrián González González
1er Suplente: Dr. Adrián Espinosa Bautista
2do Suplente: Dr. Alberto Caballero Ruíz

Lugar donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal

TUTOR DE TESIS:

Dr. Leopoldo Ruíz Huerta

FIRMA

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía (MADiT), con dependencia en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Se agradecen las facilidades prestadas para la realización de este trabajo y la tutoría brindada por parte del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta junto con los integrantes de este laboratorio.

Se agradece el apoyo brindado por la DGAPA a través del proyecto PE104014.

“Vive como si fueras a morir mañana.
Aprende como si fueras a vivir siempre”

Mahatma Gandhi

Índice

Introducción.....	1
1 Antecedentes	3
1.1 Manufactura	3
1.2 Manufactura Aditiva.....	3
1.3 El mercado de la manufactura aditiva en el 2013.	4
1.4 Sectores de aplicación de la manufactura aditiva.....	5
1.5 Beneficios de la manufactura aditiva.....	6
1.6 Clasificación con base en el proceso empleado.	8
1.7 Proceso de extrusión de materiales.....	13
1.7.1. Tecnología de Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM). 17	
1.7.2. Materiales FDM.....	22
1.8 Programa computacional <i>Insight</i>	23
2 Planteamiento del problema.....	24
2.1 Objetivo.....	33
2.2 Alcances.....	33
3 Marco Teórico	34
3.1 Condiciones de extrusión.	34
3.2 Flujo volumétrico en la extrusión de materiales.....	36
3.3 Características de las construcciones FDM.	37
4 Desarrollo	41
4.1 Requerimientos de la pieza.....	42
4.2 Relaciones entre los parámetros de manufactura.	42
4.2.1. La geometría y sus implicaciones.	42

4.2.2.	El material y sus implicaciones.....	45
4.3	Consecuencias de los parámetros de manufactura.....	46
5	Pruebas, análisis y resultados.....	48
5.1	Análisis del llenado en espesores delgados y esquinas.....	48
5.2	Flujo volumétrico como consecuencia del ancho de filamento.....	52
5.3	Tiempo de acondicionamiento entre boquillas en la construcción..	55
5.4	Análisis del ángulo de autosustentación cuando se deposita material de soporte.....	58
5.5	Acabado superficial en función del ancho de filamento.....	63
6	Análisis de resultados:.....	65
	Conclusiones	70
	Referencias.....	72
APÉNDICE A.....		76
APÉNDICE B		77
APÉNDICE C		83
APÉNDICE D.....		88

Índice de Figuras

Figura 1. Porcentajes por compañía del total de sistemas de manufactura aditiva vendidos en 2013 [3].....	4
Figura 1. Sectores de aplicación de la manufactura aditiva en el año 2014 [3](Adaptado)...	5
Figura 2. a) Soporte de monitor construido mediante manufactura convencional y b) soporte construido mediante manufactura aditiva [7].....	7
Figura 4. Ductos para la industria aeroespacial, construidos en maquina EOSINT M 280 de 3D Systems [9].	10
Figura 5. Pieza construida mediante laminación, con dos tipos de metales [10].	11
Figura 6. Esquema típico de la extrusión de materiales. 1) Boquilla u orificio de extrusión. 2) Material depositado. 3) Plataforma de construcción [39].	13
Figura 7. Máquina de manufactura Aditiva FDM, Fortus® 900, desarrollada por Stratasys [12].....	14
Figura 8. Máquina freeformer® de extrusión de materiales.	15
Figura 9. Máquina personal de manufactura aditiva, fabricada por la compañía Fabbster.	16
Figura 10. Esquema del cabezal de extrusión de una maquina FDM.....	17
Figura 11. Cabezal de extrusión y boquillas de los sistemas Fortus® [11].....	19
Figura 12. Cilindro modelado en CAD (Izquierda) y su conversión a STL (Derecha).	20
Figura 13. Cilindro seccionado en capas (izquierda) y vista superior de la trayectoria de la deposición en una capa del cilindro (Derecha).	21
Figura 15. Pieza seccionada con dos espesores de capa diferentes, 0.127[mm] (a y 0.3302 [mm] (b.	25
Figura 16. Diferentes orientaciones de construcción para una misma pieza.....	25
Figura 18. Parámetros de las trayectorias de deposición en una capa.	27
Figura 19. Diferentes estilos de contorno para una misma pieza, simple (Izquierda) y múltiple (Derecha).	29
Figura 20. Posibles configuraciones de distancia entre filamentos dentro de una construcción FDM [11].	29
Figura 21. Angulo de filamento interno.....	30
Figura 22. Diferentes estilos de llenado, de izquierda a derecha, estilo sólido, estilo espaciado y estilo espaciado de doble densidad.	30
Figura 22. Comparativo de velocidades de deposición y flujos volumétricos, el flujo volumétrico es calculado con un mismo ancho de filamento para todas las boquillas y materiales [11].	36
Figura 23. Efecto de escalonamiento en una construcción FDM [11].....	38
Figura 24. Representación de la sección transversal de una superficie [31].....	39

Figura 25. Mediciones de rugosidad obtenidas para espesores de capa distintos.	39
Figura 26. Esquema de los elementos del proceso FDM y sus interacciones.	41
Figura 27. Relación geometría - orientación, sus consecuencias y resultados.	43
Figura 28. Relación material - boquilla.	45
Figura 29. Detalle de una construcción con espacios faltantes en la deposición de contornos (Esquinas color rojo).	48
Figura 30. Distancia faltante de llenado entre esquina teórica y real.	49
Figura 31. Área faltante de llenado en esquinas.	50
Figura 32. Llenado de espesores delgados.	50
Figura 34. Geometría utilizada en el experimento	52
Figura 35. Velocidades de deposición utilizando una boquilla T16.	53
Figura 36. Flujos volumétricos y velocidades de deposición para distintos materiales utilizando una boquilla T16.	54
Figura 37. Pieza utilizada en las simulaciones.	56
Figura 38. Grafica de tiempos de cambio entre boquillas por capa para diferentes materiales.	57
Figura 39. Errores en la construcción derivados de la falta de colocación de material de soporte [37].	58
Figura 40. Sección transversal de los filamentos en una construcción FDM [29].	59
Figura 41. Esquema de la sección transversal de una deposición con diferentes ángulos en una construcción, manteniendo el ancho de filamento constante.	60
Figura 42. Esquema de la sección transversal de una deposición, manteniendo el mismo ángulo en la construcción con el ancho de filamento de contorno diferente.	60
Figura 43. Ángulos de auto sustentación en función del ancho de filamento.	61
Figura 44. Ángulos de auto sustentación en función del ancho de filamento	62
Figura 45. Diagrama propuesto para la selección de parámetros de manufactura.	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 46. Grafica para el material ABS-M30.	68

Índice de Tablas

Tabla 1. Tamaño de boquilla y espesor de capa correspondiente.	24
Tabla 2. Anchos de filamento en milímetros, para cada boquilla y material [11].	28
Tabla 3. Espesores mínimos recomendados por Stratasys®.	28
Tabla 4. Boquillas habilitadas para la extrusión de materiales FDM.	45
Tabla 5. Intervalos de dimensiones faltantes en esquinas.	49
Tabla 6. Espesores mínimos recomendados por Stratasys® [22].	51
Tabla 7. Boquilla, espesor de capa y número de capas a depositar en los experimentos ...	52
Tabla 8. Parámetros de manufactura utilizados en los experimentos.	53
Tabla 9. Comparativa de acabados entre filamentos gruesos y finos.	64
Tabla 10. Propiedades mecánicas del material ABS-M30 [38].	65
Tabla 11. Materiales de soporte desprendibles y solubles.	66
Tabla 12. Temperaturas de horno y extrusión [22].	67

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo generar recomendaciones para todo aquel que requiera de piezas construidas mediante la tecnología de Manufactura Aditiva: Modelado por Deposición Fundido (FDM, por sus siglas en inglés).

Este trabajo está dividido en 6 capítulos más un apartado dedicado a las conclusiones.

En el primer capítulo se encuentran los antecedentes. En este capítulo se definen conceptos involucrados en la manufactura aditiva, se da una clasificación de los tipos de tecnologías aditivas existentes con base al proceso que utilizan. Para finalizar este capítulo se profundiza en el proceso de extrusión de materiales, con un apartado para describir la tecnología de Modelado por Deposición Fundida.

En el segundo capítulo se plantea el problema, se establecen los objetivos y alcances.

En el tercer capítulo a modo de marco teórico se habla acerca de las condiciones de extrusión, el flujo volumétrico en la extrusión y las características de las construcciones.

En el cuarto capítulo se describen los parámetros de manufactura que tienen un impacto directo en el tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales.

En el quinto capítulo se muestran los resultados obtenidos de los análisis realizados para conocer la influencia de los parámetros de manufactura en el tiempo de construcción y la precisión dimensional.

En el sexto capítulo se analizan los resultados obtenidos acerca de las pruebas del capítulo quinto y se propone una secuencia que asista en la selección de parámetros de manufactura.

En el último capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo.

1 Antecedentes

1.1 Manufactura

La manufactura consiste en convertir la materia prima en productos. Incluye el diseño del producto, la selección de la materia prima y la secuencia de procesos a través de los cuales será manufacturado el producto [1].

La manufactura es la columna vertebral de cualquier nación industrializada. Su importancia queda enfatizada por el hecho que, como una actividad económica, comprende aproximadamente de 20 a 30 por ciento del valor de todos los bienes y servicios producidos. El nivel de la actividad manufacturera de un país está directamente relacionado con su economía, generalmente mientras más elevado es el nivel de la actividad manufacturera de una país, más alto es el nivel de vida de la población [1].

La palabra *manufactura* se deriva del latín *manu factus*, que significa hecho a mano. La palabra manufactura apareció por primera vez en 1567, y la palabra manufacturar en 1683. En un sentido más moderno, la manufactura involucra la fabricación de productos a partir de materias primas mediante varios procesos, maquinarias y operaciones, a través de un plan bien organizado para cada actividad requerida [1].

1.2 Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva es definida por la *American Society for Testing Materials* (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, conocida como ASTM), como el proceso de unir materiales para crear objetos desde un modelo digital de tercera dimensión, generalmente capa por capa, en oposición a los métodos de manufactura sustractiva (desprendimiento de material).

La terminología tiene sinónimos como: fabricación aditiva, procesos aditivos, técnicas aditivas, manufactura aditiva por capas, manufactura por capa y fabricación de forma libre [2]. Impresión 3D es otro término utilizado por usuarios y fabricantes de esta tecnología; sin embargo este término es asociado con máquinas de escritorio de bajo costo y poca capacidad. La ASTM lo define como: la fabricación de objetos a través de la deposición de un material, usando un cabezal de impresión, boquilla u otra tecnología de impresión [2].

1.3 El mercado de la manufactura aditiva en el 2013.

Los productos y servicios la manufactura aditiva se ha incrementado de manera acelerada en los últimos 4 años [3, 4]. Los sistemas y servicios que ofrece la manufactura aditiva, generan cada día nuevas soluciones para la producción de partes de uso final, especialmente en cadenas cortas de producción o especializadas. En 2013, el mercado compuesto por los servicios y sistemas de manufactura aditiva ofrecidos a nivel mundial creció un 34.9% respecto a 2012, llegando a valorarse en 3.07 billones de dólares; *Wohlers Associates* estima que en 2016, los ingresos generados por la venta de productos y servicios relacionados con la Manufactura aditiva excedan los 7 billones de dólares a nivel mundial [3].

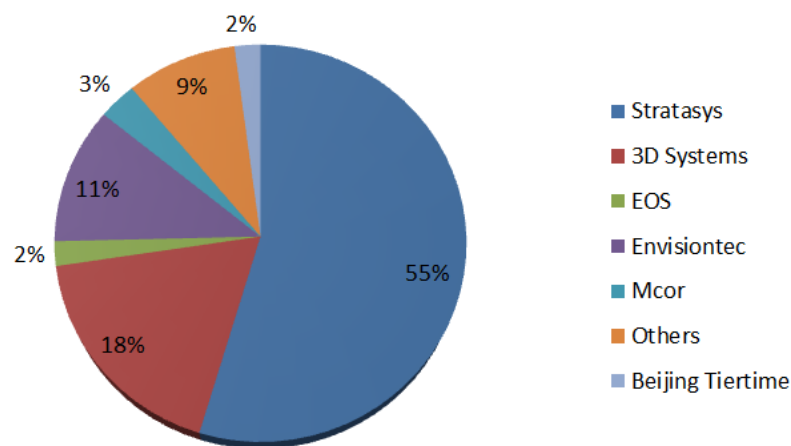


Figura 1. Porcentajes por compañía del total de sistemas de manufactura aditiva vendidos en 2013 [3].

Stratasys ha sido la compañía líder en el mercado desde el comienzo de la manufactura aditiva comercial, la tecnología FDM patentada por Stratasys representa el mayor número de sistemas de manufactura aditiva instalados, como se observa en la figura 1, en el año 2013 fue la compañía que vendió el mayor número de sistemas de manufactura aditiva [3]. El motivo de que la tecnología FDM represente una parte importante del mercado de la manufactura aditiva, se debe principalmente a la extensa lista de aplicaciones funcionales y de uso final que se han desarrollado con esta tecnología, además de los materiales especializados y de ingeniería que se pueden emplear en las construcciones FDM [4, 3, 5].

1.4 Sectores de aplicación de la manufactura aditiva

La manufactura aditiva es usada para construir modelos, prototipos, muestras, piezas herramienta y partes de producción, utilizando materiales plásticos, metales, cerámicos, vidrio y materiales compuestos [3].

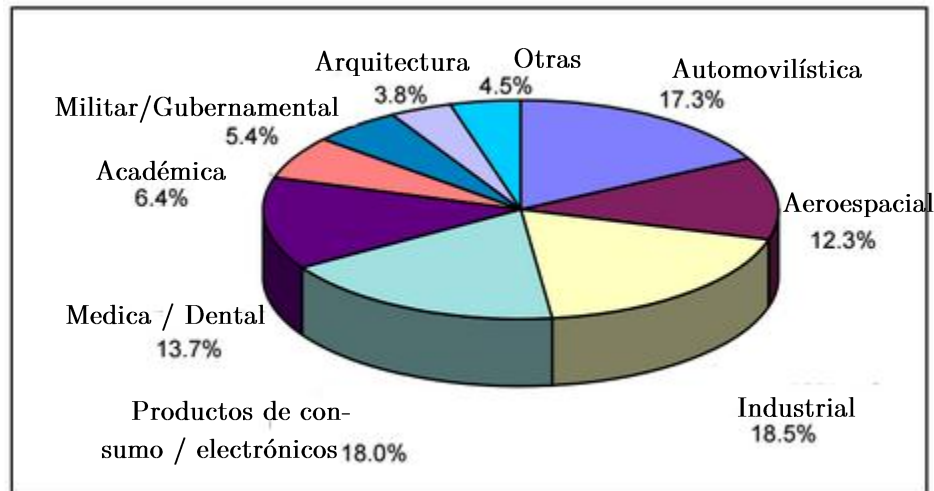


Figura 2. Sectores de aplicación de la manufactura aditiva en el año 2014 [3](Adaptado).

La manufactura aditiva se emplea para productos de los mercados: médico, industrial, de consumo y militar, por mencionar algunos. Cámaras digitales, partes para aeronaves, partes para automóviles, implantes médicos, aparatos de comunicación, muebles, joyería, juguetes, coleccionables, moda, piezas dentales, son solo algunos productos de una larga lista, que se han beneficiado de la manufactura aditiva. En la figura 2 se observa un panorama general presentado por Wohler's Report en el 2014 de los sectores de aplicación de la manufactura aditiva [3].

El desarrollo, uso y aplicaciones de la manufactura aditiva continúa expandiéndose con la introducción de nuevas tecnologías, materiales y aplicaciones. Aunado a esto, nuevos sectores de la industria y regiones geográficas, están adoptando la manufactura aditiva como un recurso para el desarrollo y manufactura de productos [3].

1.5 Beneficios de la manufactura aditiva

En contraste con las técnicas substractivas asociadas a los procesos de manufactura convencional (maquinado), las tecnologías de manufactura aditiva pueden ayudar a reducir el material, la energía consumida, el agua consumida en la eliminación de desechos y materiales tóxicos auxiliares, como lubricantes para el maquinado; estas mejoras tienen un impacto positivo en la sustentabilidad de los procesos de manufactura. Algunas de estas tecnologías permiten la reparación y reciclado de piezas obsoletas o dañadas, en lugar de ser sustituidas o eliminadas, evitando la producción de nuevas piezas. Además de esto las piezas pueden ser fabricadas cerca del lugar de consumo, evitando así los gastos de transporte y los riesgos de transporte. En industrias específicas, como la fórmula 1, la industria aeroespacial y aeronáutica, ofrecen un gran potencial en el ahorro de costos, como en el ahorro de combustible y la optimización de partes, incrementando la eficiencia de las piezas con la reducción de peso y material [6].

La manufactura aditiva es particularmente útil cuando [6]:

- El volumen de producción es relativamente bajo.

- La pieza contiene geometrías complejas o involucra ensambles complejos (El diseño se orienta a funcionalidad y no a manufacturabilidad).
- La complejidad y la capacidad del diseño tienen que maximizarse sin penalizar el costo.
- Los plazos de entrega son reducidos (las modificaciones implican consumo de tiempo).
- Los productos requieren ser personalizados.
- Se requiere agregar piezas o funciones adicionales durante la construcción de la parte principal.
- El costo de la pieza no amortiza el costo de la fabricación.
- Los clientes(o patrocinadores) tienen políticas éticas y ambientalistas.
- Los materiales que se utilizan son caros y difíciles de procesar utilizando los procesos convencionales.



Figura 3. a) Soporte de monitor construido mediante manufactura convencional y b) soporte construido mediante manufactura aditiva [7].

Un ejemplo de los beneficios de la manufactura aditiva, en el ciclo de vida económico de un producto, se encuentra en un soporte para monitor manufacturado mediante manufactura aditiva para la compañía de aviones Boeing *Virgin Atlantic*. Un soporte para monitor fabricado mediante manufactura aditiva, ahorró 0.49 [kg] en comparación a su combinación diseño-material anterior, maquinado de un bloque sólido de metal; lo que se vio reflejado en un ahorro de combustible anual de \$1500 USD; \$ 45,000 USD si tenemos en cuenta que el ciclo de vida útil de las aeronaves es de 30 años y sí se estima un tiempo de vida del producto de 5-7 años. La diferencia en el costo del soporte maquinado

(\$500 USD) en comparación con el soporte fabricado mediante manufactura aditiva (\$2500 USD) es de \$ 2000 USD, por lo que el capital invertido es recuperado en tan solo 2 años [7]. En la figura 3 se muestran los soportes construidos mediante los diferentes procesos.

1.6 Clasificación con base en el proceso empleado.

En el 2012 la ASTM crea una clasificación de los procesos aditivos, la cual se describe a continuación.

- Roseado de aglutinante (binder jetting): proceso de manufactura aditiva, en el cual se deposita selectivamente a través de un cabezal de impresión o inyección, un agente líquido adhesivo que une el material contenido en una cama de polvo. Para estos sistemas que depositan una cama de polvo capa a capa, no es necesario usar material de soporte.

Otra característica importante de este proceso, es que las piezas pueden ser coloreadas utilizando un material aglutinante de color. Los materiales empleados en esta tecnología son: metales, aceros inoxidable, plásticos y arenas para fundición. ExOne, ZCorp (comprada en 2012 por 3D Systems), Voxeljet, Digital Metal y Microjet Technology son algunas empresas que actualmente distribuyen tecnologías basadas en este proceso [8, 3].

- Deposición mediante energía dirigida (directed energy deposition): proceso de manufactura aditiva, en el cual la energía térmica concentrada es usada para fusionar por medio del derretimiento el material que se van depositando. “Energía térmica concentrada” hace referencia a la fuente de energía que es concentrada para fundir los materiales que son depositados, por ejemplo: laser, haz de electrones, o arco de plasma. Comúnmente un láser es la fuente de energía y el material es metal pulverizado. Este proceso no ha tenido un gran éxito en el mercado, a pesar de eso ofrece un gran potencial, ya que ofrece la posibilidad de

depositar dos tipos de materiales simultáneamente, lo que da como consecuencia la combinación de las propiedades de ambos materiales, además de esto la mayoría de estas tecnologías utilizan un sistema de 4 o 5 ejes de movimiento en el cabezal de deposición, lo que permite que el proceso no este limitado a capas horizontales en planos paralelos. Estas capacidades permiten además agregar material a piezas existentes, así como también la reparación de piezas o herramientas dañadas. Empresas como Optomec, AM3D, Sciaky, Accufusion y DMG Mori Sieki ofrecen tecnologías basadas en este proceso.

- Extrusión de material (material extrusión): proceso de manufactura, aditiva en el cual el material es selectivamente dispensado a través de una boquilla u orificio. Debido a que el proceso FDM pertenece a este tipo de proceso se describe posteriormente de manera detallada.
- Rociado de material (material jetting): Proceso de manufactura aditiva, en el cual diminutas gotas de material, son depositadas selectivamente a través de uno o varios cabezales de impresión, los materiales comúnmente utilizados son metales, fotopolímeros y ceras como las que se utilizan para moldes de fundición a la cera perdida. Los sistemas de rociado de material, generalmente utilizan varias boquillas para incrementar la velocidad de las construcciones y para rociar diferentes tipos de materiales. Un material es utilizado para construir la pieza mientras que el otro material es usado como soporte para la construcción. Es importante mencionar que este tipo de tecnología proporciona alta precisión dimensional en las piezas. Empresas como 3D Systems, Stratasys, Solidscape, Optomec y nScript distribuyen actualmente tecnologías basadas en este proceso [3].
- Fusión de cama en polvo (powder bed fusión): proceso de manufactura aditiva, en el cual la energía térmica funde regiones selectivas de una cama de polvo que es depositada capa a capa por rodillos desde un

contenedor de alimentación al área de la construcción, la fuente de energía térmica es un láser o un haz de electrones, ésta fuente funde el material pulverizado que posteriormente se solidifica cuando baja su temperatura. Existen 4 mecanismos para la unión del material en polvo: sinterización en estado sólido, unión química inducida, sinterización en estado líquido y fusión completa. Los materiales comúnmente empleados en este proceso son metales y cerámicos. Este tipo de procesos no necesita material de soporte ya que la cama de polvo, sirve como soporte para las capas superiores, es importante mencionar que el material que se encuentra en los alrededores de la pieza y que no es empleado en la construcción de la pieza sufre degradación, por lo que es necesario cambiarlo después de cierto número de construcciones. 3D Systems, EOS GmbH, Matsuura, Aspect, Hunan Farsoon, Trump Precisión y Wuhan Binhu son algunas empresas que distribuyen tecnologías basadas en este proceso con sus diferentes variantes [8, 3]. Un ejemplo de producto terminado derivado de este tipo de proceso se presenta en la figura 4.



Figura 4. Ductos para la industria aeroespacial, construidos en maquina EOSINT M 280 de 3D Systems [9].

- Laminación de hojas (sheet lamination): Proceso de manufactura aditiva en el cual las hojas de material son unidas para producir un objeto. Generalmente un dispositivo de corte recorre el contorno que se requiere en la hoja para obtener la geometría requerida en la capa. Este proceso se puede dividir de acuerdo a la forma en la que se unen las láminas para producir los objetos, estas categorizas son las siguientes: Unión adhesiva,

Unión Térmica, Unión mecánica y soldadura ultrasónica. Entre los principales fabricantes de tecnologías basadas en este proceso se encuentra a Mcor Technologies, UAM y Fabrisonic [8, 3]. En la figura 5 se observa una pieza construida mediante laminación, en esta se pueden apreciar una superficie cóncava con dos colores en forma de capas, los dos colores corresponden a láminas de metal de diferentes materiales.

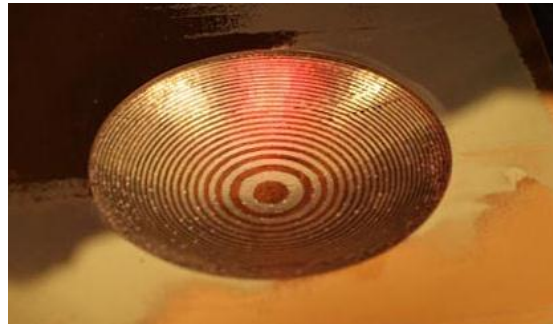


Figura 5. Pieza construida mediante laminación, con dos tipos de metales [10].

- Foto polimerización en tanque (VAT photopolymerization): Proceso de manufactura aditiva en el cual el fotopolímero líquido contenido en un tanque, es curado selectivamente mediante foto polimerización iniciada por luz. En éste proceso existen dos direcciones de construcción, en la primera, la plataforma de construcción desciende una capa de distancia dentro del tanque, para continuar con la construcción capa a capa, y en la segunda, la dirección de la plataforma es en forma ascendente, sobre la superficie del tanque de material fotopolimerizable. La fuente de energía para curar el material puede ser luz UV, laser y luz digital directa (luz estructurada utilizando mapa de bits para proyectar imágenes). Estas tecnologías ofrecen la capacidad de construir en altas resoluciones, pero generalmente los materiales de construcción no son resistentes mecánicamente. 3D Systems, Evisontec, DWS y Lithoz, son algunos fabricantes que distribuyen este tipo tecnologías basadas en este proceso [2].

Las tecnologías mencionadas anteriormente tienen sus propias características, parámetros de construcción y post-procesos para lograr la pieza terminada. La

interacción entre la máquina de manufactura aditiva y el usuario se da mediante el software propio de la máquina que generalmente cuenta con herramientas para visualizar, orientar, escalar o insertar múltiples partes; En algunos casos este software permite mayor interacción con el proceso y permite modificar parámetros de la construcción, por ejemplo: Espesor de capa, tipo de material de soporte, trayectorias de deposición etc. [11].

La pieza después de su construcción en ocasiones requiere de post-procesos para obtener la pieza final, existen varios tipos de post-procesos, dos ejemplos son:

-Remoción de material de soporte: dependiendo del tipo de tecnología de manufactura aditiva en ocasiones se requiere utilizar un material de soporte para apoyar la construcción; al finalizar la construcción el material de soporte se retira del objeto, ya sea manualmente o utilizando un agente químico [8].

-Mejorado de acabado superficial: El acabado superficial de un objeto construido mediante manufactura aditiva es dependiente del proceso de manufactura aditiva y los parámetros de la construcción; Dependiendo de la aplicación, en ocasiones el objeto requiere una mejora en el acabado superficial por lo que se emplean procesos abrasivos (lijado y pulido) o procesos químicos (sellado y recubrimientos) para mejorar el acabado superficial [8].

1.7 Proceso de extrusión de materiales

La ASTM define a la extrusión de materiales, cómo el proceso de manufactura aditiva en el cual el material es selectivamente depositado a través de una boquilla u orificio [2].

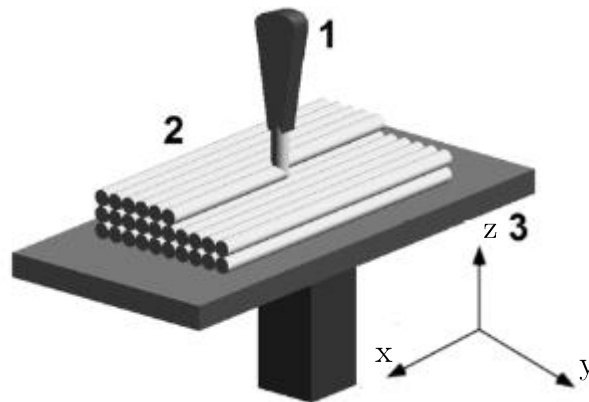


Figura 6. Esquema típico de la extrusión de materiales. 1) Boquilla u orificio de extrusión. 2) Material depositado. 3) Plataforma de construcción [39].

Con ayuda del esquema mostrado en la figura 6, el proceso típico de extrusión de materiales, consiste en forzar al material (material de modelo) previamente calentado y licuado, para hacerlo pasar por un orificio o boquilla, la boquilla que se mueve sobre el plano de construcción x-y depositando el material para completar la trayectoria correspondiente a una capa. Después de que la capa se completa, la plataforma de construcción desciende la distancia equivalente a un espesor de capa típico de la construcción y deposita la siguiente capa sobre la capa previamente depositada; no obstante existen tecnologías en las que la plataforma de construcción se mantiene fija y la boquilla de extrusión se mueve sobre el eje z para depositar las capas. El material de construcción se encuentra contenido en depósitos que alimentan mediante conductos a la boquilla de extrusión. En este tipo de tecnologías hay ocasiones en las que debido a la geometría de la pieza es necesario colocar estructuras de soporte para las partes de la pieza que se encuentran en voladizo, por lo que se agrega un material conocido como: material soporte [3].

Existe una secuencia generalizada para los procesos de extrusión de material [8]:

1. Carga del material en el conducto que lo conduce hasta la boquilla.
2. Licuefacción del material.
3. Aplicación de presión pasar el material licuado a través de la boquilla
4. Extrusión del material.
5. Recorrido controlado de la boquilla sobre la trayectoria.
6. Adhesión de la capa recién depositada con la capa previamente depositada, para lograr una estructura sólida.
7. Integración de las estructuras de material de soporte, para las geometrías complejas que lo requieran.

Stratasys, fundada por S. Scott Crump y Lisa H., es la compañía pionera en este tipo de tecnología, introduciendo en 1991 y patentando en 1992 el primer sistema de deposición de material fundido basado en extrusión (FDM, por sus siglas en inglés). Es importante mencionar que las máquinas de extrusión de material FDM, representan la mayor parte de la tecnología instalada en el mercado [3].



Figura 7. Máquina de manufactura Aditiva FDM, Fortus® 900, desarrollada por Stratasys [12].

Particularmente este proceso utiliza como material de modelo filamentos enrollados en cartuchos que alimentan a las boquillas de extrusión mediante rodillos, el material es licuado antes de ser forzado a atravesar la boquilla de extrusión. En la figura 7 se muestra una maquina Fortus 900 que funciona mediante el proceso FDM.

La tecnología 3D bioplotting™ desarrollado en 1999 por Mulhaupt, pertenece a al proceso de extrusión de materiales. Aunque esta tecnología es similar a FDM, difiere en que los materiales se encuentran en forma de polvo y pellets, y además de esto utilizan aire comprimido o gases inertes para hacer pasar el material a través de la boquilla [13]. El potencial de esta tecnología radica en la biomanufactura.

La tecnología AKF, desarrollado por la empresa alemana ARBURG pertenece de igual manera a los procesos de extrusión de materiales, entre sus particularidades se encuentra el hecho de que utiliza como material de modelo pellets y granulados estándar que son licuados de forma similar a como se realiza en los proceso de inyección de plásticos, además de que la boquilla se mantiene inmóvil y la plataforma de construcción se mueve mediante un portador de componentes de tres o cinco ejes. La boquilla de extrusión se alimenta mediante un émbolo piezoeléctrico que deposita pequeñísimas gotas de material para formar la pieza [14]. En la figura 8 se muestra una máquina de extrusión de materiales que funciona mediante la tecnología AKF.



Figura 8. Maquina freeformer® de extrusión de materiales.

Otra parte importante de los sistemas basados en extrusión, es el grupo de máquinas personales de bajo perfil conocidas en el mercado como “*personal 3D printers*”, un ejemplo se muestra en la figura 9. Estas derivan principalmente del proyecto de código abierto llamado RepRap. Estas máquinas personales tienen la característica de tener un costo relativamente bajo, comparado con las otras tecnologías. Aleph Objects, Fabbster, MakerBot Industries, Delta Micro Factory Corp y 3D Systems, son algunos fabricantes que distribuyen éste tipo de máquinas.

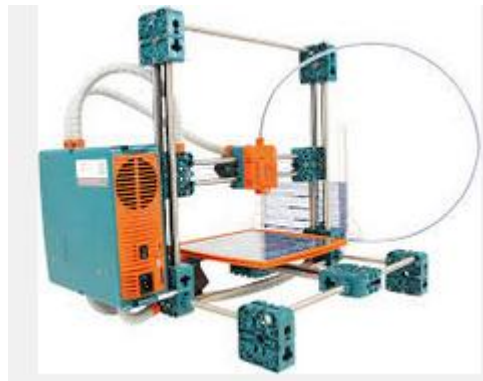


Figura 9. Máquina personal de manufactura aditiva, fabricada por la compañía Fabbster.

La tecnología de extrusión de material ofrece la posibilidad de extruir casi cualquier material licuable, esto le da la ventaja de tener una gran gama de materiales de construcción, comparando con las otras tecnologías de manufactura aditiva. También se encuentra entre las tecnologías de manufactura aditiva que ofrecen propiedades mecánicas relativamente altas, comparadas con otros tipos de tecnologías [15].

A pesar de las ventajas de la tecnología de extrusión de material fundido, una característica importante en este tipo de tecnología está relacionada con la resolución de la construcción, limitada por la boquilla u orificio de extrusión, y dado que los filamentos se encuentran en el orden de $100\mu\text{m}$ de diámetro, este tipo de tecnología tiene un acabado superficial rugoso, en comparación con otros tipos de tecnología de manufactura aditiva [16].

1.7.1. Tecnología de Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM).

Las máquinas de tecnología FDM eran utilizadas principalmente para aplicaciones de prototipado, como el modelado conceptual, modelado quirúrgico pre-operación, etc. Sin embargo las piezas producidas por este tipo de proceso adquirieron rápidamente un enfoque de piezas finales por lo que la tecnología FDM ha evolucionado hasta adquirir la capacidad de realizar piezas de aplicación directa [17, 18].

La tecnología de manufactura aditiva FDM nos da la posibilidad de construir piezas con propiedades mecánicas cercanas a las de los procesos de inyección, por lo que bajo ciertas configuraciones y condiciones es posible comparar los sistemas FDM con los sistemas convencionales de inyección de plástico cuando se habla de propiedades mecánicas y acabado superficial [19].

Principio de construcción en los sistemas FDM

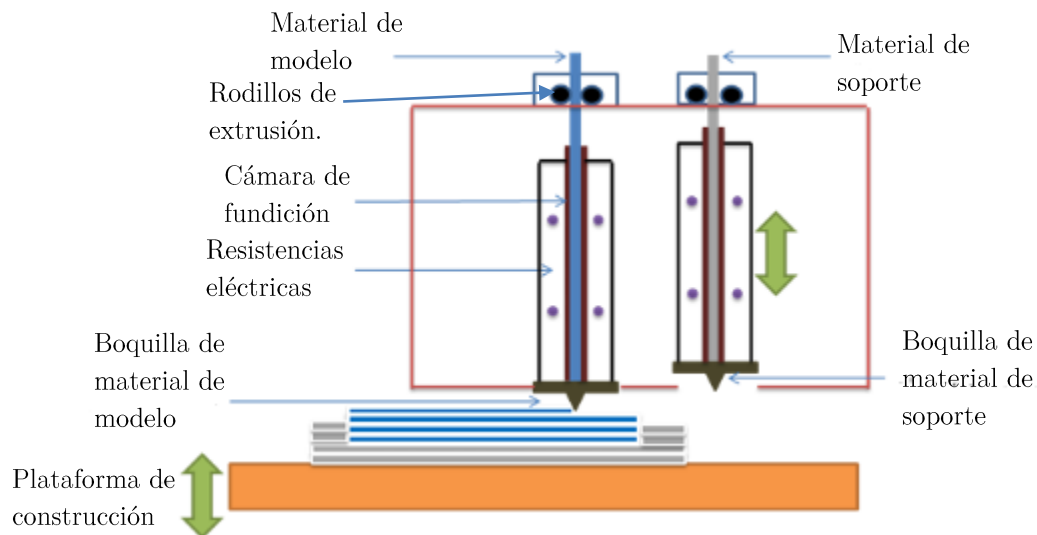


Figura 10. Esquema del cabezal de extrusión de una máquina FDM.

La tecnología FDM utiliza un cabezal extrusor similar al de la figura 10, este cabezal extrusor situado en un ambiente controlado, es guiado mediante un sistema de movimiento computarizado que recorre trayectorias previamente calculadas para depositar de manera selectiva el material necesario para construir capa a capa la pieza. Para realizar el apilamiento de capas en este proceso, la plataforma de construcción desciende capa por capa hasta finalizar la pieza. Este tipo de sistemas utiliza dos boquillas, una dedicada a la deposición material de modelo (material con el que será construida la pieza) y la otra empleada para depositar el material de soporte (material utilizado para colocar estructuras de soporte), la interacción de ambos materiales en la construcción de una pieza es común ya que las piezas generalmente requieren estructuras de soporte, mismas que serán removidas al finalizar la construcción [20].

Los sistemas Fortus® y su funcionamiento.

En la actualidad la compañía Stratasys ofrece las máquinas de proceso FDM Fortus® [12].

Tratándose del funcionamiento de los sistemas Fortus®: los materiales de construcción (modelo y soporte) se suministran como filamentos enrollados 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.

Para llevar los filamentos hasta los cabezales de extrusión se emplea un par de rodillos. Una vez que los filamentos llegan a la zona donde se encuentra el cabezal extrusor, un segundo par de rodillos se encarga de conducir los filamentos hacia las boquillas, además de esta función, los rodillos se encargan de controlar la velocidad con la que el filamento es extruido, ya que son los encargados de ejercer presión sobre el filamento y lo conduce a través de la cámara de fundición de las boquillas para su posterior extrusión (Figura 10).

Como se muestra en la figura 11, el cabezal de extrusión aloja las dos boquillas encargadas de extruir el material de modelo y soporte, las boquillas con geometría de pequeños tubos de aproximadamente 10 centímetros y con una reducción

de diámetro en la punta (orificio de extrusión), se insertan en una ranura contenida en medio de dos resistencias eléctricas (ver Figura 10) encargadas elevar la temperatura del filamento hasta alcanzar su temperatura de extrusión. Para evitar la contaminación y mezcla de materiales se utilizan diferentes boquillas para cada material, ya sea modelo o soporte. Como se observa en la figura 11, las boquillas cuentan con un disco de material aislante para evitar que el calor producido por las resistencias se transfiera hacia la pieza [21].

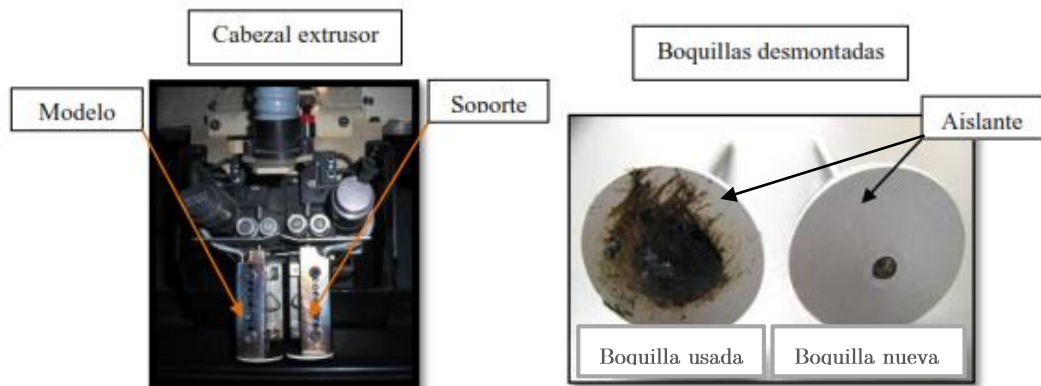


Figura 11. Cabezal de extrusión y boquillas de los sistemas Fortus® [11].

El proceso FDM requiere un control preciso de temperatura tanto en la cámara de la construcción como en la extrusión de los filamentos, esta temperatura es crucial para tener una construcción sin defectos y con buena adhesión entre filamentos [19]. Parámetros como la temperatura de cámara, temperaturas de extrusión, velocidad de extrusión, espesor de capa y ancho de filamento, se encuentran pre-establecidos aunque algunos de ellos pueden ser modificados por el usuario. La cantidad de material que depositan las boquillas o flujo volumétrico está determinada por variables como la velocidad de extrusión, ancho de filamento y espesor de capa. Los rodillos que se encargan de ejercer la fuerza necesaria para la extrusión, son los encargados de aumentar o disminuir la velocidad con la que el filamento es extruido logrando extruir diferentes anchos de filamento con un mismo espesor de capa, además de esto se encargan de mantener la correlación entre la velocidad de deposición de la boquilla y la

velocidad de extrusión del filamento para evitar el exceso o la escases de material que pudiera presentarse en los cambios de dirección del cabezal de extrusión [8].

Es importante mencionar que cuando se termina de depositar el material en una capa se presenta una secuencia de limpieza y purga de boquillas que ayudan a evitar errores en la construcción y mejorar la calidad de la pieza, que aunque benéficas para la calidad de la pieza repercuten en el tiempo de construcción de la misma. Una vez que la boquilla comienza a depositar el material, éste se deposita sobre una hoja plástica que se coloca en la plataforma de construcción y se fija mediante vacío [22].

Las trayectorias que sigue el cabezal de extrusión para depositar selectivamente el material se definen dentro de un programa computacional especializado. Estas trayectorias son resultado de la geometría de la pieza, la orientación en la plataforma de construcción y los parámetros de manufactura seleccionados. Para hacer la deposición de una capa, la primera trayectoria que se deposita es el contorno de la capa, posteriormente se llena el contorno y con esto se finaliza la capa. Para generar los contornos de las capas, el programa computacional parte del archivo STL para encontrar las intersecciones entre los triángulos del STL y el plano transversal de la capa en cuestión. En la figura 12 se muestra un cilindro modelado en un software de diseño asistido por computadora y su conversión a STL (mallado triangular de superficie) [11].

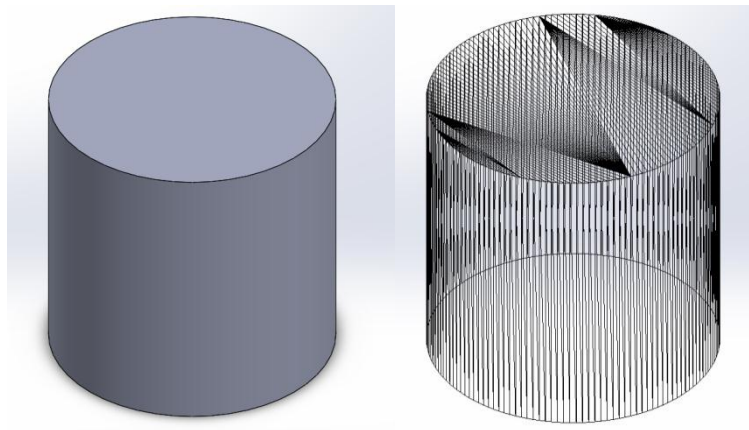


Figura 12. Cilindro modelado en CAD (Izquierda) y su conversión a STL (Derecha).

En la figura 13 se muestran los contornos para la construcción del cilindro y las trayectorias de deposición (contorno y llenado interno), aunque las trayectorias son generadas automáticamente existe la posibilidad de modificarlas casi en su totalidad por el usuario, además de que se pueden generar trayectorias de mallado interno y de contorno diferentes para un grupo de capas o por zonas.

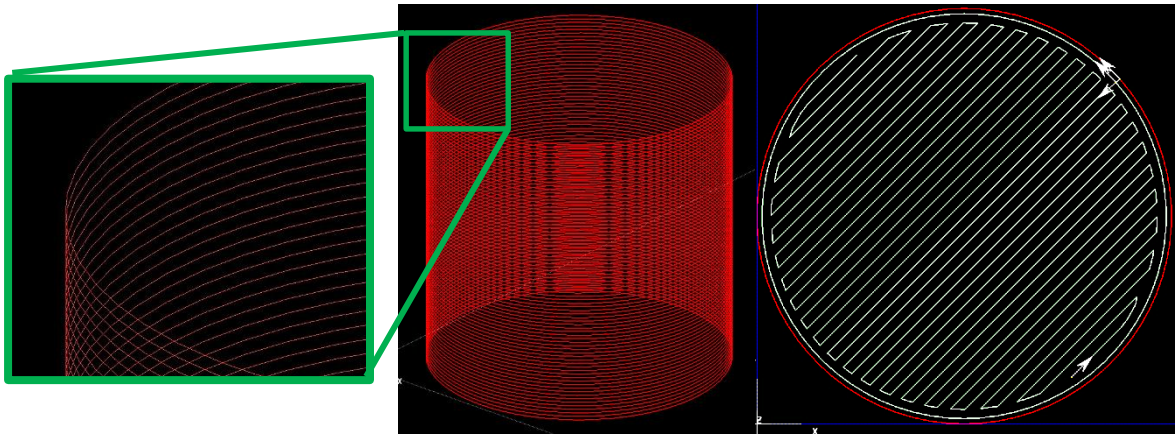


Figura 13. Cilindro seccionado en capas (izquierda) y vista superior de la trayectoria de la deposición en una capa del cilindro (Derecha).

Depositar material de soporte que ayuda a sostener las capas de la pieza que se encuentran en cantiléver, está en función de la orientación de la pieza, el espesor de la capa y el ancho del filamento, además de esto existe la posibilidad de modificar estos parámetros y así modificar los criterios en los que se coloca el material de soporte y el tipo de estructuras o andamiajes que se pueden colocar [23].

Una vez finalizada la construcción, se remueve la pieza de la hoja de construcción, y se retira el material de soporte de la pieza. El desprendimiento del material de soporte puede ser manual, pero hay ocasiones en las que es necesario utilizar agentes químicos para remover el material de soporte de las partes donde no es posible la intervención manual [24].

Dependiendo de la aplicación para la cual la pieza fue diseñada, en ocasiones es necesario aplicar un post-proceso, entre los cuales se encuentran [24]:

- Mejora del acabado superficial, generalmente procesos químicos o abrasivos.
- Adición de insertos físicos.
- Pintura o recubrimientos.
- Uniones mediante procesos químicos o térmicos de piezas construidas con FDM.
- Operaciones mecánicas (Maquinados, barrenados, etc.).

1.7.2. Materiales FDM

Los materiales destinados a la construcción de la pieza se conocen como materiales de modelo; por otra parte los materiales que ayudan a soportar las partes de la pieza que se encuentran en voladizo y que se depositan en las primeras capas para facilitar la remoción de la pieza una vez terminada la construcción, se conocen como materiales de soporte [17].

La compañía Stratasys presenta una gama de 10 materiales de modelo para la tecnología Fortus® FDM, cada una con características diferentes tanto mecánicas como de construcción (flujo volumétrico, temperatura de extrusión, velocidad de deposición), esta gama de materiales incluye hasta el momento: [17].

ABS-M30 termoplástico (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

ABSi termoplástico.

ASA termoplástico.

ABS-ESD7 termoplástico.

Nylon 12 termoplástico.

PC-ABS termoplástico (Policarbonato Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

PC termoplástico (Policarbonato).

PC-ISO termoplástico.

PPSF/PPSU termoplástico (polisulfona).

ULTEM termoplástico.

Las piezas fabricadas con tecnología FDM, presentan menor resistencia mecánica en comparación con las propiedades del propio material, esto se debe a la adherencia entre capas y a los posibles vacíos que se crean entre los filamentos de la construcción [17, 4].

1.8 Programa computacional *Insight*.

Insight es un programa compatible con las máquinas de la serie Fortus®, que a partir del archivo STL que contiene la geometría de la pieza, genera la información necesaria para que la máquina de manufactura aditiva construya la pieza. En la versión *Insight 10.1*, permite modificar diferentes parámetros de manufactura, como son: el material, la boquilla, la orientación, la escala de la pieza, el estilo de soporte y los parámetros de llenado por capa (Inclusive seleccionando una configuración diferente para cada capa).

Insight 10.1 cuenta con la posibilidad de inspeccionar el llenado de la pieza capa por capa sobre una simulación gráfica del llenado de las capas en función de los parámetros seleccionados. Además de esto, ofrece aproximaciones del tiempo de construcción de la pieza y el volumen de material requerido (modelo y soporte).

2 Planteamiento del problema

El funcionamiento de la tecnología FDM está basado en la configuración de diferentes parámetros como son: temperaturas de proceso, ancho de filamento a depositar, espesor de capa y velocidad de deposición; es importante mencionar que no todos los parámetros se pueden modificar, por ejemplo los parámetros de proceso como son las temperaturas de extrusión de materiales y las temperaturas de cámara son parámetros pre-establecidos para cada configuración, que dependen de la selección de otros parámetros [11].

Parámetros determinados por el sistema.

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

De acuerdo con las posibilidades que actualmente cuentan los equipos Fortus y el programa *Insight 10.1*, es posible modificar los siguientes parámetros de construcción:

Espesor de capa

El modelo se divide en secciones transversales de altura constante llamadas capas, estas capas son paralelas al plano de construcción X-Y. La selección del espesor de capa es dependiente de la boquilla que se utilice, ya que cada boquilla está configurada para extruir un espesor de capa único. Una vez seleccionada la boquilla el espesor de capa permanece constante para todas las capas de la construcción.

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

Tabla 1. Tamaño de boquilla y espesor de capa correspondiente.

Dependiendo de la boquilla que se seleccione, una pieza puede seccionarse en un número de capas diferente; en la Tabla 1 se muestran los espesores que puede extruir cada boquilla.

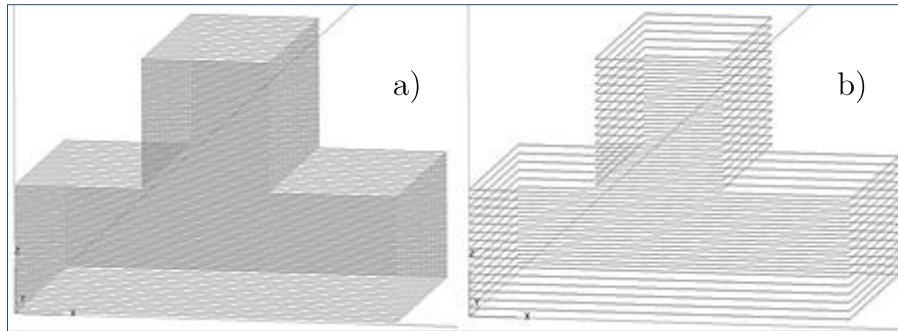


Figura 14. Pieza seccionada con dos espesores de capa diferentes, 0.127[mm] (a) y 0.3302 [mm] (b).

En la Figura 14, 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.

Orientación

La orientación de la pieza define varias características en la pieza, como el área proyectada en el plano de construcción y el número de capas a depositar dependiendo de la altura del modelo, y estas a su vez tienen un impacto directo en el tiempo de manufactura, la cantidad de material de modelo y soporte, acabado superficial, precisión dimensional y propiedades mecánicas de la pieza [25].

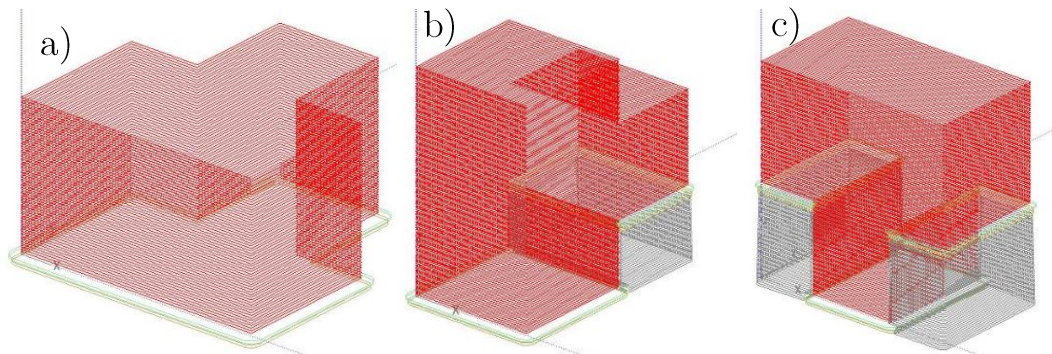


Figura 15. Diferentes orientaciones de construcción para una misma pieza (material de modelo en rojo, material de soporte en gris).

En la Figura 15 se observan 3 orientaciones diferentes de construcción, aunque las piezas finales tendrán dimensiones muy semejantes, las características finales (acabado superficial, propiedades mecánicas, etc.) y los recursos empleados en la manufactura (material de modelo, material de soporte, tiempo de construcción, etc.) serán diferentes para cada uno de los casos. En el inciso a) de la figura 15 se observa una construcción que requiere material de soporte únicamente en la base la construcción, mientras que para los incisos b) y c) se incrementa la cantidad de material de soporte debido al cambio en la orientación.

Estilo de deposición de material de soporte.

El material de soporte es aquel que sirve como auxiliar en la construcción de las partes de la pieza que requieran sustentación, también sirve de ayuda para facilitar la remoción de la pieza, ya que en el área en la que la pieza hace contacto con la hoja de construcción, se depositan algunas capas de material de soporte para facilitar el desprendimiento de la pieza final.

El programa Insight 10.1 permite 5 estilos para depositar el material de soporte, Adaptable (*Smart*), Espaciado (*Sparse*), Básico (*Basic*), Envolverte (*Surround*) y Romper-Remover (*Brake-Away*).

Ángulo de auto-sustentación.

Angulo medido desde la plataforma de construcción hasta la superficie de la pieza en voladizo, a partir del cual no es necesario colocar material de soporte.

Parámetros de la trayectoria de deposición.

La trayectoria de deposición es generada automáticamente por el programa para llenar cada una de las capa con material de modelo y soporte.

Para que se generen las trayectorias de deposición, es necesario establecer una serie de parámetros (editables por el usuario). En esta trayectoria la boquilla se desplaza depositando el filamento (*raster*, en el idioma inglés) selectivamente. En la Figura 16 se muestra una trayectoria de deposición con sus respectivos parámetros.

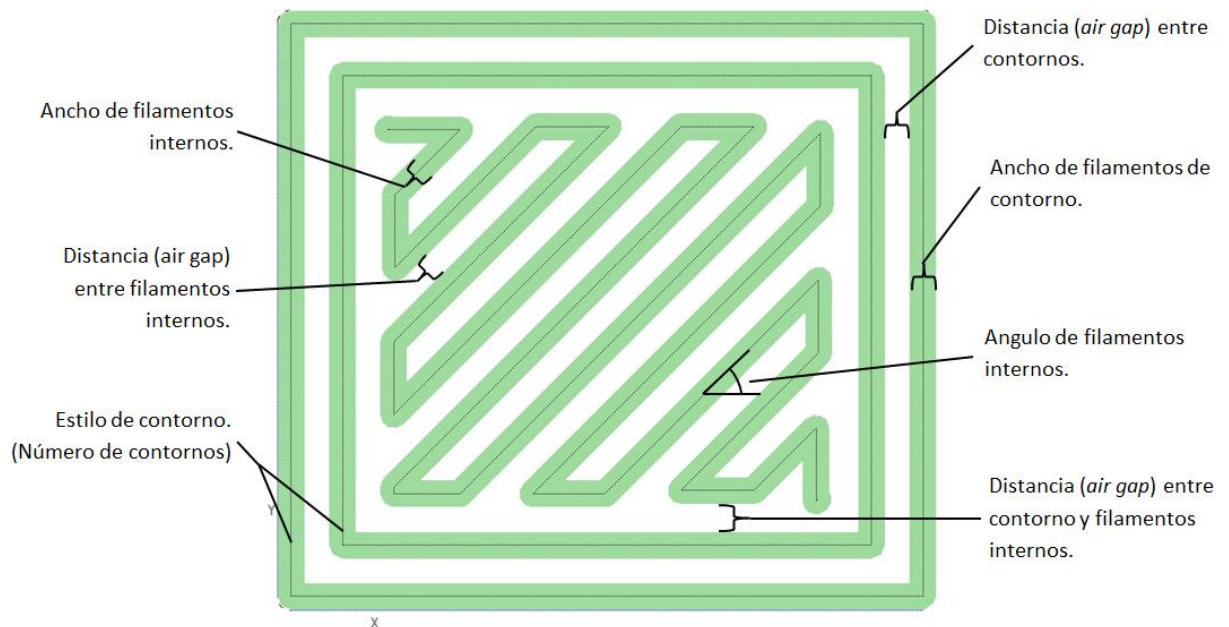


Figura 16. Parámetros de las trayectorias de deposición en una capa.

La variación de estos parámetros tiene repercusiones en las características finales de la pieza (acabado superficial, propiedades mecánicas, precisión dimensional y porosidad.) y los recursos empleados en la manufactura (cantidad material de modelo y tiempo de construcción.).

Ancho de filamento.

El ancho del filamento está relacionado con la velocidad de deposición y la velocidad de extrusión del material, el ancho de filamento es dependiente de la boquilla y el material que se utilice. En la tabla 2 se muestran los anchos de filamento disponibles por material y boquilla [11].

Material	T10	T12	T16	T20
ABS-M30 ABSi ABS-M30i PC-ABS	0.232-0.5782	0.3048-0.7298	0.4064-0.8314	0.4572-0.9822
PC PC-ISO ASA Nylon 12		0.254-0.679	0.4064-0.8814	0.4572-0.9822
ABS-EDS7		0.3048-0.7298	0.4064-0.8314	
Ultem 9085			0.4064-0.7814	
PPSF/PPSU			0.4064-0.7814	0.4572-0.9822

Tabla 2. Anchos de filamento en milímetros, para cada boquilla y material [11].

El ancho de filamento seleccionado tiene un impacto directo sobre los espesores mínimos que se pueden depositar sobre la plataforma de construcción, ya que para asegurar la construcción de una estructura estable es necesario depositar dos filamentos (ida y vuelta). Esta característica se vuelve relevante cuando tenemos detalles de bajas dimensiones sobre la plataforma de construcción. A continuación se muestra en la tabla 3 las restricciones mínimas de espesor de pared [11].

Espesor de llenado			
Boquilla	Espesor de capa	Espesor mínimo de llenado.	Ancho de filamento
T10	0.127 mm	0.41 mm	0.232 mm
T12	0.178 mm	0.61 mm	0.3048 mm
T16	0.254 mm	0.81 mm	0.4064 mm
T20	0.330 mm	0.91 mm	0.4572 mm

Tabla 3. Espesores mínimos recomendados por Stratasys®.

Estilo de contorno.

El estilo de contorno se refiere al número de contornos que se depositan para el llenado de una capa, el número de contornos se puede incrementar de acuerdo a las necesidades de la pieza, los contornos adicionales pueden producir paredes perimetrales reforzadas; en la figura 17 se muestran dos estilos de llenado.

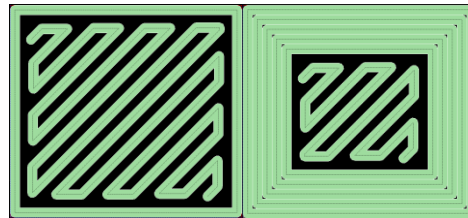


Figura 17. Diferentes estilos de contorno para una misma pieza, simple (Izquierda) y múltiple (Derecha).

Distancia entre contornos y filamentos.

Es la distancia (air gap) entre dos filamentos adyacentes depositados en la misma capa. Esta distancia puede variar en un intervalo negativo o positivo. En la figura 18 se muestran las diferentes configuraciones del espacio entre filamentos. Las distancias entre filamentos que se pueden 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 modo de múltiples contornos (Ver figura 16).

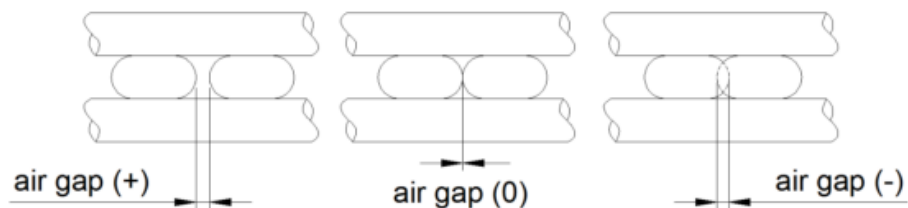


Figura 18. Posibles configuraciones de distancia entre filamentos dentro de una construcción FDM [11].

Ángulo de filamento interno.

Es el ángulo medido sobre la plataforma de construcción desde el eje X, en el cual se depositan los filamentos internos de la construcción (figura 19). El ángulo puede variar de 0 a 90 grados.

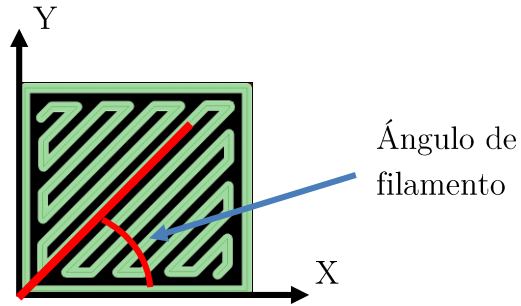


Figura 19. Angulo de filamento interno.

Estilo de llenado.

En la versión Insight 10.1 existen 3 diferentes tipos de llenado pre-establecidos: sólido, espaciado y espaciado de doble densidad. En la configuración sólido, la distancia entre filamentos internos es cero, creando un llenado total de la parte interna. En la configuración espaciada, existe una distancia entre filamentos, lo que representa una reducción en el material de modelo. Por último, en la configuración de espaciado de doble densidad, se crea un tipo de mallado sobre la misma capa, compuesta por filamentos perpendiculares depositados de manera espaciada, en la figura 20 se muestran los diferentes estilos de llenado.

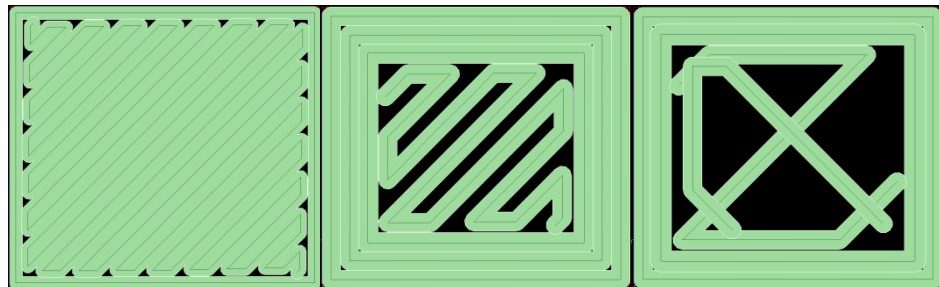


Figura 20. Diferentes estilos de llenado, de izquierda a derecha, estilo sólido, estilo espaciado y estilo espaciado de doble densidad.

Estilo de superficie visible.

En las opciones de *Insight 10.1* existe la posibilidad de mejorar el acabado superficial, esta opción disminuye el ancho de los filamentos de contorno y la distancia entre los filamentos del contorno y los internos. Cuando se habilita la opción de mejorado de superficie se pueden escoger entre varios anchos de filamento para dar un mejor acabado a las superficies externas.

Con la posibilidad de modificar todos estos parámetros de manufactura, existe la posibilidad de elegir entre una infinidad de configuraciones para la construcción de una pieza, además de que todas las configuraciones tendrán resultados diferentes tanto en acabado superficial como en tiempo de construcción.

Para poder entender la influencia de los parámetros de manufactura es necesario comprender las relaciones existentes entre ellos y entre las consecuencias en el acabado final de la pieza. Logrando de esta forma exponer un panorama de las características del proceso FDM en función de sus parámetros de manufactura, que permitan ser consideradas en el proceso de diseño y construcción de piezas mediante esta tecnología. Además, se pretende que la correcta elección de los parámetros de manufactura cumpla con los requerimientos y necesidades de la pieza.

No obstante, en la literatura se reportan las siguientes limitaciones de tecnología FDM [13, 8, 19]:

- Son necesarias estructuras de soporte.
- Presenta contracción o distorsión en detalles de baja dimensión.
- Pobre acabado superficial y baja resolución.
- Proceso lento en piezas con mucho volumen.
- Boquillas circulares que impiden la construcción de esquinas.
- Anisotropía en las construcciones.

Con la finalidad de minimizar el impacto de estas limitaciones. Es necesario conocer y atender el efecto que representa cada uno de los parámetros de construcción en el producto final.

En un esfuerzo por compartir con el diseñador las características del proceso FDM, se busca generar información que asista al proceso de diseño para piezas construidas mediante la tecnología FDM, tomando siempre en consideración los aspectos geométricos y funcionales de la pieza y así extender los alcances de la tecnología FDM.

2.1 Objetivo

Generar información, orientada al diseñador, para la selección de los parámetros de manufactura que afectan las características geométricas y de tiempo de construcción dentro del proceso FDM.

2.2 Alcances

- Generar información acerca de la relación e influencia de los parámetros de manufactura que tiene impacto en las características geométricas de la pieza y el tiempo de construcción.
- Proporcionar información acerca de las capacidades geométricas mínimas que se pueden construir y su dependencia con los parámetros de manufactura.
- Proponer una serie de pasos para la selección de parámetros de manufactura.

3 Marco Teórico

3.1 Condiciones de extrusión.

Para extruir el material de manera correcta, se deben de cumplir ciertas condiciones físicas tanto en el material como en el cabezal extrusor, a continuación se explican.

Material

Los materiales utilizados por la tecnología FDM son un subconjunto de los termoplásticos, que al ser calentados a temperaturas cercanas a su punto de fusión se depositan en forma de filamentos formando fuertes uniones entre ellos; para poder ser extruidos tienen que tener la composición y estructura necesarias para depositarse con baja deformación una vez alcanzada la temperatura del horno, además deberán tener módulos de tracción y flexión adecuados para moldearse en forma de filamentos, enrollarse y utilizarse como pistón auto-extraíble para atravesar la boquilla de extrusión. Otra propiedad necesaria para el correcto funcionamiento radica en tener una viscosidad relativamente baja para poder ser expulsado a través de la boquilla en diferentes anchos de filamentos y flujos volumétricos [26].

Cabezal extrusor.

El cabezal extrusor está diseñado para calentar y empujar el material de construcción a través de la boquilla y sobre la superficie de construcción para producir partes de precisión, además es un ensamble ligero diseñado para moverse con facilidad a las velocidades de deposición requeridas sin afectar la precisión.

Un motor D.C. controla un par de rodillos que producen una fuerza un poco mayor a 10 libras sobre el filamento que cumple la función de pistón para atravesar la boquilla. El material debe de tener la resistencia suficiente para evitar

romperse o pandearse, esta resistencia es función del diámetro del filamento y los módulos de flexión y compresión [26].

Asociada a la velocidad de deposición, el flujo volumétrico que el sistema requiere para alcanzar diferentes anchos de filamentos está definido en el sistema. El mecanismo de los rodillos debe ser capaz de mantener o aumentar el flujo volumétrico en todo el rango de viscosidades y presiones de extrusión [27].

La presión (P) que se desarrolla en la boquilla es dependiente del largo y diámetro de la región de licuefacción (d_L, L_L) y la boquilla (d_T, L_T), así como de la viscosidad del material (h), la temperatura de extrusión (T), y al flujo volumétrico (\dot{V}). Para los fluidos Newtonianos, la presión de extrusión puede expresarse con la siguiente ecuación [26]:

$$P = \frac{128hV}{\pi} \left[\frac{L_T}{d_T^4} + \frac{L_L}{d_L^4} \right]$$

Como se muestra en la ecuación, la fuerza de extrusión depende en gran medida de las medidas de la boquilla. Aunque también está influenciada por la temperatura de la zona de licuefacción, es en menor medida, debido a que la viscosidad disminuye con la temperatura. Para ciertas condiciones de operación, el flujo volumétrico máximo puede determinarse comparando la fuerza de extrusión desarrollada en la boquilla con la resistencia a la compresión del filamento [26].

El acabado superficial en las piezas es función de la viscosidad del material fundido, la temperatura del horno, la velocidad de deposición y la geometría de la pieza.

La boquilla y las resistencias deben calentar el material hasta la temperatura de extrusión y el mecanismo de alimentación deberá empujar el filamento a través de la boquilla a diferentes flujos volumétricos, tamaños de boquilla y viscosidades. La cantidad de calor necesaria para fundir el material a la temperatura necesaria es función de las resistencias, la boquilla y el material así como también del diámetro del filamento y el flujo volumétrico [28]. Mientras que aumentar el diámetro del filamento para soportar mayor carga de compresión

podiera resultar ventajoso, tendría un efecto negativo en la fundición del material [26].

3.2 Flujo volumétrico en la extrusión de materiales

La velocidad de la construcción está relacionada con la cantidad de material depositada por la boquilla en un intervalo de tiempo o flujo volumétrico, éste se puede calcular mediante la velocidad de la deposición, ancho de filamento y espesor de capa [20], de estos tres parámetros, la velocidad de deposición es la que esta preestablecida por el sistema, por lo que el flujo volumétrico se vuelve una consecuencia del espesor de capa (boquilla) y el ancho de filamento que el usuario seleccione.

$$\phi_v = V_d * A_f * E_c$$

Ortega (2014) [11], analizó la eficiencia de las boquillas respecto a la velocidad de deposición y el flujo volumétrico manteniendo el mismo ancho de filamento para todas las boquillas, en este estudio se concluye que para áreas mayores a 50000 [mm²], la velocidad de deposición y el flujo volumétrico tienden a valores constantes. Los valores calculados para 3 materiales se presentan en la figura 21.

Material	Boquilla	Velocidad deposición (mm/s)	Flujo volumétrico (mm ³ /s)
ABS-M30	T10	95.5	6.16
	T12	165.5	14.83
	T16	167	21.5
	T20	145	22.5
PC	T12	131	11.83
	T16	190.5	24.5
	T20	121	20.3
PC-ABS	T10	94.5	6.16
	T12	143	12.83
	T16	189.5	24.5
	T20	144.5	24.3

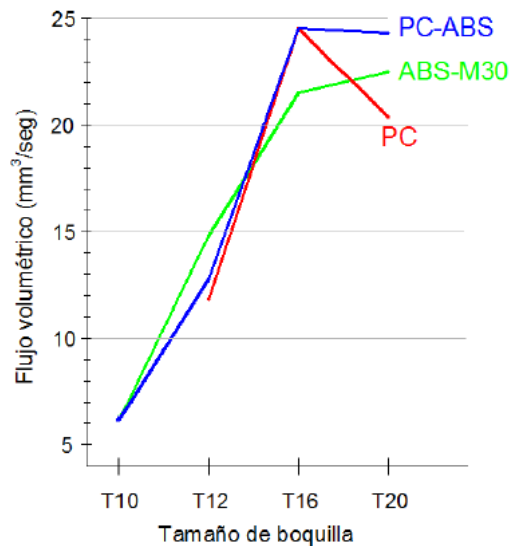


Figura 21. Comparativo de velocidades de deposición y flujos volumétricos, el flujo volumétrico es calculado con un mismo ancho de filamento para todas las boquillas y materiales [11].

Como se observa en la figura 21, en términos de flujo volumétrico, y para áreas mayores a $50000[\text{mm}^2]$, la boquilla T16 es la que deposita el mayor flujo volumétrico para el material PC y PC-ABS.

3.3 Características de las construcciones FDM.

Las características de la tecnología FDM están en función de sus parámetros, ya que la elección de estos modifica las características finales de la pieza, en esta sección se habla acerca de las principales características de las construcciones.

Propiedades mecánicas

En el proceso FDM se depositan filamentos que forman estructuras en forma de mallas apiladas, por lo que las propiedades mecánicas dependen de su mesoestructura, es decir, las uniones que se forman entre los filamentos y su arreglo. Las estructuras dependen de los parámetros de manufactura por capa seleccionados [29]. Aunque existen diferentes estudios acerca de las propiedades mecánicas en el proceso FDM los estudios refieren a la orientación de construcción, el espacio entre filamentos, el ángulo de los filamentos y el ancho de filamento como los parámetros de mayor influencia en las propiedades mecánicas de las piezas [4, 30, 18].

Características Superficiales y Geométricas.

Una característica de las construcciones FDM radica en que las superficies son rugosas, ya que las capas se depositan paralelas a la plataforma de extrusión y dependiendo del espesor de la boquilla los contornos de los filamentos se hacen notar; este efecto se vuelve excesivo en superficies inclinadas y se le conoce como "Fenómeno de escalonamiento" (figura 22). Los valores de rugosidad se encuentran entre 8 y 50 Ra (μm) [31].



Figura 22. Efecto de escalonamiento en una construcción FDM [11].

Otro tipo de distorsiones geométricas se relacionan con la generación del archivo STL, estas dependen de la complejidad de las superficies, ya que en la generación de las mallas, la representación STL tiene desviaciones del modelo original. Los problemas más comunes a los que se enfrentan los programas de CAD que generan archivos STL son los siguientes: espacios vacíos, caras encimadas, bordes colineales y redondeo de superficies. Aunado a esto, las distorsiones generadas por la carga térmica y los esfuerzos residuales repercuten directamente en el acabado superficial de la pieza [32].

Acabado superficial

Las investigaciones realizadas en cuanto al acabado de las piezas manufacturadas con la tecnología FDM, concuerdan que los parámetros con mayor influencia en el acabado superficial son: la geometría de la pieza y la orientación [33, 30, 32, 11].

Los autores Ahn D., Jin-Hwe k & Soonma, proponen un modelo para calcular la rugosidad teórica en función del ángulo de construcción de la superficie, el espesor de capa y la secciones transversal del filamento (figura 23) [31].

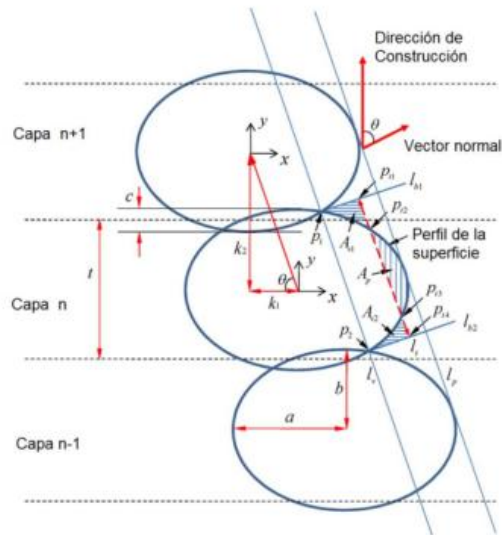


Figura 23. Representación de la sección transversal de una superficie [31].

En este modelo se hace notar que cuando los filamentos de contorno en las capas apiladas dejan de tener contacto las mediciones de rugosidad presentan valores muy elevados, como se observa en la figura 24 esto ocurre generalmente en los ángulos de la construcción de 0° - 30° y de 150° - 180° .

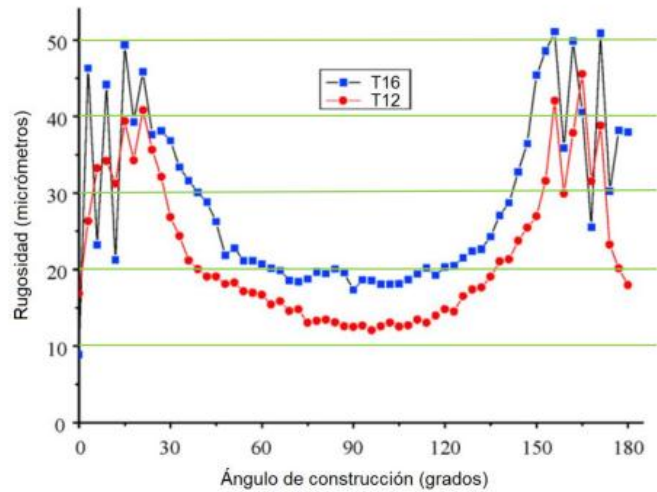


Figura 24. Mediciones de rugosidad obtenidas para espesores de capa distintos.

Precisión dimensional.

Los estudios realizados por Zang, Y & Chou, Y. H. (2004) [34], acerca de la influencia de los parámetros de construcción en la precisión dimensional de las piezas construidas por FDM, define al espesor de capa, el ancho de filamento y la velocidad de deposición como los parámetros centrales de su investigación, y concluyen que la velocidad de deposición es el parámetro con mayor influencia en el acabado superficial de la pieza. Además señalan que las combinaciones ancho de filamento y boquilla tienen alta influencia en la distorsión de las piezas, a mayor espesor de capa y ancho de filamento aumentará la acumulación de esfuerzos térmicos y por consiguiente la distorsión geométrica.

Las tolerancias publicadas por Stratasys para las máquinas de la serie Fortus® son:

- Fortus 400 mc: Partes producidas con una tolerancia de ± 0.127 mm o ± 0.0015 mm/mm, la que resulte mayor [35].
- Fortus 900mc: Partes producidas con una tolerancia de ± 0.089 mm o ± 0.0371 mm/mm, la que resulte mayor [22].

Stratasys, Inc. [24], a fin de comprobar sus tolerancias ya publicadas, realiza un estudio, encontrando que para una pieza de dimensiones 127x76x14[mm], utilizando ABS-M30, una boquilla T16, estilo de llenado sólido, ancho de filamento 0.51 y ángulo de filamento 90°, las máquinas son capaces de alcanzar tolerancias entre ± 0.13 [mm] (400 mc) y 0.09 [mm] (900 mc) en toda la plataforma de construcción.

4 Desarrollo

Los parámetros de la tecnología FDM mantienen tal correlación entre ellos, que la convierten en un proceso multi-paramétrico dependiente, es decir, si se modifica un parámetro, este puede modificar a otros parámetros que mantengan relación con el primero, además de que se tendrán diferentes resultados [30]. Por ejemplo si escogemos una boquilla T10 a diferencia 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 tendremos resultados diferentes de tiempo de construcción y acabado superficial.

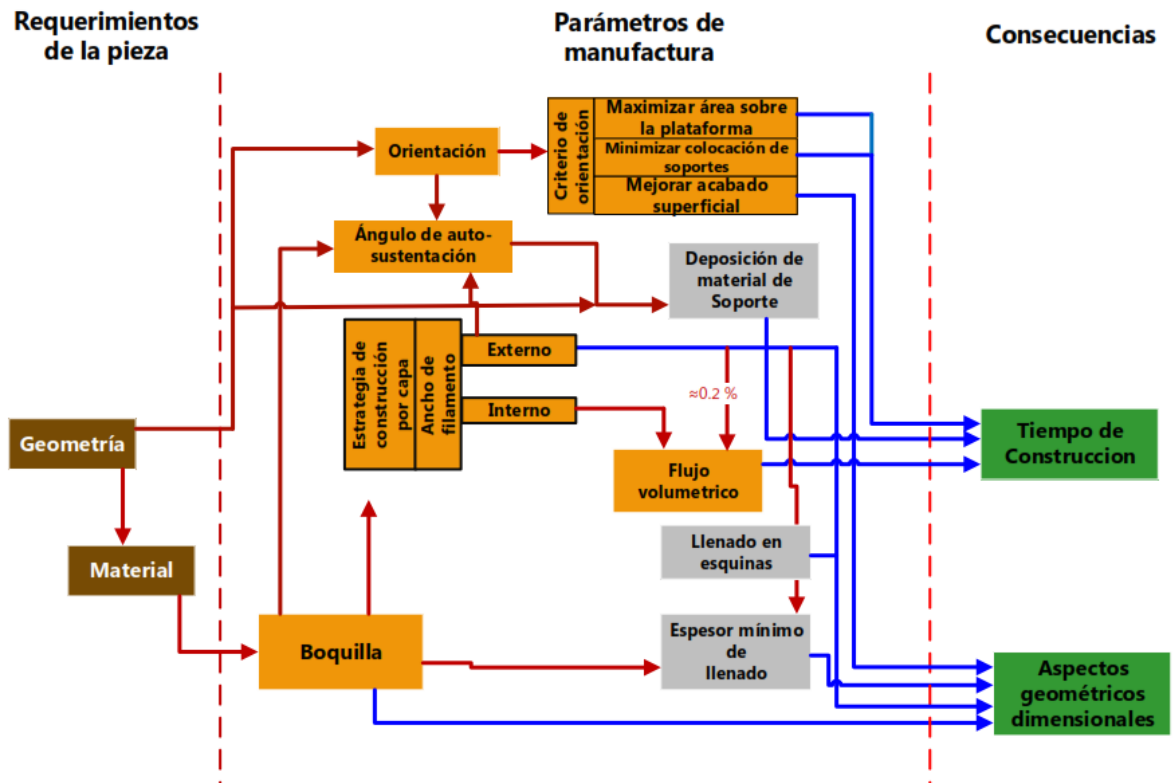


Figura 25. Esquema de los elementos del proceso FDM y sus interacciones.

Con el esquema presentado en la figura 25 se propone un diagrama que identifica la interacción de los parámetros de manufactura con el tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales.

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 parte en color naranja se encuentran los parámetros mediante los cuales se pueden modificar las características de la 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.

4.1 Requerimientos de la pieza.

Quien demanda el uso de la tecnología de manufactura aditiva generalmente proporciona su pieza en un archivo de 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 del diseño, por lo que de estos dos parámetros de entrada, el material es el primer elemento que queda seleccionado basándose en las características del material y las propiedades mecánicas; las tablas de propiedades mecánicas y características de los materiales se presentan en el apéndice A. Utilizando la geometría de la pieza como parámetro de entrada y una vez definido el material, se da entrada al proceso de selección de parámetros de manufactura.

4.2 Relaciones entre los parámetros de manufactura.

Utilizando el esquema de la figura 25, se explicarán las relaciones entre las entradas y los parámetros de manufactura que tienen un impacto en el tiempo de construcción y los aspectos geométricos dimensionales de la construcción.

4.2.1. La geometría y sus implicaciones.

La relación entre la geometría y la orientación tiene gran relevancia en la selección de los parámetros de manufactura, ya que tiene un impacto directo en los resultados de la pieza.

Como se muestra en la figura 26, la relación geometría - orientación 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.

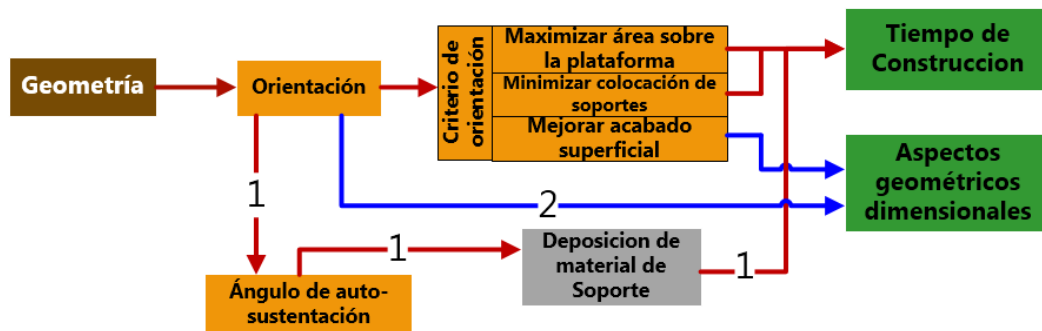


Figura 26. Relación geometría - orientación, sus consecuencias y resultados.

Por otro lado las implicaciones de la combinación geometría-orientación que presenta en los aspectos geométricos dimensionales son:

- 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 es posible 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 geométricos 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.

4.2.2. 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 4 se muestran las boquillas que están habilitadas para cada material.

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

Tabla 4. Boquillas habilitadas para la extrusión de materiales FDM.

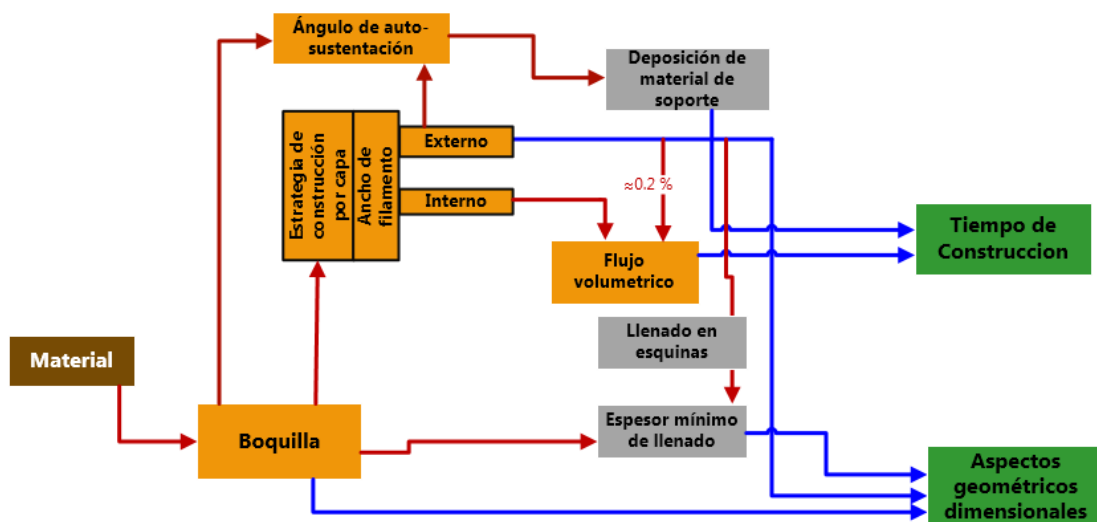


Figura 27. Material como parámetro de entrada.

En la figura 27 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 27, 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 [36].

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 condicionara 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.

4.3 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.

Como se menciona en este capítulo, los parámetros de manufactura determinan las consecuencias de la construcción, una vez indicadas las relaciones de los parámetros de manufactura con sus consecuencias (figura 25), se busca comprender con una serie de pruebas y análisis el comportamiento de los parámetros de manufactura que afectan el tiempo de construcción y acabado superficial.

Las relaciones propuestas fueron las siguientes:

- Análisis del llenado en espesores delgados y esquinas.
- 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 los siguientes:

- La boquilla
- El ancho de filamento

Cuando se modifican estos dos parámetros se tienen repercusiones en los elementos del 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 (Tiempo de construcción y Características geométricas dimensionales) [30, 36].

5 Pruebas, análisis y resultados.

5.1 Análisis del llenado en espesores delgados y esquinas.

Se puede escoger un ancho de filamento para el contorno de la capa y cualquier otro ancho para el llenado interno del área de la capa, pero siempre serán constantes mientras ocurre su deposición (El contorno y el llenado interno son dos trayectorias diferentes).

Debido a que el ancho de filamento se mantiene constante cuando la boquilla recorre la trayectoria del contorno depositando el material, se presenta una característica cuando ocurre un cambio de dirección en la trayectoria de los contornos, generalmente en esquinas menores a 90° .

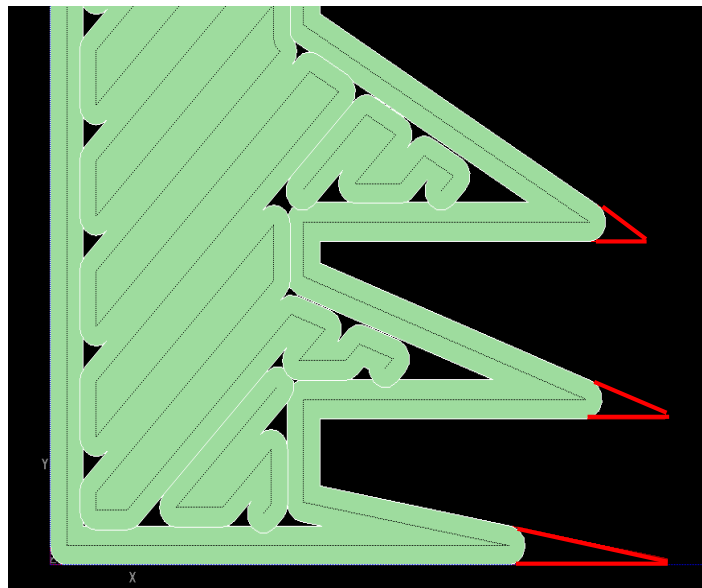


Figura 28. Detalle de una construcción con espacios faltantes en la deposición de contornos (Esquinas color rojo).

En la figura 28, se observa que cuando el ancho de filamento de contorno excede la dimensión de la esquina, la máquina interrumpe la trayectoria y se

produce un área faltante de llenado en la esquina del contorno. Esta característica depende de dos parámetros principalmente, el primero es el ancho de filamento que se utiliza en el contorno y el segundo es el ángulo de la esquina que se requiere construir.

Para conocer el espacio faltante de llenado se generaron tablas donde se encuentra la distancia faltante de llenado, medida desde la esquina teórica hasta la esquina del contorno del filamento real depositado (Figura 29) y por otra parte el área faltante de llenado en la esquina (Figura 30), ambas para los diferentes valores angulares de la construcción (0° - 90°). Las tablas para las 4 boquillas se presentan en el apéndice B. En la tabla 5 se presentan los intervalos en los cuales se encuentra la magnitud de espacios faltantes de las boquillas.

Boquilla	Intervalo de distancia faltante de llenado	Intervalo de área faltante de llenado
T10	0.12-1.064 [mm]	0.018-0.0446 [mm ²]
T12	0.151-1.596 [mm]	0.029-0.1 [mm ²]
T16	0.172-2.128 [mm]	0.037-0.178 [mm ²]
T20	0.203-2.394 [mm]	0.052-0.226 [mm ²]

Tabla 5. Intervalos de dimensiones faltantes en esquinas.

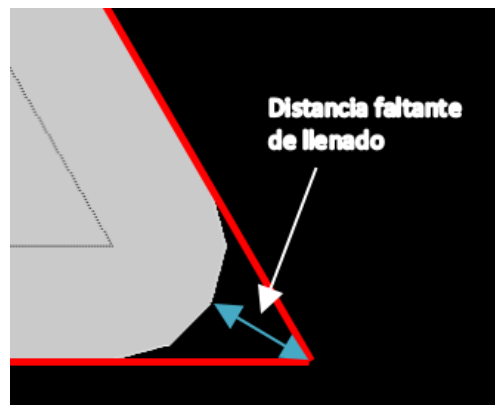


Figura 29. Distancia faltante de llenado entre esquina teórica y real.



Figura 30. Área faltante de llenado en esquinas.

Cuando tenemos áreas delgadas de construcción se presenta una restricción respecto al espesor de llenado. Este espesor mínimo de llenado representa el doble del ancho de filamento mínimo que es capaz de extruir cada boquilla. Ya que para cerrar el contorno necesita depositar un hilo sobre todo el contorno del área que se desea construir en cada capa (En este caso un filamento de ida y otro de vuelta). En la figura 31 se muestra el llenado de una capa que presenta áreas delgadas, el filamento recorre el contorno depositando un filamento de ida y otro de vuelta.

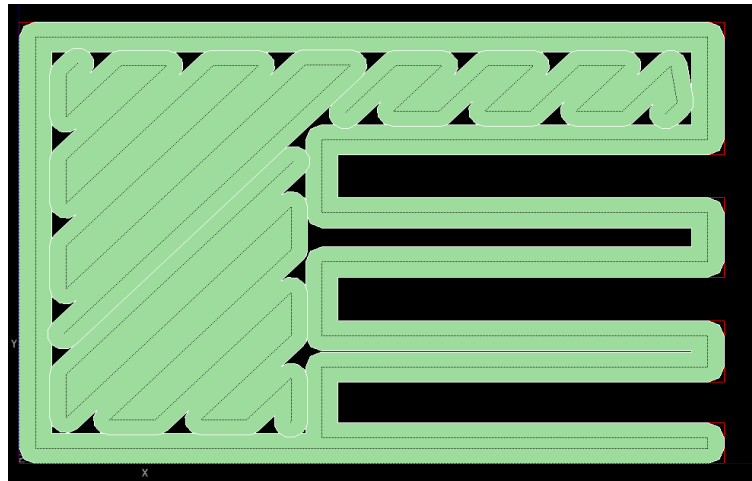


Figura 31. Llenado de espesores delgados.

En la tabla 6 se presentan los espesores mínimos de llenado dependiendo de la boquilla que se utilice.

Espesor de llenado			
Boquilla	Espesor de capa	Espesor mínimo de llenado	Ancho de filamento mínimo
T10	0.127 mm	0.41 mm	0.232 mm
T12	0.178 mm	0.61 mm	0.304 mm
T16	0.254 mm	0.81 mm	0.4064 mm
T20	0.330 mm	0.91 mm	0.4572 mm

Tabla 6. Espesores mínimos recomendados por Stratasys® [22].

5.2 Flujo volumétrico como consecuencia del ancho de filamento

Cuando la construcción se centra en la correcta deposición de los aspectos geométricos, el flujo volumétrico se vuelve una consecuencia de la elección del ancho de filamento y la boquilla, por lo que en esta prueba se tiene como objetivo conocer el comportamiento del flujo volumétrico en función del ancho de filamento.

En esta prueba se realizaron aproximaciones de tiempo de construcción mediante el programa *Insight* 10.1. Utilizando un prisma rectangular (Figura 32) de altura 115.57 [mm] para obtener un número entero de capas para todas las boquillas (Tabla 7) y lado 225 [mm] para evaluar áreas mayores a 50000[mm²], ya que para esta área y mayores el flujo volumétrico se estabiliza.

Boquilla	Espesor de capa [mm]	Cantidad de capas a depositar
T10	0.1270	910
T12	0.1778	650
T16	0.2540	455
T20	0.3302	350

Tabla 7. Boquilla, espesor de capa y número de capas a depositar en los experimentos

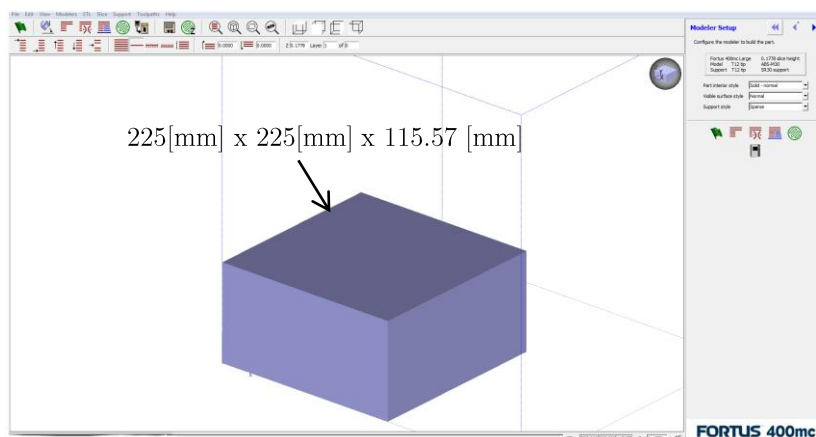


Figura 32. Geometría utilizada en el experimento

A excepción del ancho de filamento, los parámetros de manufactura establecidos para obtener las aproximaciones de tiempo y poder calcular el flujo volumétrico, fueron los valores prestablecidos por el software *Insight*; se muestran en la tabla 8.

Parámetro de manufactura	
Ancho de filamento	-Establecido según la prueba-
Estilo de contorno	Un contorno/simple
Estilo de superficie visible	Normal
Estilo de llenado	Solido-normal
Angulo de filamento	45.0
Distancia entre filamento	0.0

Tabla 8. Parámetros de manufactura utilizados en los experimentos.

Los valores calculados de flujo volumétrico se muestran en la gráfica de la figura 33, algunos materiales tienen similitud tanto en su velocidad de deposición como en su flujo volumétrico.

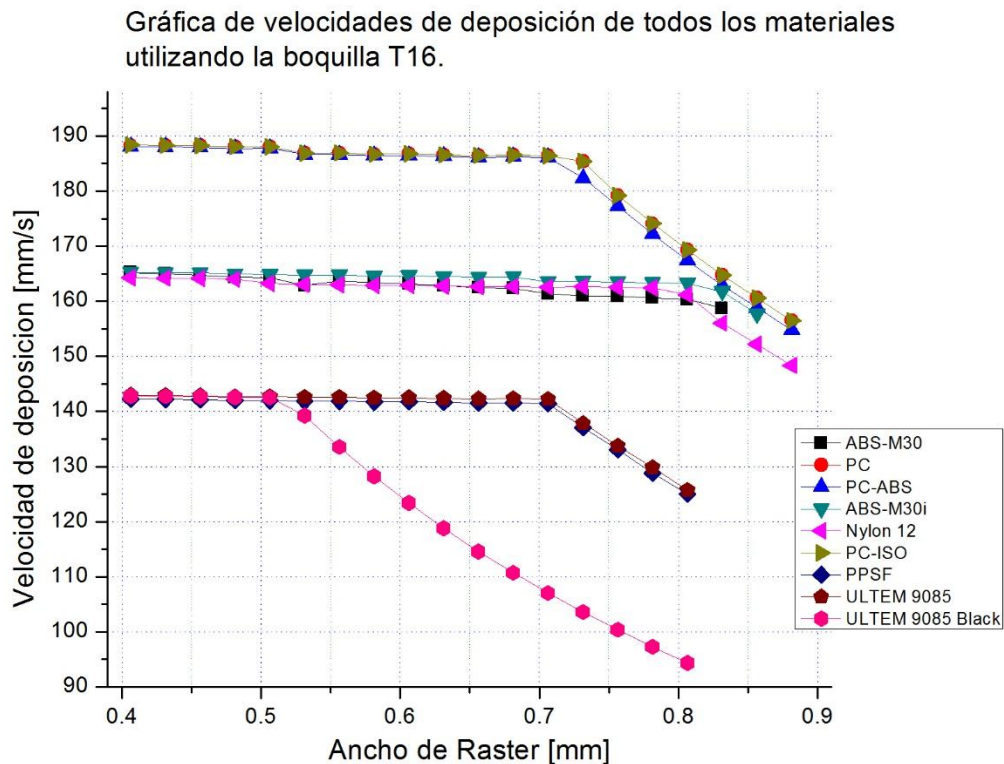


Figura 33. Velocidades de deposición utilizando una boquilla T16.

En la figura 34 se muestran los flujos volumétricos calculados para tres materiales, además se incluye a la velocidad de deposición calculada para los mismos.

Flujo volumetrico y velocidad de deposición en areas mayores a 50000[mm²] utilizando una boquilla T16

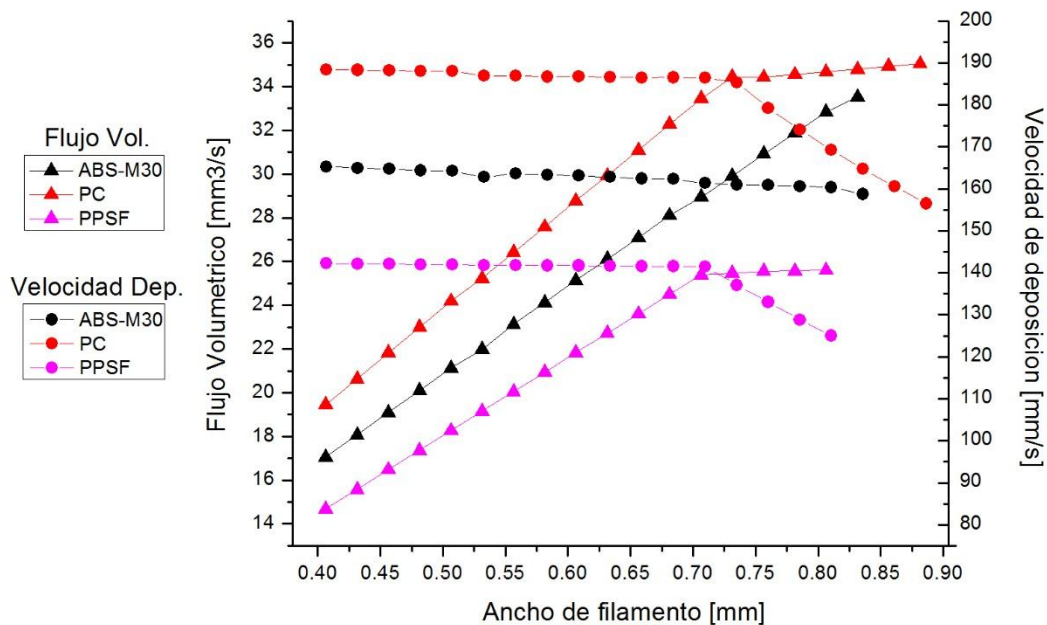


Figura 34. Flujos volumétricos y velocidades de deposición para distintos materiales utilizando una boquilla T16

En la figura 34 se observa como el flujo volumétrico del material ABS-M30 crece en todo el intervalo y su velocidad de deposición se mantiene casi constante; sin embargo para el caso de los materiales PC y PPSF, cuando el ancho de filamento supera los 0.7 [mm] el flujo volumétrico deja de aumentar, mientras que sus velocidades de deposición comienzan a decrecer. Este efecto está relacionado con la configuración, de material boquilla y fuerza de extrusión, que no permiten alcanzar el ancho de filamento manteniendo la misma velocidad de deposición, por lo que ésta disminuye para poder depositar anchos de filamento más gruesos.

El incremento del flujo volumétrico aumentará la cantidad de material depositado por unidad de tiempo; sin embargo, como se muestra en los compor-

tamientos obtenidos, dependiendo de la combinación material-boquilla, seleccionar anchos de filamento gruesos no siempre asegura obtener el beneficio del incremento lineal del flujo volumétrico que presentan los anchos de filamento delgados.

Las gráficas para las combinaciones material-boquilla faltantes se presentan en el Apéndice C.

5.3 Tiempo de acondicionamiento entre boquillas en la construcción.

En las condiciones geométricas en las que es necesario colocar material de soporte, existe un incremento considerable en el tiempo de construcción, cuando en una capa es necesario colocar material de soporte y material de modelo, la primer trayectoria que se deposita es la de material de soporte, ésta se extruye a una temperatura diferente de la del material de modelo, después de terminar la deposición se requiere el acondicionamiento de la boquilla de modelo, por lo que es necesario ajustar la temperatura de la boquilla de modelo para realizar la deposición, una vez finalizada la capa es necesario reajustar la temperatura de la boquilla de soporte para comenzar de nuevo el proceso de construcción de la siguiente capa. A pesar de que el tiempo de acondicionamiento entre boquillas es diferente cuando cambia de modelo a soporte y de soporte a modelo, pueden agruparse en uno solo ya que siempre se presentan de manera conjunta.

Para obtener información acerca de los tiempos de acondicionamiento entre boquillas, se realizó un análisis apoyado de aproximaciones de tiempo obtenidas en el programa *Insight* 10.1 considerando lo siguiente:

- Para determinar el tiempo que tarda el cambio entre boquillas, se requiere la combinación de material de modelo y soporte en todas las capas de la construcción, para conseguir este arreglo, se seleccionaron y modificaron manualmente los parámetros de manufactura por capa para cada conjunto de capas.

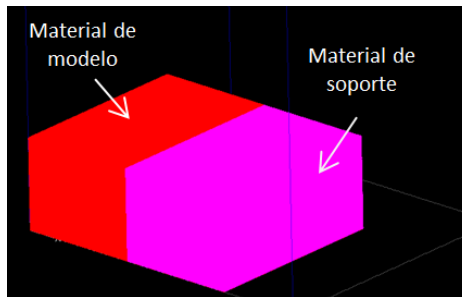


Figura 35. Pieza utilizada en las simulaciones.

De los estudios realizados en la tesis “Investigación de las capacidades de la tecnología de manufactura aditiva FDM”, se sabe que en construcciones con áreas mayores a $50,000[mm^2]$ el cálculo del flujo volumétrico no se ve afectado por el tiempo de purga y limpieza de las boquillas; por lo que para las piezas se escogieron áreas mayores a $50,000[mm^2]$.

-Debido a que existen materiales de modelo que aceptan dos tipos de material de soporte, los tiempos de estabilización cambian. Se realizaron simulaciones para obtener el tiempo de estabilización, en diferentes combinaciones de materiales y para las 4 boquillas.

En la gráfica de la figura 36 se muestra el resumen de los tiempos de estabilización de temperatura por capa, para las boquillas y materiales que se analizaron.

Aunque los valores oscilan entre los 30 y 60 segundos, los tiempos de cambio entre boquillas más grandes, corresponden a la combinación de los materiales PC - SR100, PPSF y Ultem, por otro lado los tiempos menores corresponden al material PC con material de soporte PCsupport. La diferencia entre el PCsupport y el SR100 está en que el material SR100 es soluble y el material PCsupport, es desprendible.

La afectación al tiempo de construcción resultante del cambio entre boquillas, será proporcional al número de capas que presenten la combinación de modelo y soporte.

Tiempo de cambio entre boquilla de soporte y modelo para diferentes materiales .

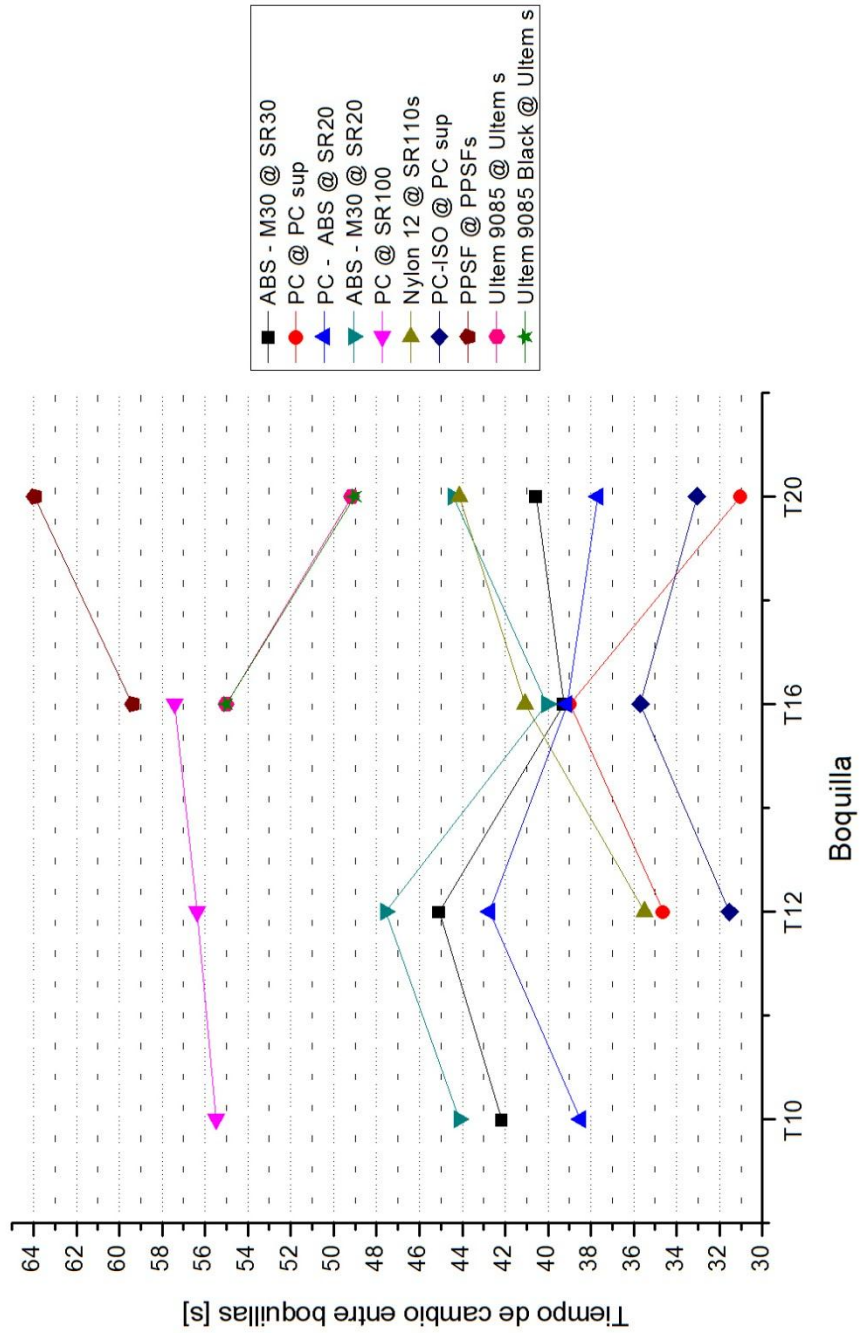


Figura 36. Grafica de tiempos de cambio entre boquillas por capa para diferentes materiales.

5.4 Análisis del ángulo de autosustentación cuando se deposita material de soporte

Como se menciona en los antecedentes, cuando la forma de la pieza, requiere estructuras de apoyo para lograr su construcción, se depositan capas de material de soporte, que servirán de apoyo para las capas que se colocaran posteriormente, una de las implicaciones que presenta depositar estructuras soporte está relacionada con el incremento del tiempo de construcción, debido al tiempo de deposición de material de soporte, más el tiempo de acondicionamiento entre las boquillas de material de modelo y soporte.

Generalmente cuando el ángulo de la construcción medido desde la plataforma de construcción es menor a 45° , es necesario depositar estructuras de soporte para evitar errores en la construcción; un ejemplo de ello se encuentra en la figura 37, donde la ausencia de material de soporte impide que los filamentos se depositen correctamente lo que produce errores en la construcción

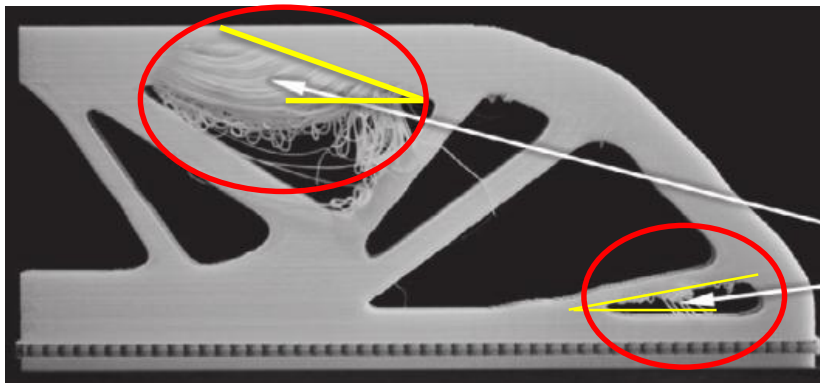


Figura 37. Errores en la construcción derivados de la falta de colocación de material de soporte [37].

El parámetro de manufactura conocido como ángulo de autosustentación (en el idioma inglés, *Self-Supporting angle*), es el ángulo a partir del cual no es necesario depositar estructuras de soporte para realizar la construcción [37], sin embargo el criterio para depositar estructuras de soporte no solo depende del ángulo de la construcción, también está relacionado con la sustentación entre los filamentos de contorno de capas adyacentes.

La ventaja de conocer el comportamiento del ángulo de autosustentación, radica en tener información que permita conocer si la combinación de geometría-orientación requerirá material de soporte, lo que se verá reflejado en el incremento del tiempo de construcción de la pieza.

Para comprender el comportamiento del ángulo de auto sustentación, se realizó un análisis de la deposición del material de soporte, encontrando que el ángulo de autosustentación depende de tres parámetros:

- El ángulo de la construcción medido desde la plataforma.
- El ancho de filamento de contorno.
- Materia de modelo.

La forma de construir las capas en la tecnología FDM, consiste en depositar un filamento que es extruido de manera continua a través de un orificio, la geometría real de un filamento consiste en una sección transversal con forma de elipse aplanado, básicamente un rectángulo con dos semicírculos unidos a los lados (figura 38), que se depositan de manera continua a lo largo de las trayectorias de deposición [11].

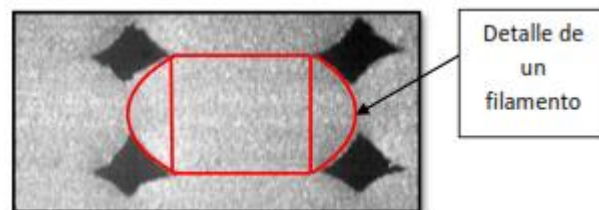


Figura 38. Sección transversal de los filamentos en una construcción FDM [29].

Sí consideramos el primer parámetro, y analizamos la sección trasversal de los filamentos de contorno cuando se depositan anchos de filamento constantes con diferentes ángulos de construcción como se muestra en la figura 39, se observa que mientras el ángulo disminuye su valor, como en el caso c) de la figura 39, los filamento dejan de tener apoyo, por lo que requieren filamentos de soporte para apoyarse y así evitar que el filamento de modelo se desplome generando errores como los mostrados en la figura 37.

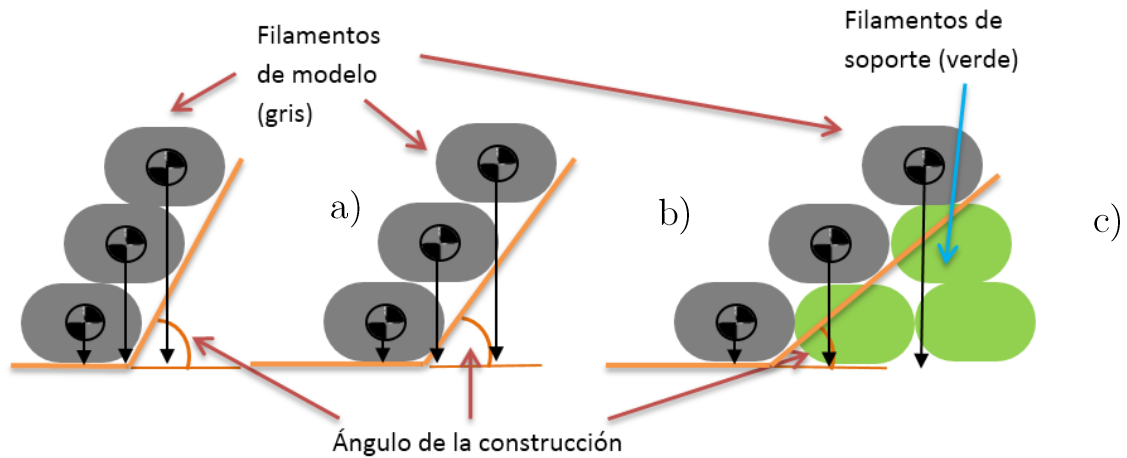


Figura 39. Esquema de la sección transversal de una deposición con diferentes ángulos en una construcción, manteniendo el ancho de filamento constante.

Por otra parte sí consideramos el segundo parámetro y se analizan deposiciones con diferentes anchos de filamento en un mismo ángulo de construcción como en la figura 40, se observa que anchos de filamento gruesos, tienen mayor sustentación que anchos de filamento finos.

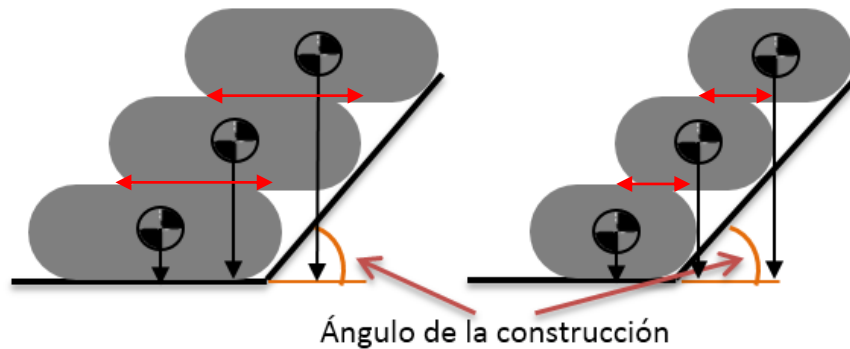


Figura 40. Esquema de la sección transversal de una deposición, manteniendo el mismo ángulo en la construcción con el ancho de filamento de contorno diferente.

Ya que los ángulos de la construcción quedan fijos una vez establecida la orientación de las pieza, el único parámetro que depende el ángulo de autosustentación es el ancho del filamento, para conocer el comportamiento de los ángulos de autosustentación, se calcularon los ángulos de autosustentación en función al ancho de filamento para cada boquilla, a partir de los cuales ya no es necesario depositar material de soporte, los resultados se presentan en la gráfica de la figura 41.

Ángulo de autosustentación en función del ancho de filamento para los materiales: ABS-M30, PC, PC-ABS,PC-ISO,ABS-ESD7 y ASA.

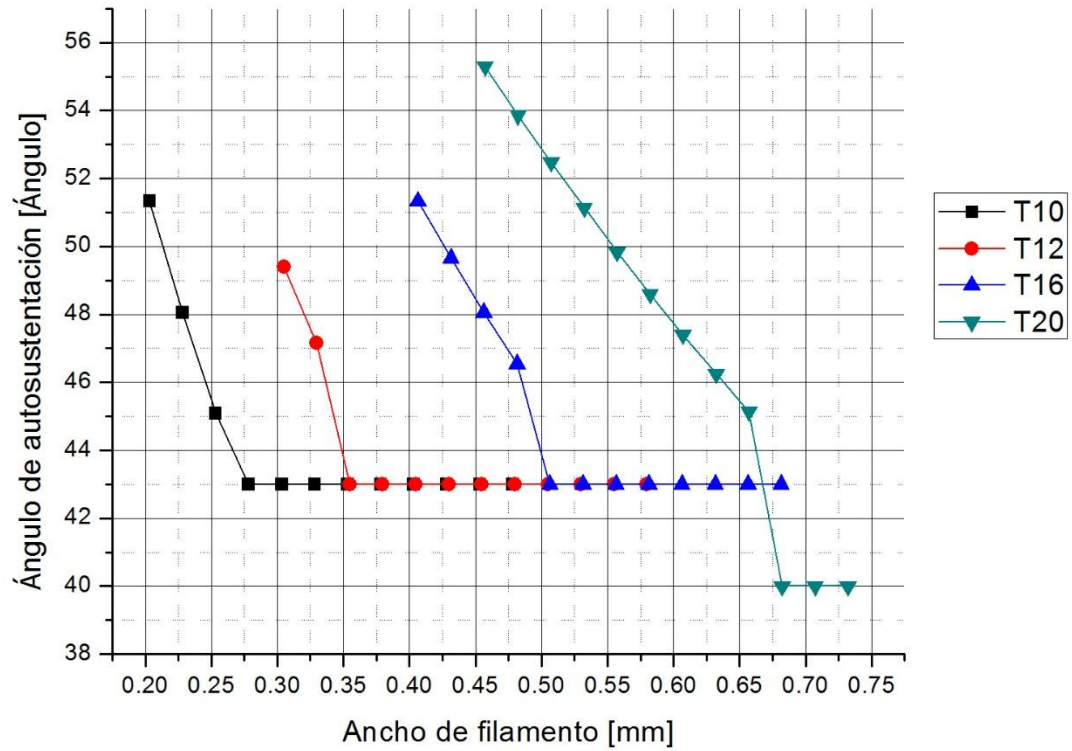


Figura 41. Ángulos de auto sustentación en función del ancho de filamento.

Sin embargo no todos los materiales presentan el mismo comportamiento, el ABSi y el Nylon 12, difieren en sus ángulos de auto-sustentación, sus valores se muestran la gráfica de la figura 42.

Ángulo de autosustentación en función del ancho de filamento para los materiales: ABSi y Nylon 12.

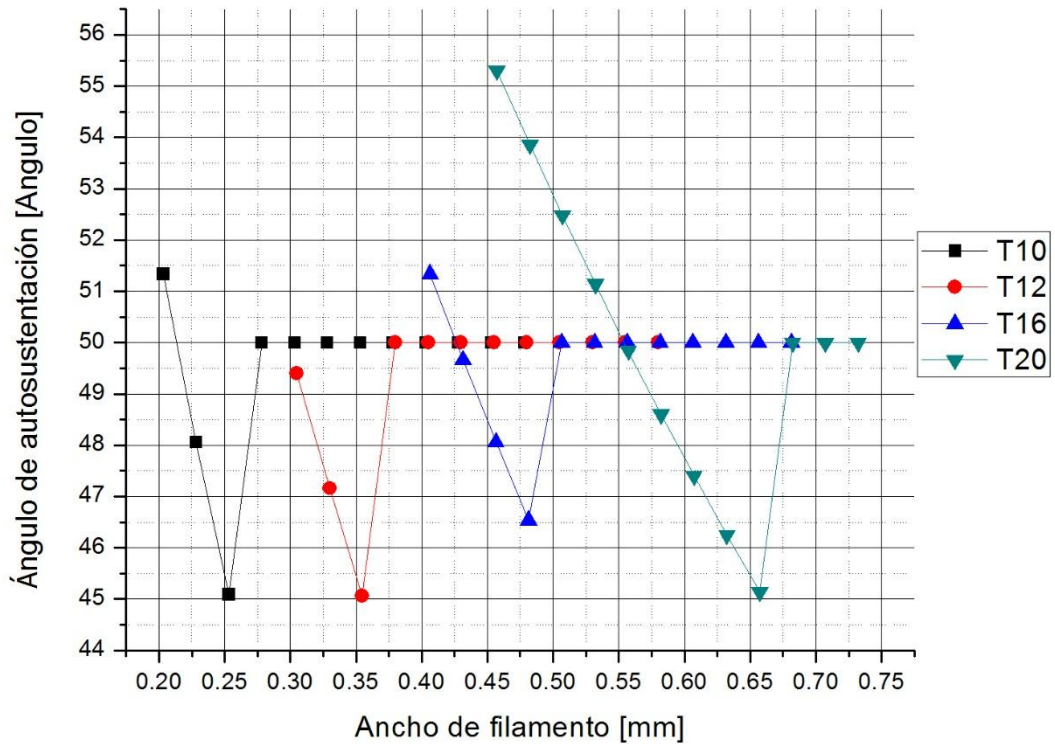


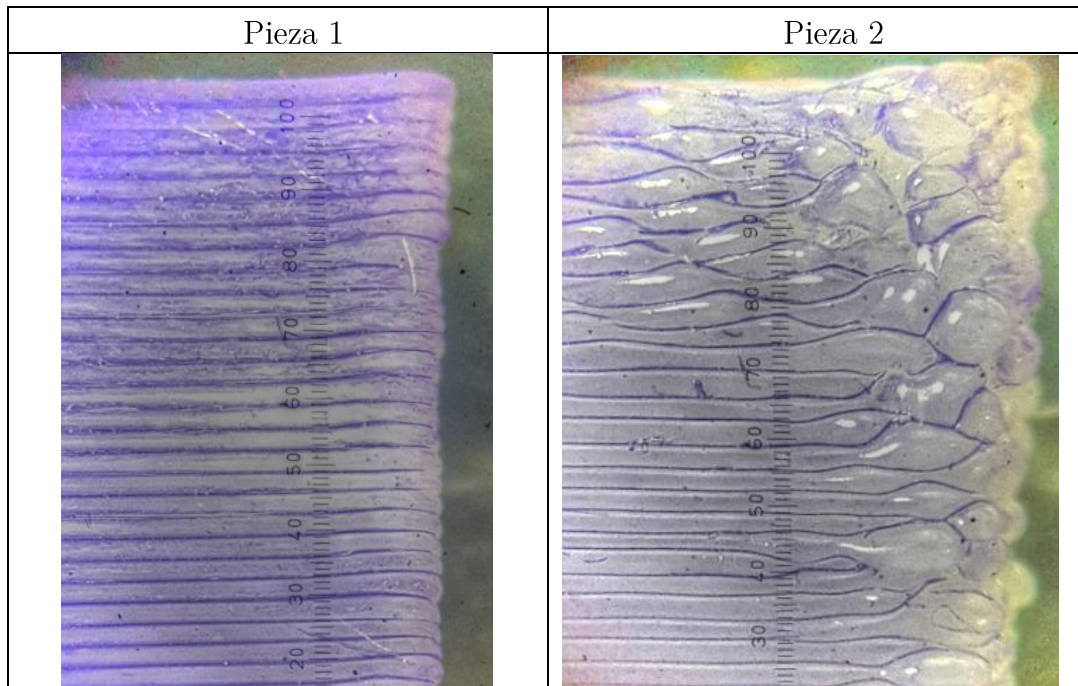
Figura 42. Ángulos de auto sustentación en función del ancho de filamento

Como se observa en las gráficas de las figura 41 y 42, para los anchos de filamento menores de cada boquilla es necesario depositar material de soporte, generalmente para ángulos menores a 43 grados, y 50 grados para el caso del ABSi y el Nylon 12.

Sin embargo el ángulo de autosustentación es consecuencia del ancho de filamento seleccionado después de seleccionar la boquilla, el material y la orientación, por lo que depositar material de soporte dependerá del material, la boquilla y el ángulo de construcción.

5.5 Acabado superficial en función del ancho de filamento.

Para determinar cómo influye el ancho de filamento de contorno en el acabado superficial se realizaron 2 construcciones, en la primera se utilizó el ancho de filamento más fino y en la segunda construcción se utilizó el ancho de filamento más grueso, los resultados se muestran en la tabla 9.



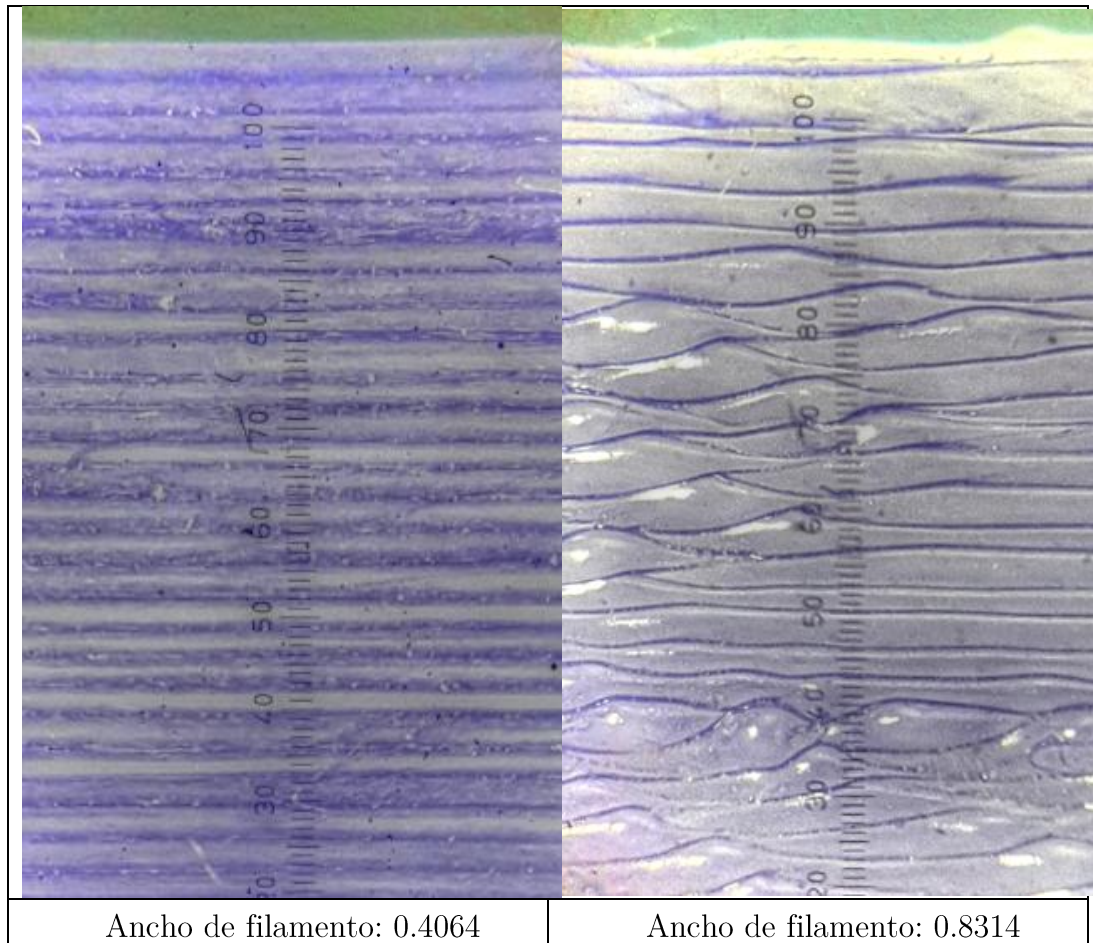


Tabla 9. Comparativa de acabados entre filamentos gruesos y finos.

Se observa que en anchos de filamento gruesos los filamentos presentan alta concentración térmica lo que genera distorsión geométrica, mientras que los filamentos delgados se depositan de manera uniforme y con pocos escurrimientos.

6 Análisis de resultados:

Considerando las relaciones que existen entre los parámetros de manufactura y agrupando las pruebas y resultados del capítulo 5, se busca emitir un proceso genérico en la selección los parámetros de manufactura.

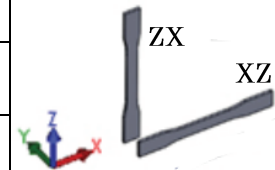
Para iniciar el proceso de selección de parámetros de manufactura, el primer parámetro que se define es el material de construcción, lo que se debe considerar es lo siguiente:

- Propiedades mecánicas del material.
- Compatibilidad con el material de soporte.

Para las propiedades mecánicas del material el fabricante proporciona hojas de datos que contienen la información del material, se anexan las pruebas mecánicas y propiedades obtenidas directamente del fabricante en el anexo A; como ejemplo se muestran las propiedades mecánicas del material ABS-M30 en la tabla 10.

Propiedades Mecánicas	Norma/Método	Eje X-Z	Eje Z-X
Esfuerzo de fluencia.	ASTM D638	31 MPa	26 MPa
Esfuerzo Último a la tracción.	ASTM D638	32 MPa	26 MPa
Módulo de Young.	ASTM D638	2230 MPa	2180 MPa
Deformación a la ruptura.	ASTM D638	7 %	2 %
Deformación al punto de fluencia.	ASTM 790	2 %	1 %
Resistencia a la Flexión.	ASTM 790	60 MPa	48 MPa
Módulo de flexión.	ASTM 790	2060 MPa	1760 MPa
Falla a la Flexión.	ASTM 790	4%	3.5%

Tabla 10. Propiedades mecánicas del material ABS-M30 [38].



Una de las características que ofrecen la tecnología aditivas como es el caso FDM es la libertad de forma, sin embargo, ésta tiene ciertas limitaciones, una de ellas se encuentra en la interacción entre el tipo de material de modelo y

soporte [37], en la tecnología FDM existen dos tipos de material de soporte, el soluble y el desprendible; la diferencia de entre estos se encuentra en la posibilidad de remover el material de soporte sin dañar la pieza cuando no se puede acceder manualmente a estructuras internas o espacios reducidos de la pieza, por lo que la compatibilidad del material de soporte con la geometría es otro parámetro que tiene que ser considerado en la elección del material de modelo. En la tabla 11 se muestran los tipos de material de soporte habilitados para los diferentes materiales de modelo.

Material Modelo	Boquillas	Soporte
ABSi	T10, T12, T16, T20	Soluble
ABS-M30 ABS-M30i	T10, T12, T16, T20	Soluble
ABS-ESD7	T12, T16	Soluble
PC	T12, T16, T20	Desprendible/Soluble
PC-ABS	T10, T12, T16, T20	Soluble
PC-ISO	T12, T16, T20	Desprendible
Ultem 9085	T12, T16	Desprendible
PPSF	T12, T16	Desprendible

Tabla 11. Materiales de soporte desprendibles y solubles.

Una tercera consideración en la selección del material se presenta cuando el diseño incluye algún inserto en el proceso de construcción, ya que para colocar un inserto en el proceso de construcción de la pieza, las condiciones que debe de soportar el inserto están relacionadas con la temperatura de extrusión y con la temperatura del horno [24], las temperaturas de horno y material se presentan en la tabla 12.

Material Modelo	Temperatura Máxima de Extrusión	Temperatura Máxima de Horno.
ABSi	330° C	85° C
ABS-M30 ABS-M30i	320° C	95° C
ABS-ESD7	320° C	95° C
ASA	330° C	100° C
Nylon 12	355° C	120° C
PC -ABS	330° C	110° C
PC PC-ISO	365° C	145° C
Ultem 9085	400° C	190° C
Ultem 1010	410° C	225° C
PPSF	415° C	225° C

Tabla 12. Temperaturas de horno y extrusión [22].

Una vez seleccionado el material se avanza a la selección de la orientación de la pieza, para la orientación de la pieza, el software propone 5 criterios de orientación descritos en la sección 4.2.

Una vez seleccionada la orientación, se llega a la elección de la boquilla y el ancho de filamento, para esta selección se reúnen las pruebas del capítulo 5 para tener los elementos suficientes que le ayuden a selección estos dos parámetros.

Con los resultados obtenidos en el capítulo 5 se realizaron graficas con el objetivo de tener una comparativa en la selección de las boquillas. Las gráficas combinan los siguientes elementos: Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumétrico. Una ventaja de presentar los resultados en función de las boquillas, radica en poder comparar diferentes materiales.

Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material ABS-M30

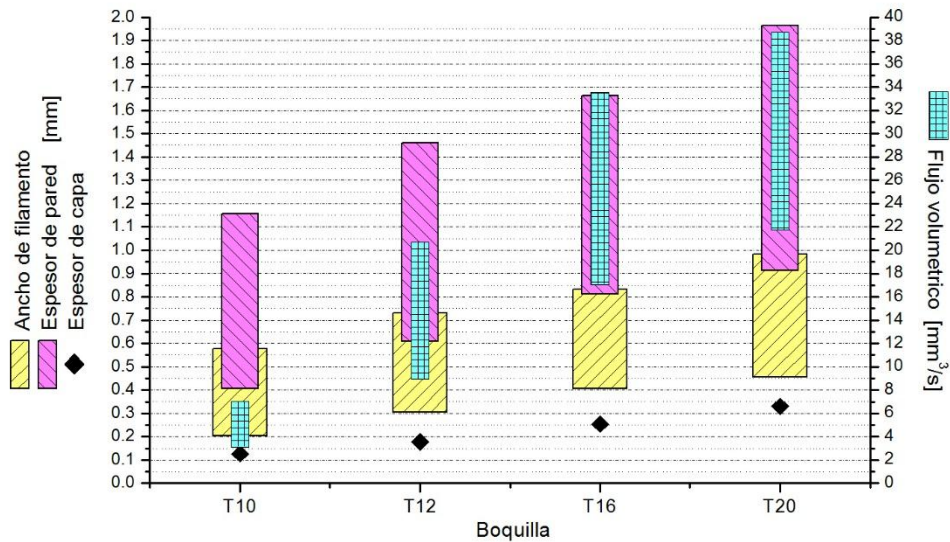


Figura 43. Grafica para el material ABS-M30.

Cuando la precisión dimensional se considera una prioridad en la construcción, las dos características más importantes a cuidar en los detalles de baja dimensión son: el llenado correcto de espesores delgados y esquinas.

En la gráfica de la figura 44, se agrupan diferentes parámetros de construcción que dependen de la boquilla seleccionada, en este caso el material en cuestión es el ABS-M30. Con base en las geometrías mínimas de la pieza, se selecciona la boquilla basándose en la gráfica que relaciona el ancho del ancho de filamento, el ancho de capa y el espesor mínimo de llenado que puede depositar sobre la plataforma de construcción.

Además de la comparativa de los anchos de filamento y el espesor mínimo que pueden depositar las boquillas se observa el rango del flujo volumétrico perteneciente a cada una de las boquillas.

Para complementar la selección de la boquilla, se utilizan graficas del Apéndice B donde se encuentra el área faltante de llenado en esquinas, dependiendo del ángulo y el ancho de filamento.

Por otra parte, las curvas del flujo volumétrico en función del ancho de filamento se presentan en el Apéndice B, y sirven como información adicional en la elección de boquilla; sin embargo es importante mencionar, que el flujo volumétrico depende del ancho de filamento seleccionado.

La selección de la orientación, la boquilla y el ancho de filamento, en combinación con la geometría, determinarán si es necesario depositar material de soporte; en el apartado 5.3 se muestra la tabla que contiene los ángulos de auto-sustentación para cada boquilla y para complementar esta información en la sección 5.2 se muestran el tiempo de cambio entre boquillas. Sin embargo, el ángulo de auto-sustentación no debe representar una condición en el diseño de la pieza, es información complementaria en el proceso de selección de parámetros de manufactura.

Conclusiones

En este trabajo se realiza una revisión de los conceptos relacionados con la manufactura aditiva, se da una descripción de las clasificaciones de los procesos de manufactura aditiva definidos por la ASTM. Se explica de manera detallada la tecnología FDM y su funcionamiento. Además se describen brevemente todos los parámetros de manufactura que intervienen en las construcciones de la tecnología FDM.

Se expone la interacción de los parámetros de manufactura en el procesamiento de piezas a construir con la tecnología FDM. Se propone un esquema que indica las interacciones de los parámetros de manufactura que tienen efecto en los aspectos geométricos dimensionales y en el tiempo de construcción. Así mismo se generó información acerca del área mínima de llenado y capacidades de deposición en esquinas que la tecnología FDM puede construir.

Se realizaron pruebas que relacionan el ancho de filamento con el flujo volumétrico, encontrando que hay una relación lineal entre el flujo volumétrico e intervalos específicos de ancho de filamento, para las diferentes combinaciones de boquilla - material; sin embargo el flujo volumétrico es consecuencia del ancho de filamento elegido que está en función de las características geométricas mínimas de la pieza. Para conocer el impacto del ancho de filamento en el acabado superficial se realizaron construcciones que muestran que las piezas construidas con anchos de filamento gruesos generar alta concentración térmica por lo que se producen escurrimientos y acabados superficiales defectuosos.

Depositar material de soporte incrementa el tiempo de la construcción, esto se debe a la deposición del volumen de material de soporte en conjunto con el tiempo de cambio entre boquillas. Los análisis realizados acerca del tiempo de acondicionamiento entre boquillas y el ángulo de autosustentación muestran información de interés cuando el tiempo de construcción tiene relevancia en la construcción de la pieza.

En la parte final de este trabajo se propone una secuencia para la elección de los parámetros de manufactura, que aunque genérica, muestra las consideraciones y recomendaciones para construir piezas utilizando la tecnología de manufactura aditiva: FDM.

Referencias

- [1] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, New Jersey, U.S.A: Prentice Hall Inc., 2002.
- [2] «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,» ASTM International, United States, 2012.
- [3] T. Wohlers, *Wohlers Report 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*, United States: WOHLERS ASSOCIATES, 2014.
- [4] A. Bagsik, V. Schoppner y E. Klemp, «FDM Part Quality Manufactured with ULTEM 9085,» *Polymeric Materials*, p. Paderborn , 2010.
- [5] Stratasys, *Technical application guide: FDM for robotic end of arm tooling*, USA, 2015.
- [6] C. Cozmei y F. Caloian, «Additive manufacturing flickering at the beginning of existence,» *ELSEVIER*, n° 462, pp. 458-460, 2012.
- [7] «Additive manufacturing: opportunities and constrains.,» *Royal Academic of Engineering*, n° 293074, p. 12, 2013.
- [8] I. Gibson, D. W. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, New York: Springer, 2010.
- [9] «http://www.eos.info/industries_markets/aerospace/interior,» [En línea]. [Último acceso: 2015 02 13].
- [10] «<http://fabrisonic.com/applications/>,» [En línea]. [Último acceso: 2015 02 02].
- [11] A. Ortega Rodriguez , «Investigacion de las capacidades de la tecnologia de manufactura aditiva FDM.,» UNAM, Mexico, 2014.
- [12] «<http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/production-series/connex3-systems>,» [En línea]. [Último acceso: 2015 04 24].

- [13] M. Gurr y M. R, Rapid Prototyping. Polymer Science: A Comprehensive Reference, Amsterdam: Isevier 77-99, 2012.
- [14] ARBURG, «ARBURG: Products and services, the AKF Process,» Mayo 2013. [En línea]. Available: <https://www.arburg.com/es/mx/productos-y-servicios/fabricacion-aditiva/proceso-akf/>. [Último acceso: 04 08 2015].
- [15] M. Mahesh, Y. Wong y J. Fuh, «A benchmark study on rapid prototyping porcesses and machines.,» *Rapid Prototyping Journal*, pp. 7-10, 2007.
- [16] L. Novakova-Marcincinova, J. Novak-Marcincin, J. Barna y J. Torok, «Special Materials Used in FDM Rapid Prototyping Technology Application,» de *International Conference on Intelligent Engineering Systems*, Lisbon, Portugal, 2012.
- [17] I. Kuric y L. Novakova-Marcincinova, «Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling,» *Manufacturing and Industrial Engineering*, pp. 25-27, 2012.
- [18] R. F. Landel y L. E. Nielsen, «Mechanical properties of polymers and composites.,» *CRC Press*, pp. 49-50, 1993.
- [19] J. F. Rodriguez James, P. Thomas Jonh y R. E., «Mechanical behavior of fused deposition materials. Experimental Investigation.,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 7, nº 3, pp. 148-158, 2001.
- [20] A. Bellini, S. Guceri y M. Bertoldi, «Liquefier dynamics in fused deposition.,» *Journal of Manufacturing* , vol. ASME, pp. 237-246, 2004.
- [21] M. Shojin, «Fused deposition modeling (FDM) fabricated part behavior under tensile stress, thermal cycling, and fluid presure.,» Texas, United States, 2014.
- [22] Stratasys, «Fortus 900mc user guide,» Eden Praire, USA, 2014.
- [23] S. Inc., «FDM for End-Use Parts: Tips and Techniques for Optimization,» Doc. No. TAG 30-01, 2011.
- [24] Stratasys, FDM Design handbook, Segunda Edicion., 2012.
- [25] K. Thrimuthulu , M. Pulak y N. Venkata Reddy, «Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling,» ELSEVIER, Kanpur, India., 2003.

- [26] C. James W., P. William R. y T. Patrick W., «FDM TECHNOLOGY PROCESS IMPROVEMENTS,» *Stratasys. Inc.* .
- [27] W. J. Swanson, K. C. Johnson, T. A. Hjelsand y S. Batchelder, «LIQUEFIER ASSEMBLY FOR USE IN EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS». USA Patente US20120070523, 22 03 2012.
- [28] P. J. Leavitt, «EXTRUSION HEAD FOR USE IN EXTRUSION-BASED LAYERED DEPOSITION MODELING». USA Patente US7625200, 1 12 2009.
- [29] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur y P. Gu, «Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties,» *Journal of manufacturing Process*, Vol 14. No2., 2002.
- [30] F. Gorski, K. Wieslaw y W. Radoslaw , «Influence of parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using FDM Technology,» *Advances in Science and Technology Reseach Journal*, vol. 7, nº 19, pp. 27-35, 2013.
- [31] D. Ahn., K. Jin-Hwe y K. Soonman, «Representation of surface roughness in fused deposition modeling.,» *Journal of Mateirals Processing Technology*, vol. Elsevier, nº 209, pp. 5593-5600, 2009.
- [32] R. Anitha, S. Arunachalam y P. Radhakrisham, «Critical Parameters Inluencing the Quality o Prototypes in Fused Deposition Modeling,» *Journal of Material Processing Technology*, vol. 118, pp. 385-388, 2001.
- [33] A. Boschetto y G. V., «Modelling micro geometrical profiles in FDM process,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 61, nº 9-12, pp. 954-956, 2012.
- [34] Y. Zhang y Y. K. Chou, «3D FEA simulations of FDM process.,» *ASME International-Conference on Manufacturing sicience and engineering*, vol. MI, nº MSEC2006-21132, p. Ypsilanti, 2006.
- [35] Stratasys., «Fortus 400 Spec Sheet.,» 2014.

- [36] F. Gorski, K. Wleslaw y W. Radoslaw, «Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using FDM Technology,» *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 7, nº 19, pp. 27-35, 2013.
- [37] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur y M. Brandt, «Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures,» ELSEVIER, Italia, 2014.
- [38] Stratasys, «<http://www.stratasys.com>,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>. [Último acceso: 09 09 2015].
- [39] O. Skyler, K. Scott y P. P.E., *Anisotropic Finite Element Modeling of the Fused Deposition Modeling Process.*, Colorado, 2010.

APÉNDICE A



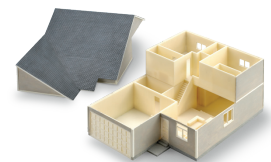
ABS-M30

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

ABS-M30™ is up to 25 to 70 percent stronger than standard ABS and is an ideal material for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools and end-use-parts. ABS-M30 has greater tensile, impact and flexural strength than standard ABS. Layer bonding is significantly stronger than that of standard ABS, for a more durable part. This results in more realistic functional tests and higher quality parts for end use. ABS-M30 parts are stronger, smoother and have better feature detail. ABS-M30 runs the Xtend 500 Fortus Plus option, which enables more than 400 hours of unattended build time.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH	
		XZ AXIS	ZX AXIS
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.4 ft-lb/n	128 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m



THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
ASTM D648	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (Tg)	DMA (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90x10 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.82x10 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.70x10 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.46x10 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

STRATASYS.COM



ABS-M30

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology™

Fortus systems are based on Stratasys® FDM® (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses productiongrade thermoplastics, enabling the most durable parts. Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals,

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

ELECTRICAL PROPERTIES ³	TEST METHOD	ORIENTATION	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	XZ Axis	4.0x10 ¹⁵ - 3.3x10 ¹⁶ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	XZ Axis	2.6 - 2.86
Dissipation Factor	ASTM D150-98	XZ Axis	0.0048 - 0.0054
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	100 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	360 V/mil

OTHER ¹	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.09", 2.50 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5
UL File Number	-----	E345258

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus® 360mc™	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Supports	<input type="checkbox"/> Ivory <input type="checkbox"/> White
Fortus 380mc™	0.010 inch (0.254 mm)		<input checked="" type="checkbox"/> Black <input checked="" type="checkbox"/> Dark Grey
Fortus 400mc™	0.007 inch (0.178 mm)		<input checked="" type="checkbox"/> Red <input checked="" type="checkbox"/> Blue
Fortus 450mc™	0.005 inch (0.127 mm) ⁴		
Fortus 900mc™			

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹Literature value unless otherwise noted.

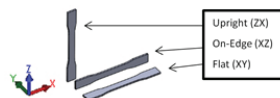
²Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

³All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

⁴0.005 inch (0.127 mm) layer thickness not available for Fortus 900mc.

Colors: The test data was collected using ABS-M30 Ivory (natural) specimens. ABS-M30 colored material will have similar properties, but can vary by up to 10%. Orientation: See Stratasys Testing white paper for more detailed description of build orientations.

- XZ = X or "on edge"
- XY = Y or "flat"
- ZX = or "upright"



E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)



ABSi

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

Fortus® 3D Production Systems give engineers the ability to manufacture real industrial thermoplastic parts direct from digital files. ABSi™ is an ideal material for conceptual modeling, functional prototyping and direct digital manufacturing. Its strength is superior to standard ABS, and the translucent nature of ABSi is beneficial for monitoring material flow and light transmission, most commonly used for medical and automotive applications. When combined with a Fortus 3D Production System, ABSi gives you parts that are visually unique, dimensionally accurate, durable and hold their shape over time.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,400 psi	37 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	277,700 psi	1,920 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4.4%	4.4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,980 psi	62 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	278,000 psi	1,920 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.8 ft-lb/in	96.4 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	3.6 ft-lb/in	191.1 J/m

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	188°F	86°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	163°F	73°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	240°F	116°C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D696	6.7x10-06 in/in/°F	12.1x10-05 mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³

ELECTRICAL PROPERTIES ⁴	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	1.5x10 ⁹ - 6.1x10 ¹⁰ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3.4 - 3.6
Dissipation Factor	ASTM D150-98	0.12 - 0.15
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	100 - 320 V/mil



STRATASYS.COM



ABSi

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology

Fortus systems are based on Stratasys® FDM® (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

OTHER ²	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.08
Rockwell Hardness	ASTM D785	R108
Flame Classification	UL 94	HB (0.059", 1.5 mm)

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 400mc™	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Supports	<input type="checkbox"/> Translucent Natural
Fortus 900mc™	0.010 inch (0.254 mm)		<input type="checkbox"/> Translucent Amber
	0.007 inch (0.178 mm)		<input type="checkbox"/> Translucent Red
	0.005 inch (0.127 mm)		

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹Build orientation is on side long edge.

²Literature value unless otherwise noted.

³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

⁴All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.



HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM

ISO 9001:2008 Certified

© 2013, 2015 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 200mc, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 380mc, Fortus 400mc, Fortus 450mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABSi, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. *ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. MSS_FDM_ABSi_A4_0815



PC-ISO

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

PC-ISO (polycarbonate-ISO), an industrial thermoplastic, which in its raw state, is biocompatible (ISO 10993 USP Class VI)* and can be gamma or EtO sterilized. PC-ISO is commonly used in food and drug packaging and medical device manufacturing because of the material's strength and medical compatibility. When combined with a Fortus® 3D Production system, PC-ISO gives you Real Parts™ that can be used for conceptual modeling, functional prototyping, and end-use parts.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	8,300 psi	57 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	289,800 psi	2,000 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4%	4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	13,100 psi	90 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	310,400 psi	2,100 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.6 ft-lb/in	86 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1 ft-lb/in	53 J/m

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	271°F	133°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	260°F	127°C
Glass Transition (Tg)	DMA (SSYS)	322°F	161°C
Vicat Softening	ISO 306	282°F	139°C
Melt Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³

ELECTRICAL PROPERTIES ⁴	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	1.5x10e14 - 8.0x10e13 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3.0 - 2.8
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0009 - .0005
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	370 - 70 V/mil



STRATASYS.COM



PC-ISO

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology™

Fortus systems are based on patented Stratasys FDM (Fused Deposition Modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization, and high impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals, or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders or resins to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

OTHER ²	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.2
Flame Classification	UL 94	HB

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 400mc	0.013 inch (0.330 mm)	BASS	<input type="checkbox"/> White
Fortus 900mc	0.010 inch (0.254 mm)		<input type="checkbox"/> Translucent
	0.007 inch (0.178 mm)		Natural

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

**It is the responsibility of the finished device manufacturer to determine the suitability of all the component parts and materials used in their finished products.*

¹Build orientation is on side long edge.

²Literature value unless otherwise noted.

³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

⁴All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

stratasys®

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

©2013, 2015 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 200mc, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. *ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA.MSS_FDM_PCISO_EN_0815

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)



ABS-ESD7

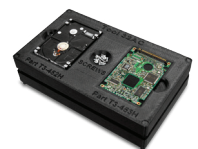
PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

ABS-ESD7™ (acrylonitrile butadiene styrene-electrostatic dissipative) is an ABS thermoplastic with static dissipative properties for applications where a static charge can damage products, impair their performance or cause an explosion. ABS-ESD7 prevents a buildup of static electricity, so it will not produce a static shock or cause other materials like powders, dust and fine particles to stick to it. Ideal for electronic products with circuit boards and for the transportation and industrial equipment industries. Most widely used to create jigs and fixtures for the assembly of electronic components, but it is also useful for building functional prototypes of fuel storage and delivery products, as well as cases, enclosures and packaging.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,200 psi	36 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	350,000 psi	2,400 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	3%	3%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,800 psi	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	350,000 psi	2,400 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	0.5 ft-lb/in	28 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.1 ft-lb/in	55 J/m

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (T _g)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.9 ⁵ in/in/°F	8.82 ⁵ mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.7 ⁵ in/in/°F	8.46 ⁵ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³

ELECTRICAL PROPERTIES ⁴	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	3.0x10 ⁹ - 4.0x10 ¹⁰ ohm-cm
Surface Resistance	ASTM D257	10 ⁹ - 10 ⁹ ohms



STRATASYS.COM



ABS-ESD7

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology™

Fortus systems are based on FDM® (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

OTHER ²	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Flame Classification	UL94	HB (0.06", 1.5 mm)
Rockwell Hardness	ASTM D785	109.5

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus® 380mc™	0.010 inch (0.254 mm)	Soluble Supports	■ Black
Fortus 400mc™	0.007 inch (0.178 mm)		
Fortus 450mc™			
Fortus 900mc™			

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹Build orientation is on side long edge.

²Literature value unless otherwise noted.

³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

⁴All electrical property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.



E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)

PC-ABS

Production-Grade Thermoplastic
for Fortus 3D Production Systems



PC-ABS (polycarbonate-ABS) is one of the most widely used industrial thermoplastics. PC-ABS offers the most desirable properties of both materials — the superior strength and heat resistance of PC and the flexibility of ABS. PC-ABS blends are commonly used in automotive, electronics and telecommunications applications. PC-ABS parts are ideal for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools and end-use-parts.

Mechanical Properties	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,250 psi	4,000 psi	29 MPa	28 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,000 psi	4,300 psi	34 MPa	30 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	260,000 psi	250,000 psi	1,810 MPa	1,720 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5%	2%	5%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%	2%	2%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,500 psi	6,000 psi	59 MPa	41 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	250,000 psi	225,000 psi	1,740 MPa	1,550 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3%	4%	3%

Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ Axis	XZ Axis
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	4 ft-lb/in	235 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	12 ft-lb/in	642 J/m

Thermal Properties	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	230°F	110°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	205°F	96°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	234°F	112°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	257°F	125°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.10 ⁻⁰⁵ in/in/°F	7.38 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

PC-ABS



At the core: Advanced FDM Technology

Fortus systems are based on patented Stratasys® FDM® (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

Electrical Properties ³	Test Method	Orientation	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	XZ Axis	3.7E15 - 1.8E16 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	XZ Axis	2.78 - 2.83
Dissipation Factor	ASTM D150-98	XZ Axis	0.0048 - 0.0054
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	130 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09 Method A	ZX Axis	320 V/mil

Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.10
Density	ASTM D792	0.0397 lb/in ³
Flame Classification	UL94	HB
Rockwell Hardness	ASTM D785	R110
UL File Number	-----	E345258

System Availability	Layer Thickness Capability	Support Structure	Available Colors
Fortus 360mc™	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Supports	■ Black
Fortus 400mc™	0.010 inch (0.254 mm)		
Fortus 900mc™	0.007 inch (0.178 mm) 0.005 inch (0.127 mm) ⁴		

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use or warranty against patent infringement.

¹Literature value unless otherwise noted.

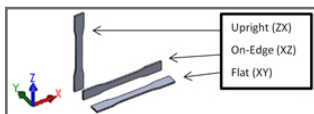
²Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

³All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

⁴0.005 inch (0.127 mm) layer thickness not available for Fortus 900mc

Orientation: See Stratasys Testing white paper for more detailed description of build orientations.

- XZ = X or "on edge"
- XY = Y or "flat"
- ZX = or "upright"



Stratasys | www.stratasys.com | info@stratasys.com

7665 Commerce Way
Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St.
Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)

©2014, 2013 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 200mc, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 380mc, Fortus 400mc, Fortus 450mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. *ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. FortusPCABSMaterialSpecSheet-US-09-14



ASA

A UV-STABLE, PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS® 3D PRODUCTION SYSTEMS

Now you can build consistently high-quality parts, with exceptional UV stability and the best aesthetics of any FDM® thermoplastic. ASA is poised to become the most popular all-purpose prototyping material for users of Fortus 360mc™, 380mc™, 400mc™, 450mc™ and 900mc™ 3D Production Systems. Matching or exceeding the mechanical properties of ABS, ASA may be your new favorite general prototyping material. Its UV-resistance makes it especially suited in end-use parts for outdoor commercial and infrastructure use. And its wide selection of colors and matte finish makes it ideal for attractive prototypes in consumer sporting goods, tools and automotive components and accessories.

MECHANICAL PROPERTIES

TEST METHOD	STANDARD	ENGLISH		METRIC	
		XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION	XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,200 psi	3,850 psi	29 MPa	27 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,750 psi	4,300 psi	33 MPa	30 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	290,000 psi	280,000 psi	2,010 MPa	1,950 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9%	3%	9%	3%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%	2%	2%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	6,900 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	270,000 psi	240,000 psi	1,870 MPa	1,630 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No Break	4%	No Break	4%

THERMAL PROPERTIES²

TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	208°F	98°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	196°F	91°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	217°F	103°C
Glass Transition Temperature (Tg)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	4.90E-06 in/in/°F	8.79E-06 mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	4.60E-06 in/in/°F	8.28E-06 mm/mm/°C

ELECTRICAL PROPERTIES

TEST METHOD	ORIENTATION	VALUE RANGE
Volume Resistivity	XZ	1.0E14 - 1.0E15 ohm-cm
Dielectric Constant	XZ	2.97 - 3.04
Dissipation Factor	XZ	0.009
Dielectric Strength	XZ	329 V/mil
Dielectric Strength	ZX	414 V/mil



STRATASYS.COM



ASA

A UV-STABLE, PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS® 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM technology

Fortus systems are based on patented Stratasys FDM technology. FDM uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts. Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

MECHANICAL PROPERTIES

TEST METHOD	STANDARD	ENGLISH	METRIC
Notched Impact, XZ orientation (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.2 ft-lb/in	64 J/m
Unnotched Impact, XZ orientation (Method A, 23°C)	ASTM D256	6 ft-lb/in	321 J/m

OTHER	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.05
Flame Classification	UL94	HB
Rockwell Hardness	ASTM D785	82
UL File Number	-----	345258

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS ²
Fortus 360mc	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Support	 Black Dark Blue
Fortus 380mc	0.010 inch (0.254 mm)		 Dark Gray Green
Fortus 400mc	0.007 inch (0.178 mm)		 Light Gray Yellow
Fortus 450mc	0.005 inch (0.127 mm)		 White Orange
Fortus 900mc ³			 Ivory Red

Tests were conducted according to published Stratasys FDM material testing methods, in compliance with the relevant ASTM standards.

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc at 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹ Literature value unless otherwise noted.

² The test data was collected using ASA (Natural) specimens. ASA colored material will have similar properties, but can vary by up to 10%.

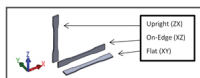
³ Fortus 900mc does not have the 0.005 inch (0.127 mm) layer thickness capability.

Orientation: See Stratasys Testing white paper for more detailed description of build orientations.

XZ = X or "on edge"

XY = Y or "flat"

ZX = or "upright"



stratasys

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

©2015 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 200mc, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 380mc, Fortus 400mc, Fortus 450mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. MSS_FDM_ASA_EN_0815

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)



PPSF

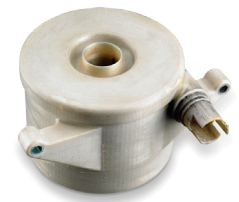
PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

PPSF/PPSU (polyphenylsulfone) material has the greatest heat and chemical resistance of all Fortus materials - ideal for aerospace, automotive and medical applications. PPSF parts manufactured on Fortus® 3D Production Systems are not only mechanically superior, but also dimensionally accurate, to better predict end-product performance. Users can also sterilize PPSF via steam autoclave, EtO sterilization, plasma sterilization, chemical sterilization and radiation*. PPSF gives you the ability to manufacture Real Parts™ direct from digital files that are ideal for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools, and end-use-parts.

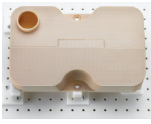
MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	8,000 psi	55 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	300,000 psi	2,100 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	3%	3%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	15,900 psi	110 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	320,000 psi	2,200 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.1 ft-lb/in	58.7 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	3.1 ft-lb/in	165.5 J/m

Thermal Properties ³	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	372°F	189°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	446°F	230°C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D696	3.1 E -05 in/in/°F	5.5 E -05 mm/mm/°C
Melt Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

ELECTRICAL PROPERTIES ⁴	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	1.5x10e14 - 5.0 x 10e13 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3.2 - 3.0
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0015 - .0011
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	290 - 80 V/mil



STRATASYS.COM



PPSF

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology™

Fortus systems are based on patented Stratasys FDM (Fused Deposition Modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization, and high impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals, or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders or resins to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

ENVIRONMENTAL RESISTANCE ⁵	24 HOURS @ 23°C (73°F)	24 HOURS @ 100°C (212°F)
Antifreeze (Prestone), 50%	Passed	Passed
Gasoline-Unleaded	Passed	Not tested
Motor Oil 10W-40	Passed	Passed
Power Steering Fluid	Passed	Passed
Transmission Fluid	Passed	Passed
Windshield Washer Fluid, 50%	Passed	Not tested

OTHER ³	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.28
Flame Classification	UL 94	V-0
Rockwell Hardness	ASTM D785	M86
UL File Number	-----	E345258

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 400mc	0.013 inch (0.330 mm)	BASS	■ Tan
Fortus 900mc	0.010 inch (0.254 mm) ⁶		

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

^{*}Stratasys has not done any sterilization testing on PPSF.

¹Build orientation is on side long edge.

²Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

³Literature value unless otherwise noted.

⁴All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

⁵Test results based on Stress Crack Resistance (24-hour immersion @ 23°C and @ 100°C).

⁶0.013 inch (0.330 mm) layer thickness not available on Fortus 900mc.



E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)



FDM Nylon 12

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

FDM Nylon 12™ is the first material in Stratasys' new family of nylon offerings, complementing the current portfolio of FDM® materials and enabling new applications requiring: repetitive snap fits, high fatigue resistance, strong chemical resistance and press (friction) fit inserts. Nylon 12 is primarily used in aerospace, automotive and consumer goods industries to take on everything from tooling, jigs and fixtures to covers, panels and vibration resistant components. For use with Fortus 360mc™, 380mc™, 400mc™, 450mc™ and 900mc™ 3D Production Systems, FDM Nylon 12 offers unparalleled toughness and a simple, clean process – free of powders.

CONDITIONED*					
MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,600 psi	4,100 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6,650 psi	5,600 psi	46 MPa	38.5 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	186,000 psi	165,000 psi	1,282 MPa	1,138 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	30%	5.4%	30%	5.4%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2.4%	2.7%	2.4%	2.7%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	9,700 psi	8,800 psi	67 MPa	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	185,000 psi	171,000 psi	1,276 MPa	1,180 MPa
Flexural Strain at Break	ASTM D790	No Break	>10%	No Break	>10%
IZOD impact - notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.5 ft-lb/in	1 ft-lb/in	135 J/m	53 J/m
IZOD impact - unnotched (Method A, 23°C)	ASTM D256	31 ft-lb/in	3.7 ft-lb/in	1,656 J/m	200 J/m
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	7,400 psi	7,900 psi	51 MPa	55 MPa
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	24,200 psi	800 psi	167 MPa	6 MPa
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	730,000 psi	155,000 psi	5,033 MPa	1,069 MPa

UNCONDITIONED (DRY)**					
MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7,700 psi	6,900 psi	53 MPa	48 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	190,000 psi	180,000 psi	1,310 MPa	1,241 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9.5%	5%	9.5%	5%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6.5%	5%	6.5%	5%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	10,000 psi	8,600 psi	69 MPa	60 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	190,000 psi	180,000 psi	1,300 MPa	1,250 MPa
Flexural Strain at Break	ASTM D790	No Break	>10%	No Break	>10%
IZOD impact - notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.8 ft-lb/in	0.9 ft-lb/in	150 J/m	50 J/m
IZOD impact - unnotched (Method A, 23°C)	ASTM D256	>37.4 ft-lb/in	5.1 ft-lb/in	>2,000 J/m	275 J/m

STRATASYS.COM



FDM Nylon 12

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology

Fortus 3D Production Systems are powered by FDM (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts. Fortus® systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

THERMAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi annealed	ASTM D648	207°F	97°C
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi unannealed	ASTM D649	167°F	75°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi annealed	ASTM D650	180°F	82°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi unannealed	ASTM D651	131°F	55°C
Melting Point	-----	352°F	178°C

OTHER	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.00
Flame Classification	UL94	HB
UL File Number	-----	E345258



SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT MATERIAL	COLOR
Fortus 360mc	0.013 inch (0.330 mm)	SR-110	■ Black
Fortus 380mc	0.010 inch (0.254 mm)		
Fortus 400mc	0.007 inch (0.178 mm)		
Fortus 450mc			
Fortus 900mc			

¹Conditioned = 20°C and 50% RH for 72 hours
²Unconditioned (Dry) = Direct from FDM system
— Annealed = 2 hours @ 140°C
— Unannealed = direct from FDM system

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

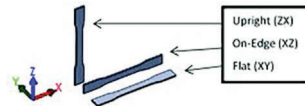
¹Literature value unless otherwise noted.

Orientation: See Stratasys Testing white paper for more detailed description of build orientations.

XZ = X or "on edge"

XY = Y or "flat"

ZX = or "upright"



E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)



PC (polycarbonate)

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

A true industrial thermoplastic, PC (polycarbonate) is widely used in automotive, aerospace, medical and many other applications. PC offers accuracy, durability and stability, creating strong parts that withstand functional testing. A PC part manufactured on a Fortus® 3D Production System is 5 to 60 percent stronger than a part made on previous FDM® systems. It also has superior mechanical properties to ABS and a number of other thermoplastics. When combined with a Fortus 3D Production System, PC gives you strong parts for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools, and end-use parts. PC runs the Xtend 500 Fortus Plus option, which enables more than 400 hours of unattended build time.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,800 psi	4,300 psi	40 MPa	30 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	8,300 psi	6,100 psi	57 MPa	42 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	282,000 psi	284,000 psi	1,944 MPa	1,958 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4.8%	2.5%	4.8%	2.5%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2.2%	2%	2.2%	2%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	13,000 psi	9,900 psi	89 MPa	68 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	291,000 psi	261,000 psi	2,006 MPa	1,800 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No break	4%	No break	4%
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.4 ft-lb/in	0.5 ft-lb/in	73 J/m	28 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	16.4 ft-lb/in	3.5 ft-lb/in	877 J/m	187 J/m
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	10,000 psi	9,200 psi	69 MPa	64 MPa
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	28,000 psi	9,400 psi	193 MPa	65 MPa
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	1,100,000 psi	227,000 psi	7,564 MPa	1,565 MPa

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	280°F	138°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	261°F	127°C
Vicat Softening	ASTM D1525	282°F	139°C
Glass Transition (Tg)	DMA (SSYS)	322°F	161°C
Melting Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³



STRATASYS.COM



PC (polycarbonate)

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology

Fortus systems are based on FDM (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

ELECTRICAL PROPERTIES ⁴	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	6.0x10 ¹³ - 2.0x10 ¹⁴ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.8 - 3.0
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0005 - .0006
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	80 - 360 V/mil

OTHER ²	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.2
Flame Classification	UL94	HB
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	3.8x10 ⁻⁵ in/in/°F
Rockwell Hardness	ASTM D785	R115
UL File Number	-----	E345258

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 360mc™	0.013 inch (0.330 mm)	Breakaway,	<input type="checkbox"/> White
Fortus 380mc™ Fortus 400mc™	0.010 inch (0.254 mm)	Soluble	
Fortus 450mc™	0.007 inch (0.178 mm)		
Fortus 900mc™	0.005 inch (0.127 mm) ⁵		

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

¹Build orientation is on side long edge.

²Literature value unless otherwise noted.

³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

⁴All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

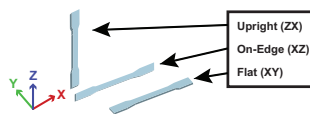
⁵PC can attain 0.005 inch (0.127mm) layer thickness when used with SR-100 soluble support. 0.005 inch layer thickness is not available on the Fortus 900mc.

Orientation: See Stratasys Testing white paper for more detailed description of build orientations.

XZ = X or "on edge"

XY = Y or "flat"

ZX = or "upright"



HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344
+1 888 480-3548 (US Toll Free)
+1 952 937-3000 (Intl)
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745-4000
+972 74 745-5000 (Fax)

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM
ISO 9001:2008 Certified

©2015 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 450mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, ABSi and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. *ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. MSS_FDM_PC_EN_0815



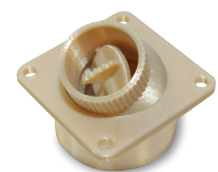
ULTEM™ 9085

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

ULTEM™ 9085 resin is a flame-retardant high-performance thermoplastic for digital manufacturing and rapid prototyping. It is ideal for the transportation industry due to its high strength-to-weight ratio and its FST (flame, smoke and toxicity) rating. This unique material's certifications make it an excellent choice for the commercial transportation industry – especially aerospace, marine and ground vehicles. Combined with a Fortus® 3D Production System, ULTEM 9085 resin allows design and manufacturing engineers to produce fully functional parts that are ideal for advanced functional prototypes or end use without the cost or lead time of traditional tooling.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION	XZ ORIENTATION	ZX ORIENTATION
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6,800 psi	4,800 psi	47 MPa	33 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9,950 psi	6,100 psi	69 MPa	42 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	312,000 psi	329,000 psi	2,150 MPa	2,270 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5.8%	2.2%	5.8%	2.2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2.2%	1.7%	2.2%	1.7%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	16,200 psi	9,900 psi	112 MPa	68 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	331,000 psi	297,000 psi	2,300 MPa	2,050 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No break	3.7%	No break	3.7%
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.2 ft-lb/in	0.9 ft-lb/in	120 J/m	48 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	14.6 ft-lb/in	3.2 ft-lb/in	781 J/m	172 J/m
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	14,500 psi	12,700 psi	100 MPa	87 MPa
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	26,200 psi	13,100 psi	181 MPa	90 MPa
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	1,030,000 psi	251,000 psi	7,012 MPa	1,731 MPa

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	307°F	153°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC (SSYS)	367°F	186°C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	3.67x10 ⁻⁶ in/(in·°F)	65.27 μm/(m·°C)
Melting Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³



STRATASYS.COM



ULTEM™ 9085

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

At the core:

Advanced FDM Technology

Fortus systems are based on FDM® (fused deposition modeling) technology. FDM is the industry's leading additive manufacturing technology, and the only one that uses production-grade thermoplastics, enabling the most durable parts.

Fortus systems use a wide range of thermoplastics with advanced mechanical properties so your parts can endure high heat, caustic chemicals, sterilization and high-impact applications.

No special facilities needed

You can install a Fortus 3D Production System just about anywhere. No special venting is required because Fortus systems don't produce noxious fumes, chemicals or waste.

No special skills needed

Fortus 3D Production Systems are easy to operate and maintain compared to other additive fabrication systems because there are no messy powders to handle and contain. They're so simple, an operator can be trained to operate a Fortus system in less than 30 minutes.

Get your benchmark on the future of manufacturing

Fine details. Smooth surface finishes. Accuracy. Strength. The best way to see the advantages of a Fortus 3D Production System is to have your own part built on a Fortus system. Get your free part at: stratasys.com.

ELECTRICAL PROPERTIES	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	4.9 x10 ¹⁵ - 8.2x10 ¹⁵ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3 - 3.2
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0026 - .0027
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	110 - 290 V/mil

OTHER ²	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.34
Rockwell Hardness	ASTM D785	---
Flame Classification	UL94	V-0 (1.5 mm, 3 mm)
Oxygen Index	ASTM D2863	0.49
OSU Total Heat Release (2 min test, .060" thick)	FAR 25.853	16 kW min/m ²
UL File Number	-----	E345258
Outgassing		
Total Mass Loss (TML)	ASTM E595	0.41% (1.00% maximum)
Collected Volatile Condensable Material (CVCM)	ASTM E595	-0.1% (0.10% maximum)
Water Vapor Recovered (WVR)	ASTM E595	-0.37% (report)
Fungus Resistance (Method 508.6)	MIL-STD-810G	Passed
Burn Testing		
Horizontal Burn (15 sec)	14 CFR/FAR 25.853	Passed (0.060" thick)
Vertical Burn (60 sec)	14 CFR/FAR 25.853	Passed (0.060" thick)
Vertical Burn (12 sec)	14 CFR/FAR 25.853	Passed (0.060" thick)
45° Ignition	14 CFR/FAR 25.853	Passed (0.060" thick)
Heat Release	14 CFR/FAR 25.853	Passed (0.060" thick)
NBS Smoke Density (flaming)	ASTM F814/E662	Passed (0.060" thick)
NBS Smoke Density (non-flaming)	ASTM F814/E662	Passed (0.060" thick)



ULTEM™ 9085

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 400mc™ Fortus 450mc™ Fortus 900mc™	0.013 inch (0.330 mm) 0.010 inch (0.254 mm)	Breakaway	■ Tan (Natural) ■ Black

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratasys material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement.

The information presented in this document are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, color, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on Fortus 400mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

¹Build orientation is on side long edge.

²Literature value unless otherwise noted.

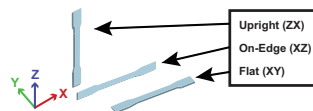
³Due to amorphous nature, material does not display a melting point.

⁴All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part density (solid). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (102 x 102 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation.

XZ = X or "on edge"

XY = Y or "flat"

ZX = or "upright"





ULTEM™ 9085

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR
FORTUS 3D PRODUCTION SYSTEMS

stratasys®

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM

ISO 9001:2008 Certified

HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344

+1 888 480-3548 (US Toll Free)

+1 952 937-3000 (Intl)

+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496

Rehovot 76124, Israel

+972 74 745-4000

+972 74 745-5000 (Fax)

©2015 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM, Fortus and Finishing Touch are registered trademarks of Stratasys Inc. FDM Technology, Fused Deposition Modeling, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 450mc, Fortus 900mc, Insight, Control Center, FDM Team, Smart Supports, SR-30, SR-100, ABSplus, ABS-ESD7, and TouchWorks are trademarks of Stratasys, Inc. ULTEM is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratasys assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratasys products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. MSS_FDM_ULTEM9085_EN_0815

APÉNDICE B

T10

Ancho de filamento [mm]	Distancia faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.2032	1.064	0.483	0.291	0.195	0.139	0.102	0.076	0.056	0.042
0.2282	1.195	0.543	0.327	0.220	0.156	0.114	0.085	0.063	0.047
0.2532	1.326	0.602	0.363	0.244	0.173	0.127	0.094	0.070	0.052
0.2782	1.457	0.662	0.398	0.268	0.190	0.139	0.103	0.077	0.058
0.3032	1.588	0.721	0.434	0.292	0.207	0.152	0.113	0.084	0.063
0.3282	1.719	0.781	0.470	0.316	0.224	0.164	0.122	0.091	0.068
0.3532	1.850	0.840	0.506	0.340	0.241	0.177	0.131	0.098	0.073
0.3782	1.981	0.900	0.542	0.364	0.258	0.189	0.141	0.105	0.078
0.4032	2.112	0.959	0.577	0.388	0.275	0.202	0.150	0.112	0.084
0.4282	2.242	1.019	0.613	0.412	0.293	0.214	0.159	0.119	0.089
0.4532	2.373	1.078	0.649	0.436	0.310	0.227	0.168	0.126	0.094
0.4782	2.504	1.138	0.685	0.460	0.327	0.239	0.178	0.133	0.099
0.5032	2.635	1.197	0.721	0.484	0.344	0.252	0.187	0.140	0.104
0.5282	2.766	1.257	0.756	0.508	0.361	0.264	0.196	0.147	0.109
0.5532	2.897	1.316	0.792	0.532	0.378	0.277	0.206	0.154	0.115
0.5782	3.028	1.376	0.828	0.556	0.395	0.289	0.215	0.161	0.120

T10

Ancho de filamento [mm]	Área faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm ²]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.2032	0.045	0.017	0.008	0.005	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
0.2282	0.056	0.021	0.011	0.006	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003
0.2532	0.069	0.026	0.013	0.008	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003
0.2782	0.084	0.031	0.016	0.009	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004
0.3032	0.099	0.037	0.019	0.011	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005
0.3282	0.116	0.043	0.022	0.013	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006
0.3532	0.135	0.050	0.025	0.015	0.010	0.008	0.007	0.007	0.007
0.3782	0.154	0.058	0.029	0.017	0.011	0.009	0.008	0.008	0.008
0.4032	0.176	0.065	0.033	0.019	0.013	0.010	0.009	0.009	0.009
0.4282	0.198	0.074	0.037	0.022	0.015	0.012	0.010	0.010	0.010
0.4532	0.222	0.083	0.041	0.024	0.016	0.013	0.012	0.011	0.011
0.4782	0.247	0.092	0.046	0.027	0.018	0.014	0.013	0.012	0.012
0.5032	0.273	0.102	0.051	0.030	0.020	0.016	0.014	0.014	0.014
0.5282	0.301	0.112	0.056	0.033	0.022	0.018	0.016	0.015	0.015
0.5532	0.330	0.123	0.062	0.036	0.025	0.019	0.017	0.016	0.016
0.5782	0.361	0.135	0.067	0.040	0.027	0.021	0.019	0.018	0.018

T12

Ancho de filamento [mm]	Distancia faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.3048	1.596	0.725	0.436	0.293	0.208	0.152	0.113	0.085	0.063
0.3298	1.727	0.785	0.472	0.317	0.225	0.165	0.123	0.092	0.068
0.3548	1.858	0.844	0.508	0.341	0.242	0.177	0.132	0.099	0.073
0.3798	1.989	0.904	0.544	0.365	0.259	0.190	0.141	0.106	0.079
0.4048	2.120	0.963	0.580	0.389	0.277	0.202	0.150	0.112	0.084
0.4298	2.251	1.023	0.615	0.413	0.294	0.215	0.160	0.119	0.089
0.4548	2.382	1.082	0.651	0.437	0.311	0.227	0.169	0.126	0.094
0.4798	2.513	1.142	0.687	0.462	0.328	0.240	0.178	0.133	0.099
0.5048	2.644	1.201	0.723	0.486	0.345	0.252	0.188	0.140	0.105
0.5298	2.774	1.261	0.759	0.510	0.362	0.265	0.197	0.147	0.110
0.5548	2.905	1.320	0.794	0.534	0.379	0.277	0.206	0.154	0.115
0.5798	3.036	1.380	0.830	0.558	0.396	0.290	0.216	0.161	0.120
0.6048	3.167	1.439	0.866	0.582	0.413	0.302	0.225	0.168	0.125
0.6298	3.298	1.499	0.902	0.606	0.430	0.315	0.234	0.175	0.130
0.6548	3.429	1.558	0.938	0.630	0.447	0.327	0.243	0.182	0.136
0.6798	3.560	1.618	0.973	0.654	0.464	0.340	0.253	0.189	0.141
0.7048	3.691	1.677	1.009	0.678	0.481	0.352	0.262	0.196	0.146
0.7298	3.822	1.736	1.045	0.702	0.499	0.365	0.271	0.203	0.151

T12

Ancho de filamento [mm]	Área faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm ²]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.3048	0.100	0.037	0.019	0.011	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005
0.3298	0.117	0.044	0.022	0.013	0.009	0.007	0.006	0.006	0.006
0.3548	0.136	0.051	0.025	0.015	0.010	0.008	0.007	0.007	0.007
0.3798	0.156	0.058	0.029	0.017	0.012	0.009	0.008	0.008	0.008
0.4048	0.177	0.066	0.033	0.019	0.013	0.010	0.009	0.009	0.009
0.4298	0.199	0.074	0.037	0.022	0.015	0.012	0.010	0.010	0.010
0.4548	0.223	0.083	0.042	0.024	0.017	0.013	0.012	0.011	0.011
0.4798	0.249	0.093	0.046	0.027	0.018	0.014	0.013	0.012	0.012
0.5048	0.275	0.103	0.051	0.030	0.020	0.016	0.014	0.014	0.014
0.5298	0.303	0.113	0.057	0.033	0.023	0.018	0.016	0.015	0.015
0.5548	0.332	0.124	0.062	0.036	0.025	0.019	0.017	0.017	0.017
0.5798	0.363	0.135	0.068	0.040	0.027	0.021	0.019	0.018	0.018
0.6048	0.395	0.147	0.074	0.043	0.029	0.023	0.020	0.020	0.020
0.6298	0.428	0.160	0.080	0.047	0.032	0.025	0.022	0.021	0.021
0.6548	0.463	0.173	0.087	0.051	0.034	0.027	0.024	0.023	0.023
0.6798	0.499	0.186	0.093	0.055	0.037	0.029	0.026	0.025	0.025
0.7048	0.536	0.200	0.100	0.059	0.040	0.031	0.028	0.027	0.027
0.7298	0.575	0.214	0.107	0.063	0.043	0.034	0.030	0.029	0.029

T16									
Ancho de filamento [mm]	Distancia faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm]								
T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.4064	2.128	0.967	0.582	0.391	0.278	0.203	0.151	0.113	0.084
0.4314	2.259	1.026	0.618	0.415	0.295	0.216	0.16	0.12	0.089
0.4564	2.39	1.086	0.653	0.439	0.312	0.228	0.17	0.127	0.095
0.4814	2.521	1.145	0.689	0.463	0.329	0.241	0.179	0.134	0.1
0.5064	2.652	1.205	0.725	0.487	0.346	0.253	0.188	0.141	0.105
0.5314	2.783	1.264	0.761	0.511	0.363	0.266	0.198	0.148	0.11
0.5564	2.914	1.324	0.797	0.535	0.38	0.278	0.207	0.155	0.115
0.5814	3.045	1.383	0.832	0.559	0.397	0.291	0.216	0.162	0.12
0.6064	3.176	1.443	0.868	0.583	0.414	0.303	0.225	0.168	0.126
0.6314	3.307	1.502	0.904	0.607	0.431	0.316	0.235	0.175	0.131
0.6564	3.437	1.562	0.94	0.631	0.448	0.328	0.244	0.182	0.136
0.6814	3.568	1.621	0.976	0.655	0.465	0.341	0.253	0.189	0.141
0.7064	3.699	1.681	1.011	0.679	0.483	0.353	0.263	0.196	0.146
0.7314	3.83	1.74	1.047	0.704	0.5	0.366	0.272	0.203	0.151
0.7564	3.961	1.8	1.083	0.728	0.517	0.378	0.281	0.21	0.157
0.7814	4.092	1.859	1.119	0.752	0.534	0.391	0.29	0.217	0.162
0.8064	4.223	1.919	1.155	0.776	0.551	0.403	0.3	0.224	0.167
0.8314	4.354	1.978	1.19	0.8	0.568	0.416	0.309	0.231	0.172

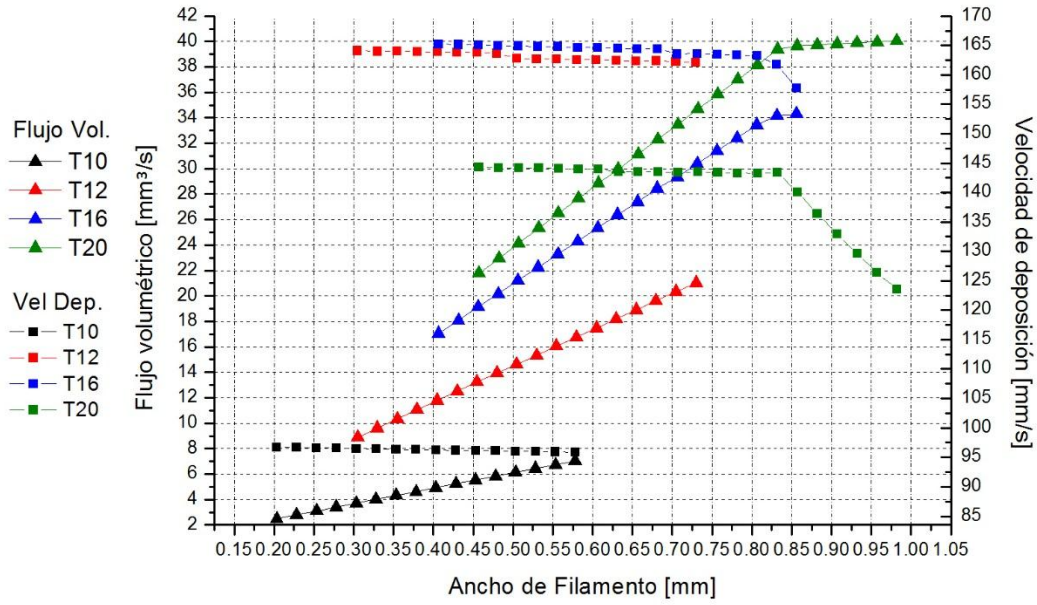
T16									
Ancho de filamento [mm]	Área faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm ²]								
T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.4064	0.178	0.066	0.033	0.02	0.013	0.01	0.009	0.009	0.009
0.4314	0.201	0.075	0.038	0.022	0.015	0.012	0.01	0.01	0.01
0.4564	0.225	0.084	0.042	0.025	0.017	0.013	0.012	0.011	0.011
0.4814	0.25	0.093	0.047	0.027	0.019	0.015	0.013	0.012	0.012
0.5064	0.277	0.103	0.052	0.03	0.021	0.016	0.014	0.014	0.014
0.5314	0.305	0.114	0.057	0.033	0.023	0.018	0.016	0.015	0.015
0.5564	0.334	0.125	0.062	0.037	0.025	0.019	0.017	0.017	0.017
0.5814	0.365	0.136	0.068	0.04	0.027	0.021	0.019	0.018	0.018
0.6064	0.397	0.148	0.074	0.044	0.029	0.023	0.021	0.02	0.02
0.6314	0.43	0.161	0.08	0.047	0.032	0.025	0.022	0.021	0.021
0.6564	0.465	0.173	0.087	0.051	0.035	0.027	0.024	0.023	0.023
0.6814	0.501	0.187	0.094	0.055	0.037	0.029	0.026	0.025	0.025
0.7064	0.539	0.201	0.101	0.059	0.04	0.031	0.028	0.027	0.027
0.7314	0.578	0.215	0.108	0.063	0.043	0.034	0.03	0.029	0.029
0.7564	0.618	0.23	0.115	0.068	0.046	0.036	0.032	0.031	0.031
0.7814	0.659	0.246	0.123	0.072	0.049	0.038	0.034	0.033	0.033
0.8064	0.702	0.262	0.131	0.077	0.052	0.041	0.036	0.035	0.035
0.8314	0.746	0.278	0.139	0.082	0.055	0.044	0.039	0.037	0.037

T20									
Ancho de filamento [mm]	Distancia faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.4572	2.394	1.088	0.655	0.440	0.312	0.229	0.170	0.127	0.095
0.4822	2.525	1.147	0.690	0.464	0.329	0.241	0.179	0.134	0.100
0.5072	2.656	1.207	0.726	0.488	0.346	0.254	0.189	0.141	0.105
0.5322	2.787	1.266	0.762	0.512	0.364	0.266	0.198	0.148	0.110
0.5572	2.918	1.326	0.798	0.536	0.381	0.279	0.207	0.155	0.115
0.5822	3.049	1.385	0.834	0.560	0.398	0.291	0.216	0.162	0.121
0.6072	3.180	1.445	0.869	0.584	0.415	0.304	0.226	0.169	0.126
0.6322	3.311	1.504	0.905	0.608	0.432	0.316	0.235	0.176	0.131
0.6572	3.442	1.564	0.941	0.632	0.449	0.329	0.244	0.183	0.136
0.6822	3.573	1.623	0.977	0.656	0.466	0.341	0.254	0.190	0.141
0.7072	3.704	1.683	1.013	0.680	0.483	0.354	0.263	0.197	0.146
0.7322	3.834	1.742	1.048	0.704	0.500	0.366	0.272	0.203	0.152
0.7572	3.965	1.802	1.084	0.728	0.517	0.379	0.281	0.210	0.157
0.7822	4.096	1.861	1.120	0.752	0.534	0.391	0.291	0.217	0.162
0.8072	4.227	1.921	1.156	0.776	0.551	0.404	0.300	0.224	0.167
0.8322	4.358	1.980	1.192	0.800	0.568	0.416	0.309	0.231	0.172
0.8572	4.489	2.040	1.227	0.825	0.586	0.429	0.319	0.238	0.178
0.8822	4.620	2.099	1.263	0.849	0.603	0.441	0.328	0.245	0.183
0.9072	4.751	2.159	1.299	0.873	0.620	0.454	0.337	0.252	0.188
0.9322	4.882	2.218	1.335	0.897	0.637	0.466	0.347	0.259	0.193
0.9572	5.013	2.278	1.371	0.921	0.654	0.479	0.356	0.266	0.198
0.9822	5.144	2.337	1.406	0.945	0.671	0.491	0.365	0.273	0.203

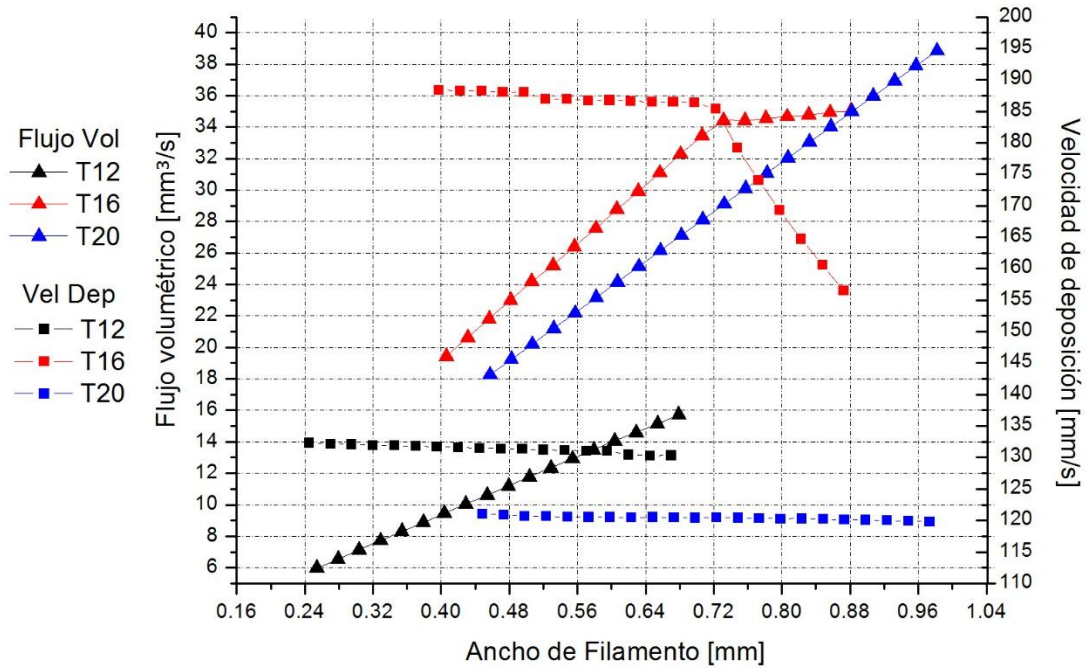
T20									
Ancho de filamento [mm]	Área faltante de llenado en esquinas dado un valor angular [mm]								
	T16	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.4572	0.226	0.084	0.042	0.025	0.017	0.013	0.012	0.011	0.011
0.4822	0.251	0.094	0.047	0.028	0.019	0.015	0.013	0.013	0.012
0.5072	0.278	0.104	0.052	0.030	0.021	0.016	0.014	0.014	0.014
0.5322	0.306	0.114	0.057	0.034	0.023	0.018	0.016	0.015	0.015
0.5572	0.335	0.125	0.063	0.037	0.025	0.020	0.017	0.017	0.017
0.5822	0.366	0.136	0.068	0.040	0.027	0.021	0.019	0.018	0.018
0.6072	0.398	0.148	0.074	0.044	0.030	0.023	0.021	0.020	0.020
0.6322	0.431	0.161	0.081	0.047	0.032	0.025	0.022	0.022	0.021
0.6572	0.466	0.174	0.087	0.051	0.035	0.027	0.024	0.023	0.023
0.6822	0.502	0.187	0.094	0.055	0.037	0.029	0.026	0.025	0.025
0.7072	0.540	0.201	0.101	0.059	0.040	0.031	0.028	0.027	0.027
0.7322	0.579	0.216	0.108	0.063	0.043	0.034	0.030	0.029	0.029
0.7572	0.619	0.231	0.116	0.068	0.046	0.036	0.032	0.031	0.031
0.7822	0.661	0.246	0.123	0.072	0.049	0.039	0.034	0.033	0.033
0.8072	0.703	0.262	0.131	0.077	0.052	0.041	0.036	0.035	0.035
0.8322	0.748	0.279	0.140	0.082	0.056	0.044	0.039	0.037	0.037
0.8572	0.793	0.296	0.148	0.087	0.059	0.046	0.041	0.040	0.039
0.8822	0.840	0.313	0.157	0.092	0.062	0.049	0.044	0.042	0.042
0.9072	0.889	0.331	0.166	0.097	0.066	0.052	0.046	0.044	0.044
0.9322	0.938	0.350	0.175	0.103	0.070	0.055	0.049	0.047	0.047
0.9572	0.989	0.369	0.185	0.108	0.073	0.058	0.051	0.049	0.049
0.9822	1.041	0.388	0.195	0.114	0.077	0.061	0.054	0.052	0.052

APÉNDICE C

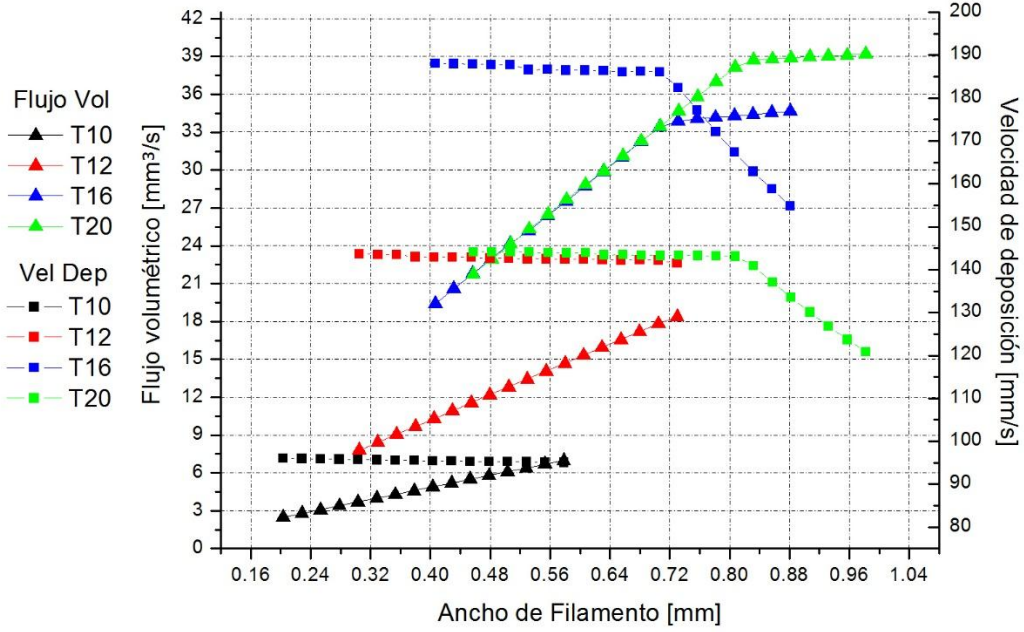
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el ASB-M30 y ABS-M30i



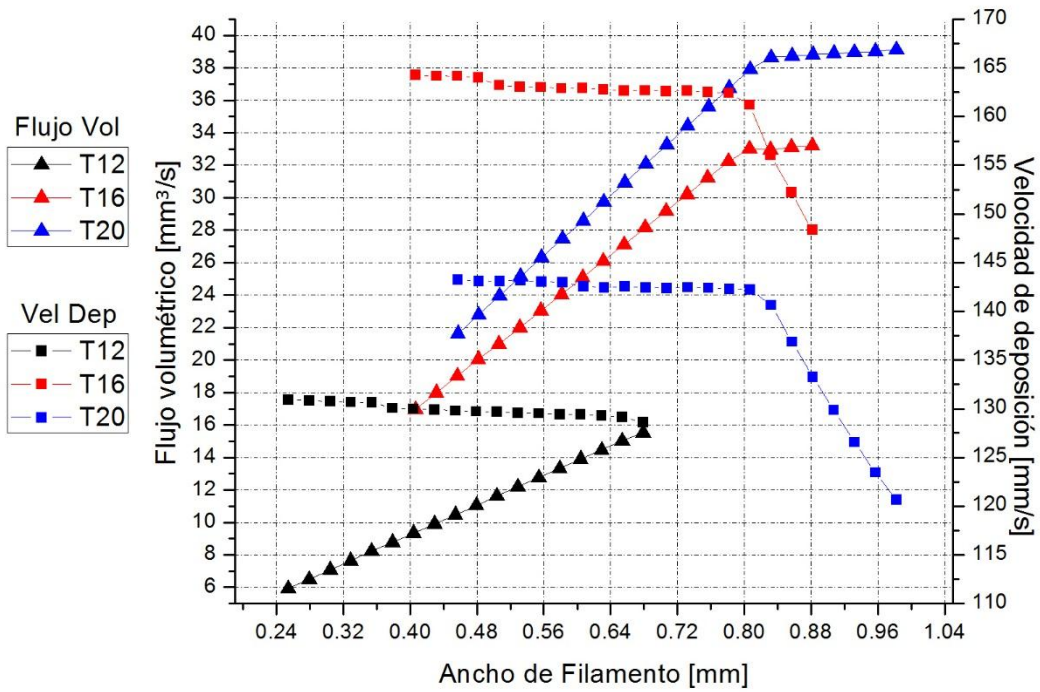
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el PC.



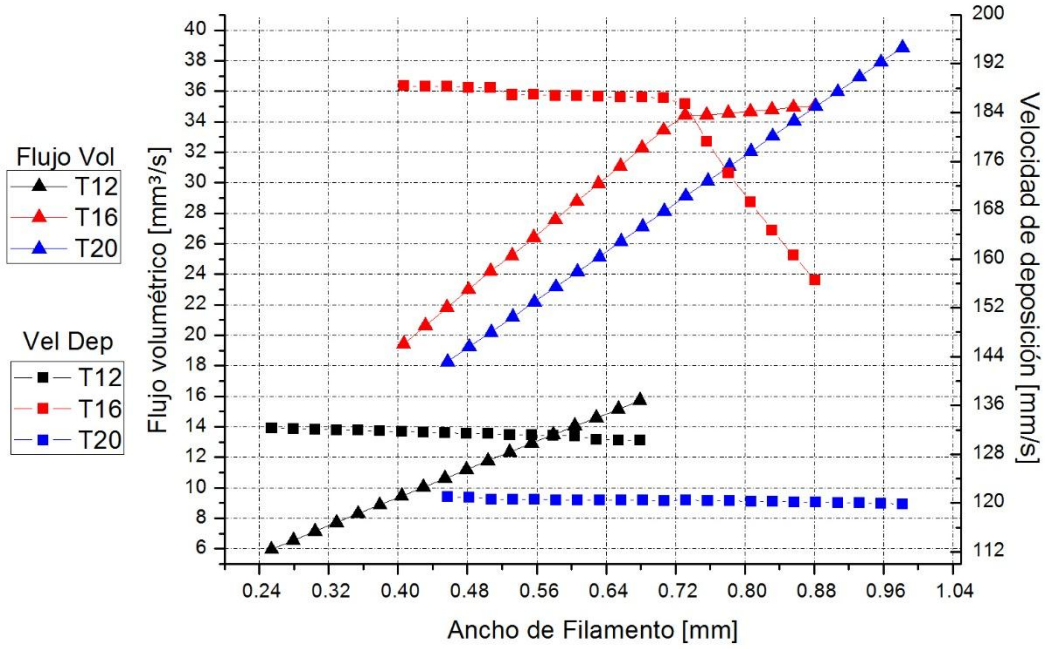
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el PC-ABS



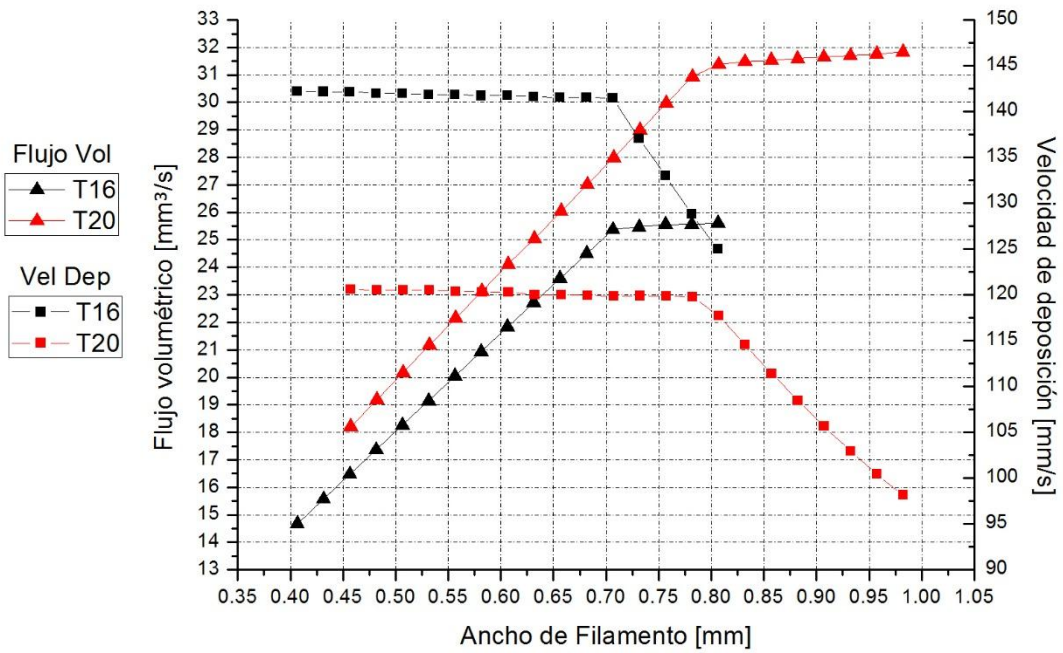
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el Nylon 12.



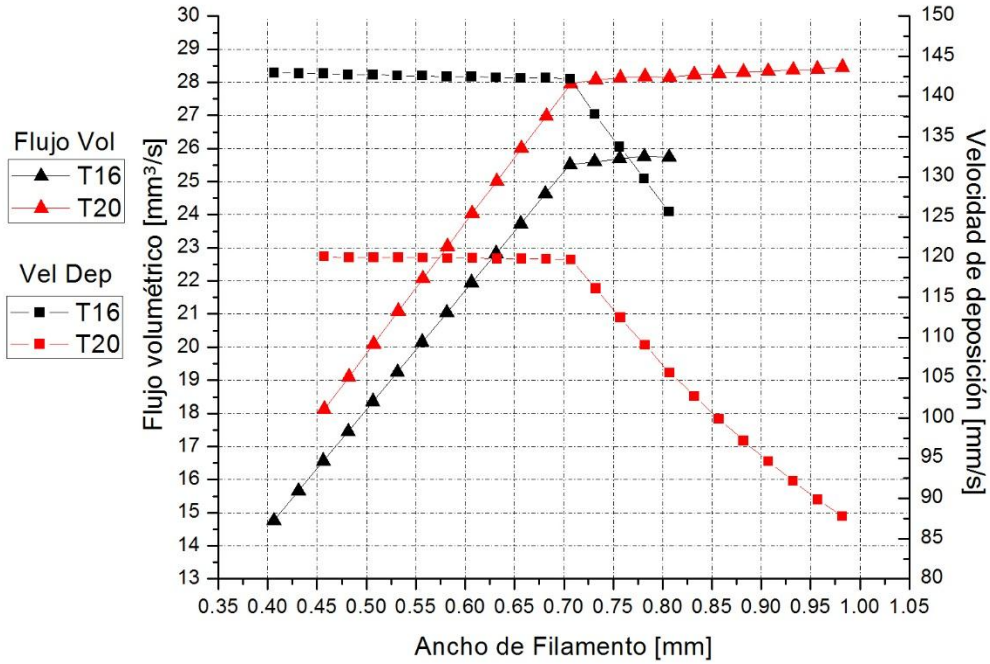
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el PC-ISO



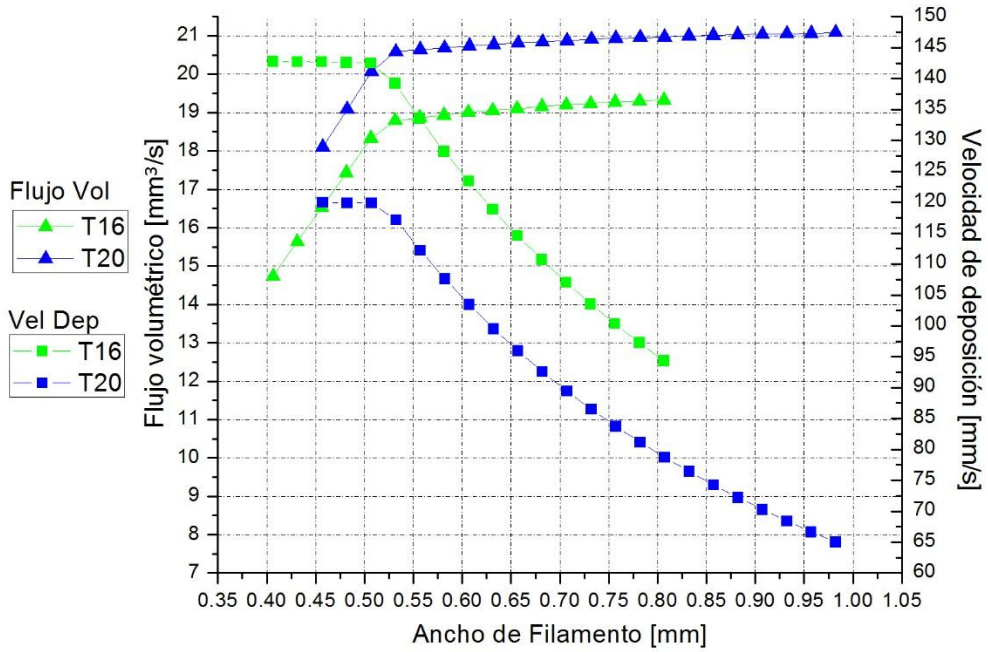
Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el PPSF.



Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el ULtem 9085.

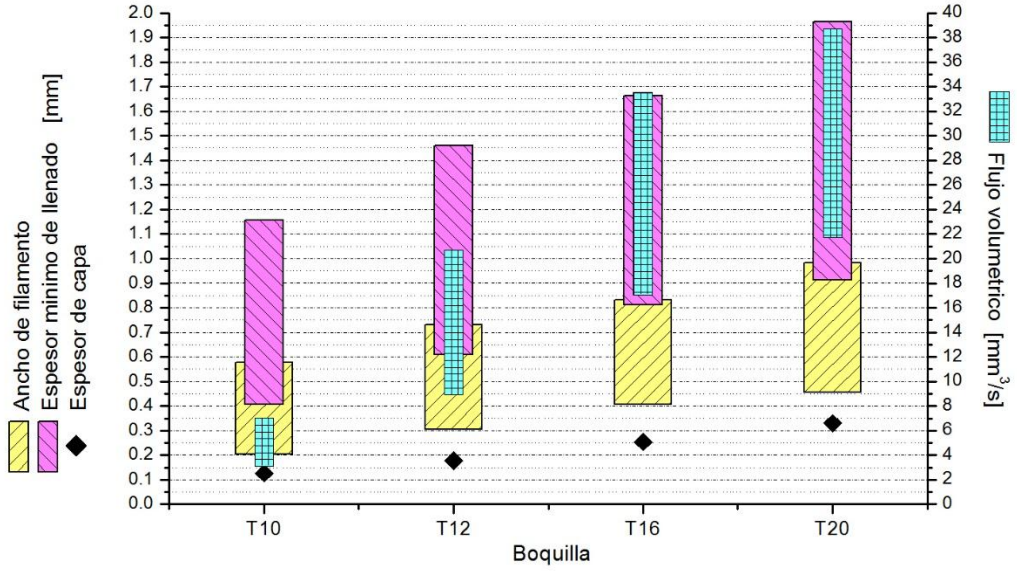


Flujo volumétrico y velocidad de deposición para el Ultem Black.

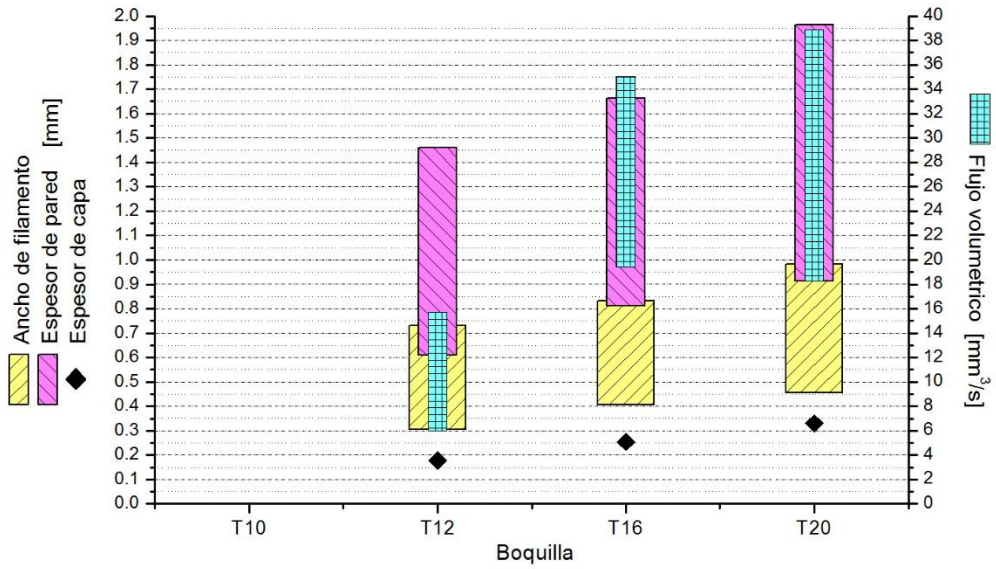


APÉNDICE D

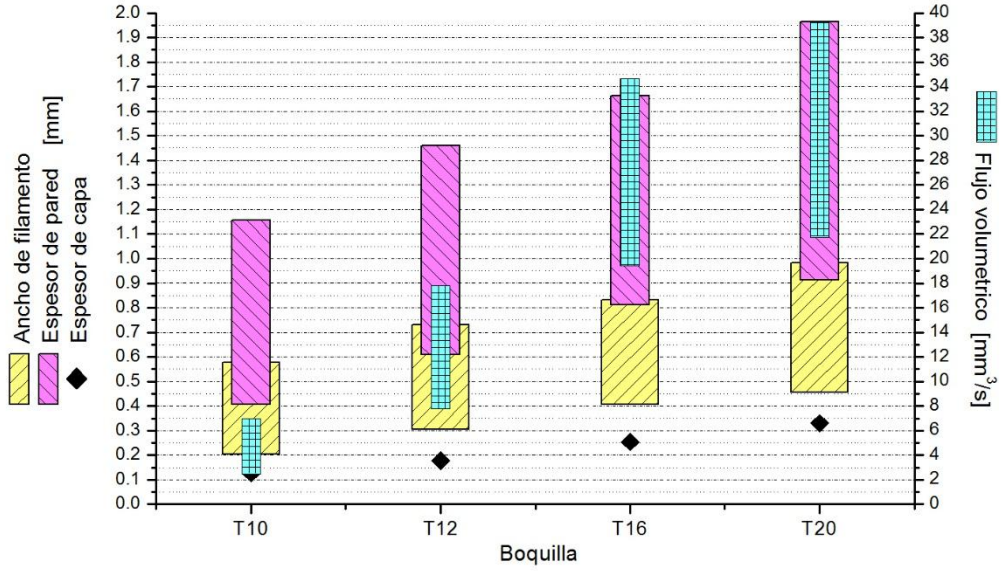
Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material ABS-M30



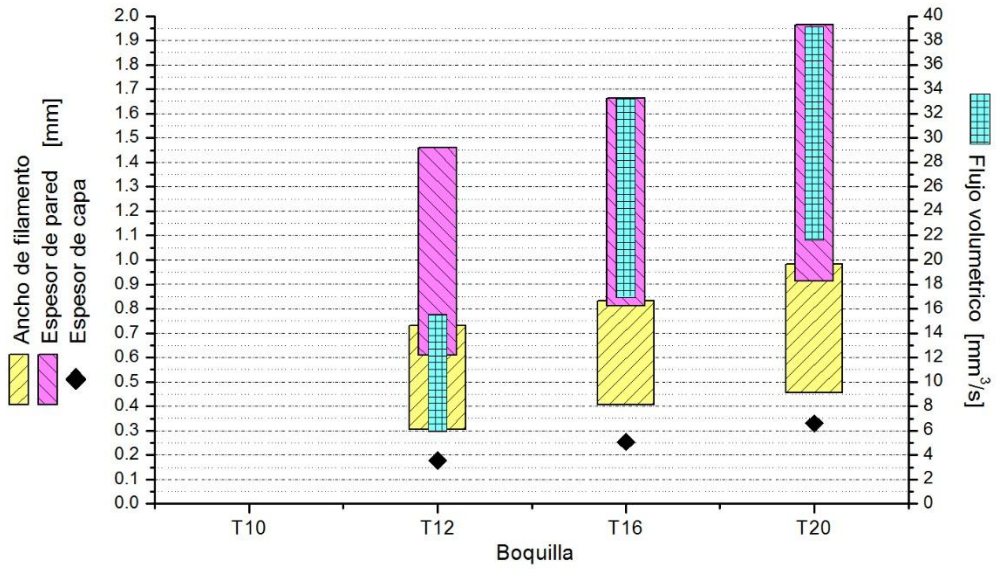
Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material PC



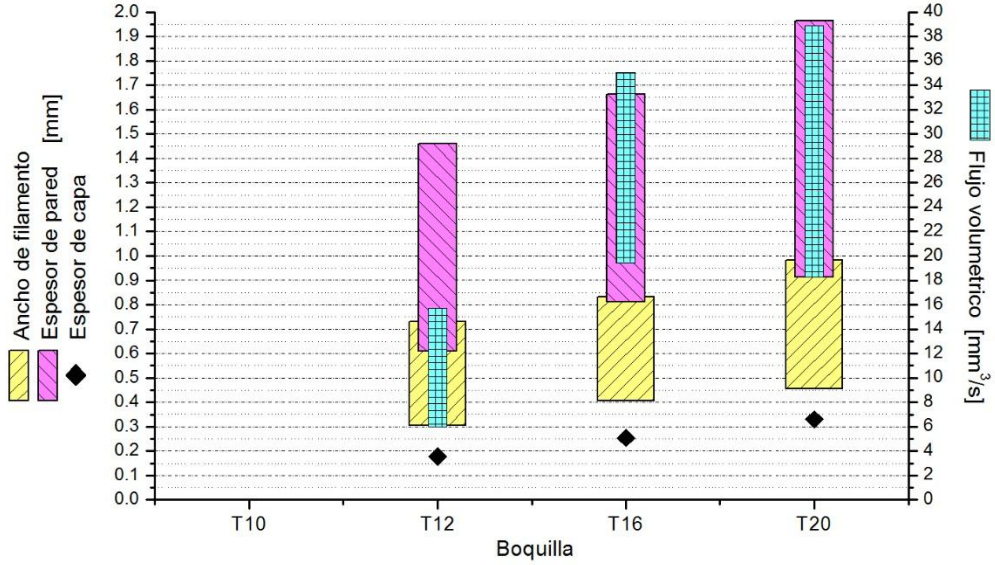
Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material PC-ABS



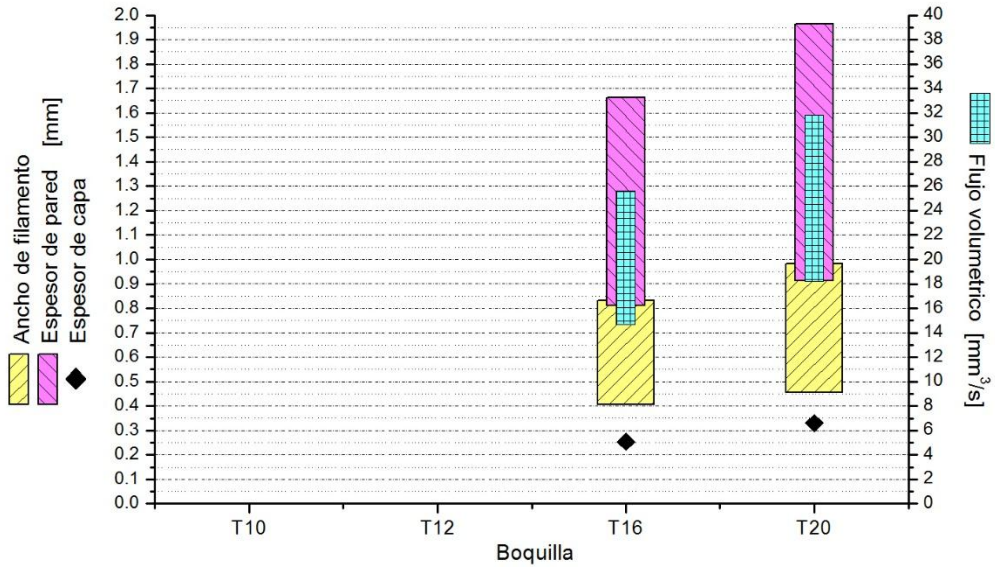
Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material Nylon 12



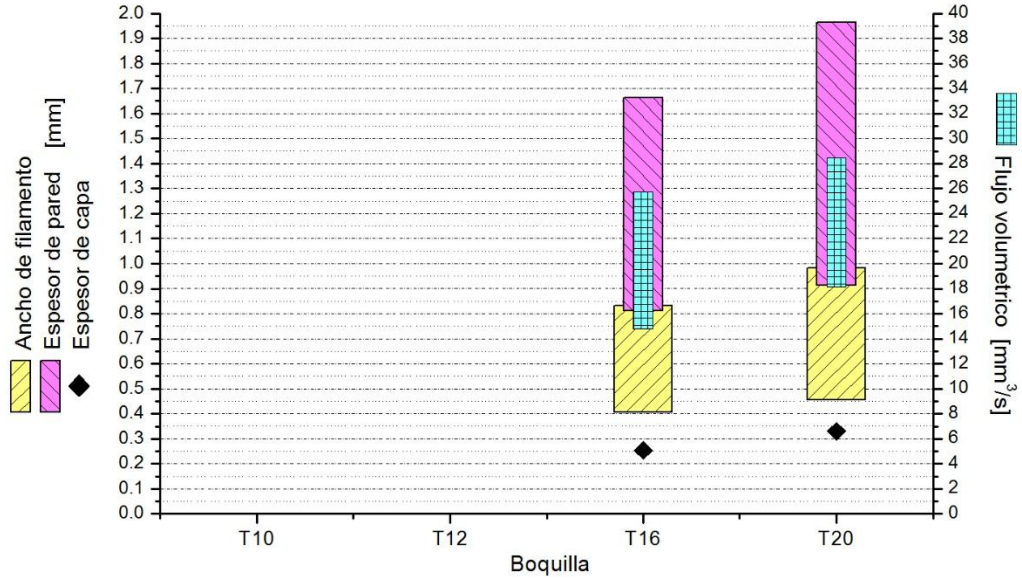
Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material PC-ISO



Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material PPSF



Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material Ultem



Ancho de filamento, espesor de pared, espesor de capa y flujo volumetrico en areas mayores a 50 000[mm²] para el material Ultem Black

