



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

INVESTIGACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE
LA TECNOLOGÍA DE MANUFACTURA ADITIVA FDM

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ADOLFO ORTEGA RODRÍGUEZ, ING.

TUTOR PRINCIPAL
DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

MÉXICO, D. F. MARZO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. López Parra Marcelo
Secretario: Dr. Borja Ramírez Vicente
Vocal: Dr. Ruiz Huerta Leopoldo
1 er. Suplente: Dr. Caballero Ruiz Alberto
2 do. Suplente: Dr. Siller Carrillo Héctor Rafael

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal

TUTOR DE TESIS:

DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte brindado por el proyecto **PAPIME IN104014**.

ÍNDICE

Introducción	1
1. Antecedentes	3
1.1 Manufactura Aditiva.....	3
1.1.1 Categorías	6
1.2 Extrusión de Materiales	10
1.3 Modelado por Deposición de Material Fundido, FDM	14
1.3.1 Descripción del proceso	14
1.3.2 Máquinas FDM	15
1.3.3 Funcionamiento de los sistemas Fortus®	16
1.3.4 Materiales.....	19
1.3.5 Limitaciones de la tecnología	20
2. Planteamiento del problema	22
2.1 Objetivo	23
2.1.1 Alcances	23
3. Marco Teórico	24
3.1 Fenómenos físicos involucrados en el proceso FDM	24
3.2 Parámetros de Manufactura	30
3.3 Características de las Construcciones	37
3.3.1 Propiedades Mecánicas	37
Anisotropía y Resistencia	37
3.3.2 Características Superficiales y Geométricas	42
Acabado Superficial.....	43
Precisión Dimensional	45
3.3.3 Infiltración.....	46
4. Pruebas, Resultados y Análisis de Resultados	48
4.1 Parámetros de influencia en el tiempo de construcción.....	48
4.2 Relación entre ángulo de construcción y boquilla	56
4.2.1 Conversión del archivo STL	57
4.2.2 Diseño del patrón angular y pruebas	58
4.3 Influencia de los parámetros de manufactura en detalles de baja dimensión	66
4.4 Pruebas de permeabilidad	70
5. Conclusiones	83
6. Referencias	85

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA 1. Bisagra de metal utilizada en aviones.....	4
FIGURA 2. Conversión de un archivo a formato STL.....	5
FIGURA 3. Clasificación de los procesos de Manufactura Aditiva según Pham (1998).....	6
FIGURA 4. Esquema general del proceso de extrusión.....	10
FIGURA 5. Maquinas Fortus 900mc y 400mc localizadas en el CCADET.....	11
FIGURA 6. Impresora 3D bioplotting™.....	11
FIGURA 7. Impresoras personales: impresora tipo Darwin de código abierto, impresora modelo Ups! de Delta Micro Factory Corp. e impresora comercializada por MakerBot Industries.....	12
FIGURA 8. Tramas o andamiajes diseñados como estructuras porosas.....	13
FIGURA 9. Esquema del proceso FDM.....	14
FIGURA 10. Impresora modelo <i>Mojo</i>	15
FIGURA 11. Cabezal extrusor y boquillas de las máquinas Fortus®.....	16
TABLA 1. Temperatura máxima de operación por material en las máquinas Fortus®.....	17
FIGURA 12. Contornos generados dentro de <i>Insight</i> ver. 8.1 para un engrane.....	18
FIGURA 13. Trayectorias de deposición generadas con distintos parámetros para un mismo engrane.....	18
FIGURA 14. Sistema de alimentación FDM.....	25
FIGURA 15. Zonas de análisis en la boquilla extrusora según Bellini <i>et al</i>	26
FIGURA 16. Sección transversal de los filamentos que conforman una construcción FDM.....	26
FIGURA 17. Proceso de formación de la unión entre dos filamentos.....	27
FIGURA 18. Perfil de temperaturas en la base de una construcción.....	28
FIGURA 19. Efectos de la estrategia de deposición en el perfil de temperaturas de enfriamiento.....	29
FIGURA 20. a) Izquierda, vista de planta de la plataforma de construcción, con acomodo específico dentro de la cámara; b) derecha, variaciones en el perfil de temperaturas según posición.....	30
TABLA 2. Material de modelo, tamaños de boquilla disponible para su extrusión y tipo de material de soporte disponible.....	31
FIGURA 21. Capas generadas dentro de <i>Insight</i> para un modelo.....	32
TABLA 3. Tamaño de boquilla y espesor de capa correspondiente.....	32
FIGURA 22. Distintas orientaciones para un mismo modelo y sus repercusiones en el número de capas y material de soporte requerido.....	33

FIGURA 23. Características de los filamentos depositados en una capa	34
TABLA 4. Anchos de filamento para cada tamaño de boquilla	34
TABLA 5. Espesores de pared mínimos recomendados por Stratasys, Inc.....	34
FIGURA 24. Tres posibles estilos de contorno	35
FIGURA 25. Posibles configuraciones de distancia entre filamentos (air gap) dentro de una construcción FDM	35
FIGURA 26. Estilos de llenado a) sólido, b) espaciado y c) espaciado, doble-densidad ...	36
FIGURA 27. Comparativo entre estilos de superficie	36
FIGURA 28. Resultado de las pruebas de tracción a probetas FDM construidas en ABS con distintas orientaciones y sin distancia entre filamentos comparadas con una probeta inyectada	38
FIGURA 29. Resultado de las pruebas a tracción en probetas FDM construidas en ABS con gap negativo comparadas con una probeta inyectada	38
FIGURA 30. Resultado de las pruebas a compresión en probetas FDM construidas en ABS comparadas con una probeta inyectada	37
FIGURA 31. Orientación de construcción de las probetas para pruebas de tracción	39
FIGURA 32. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las distintas orientaciones de construcción en las probetas elaboradas con Ultem*9085	40
FIGURA 33. Resistencia a la tracción de la probeta construida con orientación en “X” a distintos parámetros de manufactura por capa	40
FIGURA 34. Efecto de escalonamiento en las construcciones FDM.....	42
FIGURA 35. Representación del modelo de perfil para superficies FDM propuesto por Ahn <i>et al</i>	44
FIGURA 36. Representaciones del caso donde no existe intersección entre filamentos	44
FIGURA 37. Mediciones de rugosidad obtenidas para dos espesores de capa distinto	45
FIGURA 38. Prismas de área mínima y máxima evaluados en el experimento.....	49
TABLA 6. Boquilla, espesor y cantidad de capas para las pruebas.....	50
TABLA 7. Parámetros de manufactura por capa empleados para el cálculo del tiempo en la construcción de los primas rectangulares	50
FIGURA 39. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo ABS-M30 con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc	51
FIGURA 40. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo ABS-M30 con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.	52

FIGURA 41. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc	53
FIGURA 42. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc	53
FIGURA 43. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo ABS-PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc	54
FIGURA 44. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo ABS-PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc	55
FIGURA 45. 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.....	55
FIGURA 46. Diseño de Patrón de ángulos	57
FIGURA 47. Patrón angular construido con material de modelo ABS-M30 y tamaño de boquilla T12.....	59
FIGURA 48. Orientaciones de construcción del patrón angular.....	59
TABLA 8. Identificación de patrones, materiales, boquilla, máquina y orientación	60
TABLA 9. Parámetros de manufactura por capa para la construcción de los patrones angulares.....	60
TABLA 10. Valor angular medido en los patrones construidos en ABS-M30	61
FIGURA 49. Imágenes de los ángulos de 20° y 70°, construidos con cada tamaño de boquilla y tomadas en el comparador óptico Nikon modelo V-12B y microscopio binocular Iroscope® modelo NZ-14-TU; patrones en material ABS-M30 y orientados horizontalmente.	62
FIGURA 50. Defectos ocasionados por el inicio de la deposición. De izquierda a derecha, boquilla T10, T12, T16 y T10	63
TABLA 11. Valor angular medido en los patrones construidos con boquilla T16.....	63
FIGURA 51. Imágenes del perfil construido a 30° con respecto a la horizontal. Se empleó una boquilla T16 y los materiales: a) ABS-M30, b) PC y c) PC-ABS.....	64
TABLA 12. Valor angular medido a distintas orientaciones de construcción.....	64
FIGURA 52. Imágenes de los perfiles observados en el comparador óptico. a) orientación de construcción vertical. b) orientación de construcción horizontal.	65
FIGURA 53. Engrane para experimento	66

FIGURA 54. Imágenes de las simulaciones de llenado generadas por <i>Insight</i> y las imágenes obtenidas en un microscopio de las piezas una vez construidas.	69
FIGURA 55. Cuadro comparativo de las cualidades apreciadas en cada una de las construcciones del engrane.....	69
FIGURA 56. Esquema general del experimento para mostrar la influencia de la orientación de construcción en la permeabilidad de construcciones generadas mediante la tecnología FDM.....	71
FIGURA 57. CAD del corte transversal de una pipeta y su modelo 3D.....	71
FIGURA 58. Modelo 3D del banco de pruebas	72
TABLA 13. Parámetros de manufactura por capa empleados en la construcción de las pipetas.....	72
FIGURA 59. Pipetas y banco de pruebas; construcciones aún dentro de la máquina Fortus 900mc	73
TABLA 14. Datos de las pipetas deshidratadas.....	73
FIGURA 60. Montaje del experimento de filtración.....	74
FIGURA 61. Banco de pruebas al finalizar el primer experimento de permeabilidad. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0°, 45° y 90° con respecto al flujo	75
FIGURA 62. Huella dejada por el pigmento en las pipetas. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0°, 45° y 90°.....	75
TABLA 15. Datos de las pipetas después del experimento.	76
FIGURA 63. Gráficos comparativos entre orientaciones de construcción y porcentajes de porosidad, agua retenida y agua filtrada.....	76
FIGURA 64. Imágenes de la superficie de las pipetas. Izquierda, antes del post-proceso; derecha, después de ser sometidas a un post-proceso de inmersión en acetona.....	77
TABLA 16. Datos de las pipetas antes y después del post-proceso.	78
FIGURA 65. Banco de pruebas al finalizar el segundo experimento de permeabilidad. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0°, 45° y 90° con respecto al flujo.	78
TABLA 17. Datos de las pipetas con post-proceso después del experimento.....	79
FIGURA 66. Gráficos comparativos entre orientaciones de construcción y porcentajes de porosidad, agua retenida y agua filtrada en las pipetas con un post-proceso.....	79
FIGURA 67. Experimento de inmersión. De izquierda a derecha, pipetas construidas con orientación de 0°, 45° y 90°.....	80
FIGURA 68. Costuras presentadas en las pipetas: a) orientada a 90°, b) orientada a 45°...	81

FIGURA 69. Mecánica sugerida del análisis del experimento de permeabilidad dentro de una construcción FDM	82
FIGURA 70. Gráfica comparativa de los efectos del post-proceso en la filtración a diferentes orientaciones de construcción respecto al flujo	82

Introducción

El presente trabajo investiga las capacidades del proceso de Manufactura Aditiva Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM, por sus siglas en inglés), con objeto de generar información que acerque la tecnología a los diseñadores y, aprovechar así, la capacidad instalada dentro del área de Manufactura Aditiva del Laboratorio Universitario de Ingeniería de Diseño y Manufactura Avanzada (LUIDIMA), perteneciente al CCADET dentro de la UNAM.

Este trabajo está dividido en 5 capítulos, donde en el primero de ellos y, a manera de antecedentes, se abordan los conceptos de Manufactura Aditiva e Impresión 3D, describiendo de manera sucinta su desarrollo, potencial, principales aplicaciones y ventajas que ofrecen. Así mismo, se definen las categorías en las que actualmente están divididos estos procesos, acompañadas de una breve descripción, sus principales tecnologías y fabricantes. Para entender la tecnología FDM, se describe la categoría de extrusión de materiales a la cual pertenece, se explica el proceso, los materiales de construcción disponibles, se detalla el funcionamiento de las máquinas Fortus® de Stratasys Inc. y se mencionan las limitaciones de la tecnología.

El segundo capítulo contiene el planteamiento del problema, el objetivo y los alcances del presente trabajo.

En el tercer capítulo, a manera de marco teórico y para comprender los fundamentos del proceso, se presenta una recopilación de investigaciones que describen los complejos fenómenos físicos involucrados, se explican a detalle los parámetros de manufactura y las características mecánicas, superficiales, geométricas y de infiltración inherentes a las construcciones.

En el cuarto capítulo se describe cómo se realizaron una serie de pruebas con la máquinas Fortus®, para mostrar así la influencia de algunos parámetros de manufactura en el tiempo de construcción y en los detalles de bajas dimensiones; la relación que guarda el ángulo de inclinación de una superficie, su orientación de

construcción, el tamaño de boquilla y el tipo de material, con respecto al valor angular y acabado superficial resultantes. También se realizan pruebas para indagar la influencia de la orientación de construcción en la característica de permeabilidad, antes y después de un post-proceso. En el mismo capítulo y subsecuente a la descripción de cada una de las pruebas se presentan sus resultados y el análisis de los mismos. Por último, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones.

Cabe mencionar que como resultado del presente trabajo, se generó un informe técnico que contiene una serie de recomendaciones de carácter general, resultado de la recopilación de información obtenida de diversas fuentes y del estudio de numerosos trabajos de investigación. También contiene recomendaciones específicas acorde a los resultados obtenidos de las pruebas desarrolladas. Ambas series de recomendaciones se complementan mediante el seguimiento de un diagrama de flujo para la manufactura de una pieza con la tecnología FDM, con objeto de apoyar en la revisión del diseño y, de ser posible, enriquecerlo antes de su construcción.

1. Antecedentes

1.1 Manufactura Aditiva

La Manufactura Aditiva es definida por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) como el proceso de unir materiales para construir objetos desde un modelo digital en tres dimensiones, usualmente capa por capa, en oposición a los métodos de manufactura por desprendimiento de material. El término “Manufactura Aditiva” se emplea de manera oficial en la industria sustituyendo a otros como: fabricación aditiva, procesos aditivos, técnicas aditivas, manufactura aditiva por capas, manufactura rápida, manufactura por capas y fabricación de forma libre [1].

Otro término ampliamente utilizado entre los usuarios y fabricantes de estas tecnologías es el de “Impresión 3D” definido por la ASTM como la fabricación de objetos mediante el depósito de material utilizando un cabezal de impresión, boquilla o alguna otra tecnología de impresión. Denominación particularmente asociada a máquinas de bajo perfil [1]. De esta manera, la Manufactura Aditiva incluye a las tecnologías antes conocidas como de prototipado rápido, denominadas así por su capacidad de construir modelos físicos para validar nuevos diseños de manera casi inmediata.

Los comienzos de la Manufactura Aditiva moderna se encuentran en la década de los años 50’s, aunque sus raíces se asocian a la topografía y la foto escultura, procesos con una antigüedad mayor a 100 años y catalogados como acercamientos a la construcción de objetos mediante la unión secuencial de figuras en dos dimensiones [2].

Desde finales de la década de los 80’s una gran variedad de tecnologías de Manufactura Aditiva se han desarrollado y continúan su evolución hasta la fecha. En 1987, surge comercialmente la Estereolitografía (SL, por sus siglas en inglés), proceso que solidifica delgadas capas de un polímero líquido sensible a la luz ultravioleta mediante un láser. A partir de 1990 comienza la comercialización de procesos como la Manufactura de Objetos Laminados (LOM), el Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM) y el Sinterizado Laser Selectivo (SLS), sólo por mencionar algunos. Después de más de dos décadas de investigación, desarrollo y uso, la industria continúa su expansión con la introducción de nuevas tecnologías, métodos, materiales, aplicaciones y modelos de negocios. De acuerdo al Wohlers Report 2012 [1], el mercado a nivel mundial para la Manufactura Aditiva en el 2011 tuvo una tasa de crecimiento anual compuesto de \$1.714 billones de USD equivalente a un 29.4% con respecto al 2010, mostrando con esto su enorme potencial.

La Manufactura Aditiva es utilizada para construir modelos físicos, prototipos, patrones y moldes para fundición de metales, herramientas, dispositivos, partes funcionales y de uso final; estas dos últimas denominadas como Manufactura Digital Directa. Su enfoque ha sido dirigido principalmente a la manufactura de partes de reemplazo y piezas únicas, productos personalizados y ergonómicos, ediciones especiales y bajas producciones de piezas con geometrías complejas. Entre las industrias que actualmente emplean estas tecnologías se encuentran la aeroespacial, militar, arquitectónica, médica, dental, automotriz y de maquinaria industrial, por mencionar algunas.

Ejemplos significativos de las aplicaciones se encuentran en el sector médico, donde la Manufactura Aditiva se utiliza en la construcción de prototipos funcionales para validar nuevos dispositivos, modelos anatómicos o biomédicos con fines de preparación quirúrgica, moldes personalizados para implantes y en la Manufactura Digital Directa de implantes ortopédicos y partes para ingeniería de tejidos. Recientemente, la Manufactura Aditiva se está convirtiendo en el método preferido en el campo emergente de la biomanufactura. La tecnología está siendo usada en construcción de tejidos a partir de células vivas, incluyendo la exploración en la impresión de órganos humanos listos para trasplante [1, 4].

Estas tecnologías simplifican de manera sustancial los procesos de producción, pues mientras que otros procesos de manufactura requieren cuidadosos y detallados análisis de la geometría para determinar la secuencia de operaciones, herramientas y procedimientos adicionales que deben emplearse, la Manufactura Aditiva por el contrario, para su operación generalmente necesita solamente detalles dimensionales básicos y un poco de conocimiento de la tecnología y los materiales [4]. Otro beneficio importante radica en la libertad y flexibilidad que aporta al diseño de partes. El proceso de diseño se simplifica enfocándose en los requerimientos funcionales más allá de las restricciones que imponen los procesos de manufactura tradicionales, abriendo posibilidades a métodos de diseño como la optimización topológica [1]. Un ejemplo se muestra en la figura 1.



Figura 1. Bisagra de metal utilizada en aviones, diseño anterior para maquinado (atrás); el rediseño, empleando optimización topológica (frente), ofrece la misma resistencia con la mitad del peso. Cortesía de EADS para Wohler Associates, Inc. [1]

De manera general la secuencia operacional de los procesos de Manufactura Aditiva se ha dividido en 8 pasos [4]:

1. Generación del modelo digital 3D.
2. Conversión del modelo a un lenguaje triangular estándar (formato STL).
3. Manipulación del archivo y transferencia de datos a la máquina.
4. Establecer parámetros de construcción.
5. Construcción de la pieza.
6. Extracción de la pieza.
7. Post-proceso.
8. Aplicación.

Los sistemas de Manufactura Aditiva usan delgadas secciones transversales horizontales de modelos generados mediante paquetes de Diseño Asistidos por Computadora (CAD), sistemas tridimensionales de escaneo empleados en la ingeniería inversa, escaners médicos y video juegos para producir partes de casi cualquier forma imaginable [1].

Virtualmente todos los paquetes de CAD comerciales tienen la capacidad de convertir sus modelos a términos puramente geométricos como son los archivos STL. Dicho formato consiste en una aproximación de las superficies del modelo mediante una serie de caras triangulares con un tamaño calculado en términos de la distancia mínima entre el plano representado por el triángulo y la superficie que supone representar. En la figura 2 se muestra la conversión de un archivo CAD a STL.

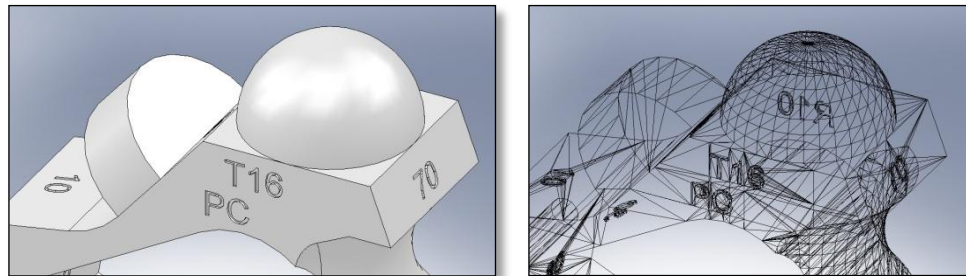


Figura 2. Conversión de un archivo a formato STL.

La información generada por los escaners, como son las nubes de puntos y las imágenes de tomografías electrónicas y resonancias magnéticas requieren de un considerablemente mayor grado de procesamiento para conseguir la descripción de superficies cerradas y coherentes. A recientes fechas, la ASTM especificó un nuevo formato para Manufactura Aditiva (AMF), este formato debe contener archivos con información de texturas, materiales funcionalmente graduados, color, curvatura en triángulos y otros elementos no soportados por el formato convencional STL [1].

Existen varias tecnologías para la construcción, soporte y unión de capas utilizadas en los procesos de Manufactura Aditiva. En la literatura se encuentran diversas formas para su clasificación [1, 3, 4]. Algunos autores emplean la materia prima o la forma inicial de ésta para diferenciarlas; como materia prima se emplean plásticos, metales, cerámicos, vidrio y materiales compuestos, en forma inicial de polvo, líquido, filamento, papel o lámina. Gibson *et al.* (2010) [4] dan especial atención al método de clasificación en dos planos propuesto por Pham (1998), mostrado en la figura 3. En esta clasificación, el primer plano (fila) relaciona la forma en que son construidas las capas con el segundo plano (columna) que indica el estado inicial de la materia prima empleada. Así pues, las capas son construidas mediante el uso de uno, dos o más canales (boquillas) con la capacidad de depositar material en una sola dimensión (1D) o mediante un arreglo holográfico bi-dimensional (Canal de 2D) [4].

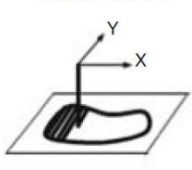
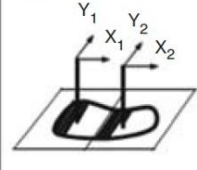
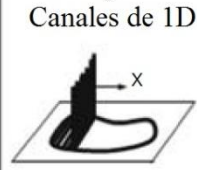
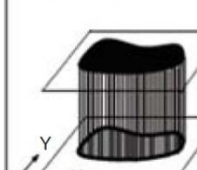
	Canal de 1D 	2 Canales de 1D 	Arreglo de Canales de 1D 	Canal de 2D 
Polímero Líquido	SLA (3D Sys)	Dual beam SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Partículas Discretas	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Material Fundido	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Hoja Sólida	Sólido PLT (KIRA)			

Figura 3. Clasificación de los procesos de Manufactura Aditiva según Pham (1998).

Aunque la clasificación anterior es útil para comprender el principio funcional de los procesos aditivos capa por capa, para una descripción específica, éstos se separan en 7 categorías, agrupadas así por su similitud en el mecanismo físico de transformación de la materia prima y el tipo de arquitectura de la máquina [4].

1.1.1 Categorías

La ASTM, en enero del 2012, denomina y define oficialmente las categorías [1]. A continuación su definición, una breve descripción y sus principales tecnologías y/o fabricantes.

- **Extrusión de material (material extrusión):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual material es depositado selectivamente a través de una boquilla u orificio. Categoría que se describe a detalle posteriormente.
- **Rociado de material (material jetting):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual diminutas gotas de material de construcción son depositadas selectivamente. Típicamente, un cabezal de impresión con múltiples boquillas semejantes a las empleadas en la inyección de tinta, deposita el material de construcción y soporte selectivamente conforme se desplaza a lo largo del área de construcción. Los materiales comúnmente utilizados son fotopolímeros o materiales tipo cera, aunque también se emplean metales y cerámicos [1]. Estos sistemas son capaces de imprimir partes con alta resolución, con múltiples materiales y de distintas clases. Entre los fabricantes de estos sistemas actualmente se encuentra a Stratasys Inc. con sus impresoras Objet, a 3D Systems Inc. con sus impresoras ProJet®, a Solidscape Corp. y a fcubic AB.
- **Rociado de aglutinante (binder jetting):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual un agente líquido adhesivo es depositado selectivamente para unir materiales en polvo. Se utiliza un cabezal semejante al de impresión de tinta con múltiples boquillas para depositar el agente adhesivo sobre una cama de material pulverizado, uniendo al polvo con la forma deseada. Se emplean materiales como arena para fundición, plásticos, metales, aceros inoxidable y vidrio. Son procesos veloces ya que depositan una pequeña fracción del volumen total de la pieza. La combinación del material y el agente adhesivo permiten composiciones difícilmente alcanzables por otros procesos. Son capaces de imprimir color en las construcciones [4]. Entre los fabricantes de estos sistemas actualmente se encuentra a 3D Systems Inc. con sus impresoras Zprint, a Voxeljet Technologies GmbH y a ExOne Corp.
- **Laminación de hojas (sheet lamination):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual hojas de material son unidas para producir un objeto. Típicamente el proceso consiste en depositar la hoja, unirla al sustrato y cortarla con precisión mediante un laser o dispositivo mecánico. La unión entre capas se logra mediante agentes adhesivos, procesos térmicos, mecánicos y soldadura ultrasónica; esta última en combinación con un proceso integrado de maquinado CNC (Control Numérico Computarizado) genera un sistema híbrido con características especiales. Los materiales comúnmente utilizados son hojas de papel, películas de PVC, metales, cerámicos y materiales compuestos. Entre

los fabricantes de estos sistemas se encuentra actualmente a Mcor Technologies, Fabrisonic LLC y Cubic Technologies.

- **Fotopolimerización en tanque (vat photopolimerization):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual un fotopolímero líquido depositado en un tanque es curado selectivamente mediante polimerización activada por luz. Existen varios métodos para irradiar la luz hacia los fotopolímeros y construir las piezas. En la Estereolitografía (SLA) se emplea un láser ultra violeta y un escaneo x-y de uno o dos canales. En el método de Procesamiento Digital de Luz, DLP (por sus siglas en ingles), se emplea un arreglo de micro espejos para proyectar una imagen en la superficie del tanque y curar toda una capa. Otro método es el denominado de dos fotones, con una resolución de hasta $0.2\mu\text{m}$ [4]. Las construcciones en general tiene buenos acabados y precisión, aunque suelen ser frágiles. Entre los fabricantes de estos sistemas se encuentra actualmente a 3D Systems con sus impresoras ProJet™ de tecnología SLA®, a Envisiontec GmbH con sus sistemas Otofash, Perfactory® y Ultra®; a Digital Wax Systems, a Lithoz GmbH con su sistema LCM (Manufactura de Cerámicos Basados en Litografía) y a Asiga con sus impresoras Pico.
- **Fusión de cama en polvo (powder bed fusion):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual energía térmica fusiona selectivamente una región de una cama de material pulverizado. Típicamente, una delgada capa de material en polvo extendido por un rodillo en toda el área de construcción, se encuentra encapsulada dentro de una cámara de atmósfera controlada, donde una fuente de energía térmica inicia un mecanismo de fusión en las regiones seleccionadas, dejando al resto del polvo como material de soporte. Existen 4 mecanismos distintos de fusión: Sinterizado de Estado Sólido, Unión Química Inducida, Sinterizado en Fase Líquida y Fusión Completa [4]. Los materiales utilizados son polímeros, metales, cerámicos y materiales compuestos. Las construcciones comúnmente logran excelentes propiedades mecánicas con la posibilidad de estructuras internas complejas. Sus tiempos de construcción son largos, con acabado superficial y precisión menor a los obtenidos mediante procesos basados en líquidos [4]. Entre los fabricantes de estos sistemas se encuentra actualmente a 3D Systems con sus impresoras sPro™ con tecnologías SLM® (Fusión Laser Selectiva de Metal Directa) y SLS® (Sinterizado Laser Selectivo), a EOS GmbH con sus sistemas Formiga P, EOSINT P, S y M, éste último con tecnología DMLS (Sinterizado Laser de Metal Directo); a Renishaw con sus sistemas de Fusión Laser (LMS), a SLM Solutions GmbH, a ReaLizer GmbH con su método SLM™ (Fusión Laser Selectiva), Arcam AB con su proceso EBM® (Fusión por Rayo de Electrones),

a Concept Laser GmbH con su tecnología LaserCusing®, a Phenix™ Systems con su proceso de Sinterizado Laser, a Blueprinter ApS con su tecnología SHS™ (Sinterizado de Calor Selectivo), a Sintermask GmbH con su tecnología SMS (Sinterizado Selectivo de Máscara) y a Matsuura Corp. con sus Máquinas Fresadoras Híbridas de Sinterizado Laser de Metales.

- **Deposición mediante energía directa (direct energy deposition):** Proceso de Manufactura Aditiva en el cual energía térmica concentrada es usada para fusionar materiales mediante fundir el material conforme es depositado. Por lo regular, la fuente de energía es un laser y el material es un metal en forma de polvo que es depositado mediante boquillas y fundido donde el material converge con el laser y el sustrato [1,4]. La mayoría de estos sistemas emplean de 4 a 5 ejes de movimiento o un brazo robotizado para posicionar el cabezal que deposita el material, por lo que el proceso no está limitado solo a capas horizontales y puede ser utilizado para adicionar material a piezas existentes. Distintos materiales pulverizados pueden ser depositados dando la posibilidad de construir partes funcionalmente graduadas [1]. Entre los fabricantes de estos sistemas actualmente se encuentra a Optomec® con su tecnología LENS, a DM3D Technology LLC con la tecnología DMD® (Deposición Directa de Metal), a Irepa Laser con su proceso CLAD® (Construcción Laser Aditiva Directa), a Sciaky Inc. con su tecnología EBDM (Manufactura Directa por Rayo de Electrones) y a Honeywell Aerospace con su proceso IFF (Formación por Fusión Iónica).

La tecnología empleada en cada proceso determina las opciones de manipulación del archivo, el establecimiento de parámetros de construcción y los post-procesos necesarios para lograr la pieza terminada. Los programas computacionales de los sistemas de Manufactura Aditiva normalmente cuentan con herramientas para visualizar, posicionar, orientar, escalar, insertar múltiples partes y adicionar textos o figuras simples al modelo original. Existen sistemas que permiten una mayor interacción con el proceso de manufactura por capa, habilitando la elección de parámetros de manufactura como: espesor de capa, tipo de soporte y trayectorias de deposición, por mencionar algunos.

La pieza después de su construcción es retirada de la máquina y, en algunos casos, solo necesita un proceso de limpieza antes de iniciar su uso. Sin embargo, prácticamente todas las piezas construidas mediante Manufactura Aditiva requieren de un post-proceso más elaborado. El término post-proceso se refiere a las etapas, usualmente manuales, de acabado que necesita la pieza a propósito de su aplicación [4]. Las etapas generalmente involucran procesos abrasivos como lijados y pulidos o la aplicación de algún tipo de sellado y/o recubrimiento.

1.2 Extrusión de Material

Dentro de la Manufactura Aditiva, la Extrusión de Material se define como el proceso en el cual material es depositado selectivamente a través de una boquilla u orificio. De manera general, las máquinas basadas en el proceso de extrusión obligan la entrada de material a través de una boquilla conforme el cabezal de extrusión o la plataforma de construcción se desplaza en el plano horizontal (x - y). Al terminar de depositar una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo o el cabezal hacia arriba, la siguiente capa es extruida y se adhiere a la capa anterior. La materia prima, típicamente un filamento de material termoplástico enrollado en un contenedor, es fundida o semi-fundida dentro de la boquilla conforme es depositada. Se requiere de estructuras de soporte como base en las construcciones y para lograr formas en voladizo. Se presenta un esquema general del proceso en la figura 4.

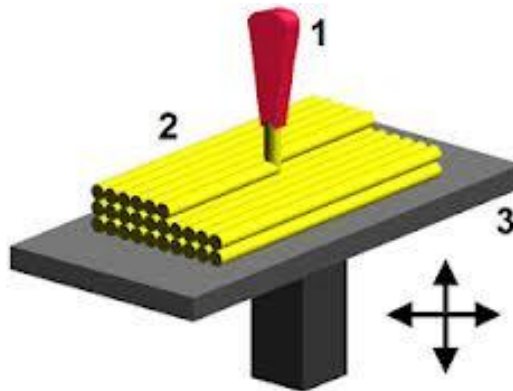


Figura 4. Esquema general del proceso de extrusión; 1) Cabezal extrusor, 2) Material depositado, 3) Plataforma de construcción. Imagen descargada de <http://www.nextdayreprint.co.uk>. [50]

Gibson *et al.* (2010) de manera general, dividen el proceso de los sistemas basados en extrusión en 7 pasos [4]:

1. Carga del material.
2. Fundición del material.
3. Aplicación de presión para desplazar el material en la boquilla.
4. Extrusión.
5. Deposito del material de manera controlada y selectiva.
6. Formación de uniones del material entre sí o con materiales de construcción secundarios para formar una estructura sólida coherente.
7. Inclusión de estructuras de soporte para permitir la formación de geometrías complejas.

El primer proceso basado en la extrusión de materiales fue el Modelado por Deposición de Material Fundido (FDM, por sus siglas en inglés) desarrollado en 1988

por Scott Crump, cofundador de Stratasys Inc., y patentado en 1992. Los sistemas basados en la tecnología FDM representan la mayor capacidad instalada de máquinas de Manufactura Aditiva en el mercado [1]. La figura 5 muestra los sistemas Fortus® con los que se cuenta en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) dentro de la UNAM.



Figura 5. Maquinas Fortus 900mc y 400mc localizadas en el CCADET.

El proceso 3D bioplotting™ también pertenece a esta categoría y fue desarrollado en el Centro de Investigación en Materiales de Freiburg, Alemania, en 1999 por Mülhaupt *et al.* Actualmente, esta tecnología es comercializada y distribuida por Envisiontec GmbH. Aunque el proceso es similar a FDM, tiene las particularidades de procesar termoplásticos en forma inicial de polvos y pellets, emplear aire comprimido o gas inerte para generar la presión necesaria en la extrusión, y permitir la construcción de piezas dentro de un medio líquido [3]. La importancia de este proceso radica en su gran potencial para la biomanufactura. Se muestra una impresora de esta tecnología en la figura 6.

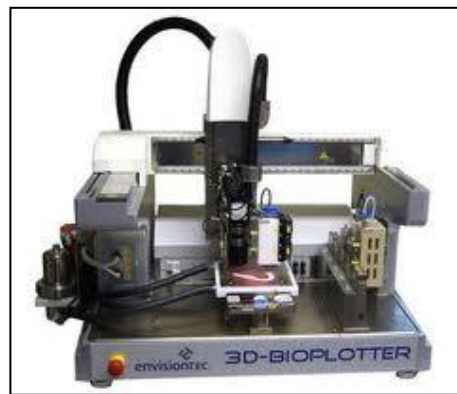


Figura 6. Impresora 3D bioplotting™ [8].

Otro grupo de sistemas basados en la extrusión de material son las impresoras personales 3D de bajo costo derivadas del proyecto de código abierto RepRap [5] iniciado por la Universidad de Bath en Inglaterra [1]. Recientemente se han desarrollado otros proyectos de código abierto como Fab@Home y surgido en el mercado una mayor oferta de impresoras por parte de fabricantes como 3D Systems con sus filiales Bits From Bites y Cubify, MakerBot Industries, Delta Micro Factory Corp., Essential Dynamics y Sintermask GmbH con sus impresoras Fabbster. La figura 7 muestra tres tipos de impresoras personales 3D.

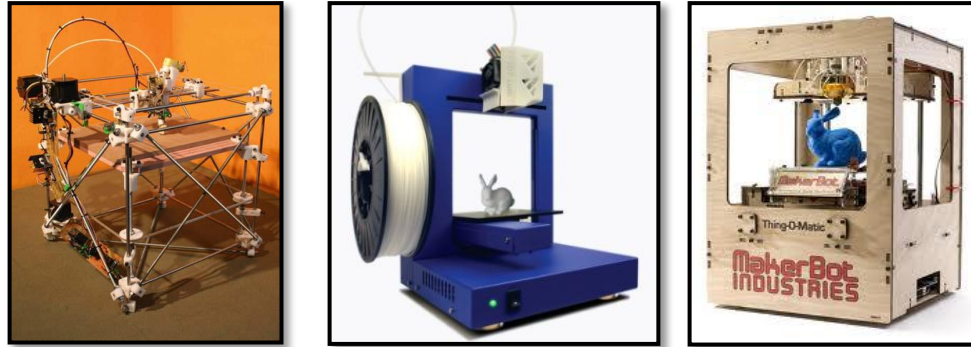


Figura 7. Impresoras personales. De izquierda a derecha: impresora tipo Darwin de código abierto, impresora modelo Ups! de Delta Micro Factory Corp. e impresora comercializada por MakerBot Industries.

La tecnologías de extrusión permiten procesar un mayor rango de materiales en comparación a otras categorías de Manufactura Aditiva [3]. Virtualmente cualquier material licuable puede ser procesado si los parámetros reológicos se logran ajustar a las demandas operacionales de la deposición. Lo anterior incluye a polímeros termoplásticos idénticos a los diseñados para piezas de uso final, polímeros bioasorbibles e hidrogeles, estos últimos relevantes por su aplicación en medicina, ingeniería de tejidos e impresión de órganos [3]. Adicionalmente a los materiales basados en polímeros, estos procesos permiten la manufactura de modelos cerámicos y metálicos, comúnmente referidos como Deposición Fundida de Cerámicos (FDCs) y Metales (FDMets). Los materiales para FDCs y FDMets usualmente se componen de partículas precursoras cerámicas y metálicas, respectivamente, dispersas en un polímero termoplástico o cera.

Una característica importante de estos sistemas radica en la deposición de filamentos de manera individual con la posibilidad de variar la distancia entre ellos, permitiendo la construcción de andamiajes de porosidad y mesoestructura controlada, como los mostrados en la figura 8. Por ejemplo, la capacidad de ajustar la densidad y porosidad en la construcción de un modelo determina directamente las propiedades mecánicas y es crucial para la proliferación, vascularización y transporte de nutrientes en aplicaciones de ingeniería de tejidos [3]. Por otra parte, la naturaleza relativamente

simple con que estos sistemas generan capas, permite el uso de más de un material en los procesos de construcción; tantos materiales se pueden depositar como boquillas existan en el cabezal extrusor. Por lo tanto, es posible que material de modelado y soporte sean procesados simultáneamente, así como construir modelos que contengan distintos materiales para lograr diferentes colores o distintas propiedades mecánicas [3].

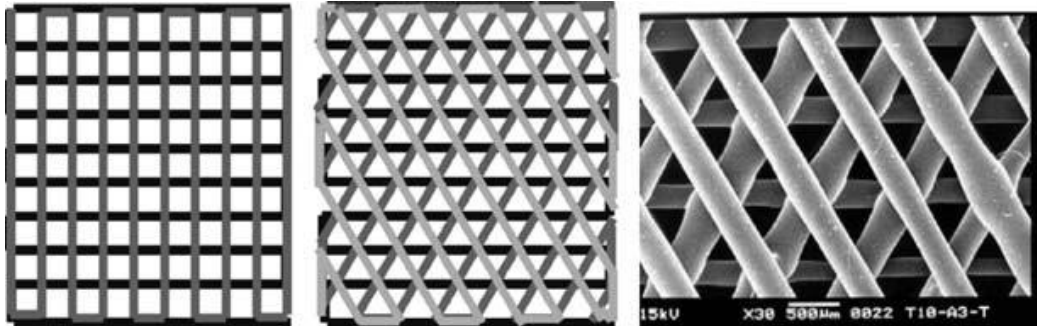


Figura 8. Tramas o andamiajes diseñados como estructuras porosas [4].

A pesar de sus muchas ventajas, estos procesos comparten algunas debilidades. La resolución de construcción está limitada por un diámetro mínimo de filamento necesario para asegurar la operación sin que se presente ruptura mientras es depositado. Las propiedades reológicas del material, las temperaturas de operación, la velocidad de desplazamiento del cabezal extrusor y las características de la boquilla son parámetros que deben ser considerados para lograr construcciones exitosas y de precisión aceptable. Típicamente el mínimo diámetro de extrusión de estos sistemas es de $100\mu\text{m}$, por lo que para muchas aplicaciones donde se requieren buenos acabados superficiales es necesario aplicar algún tipo de post-proceso.

1.3 Modelado por Deposición de Material Fundido, FDM

1.3.1 Descripción del proceso

Esta tecnología consiste básicamente en una máquina de estructura tipo pórtico o puente con control numérico computarizado que utiliza un cabezal para depositar filamentos de materiales termoplásticos de manera controlada y selectiva creando capas. En cada capa, boquillas de extrusión separadas para modelo y soporte dentro del cabezal, derriten y depositan el material en un estado semi-fundido sobre una plataforma dentro de un ambiente controlado. Los filamentos una vez depositados se enfrían y unen formando la pieza. Para el depósito de las siguientes capas, la plataforma realiza un desplazamiento hacia abajo igual al espesor de capa.

Una vez terminada la construcción es necesario remover el material de soporte de la pieza ya sea arrancándolo o disolviéndolo en una mezcla de agua y detergente.

El proceso requiere de mínima interacción humana y está basado fundamentalmente en la química de la superficie, la energía térmica y un proceso de manufactura por capa [6]. El término “Manufactura por capa” hace referencia a las características del filamento depositado y sus trayectorias. La figura 9 muestra un esquema del proceso FDM.

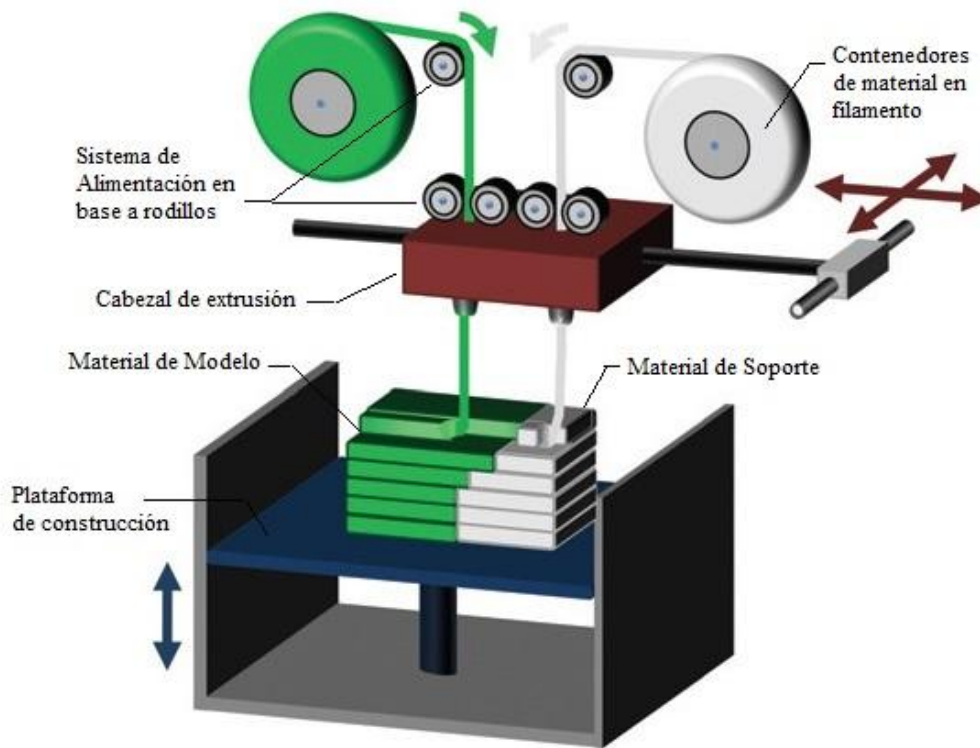


Figura 9. Esquema del proceso FDM [3].

1.3.2 Máquinas FDM

Existe una amplia variedad de maquinas FDM construidas por Stratasys, Inc. desde las de bajo costo, pequeña escala y mínimo rango de interacción en el proceso hasta las más versátiles y sofisticadas. Actualmente el fabricante las divide en tres series [7]:

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

La serie *Ideas* consiste en los modelos *Mojo* y *Uprint*, mientras que a la serie *Design* pertenece el Modelo *Dimension*. Ambas series son catalogadas como impresoras 3D de escritorio y están enfocadas principalmente a la construcción de prototipos conceptuales para asistir en el proceso de diseño. El rango de materiales de construcción es limitado, espesor de capa único y con pocas opciones para ajustar parámetros de procesamiento. Las Impresora 3D *Mojo*, mostrada en la figura 10 e introducida al mercado en mayo del 2012, tienen como característica un cabezal extrusor consumible que asemeja el proceso de carga de material al de cargar un cartucho de toner en una impresora 2D convencional.



Figura 10. Impresora modelo *Mojo*. Derecha, imagen de su interior [7].

Por su parte, la serie *Production* está dirigida a aplicaciones de mayores demandas como modelos para validación de productos finales, prototipos funcionales para pruebas y Manufactura Digital Directa. Por ello requiere de máquinas más versátiles, con mayor control sobre los parámetros de procesamiento y opción para emplear distintos materiales. Las máquinas Fortus® componen dicha serie y son las de mayor perfil por su tamaño, velocidad de construcción, precisión y rango de materiales. Tienen la capacidad de operar con diferentes espesores de capa mediante el uso de boquillas intercambiables con distintos diámetros. Un mayor diámetro de boquilla puede extruir una mayor cantidad de material y emplear un menor número de capas, acortando así el tiempo de construcción.

Las características de las máquinas Fortus 400mc y 900mc, mostradas anteriormente en la figura 5 y empleadas en las pruebas realizadas dentro de este trabajo, se anexan en el apéndice.

1.3.3 Funcionamiento de los sistemas Fortus®.

La materia prima en forma de filamento se encuentra enrollada dentro de un contenedor sellado llamado “canister” acompañado de sales para evitar la captación de humedad por el polímero. Para conducir el filamento de material termoplástico al cabezal de extrusión, la tecnología emplea un sistema de alimentación a base de rodillos. El primer juego de rodillos se encuentra localizado a la entrada del sistema encargándose de extraer el filamento del canister y conducirlo hasta un juego de rodillos localizados en el cabezal extrusor, prácticamente a la entrada de las boquillas. Estos últimos ejercen la fuerza necesaria para utilizar al filamento plástico como pistón que se auto-extruye, es decir, entra en la boquilla sólido y ejerce la presión de extrusión necesaria para posteriormente ser semi-fundido y extruido.

El cabezal extrusor utiliza dos boquillas, una para depositar material de construcción para generar el modelo y otra para depositar el material de soporte necesario para lograr la forma deseada. Las boquillas de extrusión son de un material metálico, con un recubrimiento aislante para minimizar las variaciones de temperatura a distintos flujos volumétricos. Las boquillas son de fácil desmontaje y colocación para su intercambio al momento de seleccionar un material distinto, lo que permite destinar una boquilla para cada tipo de material, eliminando así el riesgo de contaminar las construcciones al momento de la extrusión con residuos de materiales antes utilizados. En la figura 11 se muestra el cabezal extrusor y boquillas.

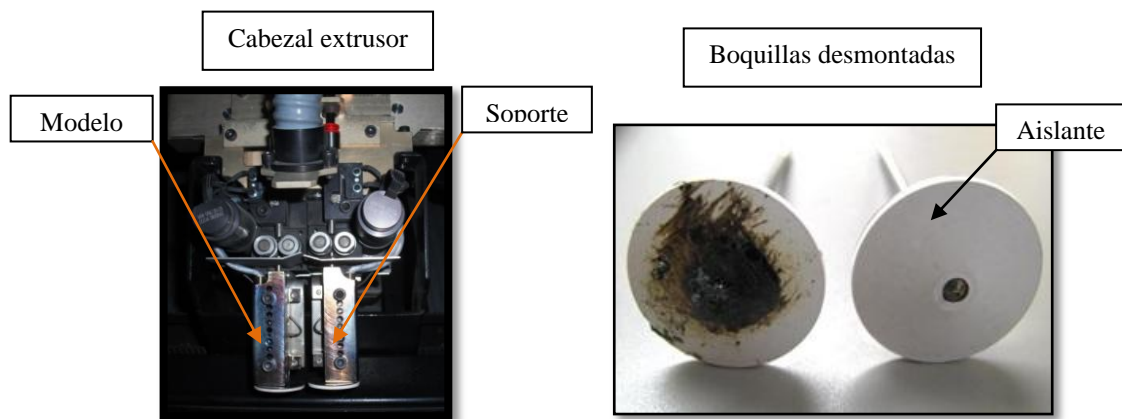


Figura 11. Cabezal extrusor y boquillas de las máquinas Fortus®.

El funcionamiento de esta tecnología requiere establecer parámetros como temperaturas de proceso, ancho de filamentos a depositar, espesor de capa y velocidad de deposición, algunos de ellos ya pre-establecidos. La cantidad de material depositado por la boquilla o flujo volumétrico es determinado por el producto de la velocidad de deposición, ancho del filamento y espesor de capa. Este flujo es controlado mediante los rodillos de alimentación que modifican su velocidad de giro para depositar diferentes anchos de filamento con un mismo diámetro de boquilla y

espesor de capa, además de mantener una correlación con la velocidad de deposición [9]. Dicha correlación es importante para compensar las cargas inerciales del sistema en los cambios de dirección del cabezal, evitando hasta cierto grado, el exceso o la escasez de material depositado [4]. Con este mismo objetivo, también cuentan con sistemas para el retroceso del filamento mediante el giro inverso de los rodillos y descenso de la plataforma de construcción al terminar de depositar el material de cada trayectoria. Además se emplea un sistema de limpieza constante de boquillas mediante el uso de cepillos de latón y flaps contra los que las boquillas se frotan para eliminar excedentes de material. En la configuración estándar, el sistema realiza una limpieza de boquillas después de cada capa depositada. Estos procedimientos buscan mejorar la calidad del modelo y repercuten en el tiempo de construcción.

El filamento una vez extruido es depositado sobre una hoja tipo acetato, especial para cada máquina de la tecnología, la cual se adhiere mediante vacío a la plataforma de construcción dentro de una cámara sellada de ambiente controlado. Tanto la temperatura de la boquilla como la temperatura del ambiente en el que se depositan los filamentos son factores importantes para lograr una buena construcción del modelo. De manera general, existe para cada material un límite superior y uno inferior de temperaturas. La operación del sistema fuera de estos límites repercute directamente en el acabado superficial y en la resistencia mecánica de la construcción [10]. Típicamente, temperaturas por encima del límite superior provocan escurrimiento en la superficie, mientras que temperaturas por debajo del límite inferior, provocan baja adherencia entre capas y ocasionan una disminución en el flujo volumétrico debido a un aumento en la viscosidad del material [10]. La tabla 1 muestra las temperaturas máximas de operación en las máquinas Fortus®.

Material	Temperatura máxima de extrusión	Temperatura máxima de cámara
ABSi	330° C (626° F)	85° C (185° F)
ABS-M30 ABS-M30i	320° C (609° F)	95° C (203° F)
PC-ABS	330 ° C (626° F)	110° C (230° F)
PC PC-ISO	365° C (689° F)	145° C (293° F)
Ultem 9085	400° C (752 °F)	190° C (374° F)
PPSF	415° C (779 °F)	225° C (437° F)

Tabla 1. Temperatura máxima de operación por material en las máquinas Fortus®, copiadas del manual de usuario.

Las trayectorias que siguen las máquinas para depositar los filamentos son definidas dentro de un programa de cómputo especializado llamado *Insight*. Las trayectorias son establecidas acorde a la geometría del modelo, su orientación y parámetros de manufactura por capa definidos por el usuario. Como los cambios de dirección dificultan el control del flujo del material, en cada capa es primero depositado el

contorno y posteriormente rellenado. El contorno es determinado por la intersección del plano de la sección transversal a construir (capa) y los triángulos del archivo STL. Dichas intersecciones son ordenadas para formar curvas completas y continuas para cada contorno (un archivo STL mal generado causa conflictos en las curvas). La figura 12 muestra los contornos para la construcción de un engrane generados en *Insight* versión 8.1.

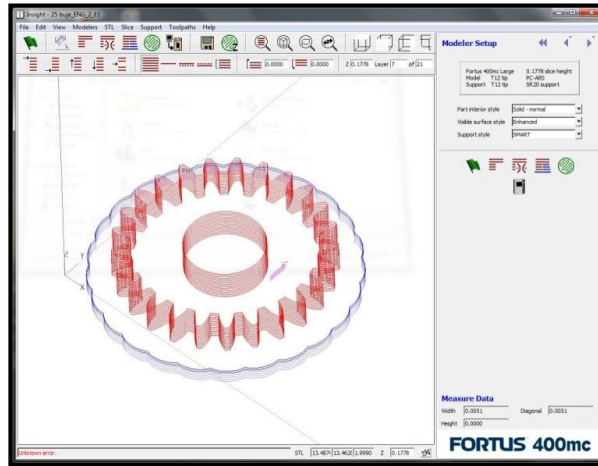


Figura 12. Contornos generados dentro de *Insight* versión 8.1 para un engrane.

Las trayectorias internas, son generadas automáticamente dentro de *Insight* aunque cuentan con suficientes parámetros de control para ser casi totalmente modificadas por el usuario especializado. En teoría, existe un número infinito de soluciones para este tramado interno o llenado interior [4], tomando como variables la distancia con el contorno y las otras trayectorias, dirección u orientación y ancho del filamento. Existe la posibilidad de generar un tramado interno específico por capa y hasta por zona. La figura 13 muestra dos trayectorias distintas de deposición generadas en *Insight*.

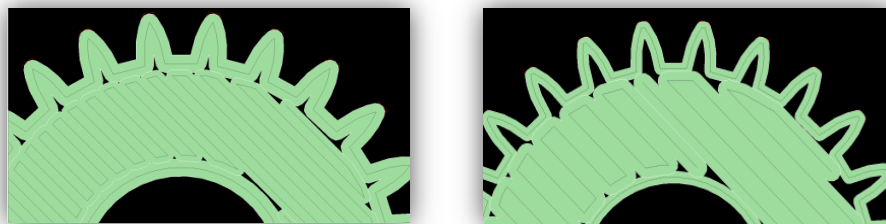


Figura 13. Trayectorias de deposición generadas con distintos parámetros para un mismo engrane.

El soporte necesario para la construcción del modelo es determinado automáticamente en función de la orientación y del espesor de capa. El programa *Insight* cuenta con opciones para seleccionar algunos parámetros, entre ellos que se encuentran: el estilo de construcción para adaptarse al material de soporte seleccionado, ángulos a soportar,

es decir, la pendiente con respecto a la horizontal por debajo de la cual deberá construir andamiajes para las geometrías en cantiléver y número de capas en la base de la construcción.

Al terminar su proceso de construcción, la pieza es desprendida de la hoja y removido el material depositado como soporte. En función de la aplicación, generalmente es necesario aplicar un post-proceso. Entre los más comunes encontramos:

- Procedimientos en estaciones o máquinas elaboradas por el fabricante, granallados, procesos químicos o abrasivos, con objeto de mejorar el acabado superficial.
- Adición de insertos físicos.
- Uniones mediante procesos térmicos o químicos con otras construcciones FDM.
- Sellados.
- Pintura y recubrimientos.
- Maquinados: Barrenados, torneado, rimado, machueleados y fresados, con el objetivo de mejorar la exactitud de la pieza.

Los procedimientos anteriores se encuentran brevemente descritos en manuales generados por Stratasys, Inc. [15].

1.3.4 Materiales

La mayor fortaleza del proceso FDM radica en su variedad de materiales termoplásticos y las propiedades mecánicas que logran sus construcciones. Las piezas fabricadas usando esta tecnología se encuentran entre las más resistentes construidas por cualquier proceso de Manufactura Aditiva en base a polímeros [3]. El material más común, empleado en alguna de sus distintas versiones por todas las máquinas, es el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

Existen otros materiales disponibles para la tecnología. Los basados en PC (Policarbonato) poseen una mayor resistencia a la tracción y una resistencia a la flexión de 104 MPa. Una variación de este material es el PC-ISO, formulado para cumplir con la norma ISO10993-1 y requerimientos USP Clase VI [4]. Este material, aunque más débil que el PC, está certificado para empaque de uso alimenticio y fabricación de dispositivos médicos. También se encuentran la combinación PC-ABS, material que ofrece la resistencia térmica y mecánica del PC aunada a la flexibilidad del ABS.

Otro de los materiales desarrollados para cumplir con requerimientos a nivel industrial es el ULTEM 9085, de alta resistencia y con características favorables FST (flama, humo y toxicidad, por sus siglas en Inglés) que lo convierten apropiado para aplicaciones aéreas, navales y automotrices. De igual forma, para aplicaciones que

requieran de resistencia térmica y química, la Polisulfona (PPSF/PPSU) también utilizada por la tecnología, posee una temperatura de flexión bajo carga (HDT, por sus siglas en inglés) de 189°C a 264 psi.

Se debe mencionar que tanto el ULTEM 9085 como la Polisulfona sólo están disponibles para las máquinas de alto perfil y no tienen disponible material de soporte soluble, por lo que su uso llega a ser complicado y especializado [4].

Las propiedades de estos materiales son muy similares a la de los materiales comúnmente usados por otros procesos de manufactura como el moldeo por inyección de plástico. Sin embargo, las partes construidas en las máquinas FDM pueden contener regiones de menor resistencia debido a las interfaces entre capas y posibles huecos en la construcción [4].

Gibson *et al.*, hacen notar que la tecnología FDM funciona mejor para polímeros de naturaleza amorfa que para polímeros altamente cristalinos. Lo anterior debido a que los polímeros extruidos en forma de pasta viscosa se ajustan mejor al proceso que los de baja viscosidad. Los polímeros amorfos no poseen un punto de fusión definido y fluyen con mayor facilidad al aumentar la temperatura. La viscosidad a la cual los polímeros amorfos pueden ser extruidos bajo presión es lo suficientemente alta para que conserven su forma después de la extrusión y sean capaces de solidificar rápidamente formando uniones con material antes extruido y depositado.

1.3.5 Limitaciones de la tecnología

La mayoría de los trabajos respecto a la tecnología FDM coinciden en ciertas características como debilidades del proceso. Gurr *et al.* [3], identifican principalmente 4 características:

- Son necesarias estructuras de soporte.
- Se presenta contracción o distorsión térmica en estructuras delicadas.
- Pobre acabado superficial y baja resolución.
- El proceso es lento en partes con mucha masa.

Gibson *et al.* [4], por su parte describen las desventajas de la tecnología en términos de la velocidad de construcción, precisión y densidad de material. Hacen notar que las boquillas son circulares por lo que es imposible generar esquinas, y que de manera general, las formas producidas son dependientes de la boquilla, características de aceleración y desaceleración del cabezal, y del comportamiento viscoelástico del material al momento de su solidificación. Otro punto importante mencionado por los autores es referente a la naturaleza anisotrópica de las construcciones.

Así pues, existen en la literatura numerosos trabajos de investigación enfocados a mejorar las características de precisión, acabado superficial, resistencia mecánica y tiempo de construcción, entre otros, mediante el ajuste de los parámetros del proceso [11-14]. Estos trabajos se abordarán más adelante y muestran que las propiedades de las construcciones son significativamente mejoradas utilizando los parámetros de manufactura apropiados sin necesidad de incurrir en costosos cambios en la infraestructura del sistema [14].

2. Planteamiento del problema

Existe en la industria a nivel mundial un creciente interés por explotar las capacidades de las tecnologías de Manufactura Digital Directa en nichos que anteriormente eran específicos de otros procesos para la construcción de productos funcionales y de uso final. Ejemplos se encuentran en el área Biomédica, donde estas tecnologías abren la posibilidad de construir férulas o implantes personalizados en cuestión de hora; también se hallan en la industria aeroespacial, donde bajos volúmenes de partes con geometrías complejas son habitualmente utilizados [16]. Sin embargo, las tecnologías actualmente aplicadas deben ser entendidas para aprovechar sus ventajas y disminuir sus limitaciones dentro del proceso de diseño, generando partes robustas y confiables que cumplan con especificaciones y requerimientos funcionales.

La tecnología FDM ya es utilizada con este propósito y posee gran potencial. No obstante, en la literatura se encuentran señaladas una serie de limitaciones con respecto al proceso, las cuales logran ser subsanadas comprendiendo la tecnología y empleando correctamente sus parámetros de manufactura.

Dentro de las limitaciones detectadas como áreas de oportunidad para lograr un mejor aprovechamiento de la tecnología y, por consiguiente, de la capacidad instalada dentro del CCADET, encontramos:

- La tecnología FDM y las características de sus construcciones, en específico la relación entre tamaño de boquilla, acabado superficial y tiempo de construcción, no es comprendida por el diseñador, lo que se convierte en obstáculo para considerarla como una opción de proceso de manufactura.
- Existe poca información en la literatura acerca de las características de permeabilidad o infiltración en las construcciones.
- El proceso es lento en partes de gran volumen, lo que dificulta la elección del tamaño de boquilla de extrusión, más aún cuando la pieza contiene detalles de bajas dimensiones.

A pesar de que el desarrollador de la tecnología ha generado una serie de recomendaciones que abordan los puntos antes mencionados, se consideran insuficientes y, sin el correcto entendimiento del proceso, llegan a ser poco aplicables.

2.1 Objetivo

Investigar las capacidades de la tecnología FDM con la finalidad de generar información que relacione el tamaño de boquilla, la orientación y el tiempo de construcción, durante el desarrollo de partes, profundizando en aquellas que incluyan características de bajas dimensiones y permeabilidad.

2.1.1 Alcances

- Generar información respecto a la velocidad de deposición y el flujo volumétrico, explicando su relación con el tamaño de la boquilla, el tipo de material de modelo y el área de construcción, apoyando con ello el proceso de selección del tamaño de boquilla.
- Construir piezas tipo patrón para auxiliar al diseñador a percibir las diferencias resultantes de variar la orientación de construcción, el material de modelo y el tamaño de boquilla, en relación al valor angular y acabado superficial.
- Realizar pruebas construyendo piezas con detalles de bajas dimensiones que muestre como el ancho de filamento, el espacio entre filamentos (air gap), y la cantidad de contornos repercute en su llenado y definición geométrica.
- Realizar pruebas que permitan apreciar la influencia de la orientación de construcción en los fenómenos de permeabilidad y filtrado en una construcción FDM.

3. Marco Teórico

3.1 Fenómenos físicos involucrados en el proceso FDM

El proceso FDM parte de la sencilla idea de fundir, extruir y re-solidificar un filamento de material termoplástico para formar un objeto [17]. La idea quizá sea simple, pero los principios físicos que la hacen posible involucran fenómenos complejos que repercuten directamente en las características de los objetos construido y en la evolución misma de la tecnología. A continuación se describen dichos fenómenos, que aún después de dos décadas de su desarrollo, son tema de múltiples investigaciones.

Los fenómenos físicos involucrados en el proceso han sido estudiados en dos fases [17].

- 1) La fase donde se funde parcialmente el material, es extruido y se inicia la trayectoria.
- 2) La fase de consolidación de la trayectoria, enfriamiento del filamento depositado y su adherencia mediante la difusión molecular.

La primera fase ocurre alrededor del cabezal de extrusión, involucrando de manera relevante fenómenos físicos como el flujo multi-fase del material y la transferencia de calor. La segunda fase, por su parte, ocurre dentro del cuerpo en formación como una interacción térmica de la masa plástica depositada, siendo la transferencia de calor por conducción en el cambio de fase del filamento plástico, el principal mecanismo para la transferencia de energía [17].

Fase 1

La presión de extrusión en la boquilla es determinada por la relación entre la fuerza de tracción ejercida por los rodillos en el filamento y su sección transversal. Para un diámetro interior de boquilla a temperatura constante, la relación entre presión y flujo volumétrico es, para efectos prácticos, lineal [10]. Conforme el diámetro de la boquilla disminuye, la presión requerida para lograr un flujo volumétrico específico aumenta, así como al disminuir la temperatura, la presión requerida aumenta debido al incremento en la viscosidad del material. La presión admisible de alimentación a la boquilla está delimitada por los siguientes factores [10]:

- La fuerza necesaria para que el filamento fluya dentro de la boquilla.
- La resistencia a la compresión del filamento.
- El esfuerzo crítico al cual el filamento se pandea o colapsa, estando éste en función del diámetro y la longitud del filamento sometido a compresión.

Estas fuerzas difieren en magnitud y orden relativo entre distintos materiales. Así pues, la presión admisible en la boquilla está supeditada al menor de los valores de estas fuerzas según el material a extruir [10]. La figura 14 muestra el filamento en su entrada a la boquilla.

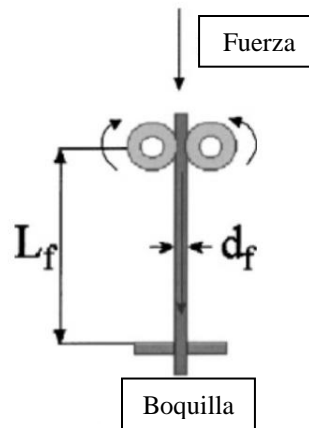


Figura 14. Sistema de alimentación FDM; diámetro del filamento (d_f), longitud del filamento sometida a compresión (L_f) [25].

Yardimci *et al.* (1997) [20], explican el fenómeno de extrusión, proponen un modelo para predecir la temperatura en la entrada de la boquilla, desarrollan metodologías de diseño para determinar la longitud, enfriamiento y forma del ducto interno de la boquilla, analizan la zona donde se funde el material y el impacto del diseño de la boquilla en la estabilidad operacional del sistema.

Posteriormente, Bellini *et al.* (2004) [25], proponen un modelo matemático para los fenómenos físicos dentro de la boquilla extrusora con objeto de establecer una relación de control entre la velocidad de deposición y el flujo volumétrico. Asumen que el complejo comportamiento físico del material dentro de la boquilla se debe al movimiento inestable del termo-flujo viscoso, compresibilidad y cambio de estado físico del material, distribución no homogénea del flujo de calor generado por las resistencias y deslizamiento del filamento con los rodillos. Determinan el flujo de calor necesario para la extrusión en función de la temperatura de entrada del material y temperatura de operación, densidad y calor específico del flujo viscoso y sección transversal interna de la boquilla. Dividen la boquilla en tres zonas para analizar, conforme al comportamiento pseudoplástico que exhiben los polímeros termoplásticos, la caída de presión en cada una de ellas y determinar así, la fuerza necesaria para que el material fluya dentro de la boquilla. Se muestran las zonas dentro de la boquilla en la figura 15.

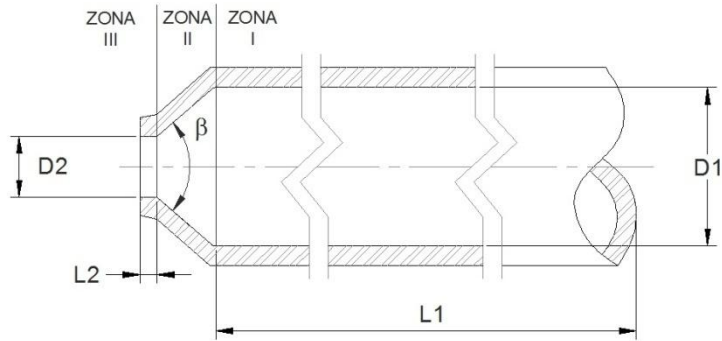


Figura 15. Zonas de análisis en la boquilla extrusora según Bellini *et al.*

Fase 2

Una vez que el material semi-fundido es depositado sobre la plataforma comienza a enfriarse y adherirse mediante difusión. La difusión térmica expresa la velocidad de cambio y flujo de temperaturas en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Dicho proceso involucra, la mayor parte del tiempo, fenómenos de transferencia de calor acoplados al cambio de fase o condiciones reactivas [18].

La sección transversal del filamento depositado toma la forma de un elipsoide aplanado, resultado de la termofluencia del polímero al encontrarse entre la plataforma o un filamento antes depositado y la boquilla. Estas formas elipsoides son básicamente rectángulos con dos semicírculos unidos a los costados del filamento con el espesor de la capa como su diámetro. Se muestra en la figura 16 la sección transversal de una construcción.

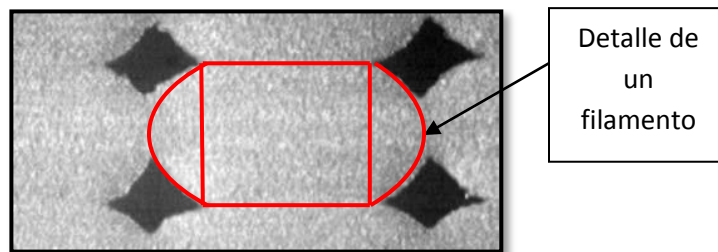


Figura 16. Sección transversal de los filamentos que conforman una construcción FDM [22].

La unión de los filamentos, en una misma capa y entre capas, se da debido a la energía térmica absorbida por el material plástico al momento de ser calentado y extruido [18]. La energía térmica absorbida por el material semi-fundido, se redistribuye en la construcción mediante el mecanismo térmico de conducción y es consumida por un enfriamiento convectivo lateral. La redistribución de la energía térmica asegura la adhesión en la interface de los filamentos depositados y genera la integridad estructural de la construcción. Existen límites en la magnitud de esta energía térmica. El límite superior surge del hecho que la viscosidad efectiva del material fundido depende

fuertemente de la temperatura cerca del punto de solidificación, por lo que un exceso de energía absorbido por el material bajará su viscosidad creando problemas de inestabilidad geométrica. El límite inferior, por su parte, es crítico para lograr una adherencia adecuada entre filamentos y capas, estando en función de los parámetros del proceso y del ambiente de construcción [18].

Yardimci *et al.* [18-20], explican a detalle las ecuaciones y condiciones de frontera para representar dicho fenómeno de transferencia de calor y proponen un modelo analítico en una dimensión para un único filamento, involucrando al espesor de la capa, ancho del filamento y temperatura de “curado”, término que hace referencia a la difusión molecular en la interface entre filamentos, por debajo de la cual las uniones dejan de ser efectivas. También proponen un modelo en dos dimensiones para el comportamiento físico de las interacciones filamento-filamento y filamento-capas. Thomas *et al.* (2000) [24], idealiza al filamento como un rectángulo y parte de una temperatura promedio entre boquilla y cámara. Su modelo se describe en función del espesor de capa, ancho del filamento, tiempo, calor específico, conductividad térmica y densidad del material. Otro modelo, el propuesto por Li *et al.* (2003)[23] emplea un análisis por capacitancia para describir al proceso de enfriamiento del filamento extruido, simplificándolo en un modelo transitorio de transferencia de calor en una dimensión, donde la sección transversal del filamento es representada como una elipse. La solución es dada en términos del ancho del filamento, espesor de capa, perímetro depositado y velocidad de deposición [22].

Sun *et al.* (2008)[22], validan los modelos de transferencia de calor antes mencionados y profundizan en la formación de las uniones entre filamentos. De acuerdo a su trabajo, la calidad de estas uniones depende del desarrollo de un cuello formado entre filamentos adyacentes, donde se presenta la difusión molecular y distribución aleatoria de las cadenas poliméricas a lo largo de la interface (Química de la superficie). Cabe mencionar que en un polímero amorfo, el movimiento de las cadenas está muy restringido por el acomodo de las cadenas contiguas. La formación de este cuello se muestra en la figura 17.

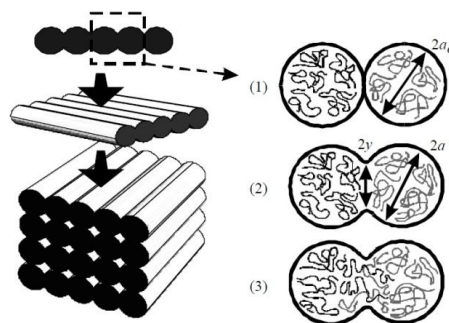


Figura 17. Proceso de formación de la unión entre dos filamentos: (1) superficies en contacto; (2) desarrollo de un cuello; (4) difusión molecular en la interface y distribución aleatoria [22].

Para predecir la formación del cuello de unión, Sun *et al.*, utilizan un modelo newtoniano de sinterizado combinado con predicciones obtenidas con el modelo, antes mencionado propuesto por Li *et al.* En el modelo de sinterizado, la dependencia de la viscosidad a la temperatura y tensión superficial (se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área) son consideradas, mientras que las propiedades térmicas como el calor específico, conductividad térmica y densidad se asumen constantes.

Por su parte, Bellehumeur *et al.* (2004), mencionan que la mayor parte del crecimiento del cuello sucede cuando la temperatura del filamento se encuentra por encima de una temperatura crítica de sinterizado, siendo ésta prácticamente el doble que la T_g (Temperatura de transición vítrea) para un polímero como el ABS. Dicha condición se presenta solo durante unos pocos segundos después de la deposición del filamento en la plataforma, dándose crecimiento adicional del cuello mientras los filamentos se encuentren por encima de la T_g [22]. La figura 18 muestra un perfil de temperaturas en la base de una construcción.

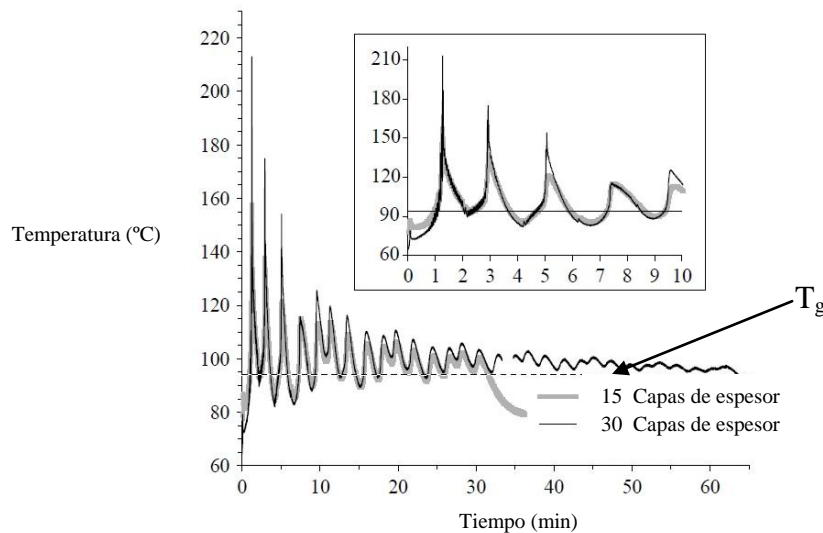


Figura 18. Perfil de temperaturas obtenido por Sun *et al.*, en la base de una construcción de forma rectangular; los cambios de temperatura son debidos a las trayectorias del cabezal extrusor [22].

Dentro de una construcción, la temperatura de los filamentos se mantiene por encima de la T_g relativamente un largo periodo de tiempo. La temperatura de los filamentos de las capas inferiores o base aumenta periódicamente por encima de la T_g con la deposición de cada capa adicional, lo que confirma la importancia de la transferencia de calor mediante conducción dentro de la estructura, es decir, el calor transferido mediante conducción de los filamentos de las capas superiores afecta el comportamiento de las uniones de las capas inferiores [22].

Así pues, la historia térmica, es decir, la velocidad de enfriamiento del filamento una vez que sale de la boquilla, tiene repercusiones importantes en la mesoestructura final (estructura a nivel del filamento extruido) y la resistencia de las uniones. La estrategia de deposición de los filamentos es un factor importante en dicho proceso, ya que la temperatura en diferentes partes dentro de una construcción cambia según el movimiento del cabezal extrusor debido a que la temperatura de éste es mucho mayor a la de la cámara de deposición. Es de esperarse que tanto la geometría de la pieza como el movimiento del cabezal extrusor para seguir las trayectorias, influyan en la velocidad de enfriamiento de la construcción [22]. Se muestra en la figura 19 los efectos de la estrategia de deposición en el tiempo de enfriamiento.

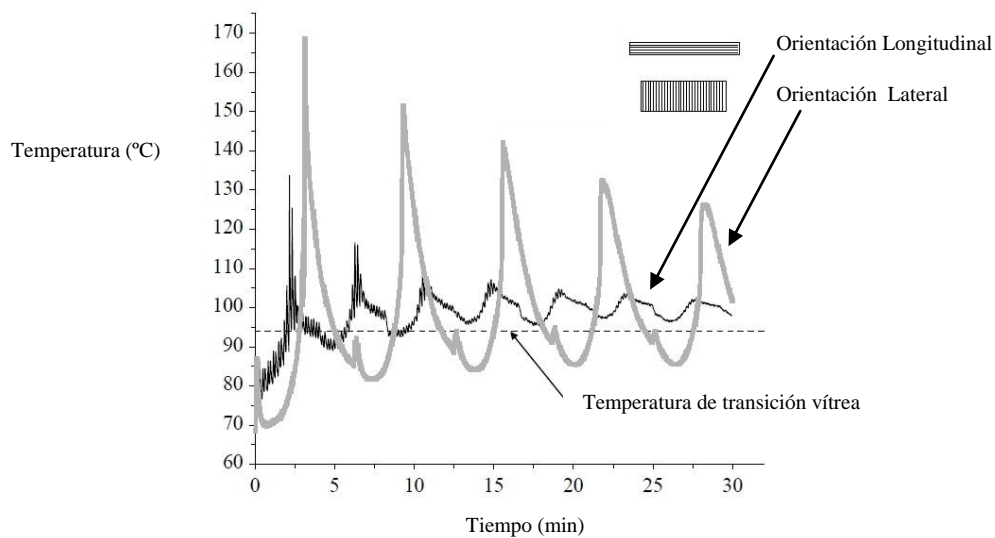


Figura 19. Efectos de la estrategia de deposición (orientación de los filamentos) en el perfil de temperaturas de enfriamiento [22].

Otro factor importante es la temperatura dentro de la cámara. Esta temperatura es controlada por el calentamiento y circulación de aire encapsulado lo que provoca una distribución de temperaturas homogénea pero un flujo de aire poco uniforme [22]. Tanto la temperatura de la cámara de deposición como las variaciones en sus condiciones convectivas afectan fuertemente la mesoestructura y sobre todo, la calidad en la resistencia de las uniones entre filamentos [22]. Los perfiles de temperatura y la resistencia mecánica de las piezas varían significativamente con el cambio de posición dentro de la cámara. Hasta un 20% de menor resistencia, obtenido en la posición 1 con respecto a la posición 9, fueron reportado por Sun *et al.* [22], en un arreglo como el mostrado en la figura 20.

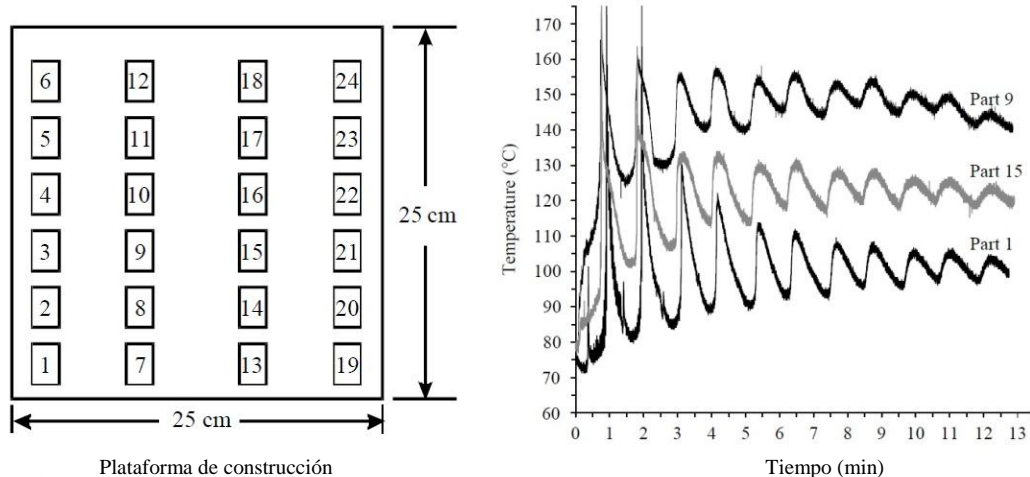


Figura 20. a) Izquierda, vista de planta de la plataforma de construcción, con acomodo específico dentro de la cámara; b) derecha, variaciones en el perfil de temperaturas según posición [22].

3.2 Parámetros de Manufactura

La tecnología FDM necesita procesar información geométrica para convertirla en trayectorias de construcción y comandos de instrucciones para la máquina. El proceso comienza con un modelo sólido en tres dimensiones del objeto a construir en formato STL, para después ser computacionalmente traducido a una descripción por medio de capas. Esta representación del modelo en capas es utilizada para generar las trayectorias de deposición que seguirá el cabezal extrusor y demás comandos necesarios para que la máquina deposite los filamentos con las condiciones requeridas por la tecnología. Dichas condiciones se dividen, dentro de este trabajo, en parámetros pre-establecidos y en parámetros de manufactura por capa, acorde a las posibilidades que actualmente poseen las máquinas Fortus® y el programa de cómputo especializado *Insight* versión 8.1.

Los parámetros de proceso pre-establecidos, los cuales fueron abordados dentro de los fenómenos físicos involucrados en el proceso, y que no cuentan con la posibilidad de ser modificados dentro de *Insight* se enlistan a continuación:

Parámetros pre-establecidos en el sistema.

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

Así pues, estos parámetros son supeditados a la elección de los materiales; cada tipo de material requiere de parámetros específicos de procesamiento, es por ello que al

momento de su elección, el sistema automáticamente establece las temperaturas del proceso y la velocidad de deposición acorde a los características reológicas del polímero, lo que también limita el tamaño de boquilla para lograr la extrusión dentro de los intervalos funcionales del proceso.

Los materiales de soporte se dividen en dos tipos: solubles y básicos; estos últimos deben ser arrancados de la construcción una vez terminada la pieza. No todos los materiales de modelo son compatibles, hasta el momento, con materiales de soporte solubles, lo cual limita las posibilidades geométricas alcanzables ya que, al momento de remover el material de soporte, la pieza podría dañarse o simplemente no permitir el acceso para la remoción del soporte. La tabla 2 muestra los materiales de modelo, el tamaño de boquilla para su extrusión y el tipo de material de soporte compatible.

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

Tabla 2. Material de modelo, tamaños de boquilla disponible para su extrusión y tipo de material de soporte disponible.

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

Parámetros de manufactura por capa.

- Espesor de capa.

Las capas son delgadas secciones transversales horizontales (plano x-y) resultantes de rebanar (laminar) el modelo según su orientación y espesor seleccionado. La figura 21 muestra como *Insight* secciona un modelo en capas.

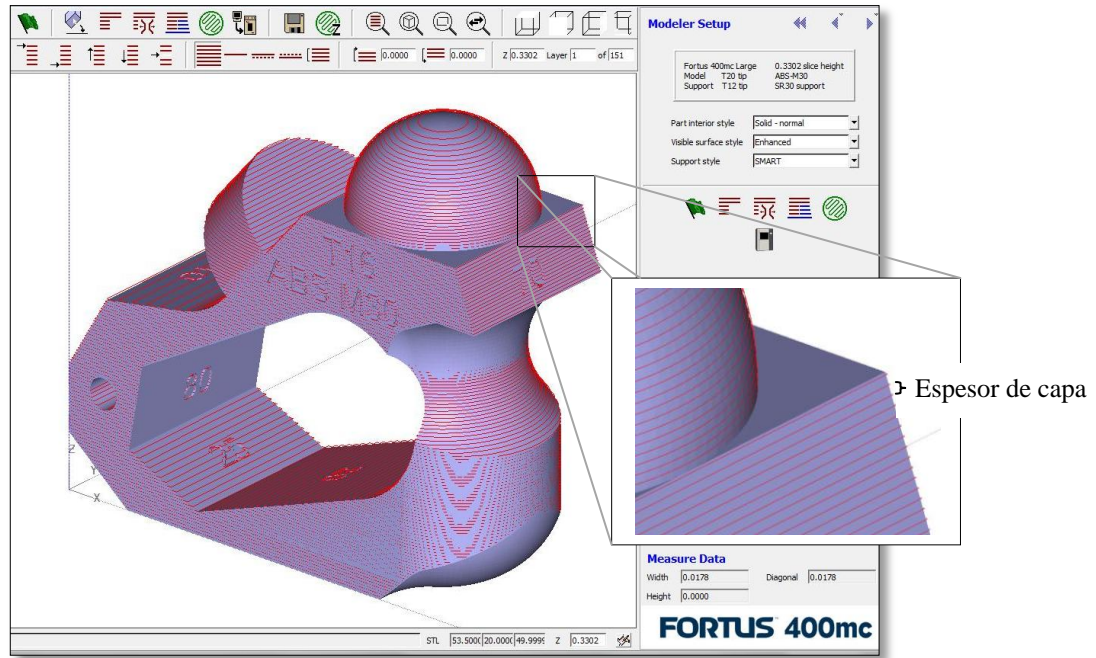


Figura 21. Capas (líneas rojas) generadas dentro de *Insight* para un modelo.

Cada tamaño de boquilla se encuentra configurada en el sistema para extruir un solo espesor de capa. En la tabla 3 se muestra el tamaño de boquilla con espesor de capa correspondiente para las máquinas Fortus®.

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

Tabla 3. Tamaño de boquilla y espesor de capa correspondiente.

- Orientación.

La orientación de un modelo está en función de su geometría y define el área proyectada (plano x-y) y la altura (eje z). Esta orientación específica de construcción influye en el tiempo de manufactura, cantidad de material de modelado y soporte, acabado superficial y precisión dimensional [40]. Así pues, la orientación determina el número de capas a depositar, es decir, entre mayor sea la altura mayor será el número de capas de un espesor determinado. En la figura 22 se muestran dos orientaciones distintas para un mismo modelo y el material de soporte que ambas requieren.

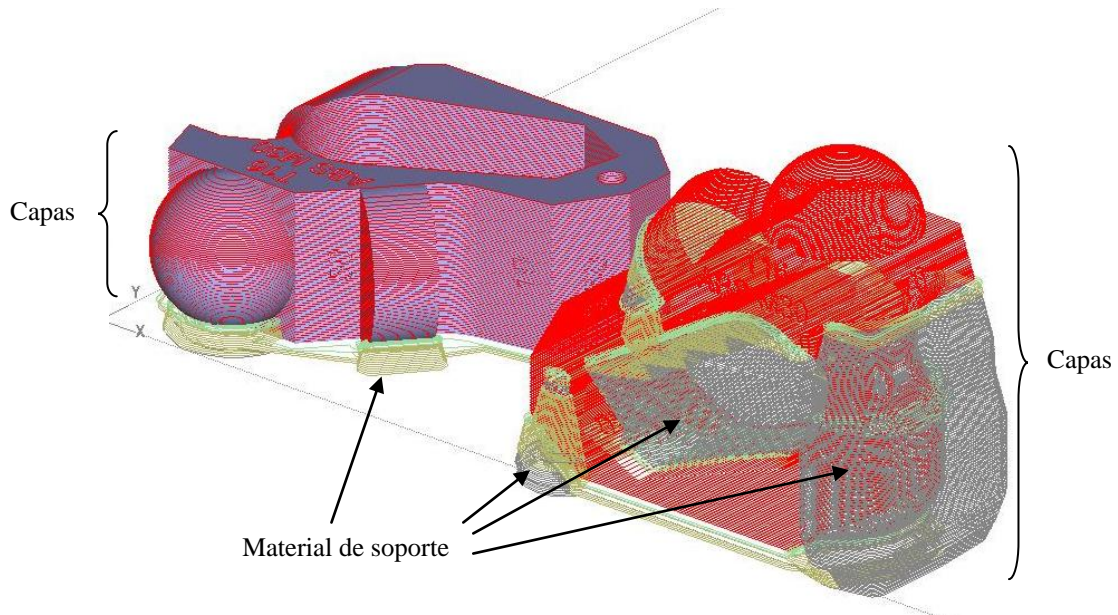


Figura 22. Distintas orientaciones para un mismo modelo y sus repercusiones en el número de capas y material de soporte requerido.

- Estilo de soporte.

El soporte es todo aquel material necesario para la construcción del modelo pero que no forma parte de su geometría. La cantidad de material y las trayectorias en que es depositado son calculadas automáticamente por *Insight* de acuerdo al estilo de soporte seleccionado. Existen 5 estilos: básico, espaciado, romper-remover, envolvente y adaptativo (*smart*); enfocados cada uno de ellos para cumplir con los requerimientos que imponen el tipo de material de soporte (soluble o no) y la geometría del modelo.

Cabe mencionar que en las máquinas Fortus® existe una metodología de calibración entre la boquilla de modelo y la de soporte, donde la posición relativa de la boquilla de soporte en los tres ejes debe ser ajustada. Lo anterior debido a que un sólo diámetro de boquilla de soporte ajusta su flujo volumétrico para cumplir con las características de deposición de diferentes boquillas de modelo, cada una con un diámetro específico. Las características propias de los materiales de soporte, así como la pericia del operador, influyen en la exactitud de la calibración y el tiempo que consume en cada cambio de boquillas.

- Ancho de filamento.

Es el ancho con que el filamento depositado (*raster* en inglés) sigue las trayectorias para formar el contorno y llenar una región interna. En la figura 23 se muestra la representación de una posible estrategia para depositar una capa y las características de las trayectorias de depósito.

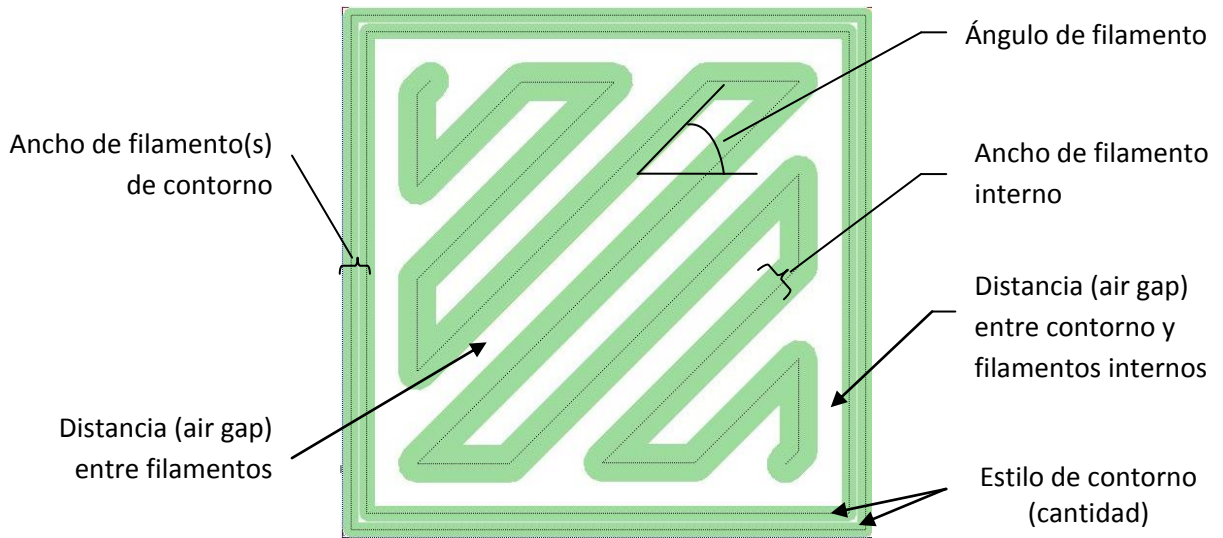


Figura 23. Características de los filamentos depositados en una capa [51].

Cada tamaño de boquilla posee un intervalo específico de anchos de filamentos que es capaz de depositar en función al material de modelo. La tabla 4 muestra los materiales, el tamaño de boquilla y el intervalo de anchos de filamentos que es capaz de extruir.

MATERIAL	T10	T12	T16	T20
ABS-M30 ABSi ABS-M30i PC-ABS	0.2032-0.5782	0.3048-0.7298	0.4064-0.8314	0.4572-0.9822
PC PC-ISO		0.254-0.679	0.4064-0.8814	0.4572-0.9822
ABS-ESD7		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 4. Anchos de filamento para cada tamaño de boquilla.

También el tamaño de boquilla, en función al ancho de filamento que es capaz de extruir, limita a la tecnología a construir partes con paredes de espesor mínimo recomendado. Este espesor, como se muestra en la tabla 5, es generalmente el doble del ancho mínimo de filamento capaz de ser extruido por la boquilla, es decir, la tecnología requiere que existan dos filamentos (ida y vuelta) por pared para lograr construcciones confiables.

Espesor de pared		
Boquilla	Espesor de capa	Espesor mínimo de pared
T 10	0.127mm	0.41mm
T 12	0.178mm	0.61mm
T 16	0.254mm	0.81mm
T 20	0.330mm	0.81mm

Tabla 5. Espesores de pared mínimos recomendados por Stratasys, Inc. [15].

- Estilo de contorno.

Es la cantidad de filamentos depositados para conformar el exterior de la sección transversal. Se muestran en la figura 24, diferentes estilos de contorno en una sección cuadrada, conservando misma distancia entre contorno y filamentos internos.

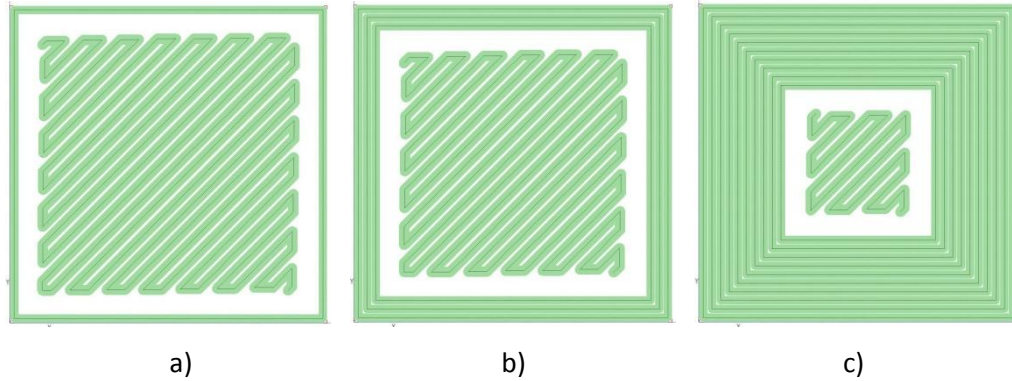


Figura 24. Tres posibles estilos de contorno a) 1 contorno, b) 3 contornos y c) 10 contornos.

- Distancia entre filamentos.

Es la distancia (*air gap*) entre dos filamentos adyacentes en una misma capa. En la figura 25 se muestran las posibilidades del *air gap*.

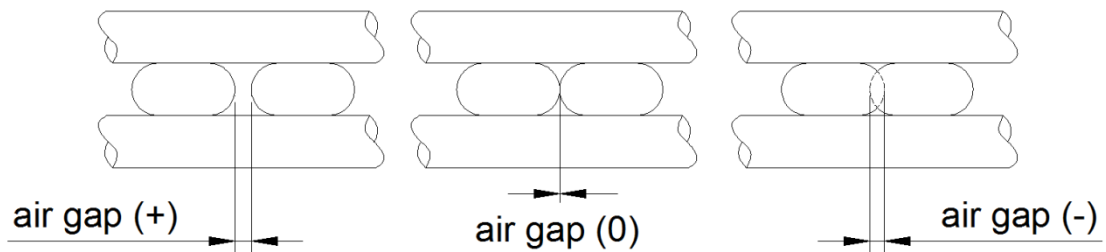


Figura 25. Posibles configuraciones de distancia entre filamentos (*air gap*) dentro de una construcción FDM.

- Estilo de llenado.

Existen tres tipos de llenado interior pre-definidos dentro del Insight para construir una pieza: Sólido-normal (Solid-normal), Espaciado (Sparse) y Espaciado doble-densidad (Sparse-double dense).

El estilo sólido-normal es un llenado sin espacios (*air gap*) entre filamentos adyacentes, donde los filamentos se depositan perpendicularmente a los depositados en la capa anterior. El estilo espaciado es un llenado hueco con una distancia determinada entre filamentos, formando solo una red interna unidireccional para otorgar rigidez

estructural a la pieza. El estilo denso espaciado-doble es un llenado similar al espaciado con la diferencia de ser conformado por filamentos bidireccionales en cada capa. La figura 26 muestra, de manera general, los tres estilos de llenado.

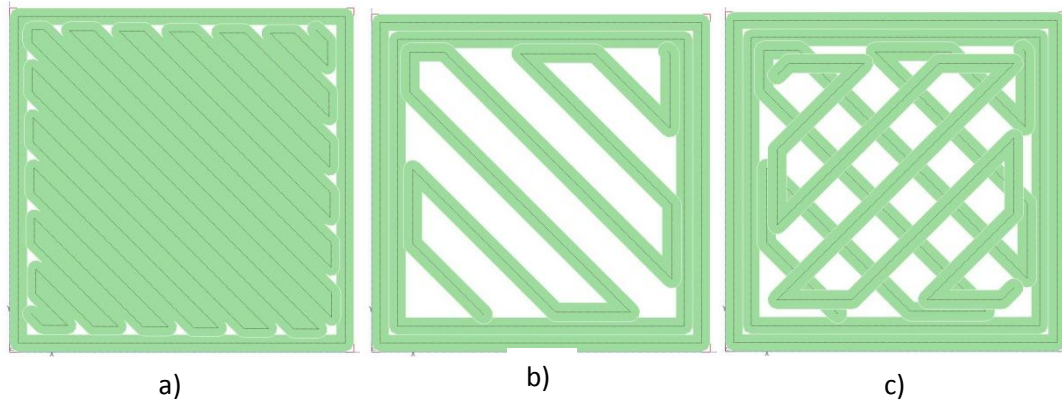


Figura 26. Estilos de llenado a) sólido, b) espaciado y c) espaciado, doble-densidad [51].

- Estilo visible de superficie.

Dentro de *Insight* existe la opción para elegir entre un acabado superficial normal y un acabado superficial mejorado. Mientras que en el estilo normal solo se pueden elegir los anchos de filamentos de contorno e internos, dejando al descubierto los huecos generados por los cambios de dirección en el llenado interior, en el estilo mejorado se cuenta con opciones para elegir los anchos de filamentos que permanecerán visibles debido al efecto de escalonamiento generado por la inclinación de la superficie. La figura 27 muestra la diferencia entre los dos estilos visibles de superficie.

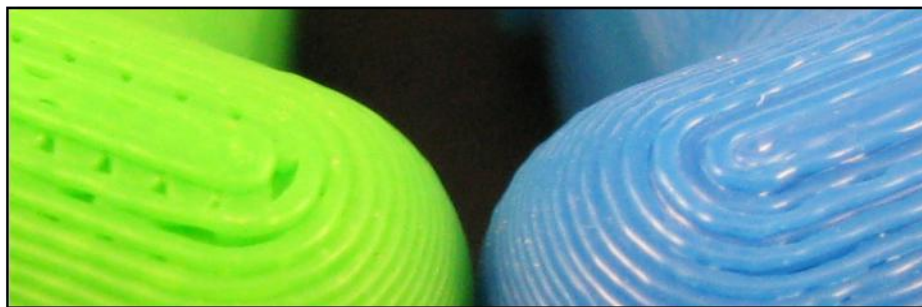


Figura 27. Comparativo entre estilos de superficie. Construcción de color verde en estilo normal, se notan los espacios vacíos provocados por los cambios de dirección de los filamentos internos. Construcción en color azul estilo de superficie mejorado. Imagen tomada de la guía técnica de aplicación para piezas de uso final, Stratasys, Inc. [43].

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

- Ángulo de filamento.

Es la dirección del filamento con relación al eje “x” de la plataforma de construcción. Ver figura 23.

3.3 Características de las Construcciones

Existen en la literatura investigaciones dirigidas a determinar la influencia de los parámetros de manufactura en las características de las piezas construidas por la tecnología FDM. La intención de esta sección es mencionar las características de mayor relevancia en las construcciones y los parámetros de manufactura por capa asociados.

3.3.1 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de las construcciones FDM son gobernadas por su mesoestructura, es decir, la interacción entre filamentos y su arreglo. La mesoestructura a su vez es determinada por los parámetros de manufactura por capa, lo cual otorga a la tecnología la habilidad de fabricar partes con propiedades localmente controladas mediante el cambio de densidad (estilo de llenado) [21]. Para el aprovechamiento de estas propiedades inducidas existen características inherentes a las construcciones que deben ser consideradas tanto en el diseño de la parte como en el proceso de manufactura.

- Anisotropía y resistencia.

Said *et al.* (2000) [11], mostraron que la orientación o ángulo de filamento causa alineamiento en las moléculas del polímero a lo largo de la dirección en que son depositados, por lo que la resistencia a la tracción, a la flexión y al impacto dependen de la orientación de construcción. Ahn *et al.* (2002) [13], realizaron pruebas comparativas entre probetas construidas con la tecnología FDM en material ABS y una probeta del mismo material generada mediante el proceso de moldeo por inyección de plástico, encontrando que el ángulo de filamento y la distancia entre filamentos (air gap) son los parámetros de mayor influencia. La figura 28 muestra la comparativa entre las probetas al ser sometidas a una prueba de tracción.

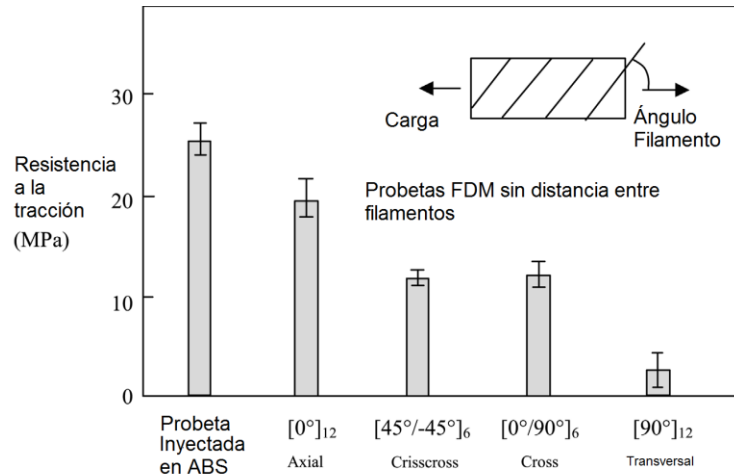


Figura 28. Resultado de las pruebas de tracción a probetas FDM construidas en ABS con distintas orientaciones y sin distancia entre filamentos comparadas con una probeta inyectada [13].

De la figura 28 podemos observar que la probeta construida con los filamentos orientados en sentido axial a la carga, es decir, orientada a 0°, donde la resistencia de la probeta es la de los filamentos en sí mismos, resulta ser significativamente la orientación que ofrece mayor resistencia con respecto a la probeta orientada a 90°, donde la resistencia medida es la de las uniones entre filamentos; sin embargo, la mayor resistencia obtenida con la tecnología FDM muestra ser un 25% menor a la obtenida por la probeta moldeada por inyección.

Por su parte, una distancia negativa entre filamentos (air gap) incrementa la resistencia mecánica, aunque distancias menores a -0.07mm no deben ser utilizadas, ya que provocan distorsión geométrica [13]. En la figura 29 se muestra como una distancia negativa de -0.07mm influye de distinta forma según el ángulo del filamento depositado en la resistencia a la tracción.

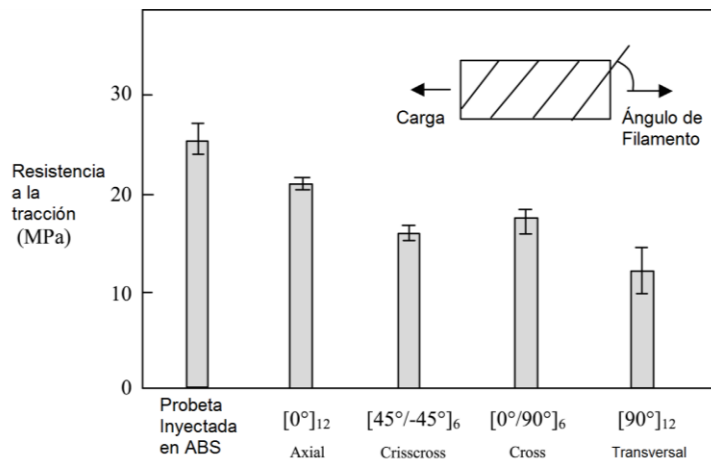


Figura 29. Resultado de las pruebas a tracción en probetas FDM construidas en ABS con gap negativo comparadas con una probeta inyectada [13].

La resistencia a la compresión, mostrada en la figura 30, resulta menos afectada por la orientación de construcción y, aunque es mayor que la resistencia a la tracción, continúa siendo entre un 10 y 20% menor a la resistencia obtenida por la probeta moldeada por inyección.

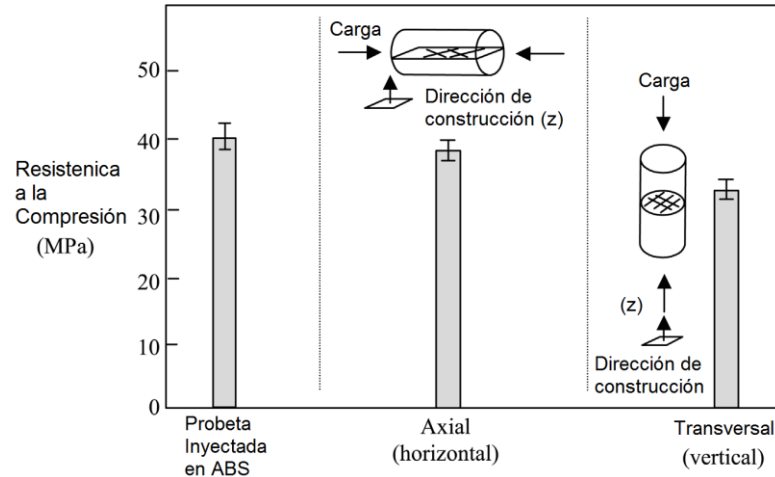


Figura 30. Resultado de las pruebas a compresión en probetas FDM construidas en ABS comparadas con una probeta inyectada [13].

Bagsik *et al.* (2010) [26], realizaron estudios similares a los anteriores en los que mostraron diferentes características de las curvas esfuerzo-deformación en probetas elaboradas con material Ultem*9085 (PEI) sometidas a ensayos de tracción. Las curvas muestran dependencia de la estructura como resultado de la orientación de construcción. La figura 31 y 32 muestran las orientaciones de construcción de las probetas y las curvas resultantes, respectivamente; las probetas fueron construidas utilizando los parámetros de manufactura por capa pre-establecidos dentro del programa de cómputo especializado *Insight*.

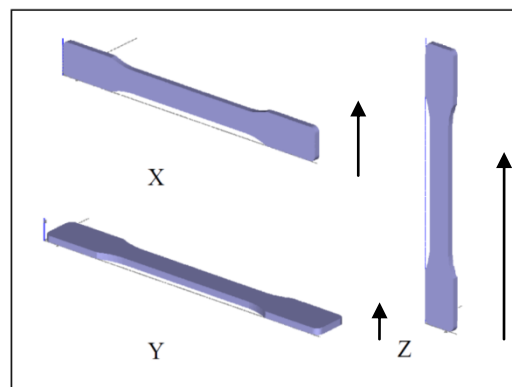


Figura 31. Orientación de construcción de las probetas para pruebas de tracción [26].

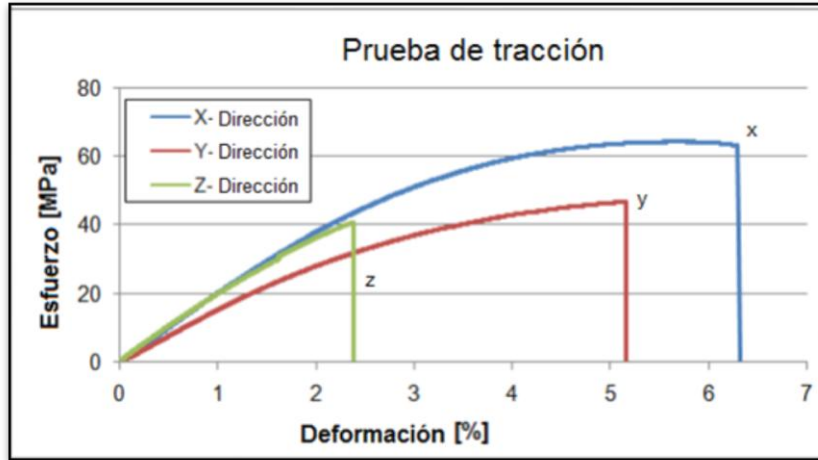


Figura 32. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las distintas orientaciones de construcción en la probetas elaboradas con Ultem*9085 [26].

El esfuerzo máximo a la tracción fue el obtenido por la probeta construida en dirección “x” con un valor de 63MPa y una elongación máxima a la fractura de 6.4%. Posteriormente, Bagsik *et al.* (2011) [27], utilizando las mismas orientaciones de construcción y realizando modificaciones en el ángulo del filamento, ancho de filamento y distancia entre filamentos, encontraron que la probeta orientada en dirección “x”, con ancho de filamento de 0.7mm (grosso), ángulo de filamento a 0 grados, distancia entre filamentos internos de -0.025mm y distancia entre filamentos y contorno de -0.06mm, resulta ser la de mayor resistencia a la tracción con un valor de 81MPa. Lo anterior se muestra en la figura 33.

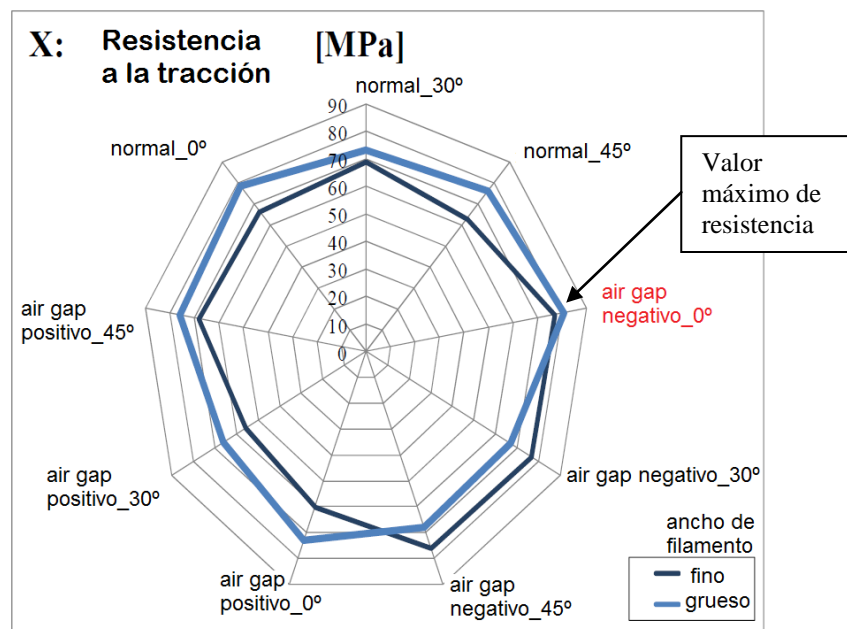


Figura 33. Resistencia a la tracción de la probeta construida con orientación en “X” a distintos parámetros de manufactura por capa [27].

Resulta interesante señalar que el valor máximo del esfuerzo a la tracción proporcionado por el fabricante de la tecnología para el material Ultem*9085 es de 71MPa, y que acorde a las investigaciones antes descritas, la elección de una orientación de construcción adecuada junto con los parámetros de manufactura por capa correctos, logran alcanzar una resistencia de hasta 81MPa. Lo anterior es importante, ya que bajo dichas condiciones, la resistencia máxima a la tracción de una probeta construida mediante la tecnología FDM en comparación con una probeta obtenida mediante el proceso de moldeo por inyección de plástico, con resistencia máxima a la tracción de 84MPa, es tan solo un 4% menor.

Por su parte, Sood *et al.* (2010) [28], también realizaron experimentos para estudiar la influencia del espesor de capa, orientación, ángulo de filamento, ancho de filamento y distancia entre filamentos en la resistencia a la tracción, flexión e impacto. De los cuales concluyeron que los parámetros de manufactura por capa no pueden ser seleccionados independientemente, ya que la interacción entre ellos juega un rol importante en las propiedades mecánicas de las construcciones. Generando una serie de explicaciones con respecto a la tecnología, sus parámetros de manufactura y las propiedades mecánicas, lo que se incluye a continuación.

- El número de capas en una pieza depende del espesor de capa y la orientación de la pieza. Si el número de capas es mayor, resultará en gradientes de temperatura mayores, lo cual aumenta la difusión entre filamentos adyacentes dando como resultado una mayor resistencia. Sin embargo, gradientes de temperatura altos también causan distorsión dentro de una capa o entre capas, es decir, aumentar el número de capas incrementa el número de ciclos térmicos (calentar y enfriar) lo que provoca acumulación de esfuerzos residuales y, por lo tanto, distorsión, fracturas entre capas (delaminación) o fallas en la fabricación, resultando así una disminución de la resistencia.
- Ángulos de filamento pequeños resultan en filamentos largos lo que aumenta la acumulación de esfuerzos a lo largo de la dirección de depósito teniendo como resultado distorsión y por lo tanto uniones débiles. Aunque, ángulos de filamentos pequeños también significa que los filamentos están inclinados a lo largo de la dirección de la carga y por ello ofrecerán mayor resistencia.
- Filamentos anchos resultan en acumulación de esfuerzos a lo largo del ancho de la construcción y tienen el mismo efecto que los filamentos largos. Sin embargo, esta acumulación de esfuerzos resulta en mayores temperaturas cerca de las superficies de contacto, lo que promueve la difusión molecular y resulta en la formación de uniones más fuertes.
- Una distancia entre filamentos de cero o menor, mejora la difusión entre filamentos adyacentes pero puede disminuir la capacidad para disipar el calor así como disminuir el área total para formar la unión.

Cabe reiterar que son diversas las investigaciones respecto a las características mecánicas de las construcciones FDM, como las realizadas por Khan *et al.* (2005) [12], donde se determinaron los factores con mayor influencia en el comportamiento elástico y flexible de una construcción. Los estudios realizados por Ang *et al.* (2006) [29], donde se investiga la relación entre la porosidad y las propiedades mecánicas. La investigación realizada por Galantucci *et al.* (2010) [30], donde se muestra como un post-proceso químico disminuye levemente la resistencia a la tracción. Los referentes a estructuras topológicamente optimizadas y la resistencia a la compresión [31], además de investigaciones respecto a estructuras internas paramétricamente reconfigurables y las propiedades mecánicas que éstas alcanzan [32]. Recientemente, Stratasys, Inc. caracterizó las propiedades mecánicas de algunos de sus materiales (estas caracterizaciones son realizadas en probetas construidas con tamaño de boquilla T12), donde también se consideran aspectos como la temperatura y el envejecimiento, sin dejar de puntualizar en que la orientación y los parámetros de manufactura alteran las propiedades mecánicas [7]. Así pues, será necesario generar una búsqueda específica si se requiere de una mayor especialización.

3.3.2 Características Superficiales y Geométricas

Como proceso de Manufactura Aditiva, la tecnología FDM construye partes con acabado superficial rugoso, con valores entre 8 y 50 Ra (μm), como resultado de unir capas. Este defecto se vuelve excesivo en cualquier superficie inclinada lo que comúnmente se conoce como “Efecto de escalonamiento” [6]. En la figura 34 se muestra el efecto de escalonamiento.



Figura 34. Efecto de escalonamiento en las construcciones FDM.

También existen las características superficiales y geométricas asociadas a la generación de los archivos STL, donde dependiendo de la complejidad de las superficies, los programas computacionales especializados incurren en 4 tipos de problemas: espacios vacíos, caras encimadas, degeneración de caras con bordes colineales y redondeos durante el teselado [34]; lo anterior, junto con los fenómenos de distorsión geométrica debido a los esfuerzos térmicos residuales, repercuten directamente en la exactitud dimensional obtenida en las construcciones.

- Acabado Superficial

Existen investigaciones experimentales y teóricas para evaluar y predecir la rugosidad superficial mediante el parámetro de rugosidad promedio (R_a , media aritmética). Vesudevarao *et al.* (2000)[35], mostraron que el espesor de capa y la orientación de construcción tienen un efecto significativo en la rugosidad y proponen una ecuación para calcular la rugosidad promedio. Anitha *et al.* (2001)[14], utilizando el método Taguchi, examina el efecto de parámetros como espesor de capa, ancho de filamento y velocidad de construcción, determinando que el parámetro de manufactura con mayor influencia en la rugosidad es el espesor de capa. Galantucci *et al.* (2009)[33], señalan 4 categorías de estudio enfocadas a mejorar las características superficiales: orientación óptima de construcción, estrategia de rebanado (slicing en el idioma inglés), optimización de los parámetros de manufactura y aplicación de post-procesos, además estudian los efectos de algunos parámetros de manufactura y, de como un post-proceso químico económico aplicado en el ABS, aporta mejoras significativamente mayores en la rugosidad comparado con una posible optimización de los parámetros de manufactura. También señalan que Stratasys Inc., fabricante de la tecnología, ofrece sistemas de acabado semi-automático, pero que estos resultan muy costosos.

Por su parte, Ahn *et al.* (2009) [6] generan un modelo teórico de la rugosidad en función al ángulo de construcción de la superficie, el espesor de capa y la sección transversal del filamento (forma elíptica). La figura 35 muestra el planteamiento del modelo.

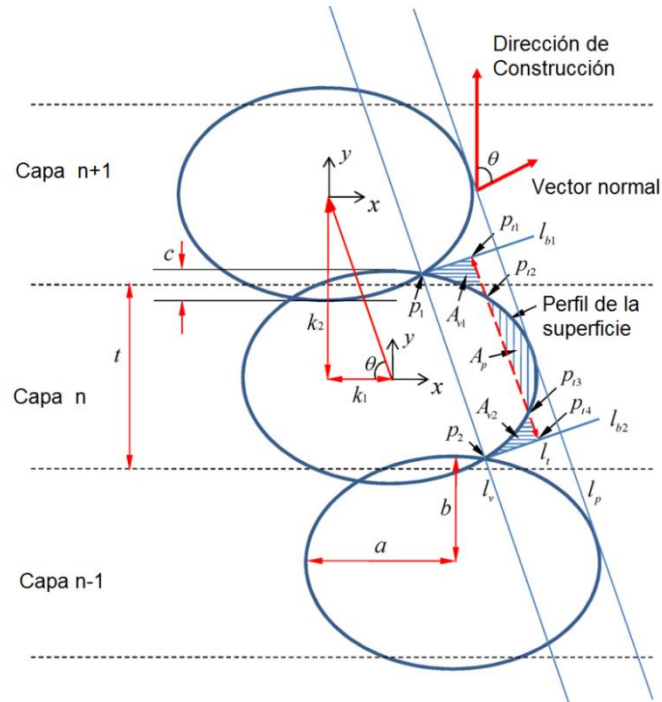


Figura 35. Representación del modelo de perfil para superficies FDM propuesto por Ahn *et al.* [6].

En este modelo se puntualiza en la existencia de una “región indeterminada”, comprendida entre los ángulos de 0 a 30° y de 150 - 180° con respecto a la horizontal, donde las mediciones obtenidas en una construcción son extremadamente diferentes debido a que no se presenta una intersección entre filamentos. La figura 36 muestra dos representaciones de un caso de no intersección entre filamentos.

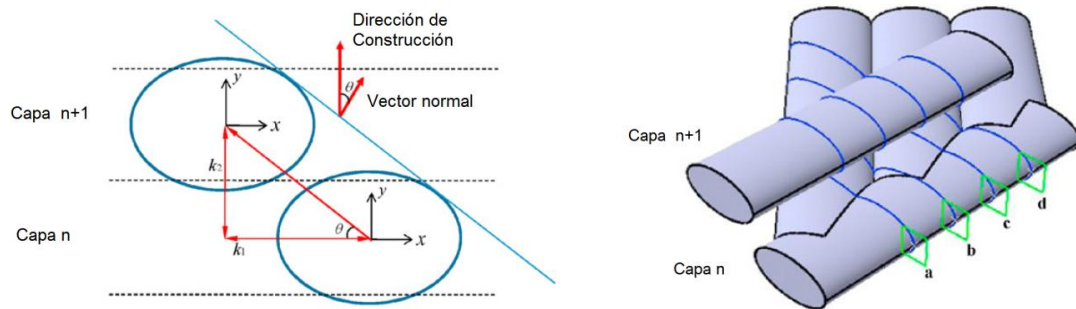


Figura 36. Representaciones del caso donde no existe intersección entre filamentos [6].

De acuerdo a sus mediciones, el valor de la rugosidad promedio en superficies cercanas a 90 grados, son comparativamente menores a los obtenidos por superficies a otros ángulos de construcción. La figura 37 muestra las mediciones obtenidas en su investigación.

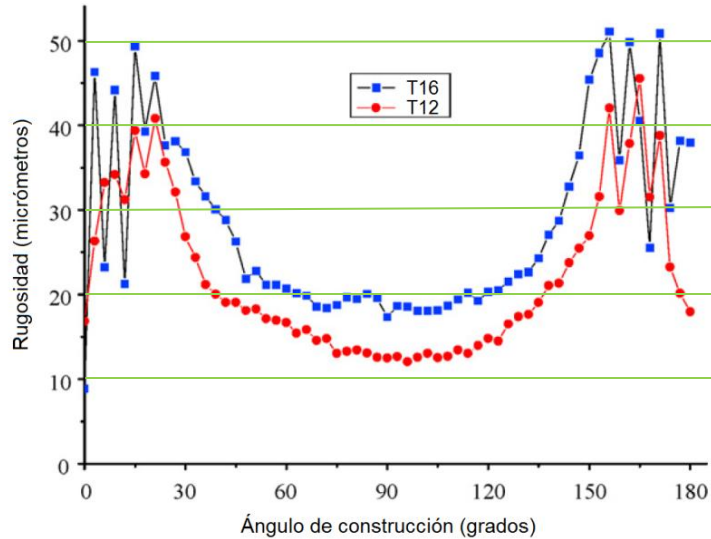


Figura 37. Mediciones de rugosidad obtenidas para dos espesores de capa distinto [6].

Boschetto *et al.* (2012) [34], dentro de los parámetros de manufactura que estudia incluye además de la inclinación de la superficie y el espesor de capa, el método de soporte y el estilo de llenado, con resultados que confirman al ángulo de construcción como el factor de mayor influencia seguido por el espesor de capa. Muestran que las variaciones de rugosidad respecto al espesor de capa son estables para ángulos de construcción entre 45 y 90 grados.

En su trabajo señalan que el soporte modifica la geometría y, por lo tanto, el acabado superficial de la construcción, ya que el material de modelo se deposita sobre filamentos de soporte ya solidificados. También mencionan que el método o estilo de soporte en modo circundante produce defectos en la construcción debido a la contracción térmica que sufre.

- Precisión Dimensional

Pennington *et al.* (2003)[36], investigaron los factores que influyen en la precisión dimensional de las construcciones FDM, mostrando que el tamaño de la pieza, su posición y la temperatura dentro de la cámara afectan significativamente. Jiang *et al.* (2004)[37], realizan estudios de los fenómenos físicos del proceso de extrusión y reportan que los parámetros de manufactura son críticos en la precisión de las construcciones. Zhang *et al.* (2006)[38], investigan los fenómenos térmicos y mecánicos de la tecnología, generando un modelo para predecir los esfuerzos residuales y evaluar la distorsión geométricas en las construcciones. Concluyen que de los tres parámetros estudiados en su investigación: espesor de capa, ancho de filamento y velocidad de deposición, es la velocidad de deposición el de mayor influencia en los

esfuerzos residuales seguida por el espesor de capa. Así mismo, señalan que la interacción entre el espesor de capa y ancho de filamento influye en la distorsión de la construcción, es decir, a mayor espesor de capa y ancho de filamento, aumentará la acumulación de esfuerzos térmicos y, por lo tanto, la distorsión geométrica.

Sood *et al.* (2009)[39], puntualizan la necesidad de un estudio profundo para entender los parámetros de manufactura y los efectos de su interacción en la precisión dimensional con respecto a diferentes direcciones de construcción. En su investigación utilizan el método Taguchi para seleccionar los parámetros óptimos y minimizar la imprecisión dimensional, incluyendo parámetros como: espesor de capa, orientación de construcción, ángulo de filamento, ancho de filamento y distancia entre filamentos (air gap). Los resultados obtenidos muestran que la contracción o distorsiones de la pieza son dominantes a lo largo y ancho de la construcción, mientras que en la altura o espesor siempre se obtienen valores mayores a los nominales. Su investigación sugiere que un espesor de capa de 0.178 (boquilla T12), una orientación de 0°, un ángulo de filamento de 0°, un espesor de filamento de 0.456mm y una distancia entre filamentos de 0.008mm son los parámetros que producirán una mejora en la precisión dimensional de una construcción FDM.

Por su parte, Stratasys, Inc. (2009) [41], analiza la exactitud, precisión y repetitividad de sus máquinas Fortus® con objeto de confirmar sus tolerancias publicadas. Utilizando como material el ABS-M30, espesor de capa 0.25mm, estilo de llenado sólido, ancho de filamento 0.51mm y ángulo de filamento a 90° intercalado entre las capas, mostraron lograr tolerancias, en una pieza de 127x76x14mm, dentro de un intervalo ± 0.13 mm (400mc) y ± 0.09 mm (900mc) consistentes en toda la plataforma de construcción.

3.3.3 Infiltración

Lam *et al.* (2008) [41], investigan la influencia de diferentes parámetros de manufactura en la propiedades mecánicas de las construcciones FDM. Realizan estudios relacionados con la infiltración donde muestran que las características intrínsecas del proceso FDM producen un comportamiento de capilaridad en las construcciones. Puntualizan que dicho comportamiento en función de la aplicación, puede llegar a ser de utilidad, sin embargo, las construcciones FDM no deben ser utilizadas directamente como depósito o conducto de fluidos sin haber sido sometidas antes a un post-proceso.

Existen investigaciones relacionadas a los post-procesos de sellado, entre las que se encuentran las realizadas por la Universidad de El Paso Texas en conjunto con Stratasys, Inc. (2011) [42], donde señalan la necesidad de eliminar los vacíos

(porosidad) y reforzar las uniones entre filamentos para producir partes impermeables. Realizan un estudio de infiltración en cubos sólidos con objeto de determinar el tiempo requerido para su saturación mediante una relación que incluye el cálculo del volumen de porosidad. Este volumen de porosidad, V_p , es calculado mediante la siguiente relación:

$$V_p = m_p / \rho$$

Donde m_p es la masa de porosidad calculada por la diferencia entre la masa ideal (sin porosidad) y la masa real de la pieza. La masa ideal es calculada del modelo en CAD, multiplicando el volumen obtenido por el programa computacional especializado (SolidWorks) por la densidad del material ABS-M30 (1.04 gr/cm^3).

4. Pruebas, Resultados y Análisis de Resultados

El presente capítulo consta de cuatro secciones, cada una de ellas integrada por una serie de pruebas dirigidas a cumplir con los objetivos planteados en el segundo capítulo. En la primera sección se busca establecer de manera clara la mecánica de la deposición, es decir, la relación que guarda el tamaño de boquilla con respecto a la velocidad de deposición y, por lo tanto, al flujo volumétrico. Para ello se eligió una geometría simple que permitió generar, de manera sencilla, un gran número de simulaciones para evaluar los tiempos de construcción a diferentes áreas, volúmenes y parámetros de manufactura por capa.

Para la segunda sección se diseñó una pieza patrón conteniendo diversos ángulos que, al ser construidos con diferentes tamaños de boquilla, arrojarán información acerca del acabado superficial y valor angular de la construcción. Con lo anterior se busca aportar al diseñador y/o usuario de la tecnología un parámetro de comparación para la elección del tamaño de boquilla y orientación de construcción, además de sensibilizarlo con respecto al acabado superficial que logra la tecnología en distintos ángulos y a distintos tamaños de boquilla.

En la tercera sección de este capítulo se realizan una serie de simulaciones y construcciones de una misma pieza con características de bajas dimensiones para mostrar cómo influye el ancho de filamento, a un espesor de capa constante, en el llenado y en la distorsión geométrica de áreas pequeñas, donde la carga térmica juega un papel importante.

Por último, en la cuarta sección, se realizaron pruebas para mostrar la influencia de la orientación de construcción en los fenómenos de permeabilidad y filtración, para lo cual se diseñaron y construyeron pipetas de pared constante. Lo anterior debido a que la orientación de construcción es, acorde a la mayoría de los autores, el parámetro de mayor influencia en las características de las construcciones FDM.

Las pruebas antes descritas fueron seleccionadas porque muestran cómo influyen los parámetros de manufactura en las características de una construcción FDM y dan pauta a explicar cómo se relacionan.

4.1 Parámetros de influencia en el tiempo de construcción

El material de modelado y soporte junto con el tiempo de construcción definen el costo de una pieza realizada mediante la tecnología FDM [43]. Para generar estrategias que reduzcan el tiempo de construcción es fundamental elegir correctamente los parámetros de manufactura por capa, así pues, resulta de gran importancia comprender dichos parámetros y estudiar su influencia.

La cantidad de material depositado por la boquilla o flujo volumétrico es determinado por el producto de la velocidad de deposición, ancho del filamento y espesor de capa [10]. El número de capas a construir es definido por una combinación de la geometría, orientación del modelo y espesor de capa; de tal suerte que a mayor altura es mayor el número de capas de un espesor determinado. Por su parte, el ancho del filamento influye en la cantidad de material que puede ser depositado en un tiempo determinado, es decir, para cubrir un área determinada un ancho de filamento mayor requiere de un menor recorrido del cabezal. Así pues, la orientación define tanto la altura como el área proyectada por el modelo. Con esta información se aprecia que la correcta selección de la boquilla y orientación de la pieza son los parámetros de entrada al proceso FDM, presentando para cada geometría distintas consideraciones.

De acuerdo a la literatura, la velocidad de deposición es constante para cada máquina FDM, ya que obedece a la reología del polímero depositado. Para determinar el comportamiento de la velocidad de deposición y flujo volumétrico con relación al área de construcción, boquilla y material, se propusieron y evaluaron geometrías de prismas rectangulares con volúmenes desde $115.57 \times 10^3 \text{ mm}^3$ hasta $16.18 \times 10^6 \text{ mm}^3$ en áreas de construcción que van de 100 mm^2 a $140 \times 10^3 \text{ mm}^2$ respectivamente, considerando así prácticamente toda la superficie de construcción de una máquina Fortus 400mc. Se muestran en la figura 38, el volumen mínimo y máximo.

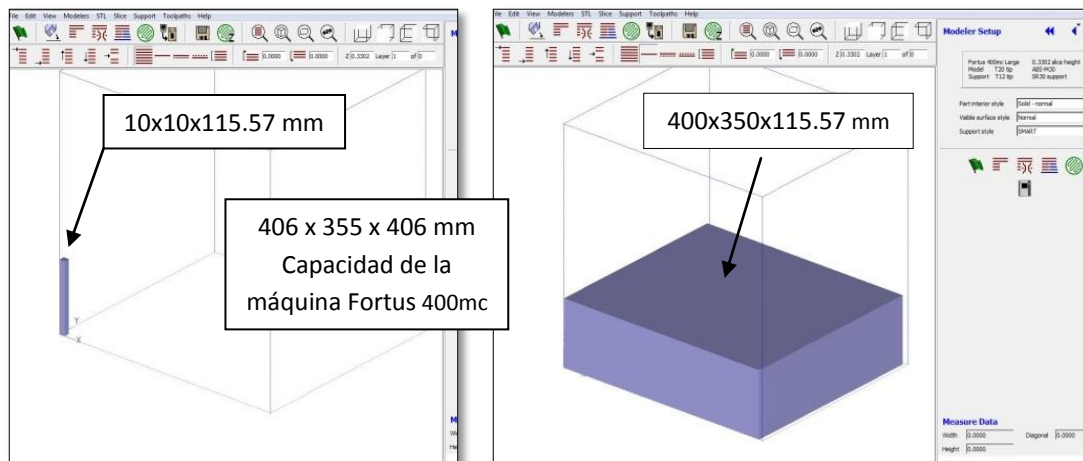


Figura 38. Prismas de área mínima y máxima evaluados en el experimento.

Se eligió una altura constante de 115.57 mm con objeto de obtener un número entero de capas para todas las boquillas, pues los cálculos se realizaron por capa. La tabla 6 muestra el tamaño de boquilla, el espesor de capa que deposita cada una de ellas y el número de capas resultantes para el experimento.

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 6. Boquilla, espesor y cantidad de capas, para las pruebas.

Las simulaciones para calcular el tiempo de construcción para cada prisma rectangular se realizaron dentro del programa *Insight* versión 8.1, donde el modelo digital 3D en formato STL es rebanado según el espesor de capa acorde a la boquilla y al material de modelo seleccionado, se eligen los parámetros de manufactura por capa y se crean las trayectorias que seguirá el cabezal extrusor. Cabe mencionar que la cantidad y estrategia de depósito del material de soporte (estilo de soporte) para la construcción no fue incluida en los experimentos, ya que la geometría así lo permite.

Durante los experimentos, los parámetros de ancho de filamento y distancia entre filamentos (air gap) se mantuvieron constantes para todos los tamaños de boquillas y modelos. Lo anterior debido a que la velocidad de deposición es expresada en función del área, ancho de filamento más air gap (en caso de llevarlo) y tiempo de construcción. La ecuación (1) muestra dicha relación:

$$V = \frac{A}{(Af)(t)} \dots\dots(1)$$

Donde V es la velocidad de deposición, A es el área proyectada de la construcción, Af el ancho del filamento y t el tiempo de construcción por capa. Se seleccionó un ancho de filamento posible para todos los tamaños de boquilla, utilizando los valores pre-establecido en *Insight* para los parámetros restantes. Los parámetros de manufactura con que se realizaron los experimentos se muestran en la tabla 7.

Parámetro de manufactura	
Ancho de filamento	0.50 mm
Estilo de contorno	Un contorno
Estilo de superficie visible	Normal
Estilo de llenado	Sólido-normal
Ángulo de filamento	45.0
Distancia entre filamentos (air gap)	0.0

Tabla 7. Parámetros de manufactura por capa empleados para el cálculo del tiempo en la construcción de los prismas rectangulares.

Resultados

Las relaciones obtenidas de velocidad de deposición y flujo volumétrico no muestran un comportamiento lineal con respecto al área como lo suponen las relaciones antes mencionadas. En los materiales estudiados, ABS-M30, PC y ABS-PC, estas relaciones muestran un comportamiento específico en función del área y boquilla seleccionada. Para los tres materiales, las gráficas de velocidad de deposición y flujo volumétrico describen comportamientos prácticamente constantes con respecto al área en superficies mayores a $50 \times 10^3 \text{ mm}^2$. En la figuras 39 y 40, respectivamente, se muestra el comportamiento de la velocidad de deposición y flujo volumétrico del ABS-M30 con respecto al área proyectada de construcción.

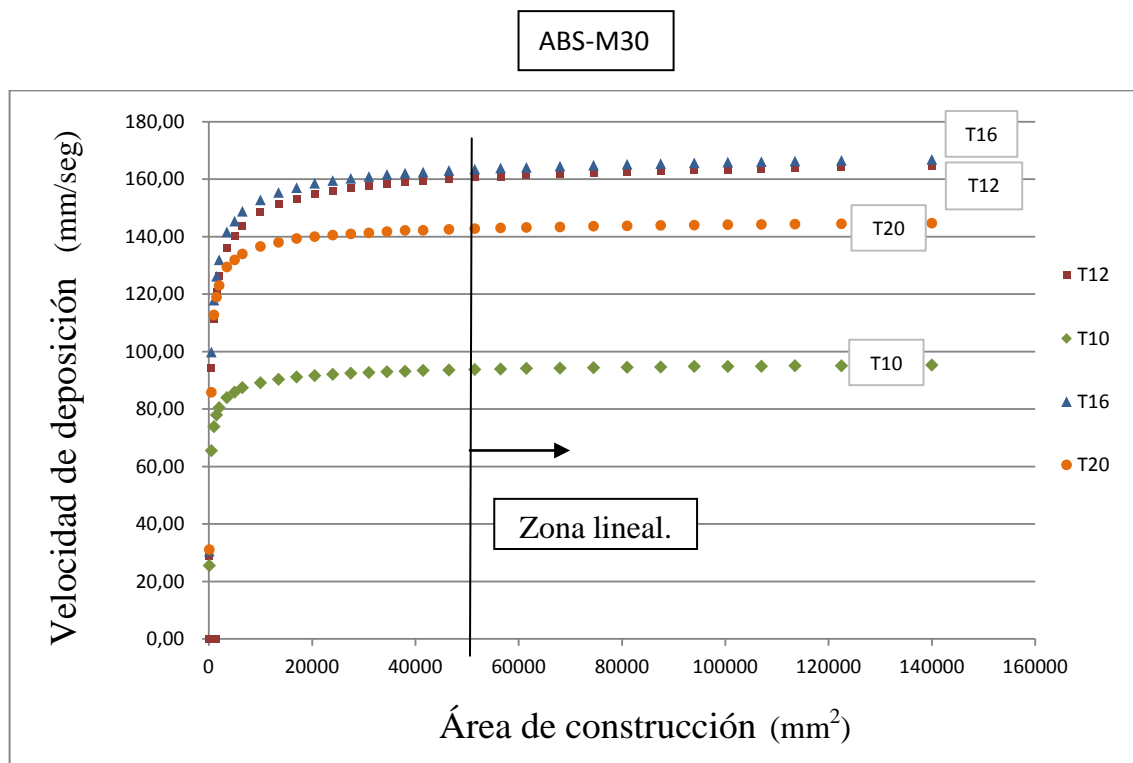


Figura 39. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo ABS-M30 con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

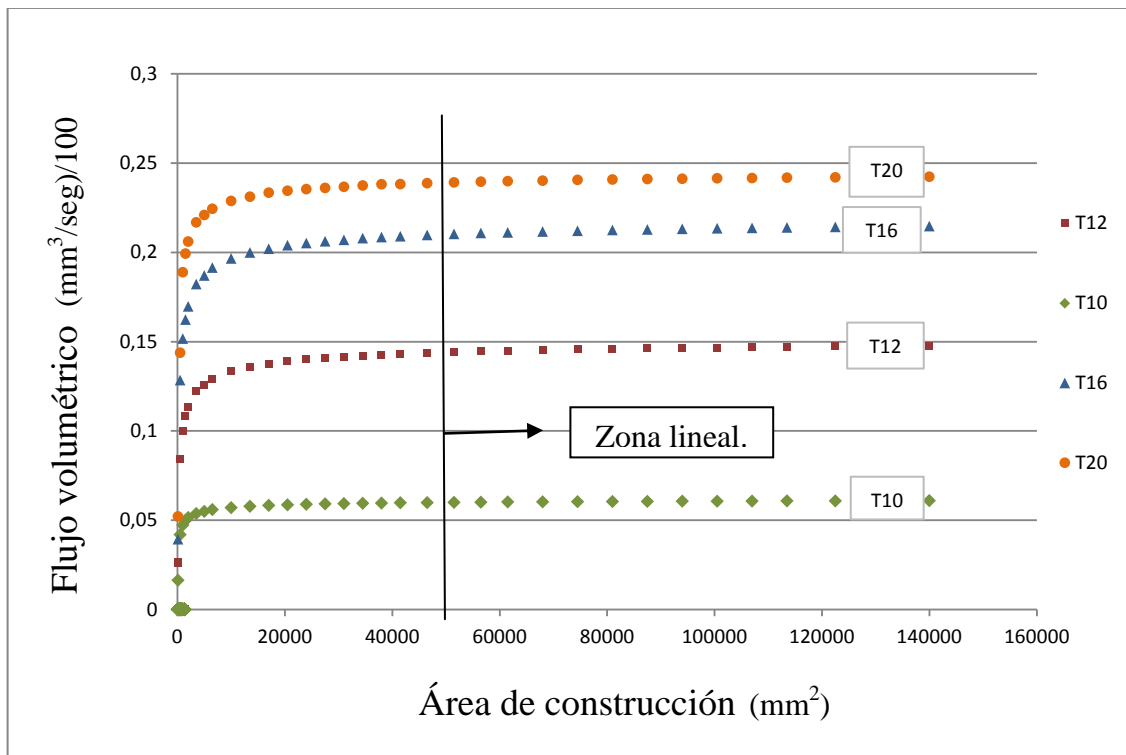


Figura 40. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo ABS-M30 con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

Para el ABS-M30, el flujo volumétrico obedece al número de capas construidas, es decir, aunque las boquillas T16 y T12 se desplazan a mayor velocidad, la cantidad de material depositado es menor al depositado por la boquilla T20, pues esta última deposita un espesor de capa mayor y, por lo tanto, un menor número de capas. Para la boquilla T10 tanto la velocidad de deposición como el flujo volumétrico muestran los valores más bajos.

Por su parte, el PC no muestra el mismo comportamiento que el ABS-M30, ya que la velocidad de deposición de la boquilla T16 es mucho mayor al de la boquilla T20, dando como resultado un mayor flujo volumétrico para la T16 aun depositando un mayor número de capas de menor espesor. La boquilla T12 muestra una velocidad de deposición ligeramente mayor a la mostrada por la boquilla T20, sin embargo, no lo suficiente para compensar el número de capas y, por lo tanto, el mayor recorrido necesario para depositar la misma cantidad de material a un mismo tiempo que la boquilla T20. Cabe señalar que para el material de modelo PC no está habilitado para ser extruido con el tamaño de boquilla T10. En las figuras 41 y 42 respectivamente, se muestran las gráficas de velocidad de deposición y flujo volumétrico para el material de modelo PC en la máquina Fortus 400mc.

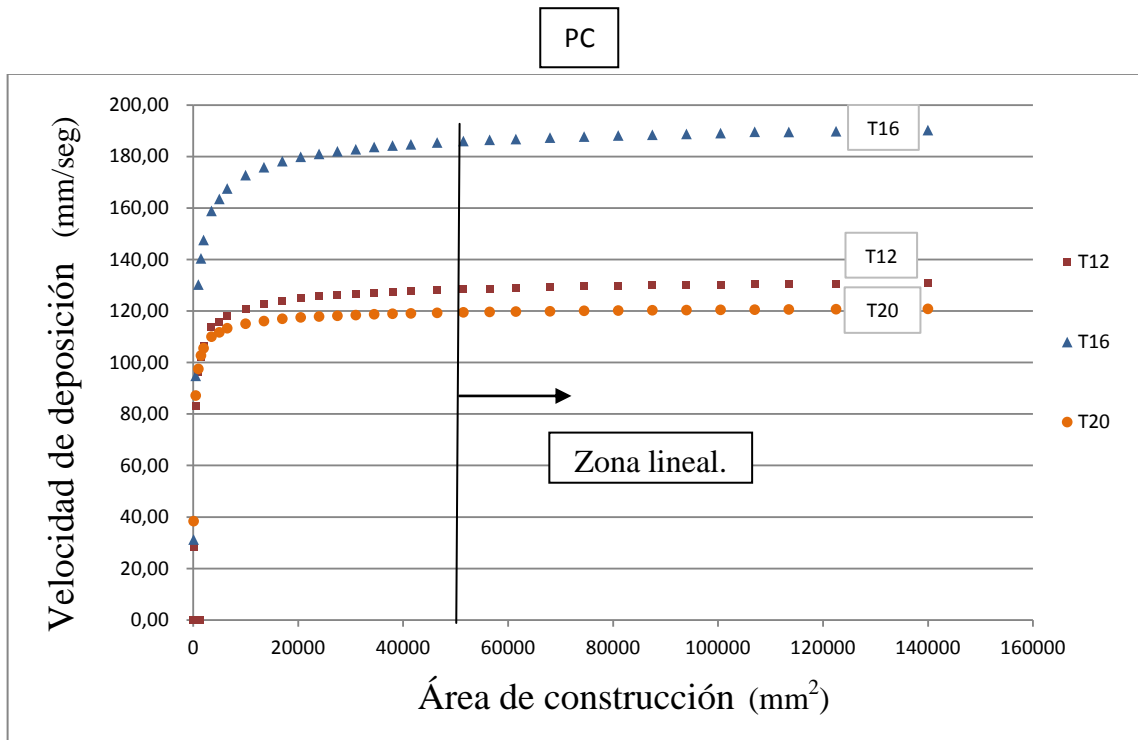


Figura 41. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

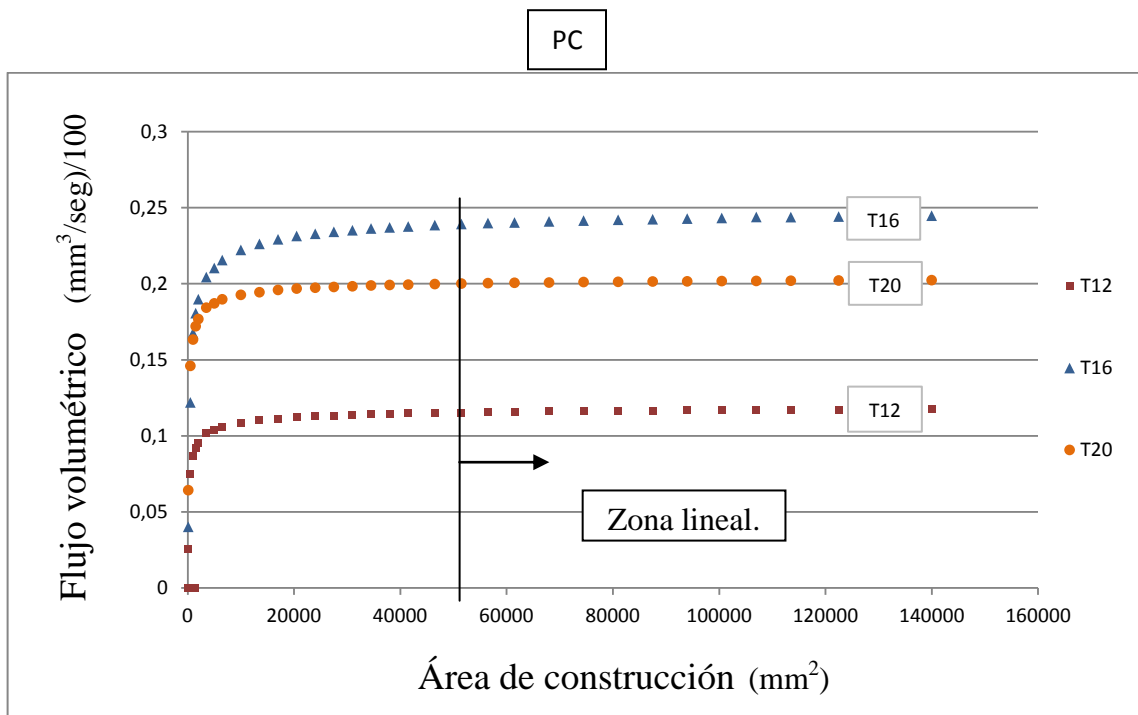


Figura 42. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

Por su parte, el material de modelo PC-ABS, en sus gráficas de velocidad de deposición y flujo volumétrico mostradas en las figuras 43 y 44, respectivamente,

muestran un comportamiento en su flujo volumétrico para las boquillas T20 y T16, prácticamente igual, lo anterior debido a la mayor velocidad de deposición de esta última; así pues, aún con espesores de capa más delgados y, por lo tanto, mayor número de capas a depositar, la boquilla T16 deposita la misma cantidad de material que la boquilla T20 en un tiempo determinado. A su vez, la boquilla T12 muestra una velocidad de desplazamiento similar a la boquilla T20, sin embargo, el flujo volumétrico para la boquilla T12 es notoriamente menor debido a la mayor cantidad de capas depositadas.

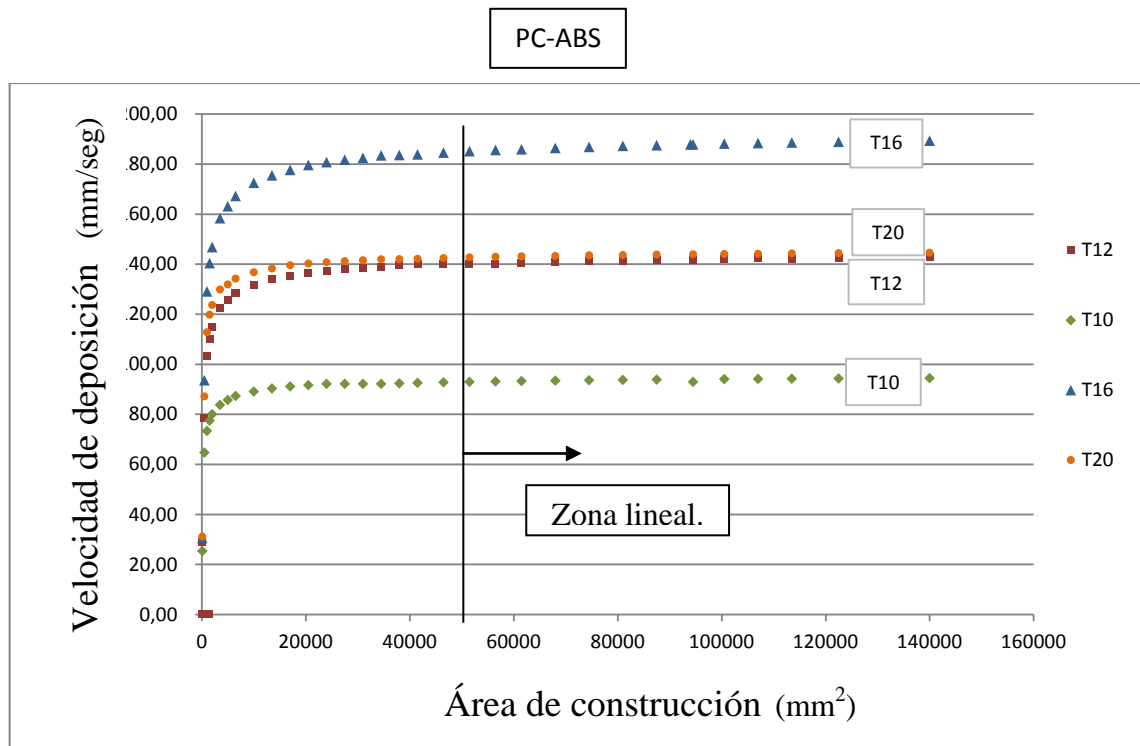


Figura 43. Comportamiento de la velocidad de deposición por boquilla para el material de modelo ABS-PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

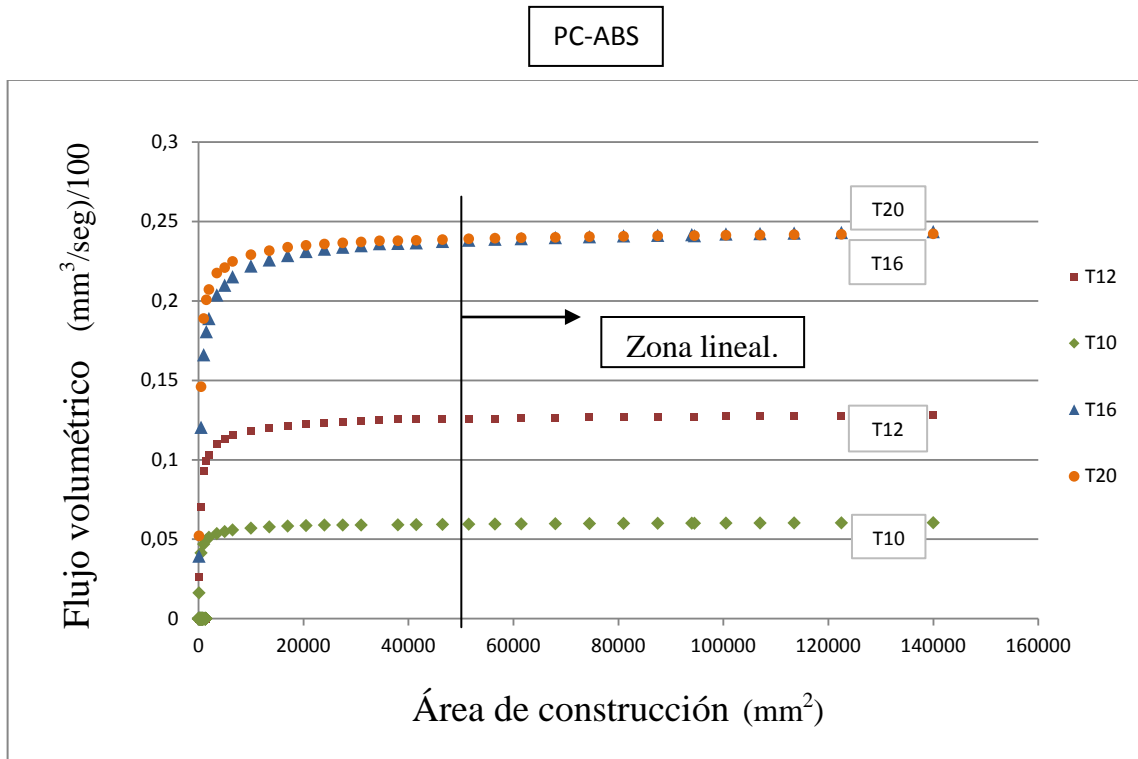


Figura 44. Comportamiento del flujo volumétrico por boquilla para el material de modelo ABS-PC con respecto al área de construcción. Valores obtenidos para una máquina Fortus 400mc.

Para los tres materiales las relaciones de velocidad de deposición muestran a la boquilla T16 como la de mayor velocidad, aumentando progresivamente a partir de la boquilla T10 y, disminuyendo invariablemente para el tamaño de boquilla T20. La figura 45 muestra una tabla con las velocidades de deposición y flujos volumétricos junto con un gráfico comparativo del flujo volumétrico por boquilla para cada material.

Material	Boquilla	Velocidad deposición (mm/s)	Flujo volumétrico (mm³/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

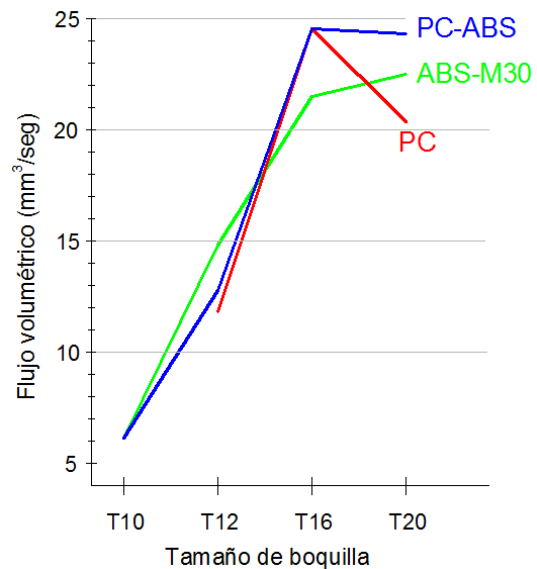


Figura 45. Comparativo de velocidades de deposición y flujos volumétricos; el flujo volumétrico es calculado con un mismo ancho de filamento para todas las boquillas y materiales [51].

Análisis de resultados

Las curvas obtenidas en áreas relativamente pequeñas se deben a la mecánica propia de la deposición, ya que las boquillas deben de realizar labores de purga y limpieza después de depositar una capa con objeto de minimizar el escurrimiento. El tiempo de construcción es principalmente función de la geometría de la pieza, es decir, la complejidad de la geometría impone requerimientos de soporte que obligan al sistema a realizar cambios entre las boquillas de modelo y soporte, lo que implica un retardo en la construcción. Este retardo es la suma de los tiempos empleados para purgar, limpiar y estabilizar la temperatura de operación en el cambio de boquillas. El tiempo necesario para estabilizar la temperatura de una boquilla y comenzar la deposición, no se ve reflejado en las gráficas obtenidas (figuras 39-44) por considerar solamente material de modelo en la construcción. Por citar un ejemplo, los resultados de las gráficas de flujo volumétrico indican que una misma construcción empleando un tamaño de boquilla T16 en material de modelo PC a un determinado ancho de filamento, consume menos tiempo que el mismo tamaño de boquilla depositando material de modelo ABS-M30, sin embargo, esto podrá no ser así en función a la cantidad de cambios necesarios entre boquillas, pues la temperatura requerida para depositar el PC es mayor y, por lo tanto, requiere de mayor tiempo para estabilizarse y realizar las labores de purga y limpieza en cada cambio de boquilla.

Resulta importante señalar que la boquilla también impone restricciones con respecto al espesor mínimo de pared alcanzable en una construcción, referidos en la tabla 5 del presente trabajo; por lo que, una vez elegido el material y considerando el espesor mínimo de pared, las gráficas obtenidas en esta investigación sirven como referencia para elegir el tamaño de boquilla y considerar la orientación para ocupar, como mínimo, una determinada superficie de construcción, dando como resultado un menor tiempo de manufactura y un mejor aprovechamiento de la tecnología.

4.2 Relación entre ángulo de construcción y boquilla

El acabado superficial, específicamente la rugosidad, es una de las características en las que mayor influencia presenta el tamaño de boquilla o espesor de capa y, de acuerdo a las investigaciones reportadas en la sección 3.3.2, solo la orientación de construcción tiene mayor impacto. Si bien es sencillo entender que a mayor tamaño de boquilla serán menor el número de capas y, por lo general, menor el tiempo de construcción, resulta complicado ganar sensibilidad acerca de las repercusiones del tamaño de boquilla en el acabado superficial. Por otra parte, la precisión dimensional también es influenciada por el tamaño de boquilla y la orientación de construcción, por lo que la geometría, en específico un plano inclinado, no sólo presenta incertidumbre en sus características de acabado superficial sino también en el valor angular resultante.

Para ayudar a desarrollar sensibilidad en el diseñador y/o usuario de la tecnología FDM con respecto al acabado superficial, se diseñó un patrón de ángulos que además de permitir apreciar la rugosidad a distintos ángulos de construcción, permita evaluar dimensionalmente los ángulos obtenidos. En la figura 46 se muestra el patrón de ángulos diseñado.

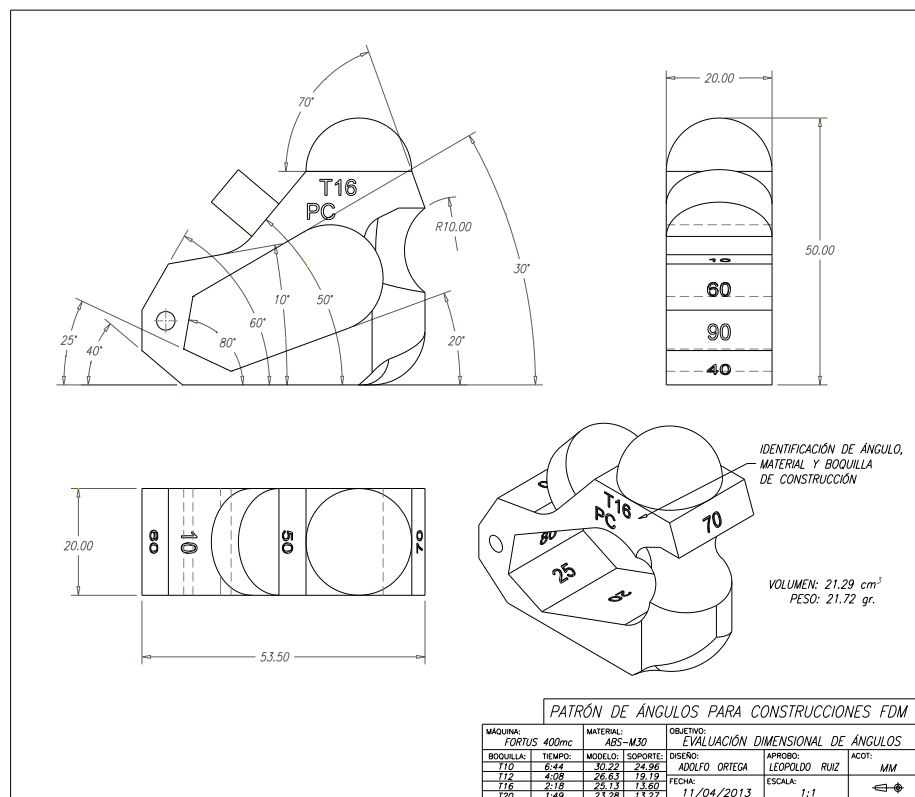


Figura 46. Diseño de Patrón de ángulos.

El patrón fue diseñado y convertido a archivo STL dentro del programa de cómputo especializado SolidWorks®.

4.2.1 Conversión del archivo STL

Esta sección tiene como objetivo informar de una serie de aspectos importantes relacionados con la generación de archivos STL “correcto” acorde a una resolución coherente al diseño y a la tecnología. Para ello se debe tomar en cuenta que un archivo STL traduce las superficies del modelo digital 3D en mallas formadas por triángulos. El número y el tamaño de los triángulos determinan la exactitud en la construcción de superficies curvadas.

Así pues, se mencionan a continuación algunos puntos respecto a la resolución y revisión del archivo STL tomadas principalmente del fabricante de la tecnología [46].

- Triangulación o resolución del mallado:

Los parámetros para establecer el número y el tamaño de los triángulos son:

- ✓ La desviación o tolerancia; distancia máxima entre la superficie original y los triángulos del mallado.
- ✓ Ángulo de control; desviación angular permitida entre triángulos adyacentes, lo que permite aumentar el teselado para cumplir con curvaturas pequeñas.
- ✓ Formato de archivo; existe el formato binario y el ASCII, siendo el binario de mayor resolución.

Resulta importante evitar mallados muy finos, ya que estos provocan archivos grandes que requieren de mayor tiempo de procesamiento. Aumentar la resolución excesivamente no mejora necesariamente la calidad de la pieza. Esto se da cuando la desviación y el ángulo de control son muy pequeños. Por el otro lado, si el ángulo de control es muy grande y/o la desviación muy larga se produce un efecto de “faceteado” en las superficies curvadas. La recomendación general es generar archivos de tamaño medio acorde a la escala de los detalles de la pieza.

- Revisión de superficies “correctas”:

Es conveniente realizar una revisión del archivo STL para detectar errores como superficies invertidas (las superficies tienen una dirección) y agujeros o vacíos dentro y entre superficies, antes de enviarlo a construcción. Para este propósito es posible utilizar paquetes de cómputo especializados como: Objet Studio™ de Stratasys Inc., Magics de Materialise, Netfabb, CADspan y Deskartes, por mencionar algunos, además de programas como MeshLab, de código abierto.

4.2.2 Diseño del patrón angular y pruebas

En el diseño del patrón angular se consideró tener una cara como referencia para ser orientadas paralela a la horizontal y asignarle así el valor de 0 grados, con incrementos de 5 ó 10 grados para formar las demás superficies con objeto de lograr cubrir un rango de medición de 0 a 90 grados con sus 11 caras.

Inicialmente se construyeron cuatro patrones, todos con la misma orientación de construcción y empleando para cada uno de ellos un tamaño de boquilla distinto. El material de modelo utilizado fue el ABS-M30, seleccionado por ser el más común para la tecnología además de ser compatible con todos los tamaños de boquilla. La figura 47 muestra el patrón construido con un tamaño de boquilla T12.



Figura 47. Patrón angular construido con material de modelo ABS-M30 y boquilla T12.

Se efectuaron mediciones, las cuales se describirán más adelante, en donde se muestra la influencia del tamaño de boquilla y se consideró pertinente construir dos patrones más utilizando distintos materiales a un mismo tamaño de boquilla, para mostrar así la influencia del materiales de construcción. El tamaño de boquilla seleccionado fue el T16 por ser el de mejor flujo volumétrico (ver sección 4.1) y los materiales seleccionados fueron el PC y el PC-ABS. Por último, se construyeron dos patrones más en los materiales PC y PC-ABS, pero esta vez con una orientación distinta (vertical) como se muestra en la figura 48, con el objeto de mostrar la influencia de la orientación de construcción.

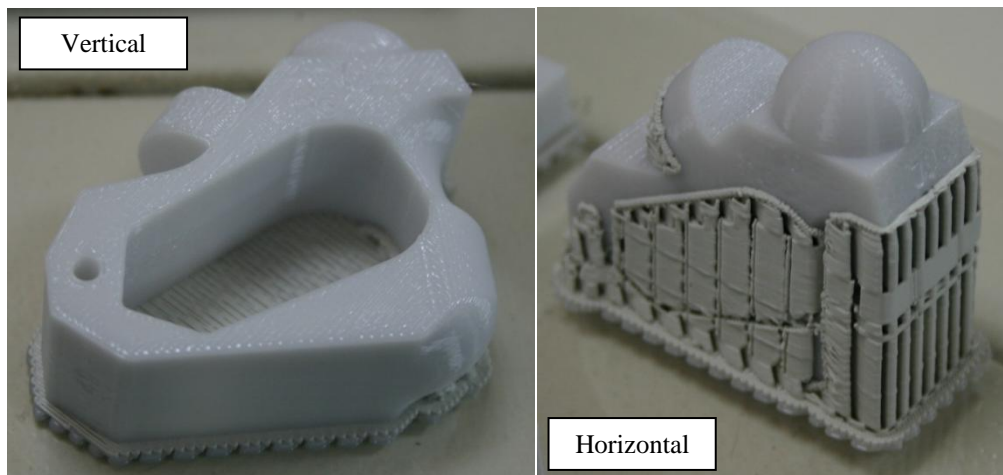


Figura 48. Orientaciones de construcción del patrón de angular. Las imágenes muestran las construcciones aún con material de soporte.

Los archivos STL fueron procesados dentro de *Insight* versión 8.1 y construidos aleatoriamente, por razones de cargas de trabajo, en las maquinas Fortus 400mc y

900mc. La tabla 8 identifica los patrones y muestra el material, orientación, boquilla y máquina utilizada para cada uno de ellos.

Patrón	Modelo	Soporte	Boquilla	Máquina	Orientación
1	ABS-M30	SR-30	T10	Fortus 400mc	Horizontal
2	ABS-M30	SR-20	T12	Fortus 900mc	Horizontal
3	ABS-M30	SR-20	T16	Fortus 900mc	Horizontal
4	ABS-M30	SR-30	T20	Fortus 400mc	Horizontal
5	PC	PC-S	T16	Fortus 400mc	Horizontal
6	PC	PC-S	T16	Fortus 400mc	Vertical
7	PC-ABS	SR-20	T16	Fortus 900mc	Horizontal
8	PC-ABS	SR-20	T16	Fortus 900mc	Vertical

Tabla 8. Identificación de patrones, materiales, boquilla, máquina y orientación.

Todos los patrones fueron construidos con estilo de contorno de un solo filamento, estilo de llenado sólido-normal, estilo visible de superficie en modo mejorado, air gap entre filamento visibles de -0.025, air gap entre filamentos internos de 0, ángulo de filamento a 45° y estilo de soporte adaptativo. Los parámetros de manufactura por capa restantes se muestran en la tabla 9.

Parámetro \ Patrón	1	2	3	4	5	6	7	8
Espesor de capa	0.127	0.178	0.254	0.330	0.254	0.254	0.254	0.254
Ancho de contorno	0.203	0.305	0.406	0.457	0.406	0.406	0.406	0.406
Ancho de filamento visible	0.203	0.305	0.406	0.457	0.406	0.406	0.406	0.406
Ancho de filamento interno	0.403	0.505	0.606	0.757	0.606	0.606	0.606	0.606

Tabla 9. Parámetros de manufactura por capa para la construcción de los patrones de ángulos.

Las mediciones de los ángulos en las construcciones fueron realizadas utilizando un comparador óptico Nikon modelo V-12B con aumento de 20x. Las mediciones se efectuaron alineando uno de los ejes coordenados de la pantalla del comparador óptico a la cara de referencia, posteriormente se rotó dicho eje buscando hacer tangencia con los perfiles semi-elípticos de las capas de cada una de las caras. Lo anterior se llevo a cabo sin mover el patrón una vez referenciado, girando la pantalla del comparador siempre en un mismo sentido y repitiendo el procedimiento tres veces, registrando así valores angulares con una precisión de $\pm 0.05^\circ$. Adicionalmente, se tomaron imágenes en un microscopio binocular Iroscope® modelo NZ-14-TU, con objeto de obtener evidencia gráfica de los acabados y características superficiales particulares de la tecnología FDM.

Resultados

Los resultados obtenidos de las mediciones del valor angular se presentan en tres secciones para apreciar la influencia del tamaño de boquilla, el tipo de material y la orientación de construcción. La primera sección contiene las mediciones de los patrones construidos en material de modelo ABS-M30 y orientados horizontalmente.

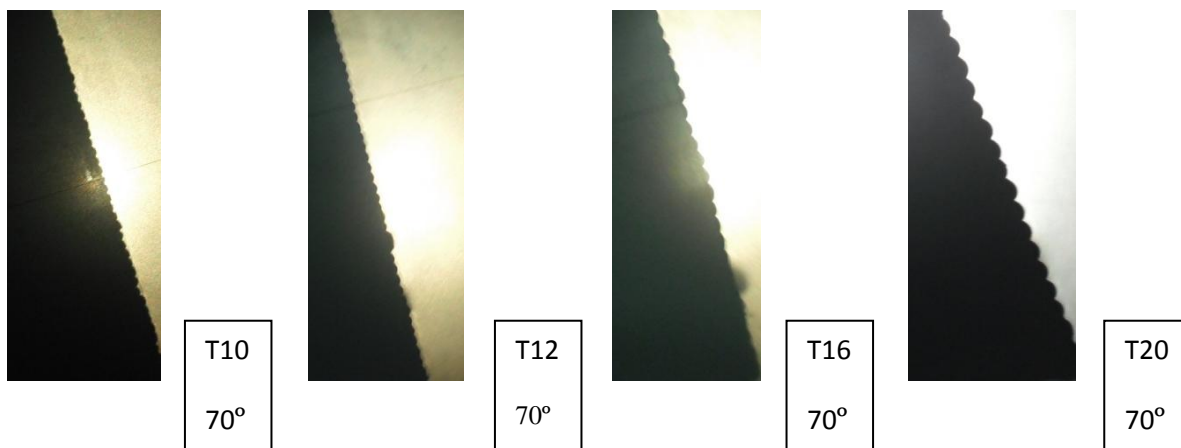
La tabla 10 muestra los valores angulares obtenidos en las mediciones de los patrones construidos por cada uno de los tamaños de boquilla.

Valor nominal (grados)	T10	T12	T16	T20	% de error promedio por ángulo
10	10.00	10.20	9.85	9.90	11
20	20.15	20.10	20.15	20.10	13
25	24.85	25.10	25.05	25.40	18
30	30.00	30.10	30.15	29.90	9
40	40.40	40.15	40.30	40.05	22
50	49.85	49.90	49.90	49.75	15
60	59.85	60.00	59.70	60.10	14
70	70.20	69.95	69.95	69.70	15
80	79.85	79.85	79.75	79.75	20
90	90.15	90.20	90.15	90.25	19
% de error promedio por boquilla	15	12	17	19	

Tabla 10. Valor angular medido en los patrones construidos en ABS-M30 a diferentes tamaños de boquilla.

De acuerdo a la tabla 10, la boquilla T12 es la que menor diferencia presenta entre los valores angulares medidos y el valor nominal, mientras que el ángulo de 30° es en promedio, el más apegado al valor nominal para todas las boquillas. La boquilla T20 es la que menor exactitud angular presenta y los ángulos de 40° y 80° son en promedio, los que mayores diferencias presentan para todas las boquillas.

En cuanto al acabado superficial, se presentan en la figura 49, imágenes de los ángulos de 70° y 20°, elegidos así por ser ángulos complementarios y, estar el ángulo de 20° en la región indeterminada (ver sección 3.3.2). Las imágenes fueron tomadas en el comparador óptico y el microscopio, descritos anteriormente, para todos los tamaños de boquilla con objeto de apreciar la influencia de la orientación y espesor de capa en la rugosidad de las construcciones.



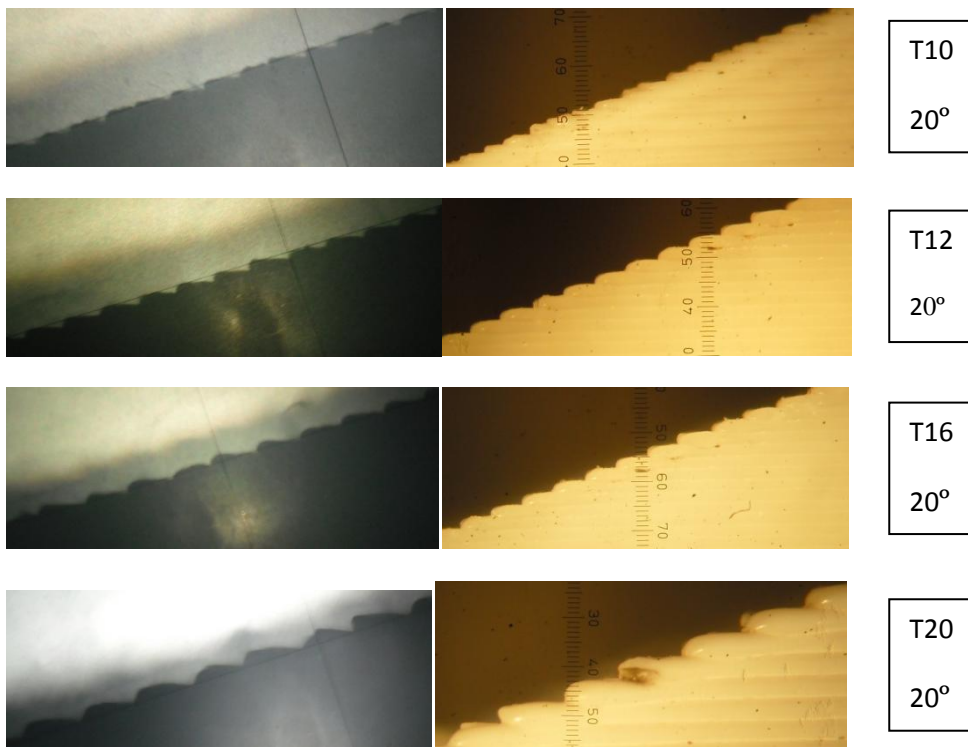
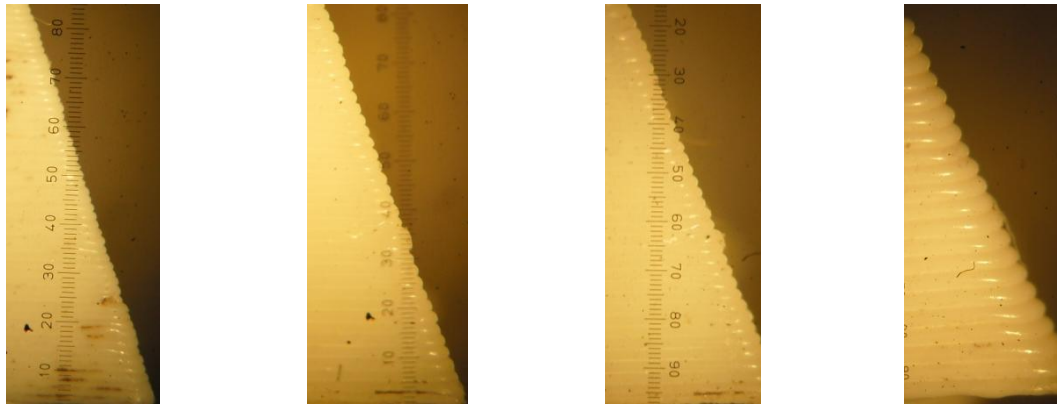


Figura 49. Imágenes de los ángulos de 20° y 70°, construidos con cada tamaño de boquilla y tomadas en el comparador óptico Nikon modelo V-12B y microscopio binocular Iroscope® modelo NZ-14-TU; patrones en material ABS-M30 y orientados horizontalmente [51].

Otro aspecto interesante mostrado en la construcción de los patrones y que repercute visiblemente en su acabado superficial, son las marcas dejadas por el inicio y final de la deposición del filamento de contorno, denominadas “costuras” (seams en el idioma Inglés). Estas costuras, que fue necesario remover para realizar las mediciones angulares en el comparador óptico, se muestran, para el ángulo de 70°, en la figura 50.

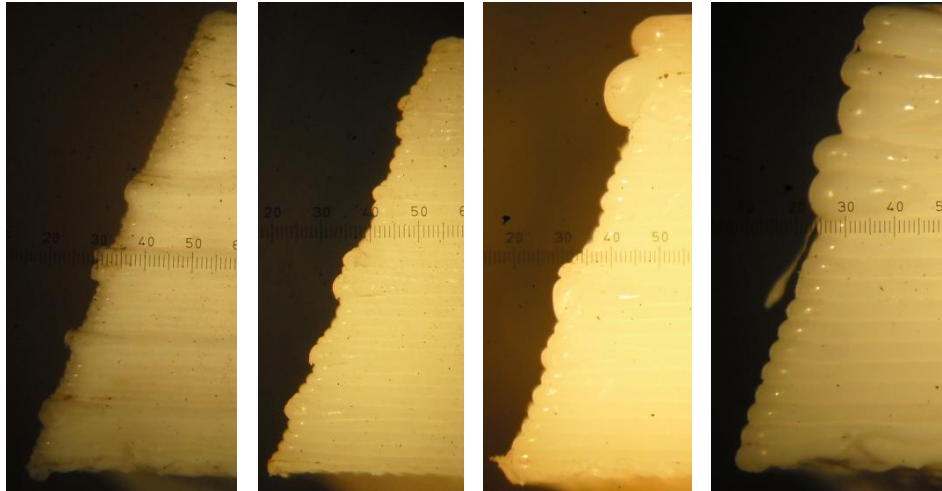


Figura 50. Defectos ocasionados por el inicio de la deposición del filamento. De izquierda a derecha, boquilla T10, T12, T16 y T10.

La segunda sección comprende las mediciones obtenidas de los patrones construidos en tres distintos materiales utilizando un mismo tamaño de boquilla. La boquilla seleccionada fue una T16 debido a que ésta es la más ampliamente utilizada. Los materiales empleados fueron ABS-M30, PC y PC-ABS. La tabla 11 muestra los resultados del valor angular registrado.

Valor nominal (grados)	ABS-M30	PC-ABS	PC	% de error promedio por ángulo
10	9.85	10.35	9,80	23
20	20.15	20.10	19,85	13
25	25.05	25.30	25,35	23
30	30.15	30.00	29,80	12
40	40.30	40.50	40,50	43
50	49.90	50.15	49,75	17
60	59.70	59.75	59,65	30
70	69.95	69.60	69,70	25
80	79.75	79.65	79,60	33
90	90.15	90.45	90,30	30
% de error promedio por material	17	30	29	

Tabla 11. Valor angular medido en los patrones construidos con boquilla T16.

De acuerdo a la tabla 11, el material de modelo ABS-M30 presenta las menores diferencias entre los valores angulares registrados y el valor nominal, mientras que el PC y el PC-ABS presentan prácticamente los mismos porcentajes de error. El ángulo de 30° resulta otra vez el más apegado al valor nominal en todos los materiales, mientras que el ángulo de 80° es el que muestra las mayores diferencias. En la figura

51, se observan las imágenes tomadas en el microscopio para el ángulo de 30° en los tres materiales empleados.

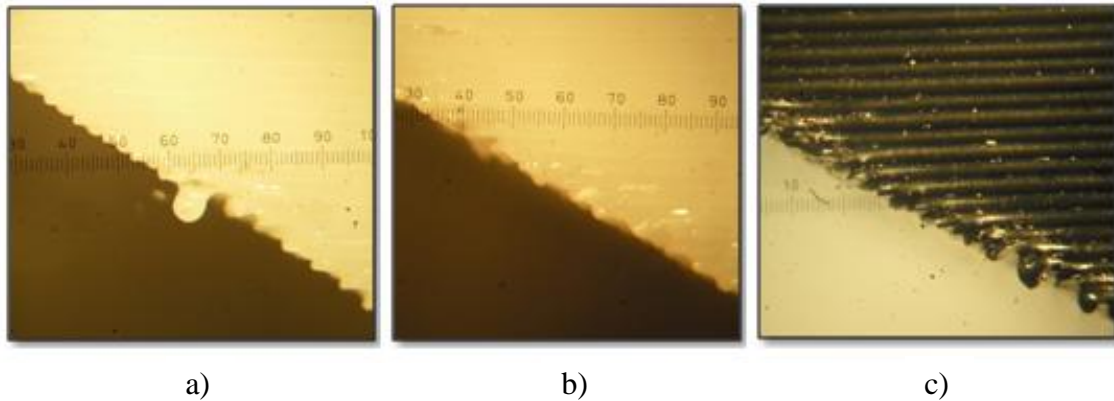


Figura 51. Imágenes del perfil construido a 30° con respecto a la horizontal. Se empleó una boquilla T16 y los materiales: a) ABS-M30, b) PC y c) PC-ABS.

Cabe mencionar que las superficies construidas con inclinación de 30° y que se muestran en la figura 51, necesitaron soporte para su construcción, lo que como se puede observar, modifica las características superficiales.

Por último, se presenta la comparativa entre dos distintas orientaciones utilizando un mismo tamaño de boquilla y tipo de material. Los materiales de modelo PC y PC-ABS fueron empleados para la construcción de patrones orientados verticalmente como se mostró en la figura 48. La tabla 12 muestra la comparativa de los valores angulares obtenidos en las mediciones.

Valor nominal (grados)	PC-ABS		PC	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
10	10.35	10.00	9,80	10,10
20	20.10	20.00	19,85	19,95
25	25.30	25,10	25,35	25,05
30	30.00	30.00	29,80	29,90
40	40.50	40.00	40,50	40,05
50	50.15	49,65	49,75	49,90
60	59.75	60,05	59,65	60,15
70	69.60	69,85	69,70	70,10
80	79.65	79,75	79,60	80,15
90	90.45	90,10	90,30	90,05
% de error promedio por orientación	30	9	29	10

Tabla 12. Valor angular medido a distintas orientaciones de construcción.

La orientación de construcción vertical para ambos materiales, resulta de un grado de exactitud mayor que la orientación horizontal. La figura 52 muestra las imágenes tomadas en el comparador óptico de ambas orientaciones.

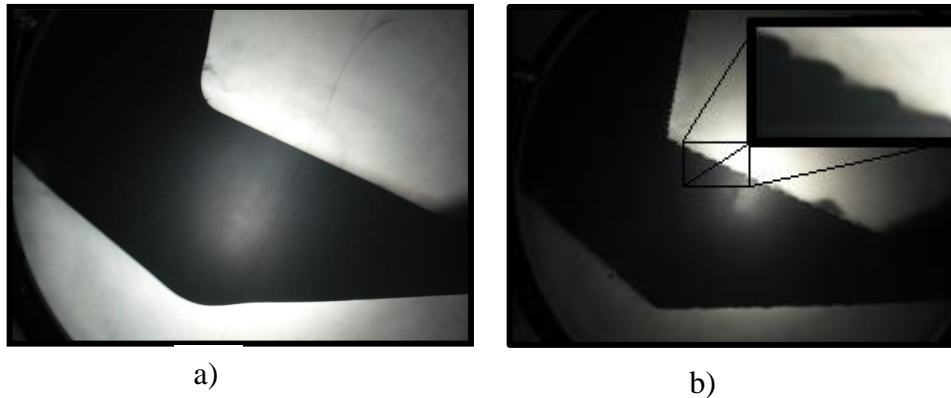


Figura 52. Imágenes de los perfiles observados en el comparador óptico. a) orientación de construcción vertical. b) orientación de construcción horizontal.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos respecto al valor angular reflejan la mecánica misma de la deposición; la boquilla T20 deposita el filamento de mayor tamaño, siendo así la más propensa a sufrir distorsiones geométricas debido a la carga térmica, por ello, sus valores angulares son los que mayores diferencias presentan. Los tamaños de boquilla T10 y T12 depositan menor cantidad de material y presentan mayor exactitud.

Por su parte, el material de soporte no muestra una influencia determinante; el ángulo de 30° arroja los resultados de mayor exactitud para todos los tamaños de boquillas, mientras que el ángulo de 40° , también construido encima de soporte, muestra la mayor diferencia con respecto al valor nominal. Con respecto al acabado superficial, como ha sido documentado en otras investigaciones (ver sección 3.3.2), el soporte influye al modificar la forma de los filamentos depositados.

Resulta evidente de la figura 49, la influencia de la orientación en el fenómeno de escalonamiento (inherente a la manufactura aditiva) y, por lo tanto, en el acabado superficial; siendo los ángulos de 20° y 70° complementarios, el ángulo de 20° pertenece a la zona denominada como: “región indeterminada” (ver sección 3.3.2), debido a lo impredecible de su rugosidad. El perfil con inclinación de 70° , en cambio, muestra gran homogeneidad en su construcción, sin embargo, es interesante señalar que el ángulo de 20° resultó, en promedio, con menores diferencias respecto al valor nominal (tabla 10 y 11).

En relación a las costuras generadas por el inicio de la deposición del contorno de cada capa, aunque las boquillas de mayor tamaño depositan un menor número de capas y, por lo tanto, producen una menor cantidad de errores en la construcción, estos son de mayor tamaño, repercutiendo en el acabado y haciendo necesario ejecutar un post-proceso para removerlos.

Al comparar los valores obtenidos entre los patrones construidos con un mismo tamaño de boquilla y distinto material, confirmamos la importancia de la carga térmica en una construcción. El ABS-M30, material que requiere la menor temperatura de operación, es el que menor diferencia, en promedio, de valor angular presenta con respecto al valor nominal.

Respecto a la diferencia de los valores angulares obtenidos entre las orientaciones horizontales y verticales de construcción, resulta claro señalar que la orientación vertical aporta los valores angulares con menores diferencias al valor nominal debido a que solo depende de la capacidad de interpolación de la máquina, mientras que la orientación horizontal es influenciada por los parámetros de manufactura por capa, el material y los fenómenos térmicos involucrados en las distintas fases del proceso (ver sección 3.1).

4.3 Influencia de los parámetros de manufactura en detalles de baja dimensión

Dentro de las características inherentes a la tecnología FDM se encuentra la baja resolución [3] obtenida en las construcciones en comparación a otras tecnologías de Manufactura Aditiva. Lo anterior se debe a que el proceso está restringido por un diámetro mínimo de filamento extruido, lo que determina tanto el espesor de capa como el ancho de filamento. Con el propósito de mostrar la influencia de los parámetros de manufactura por capa en la resolución, es decir, la calidad en la definición del detalle en una geometría, se evaluaron cualitativamente distintos estilos de construcción de un mismo engrane de bajas dimensiones. En la figura 53 se muestra el engrane propuesto para las pruebas.

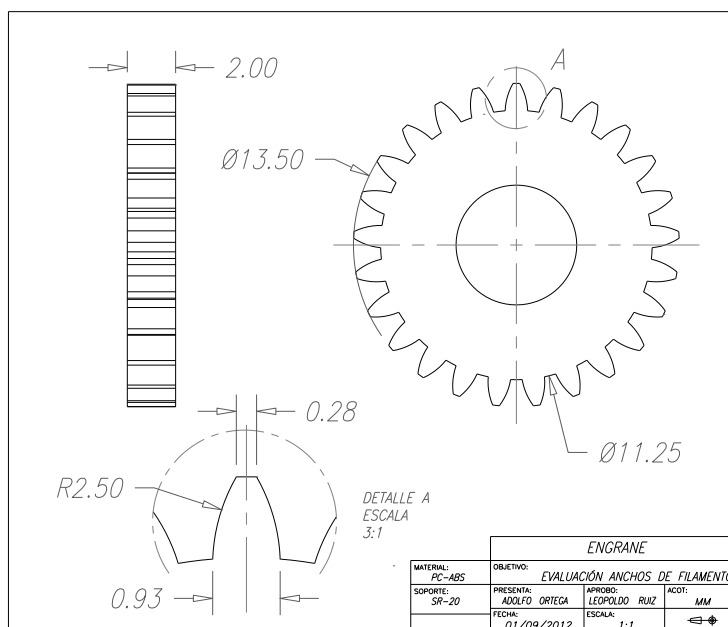


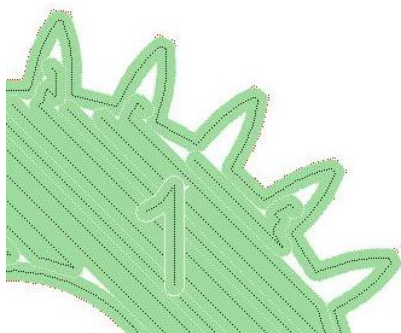
Figura 53. Engrane para experimento.

Específicamente, la prueba se diseñó para mostrar cómo influye el ancho de filamento, la distancia entre filamentos (air gap) y estilo de contorno (cantidad de contornos) a un mismo espesor de capa (tamaño de boquilla) en el formado y la resolución de un detalle de bajas dimensiones. Con este propósito se construyeron 7 engranes utilizando la máquina Fortus 400mc y procesando los archivos STL dentro del programa *Insight* versión 8.1. Se seleccionó como material de modelo al ABS-M30, por ser el más comúnmente utilizado con la tecnología y un tamaño de boquilla T12 (espesor de capa de 0.178 mm), por haber resultado en la sección 4.2, el tamaño de boquilla con mayor exactitud para la construcción de superficies inclinadas.

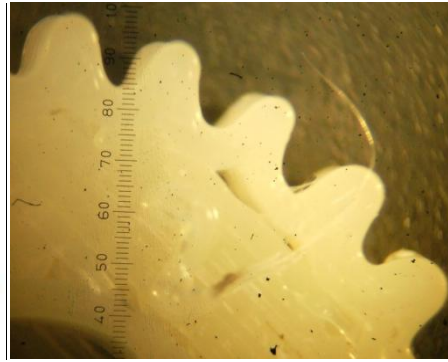
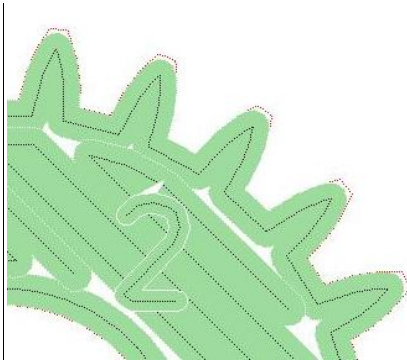
Para la prueba se seleccionaron tres distintos anchos de filamentos: fino (0.305mm), medio (0.505mm) y grueso (0.729mm), por considerarse estos representativos del espectro de posibilidades para el tamaño de boquilla y el tipo de material seleccionados (ver tabla 4 en la sección 3.2). Los espacios entre filamentos elegidos fueron de 0 y de -0.05mm, por ser este último el mínimo permitido por el programa *Insight* versión 8.1. Además se emplearon tres distintos estilos de contorno (cantidad de contornos) con el ancho de filamento fino y dos con el ancho de filamento medio.

Resultados

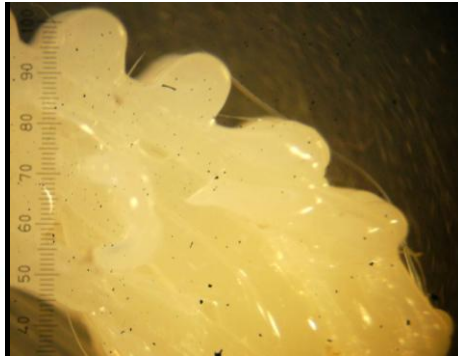
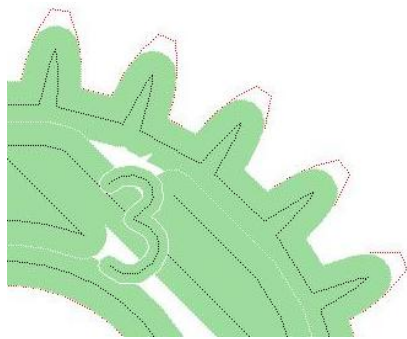
Para mostrar la influencia del ancho de filamento, espacio entre filamentos y estilo de contorno, los resultados se presentan como una serie de imágenes obtenidas de fotografiar, en un microscopio binocular Iroscope® modelo NZ-14-TU con aumento de 20x, los engranes construidos. Estas imágenes son presentadas en comparación a las imágenes obtenidas de las simulaciones que genera el programa de cómputo especializado *Insight* versión 8.1 con objeto de aportar una referencia al usuario de la tecnología. La figura 54 muestra estas imágenes junto con los parámetros de manufactura empleados para la construcción de cada engrane; en ellas se logra apreciar la influencia de los parámetros en el formado y la definición de los detalles de baja dimensión. Los valores de los parámetros de manufactura por capa no mencionados, son los pre-establecidos dentro de *Insight*.



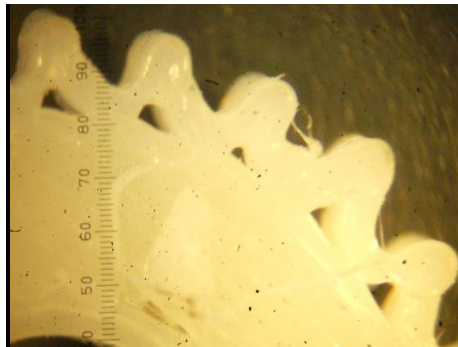
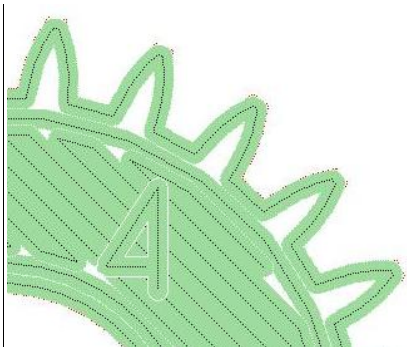
Engrane 1,
1 Contorno
Filamentos finos
0.305mm
Air gap: 0.0



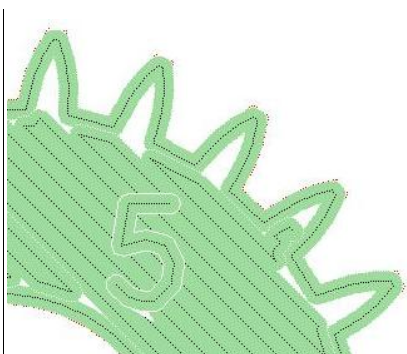
Engrane 2,
1 Contorno
Filamentos
medianos
0.505mm
Air gap: 0.0



Engrane 3,
1 Contorno
Filamentos
gruesos
0.729mm
Air gap: 0.0



Engrane 4,
2 Contornos
Filamentos finos
0.305mm
Air gap: 0.0



Engrane 5,
1 Contorno
Filamentos finos
0.305mm
Air gap: -0.05

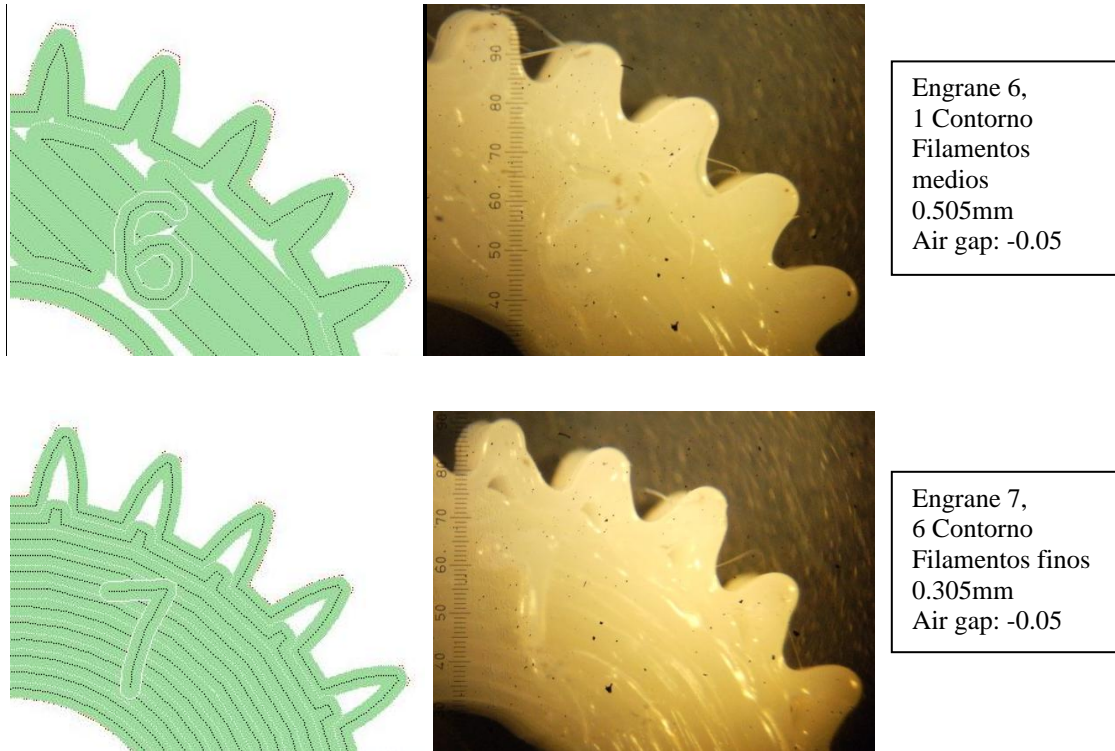


Figura 54. Imágenes de las simulaciones de llenado generadas por *Insight* y las imágenes obtenidas en un microscopio binocular Iroscope® modelo NZ-14-TU con aumento de 20x, de las piezas una vez construidas.

Con objeto de ayudar a apreciar cualitativamente las imágenes obtenidas se presenta un cuadro comparativo, en la figura 55, donde se califican tres aspectos que se consideran importantes en la resolución: la definición geométrica, es decir, la calidad de la forma del diente del engrane; el cumplimiento del contorno, en donde se hace referencia a la trayectoria de deposición respecto a la curva; y el llenado interno del detalle, es decir, un buen llenado es aquel que no deja espacios vacíos. La escala de apreciación es: $\sqrt{\sqrt{}}$ buena, $\sqrt{}$ regular y X mala.

Engrane No.	Definición geométrica	Cumplimiento del contorno	llenado interno	Ancho de filamento	Air gap	Cantidad de contornos
1	$\sqrt{}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	fino	0	1
2	$\sqrt{\sqrt{}}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	medio	0	1
3	X	X	$\sqrt{\sqrt{}}$	grosso	0	1
4	$\sqrt{}$	$\sqrt{}$	X	fino	0	2
5	$\sqrt{\sqrt{}}$	$\sqrt{}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	fino	-0.05	1
6	$\sqrt{}$	$\sqrt{}$	$\sqrt{\sqrt{}}$	medio	-0.05	1
7	$\sqrt{}$	$\sqrt{}$	$\sqrt{}$	fino	-0.05	6

Figura 55. Cuadro comparativo de la cualidades apreciadas en cada una de las construcciones del engrane.

Análisis de resultados

Como se muestra en la figura 54, en detalles de bajas dimensiones la carga térmica de la deposición es determinante. En el engrane No.1, de filamento fino, un contorno y air gap 0, se aprecia una leve distorsión geométrica en aquellos dientes donde no se deposita un filamento interno que soporte al contorno, es decir, filamentos finos sin soporte resultan débiles y son susceptibles a escurrimiento por exceso de temperatura; dicho fenómeno también se logra observar en los engranes 4, 5 y 7, específicamente, en los engrane 4 y 7, en donde el doble contorno impide la llegada de filamentos internos, se agudiza este comportamiento. Sin embargo, la carga térmica se hace notar de manera drástica en la deposición de filamentos gruesos que, como se aprecia en la construcción del engrane 3, generan una distorsión geométrica que implica la pérdida de la construcción.

El filamentos mediano, engrane 2, con air gap de 0 y un sólo contorno, resultó con la mejor resolución al no mostrar distorsión geométrica alguna, cumplir con el contorno y no dejar vacíos dentro del diente.

Por su parte, el espacio entre filamentos negativo (-0.05 mm de air gap), aún sin llegar al límite establecido de -0.07mm (ver sección 3.3.1), también contribuye a generar una mayor carga térmica en la construcción y, por lo tanto, genera detalles proclives a la distorsión geométrica; los engranes 5, 6 y 7, sin importar el ancho del filamento, muestran deformación de los dientes.

4.4 Pruebas de permeabilidad

Debido a la naturaleza del proceso FDM, la permeabilidad o infiltración es una cualidad inherente a las construcciones. En la literatura, la mayoría de los trabajos relacionados con esta cualidad se enfocan en los procesos de sellado con objeto de evitarla, sin embargo, existe la posibilidad de no contar con un método de sellado compatible con la funcionalidad de la pieza o que la complejidad de la geometría dificulte su aplicación. Por otro lado, dependiendo de la función que desempeñará la pieza, la permeabilidad pueda llegar a ser una cualidad de utilidad. Por lo anterior, resulta importante entender cómo influyen los parámetros de manufactura en la permeabilidad de una construcción.

Dado que la orientación es el parámetro de mayor influencia en todas las características de las construcciones FDM, las pruebas estuvieron dirigidas a mostrar la influencia de tres distintas orientaciones en la infiltración de un fluido, específicamente agua, en una construcción de pared constante. Para este propósito se diseñaron y construyeron pipetas cilíndricas y un banco de pruebas en material de modelo ABS-M30. En la figura 56 se muestra el esquema general del experimento.

Permeabilidad en construcciones FDM

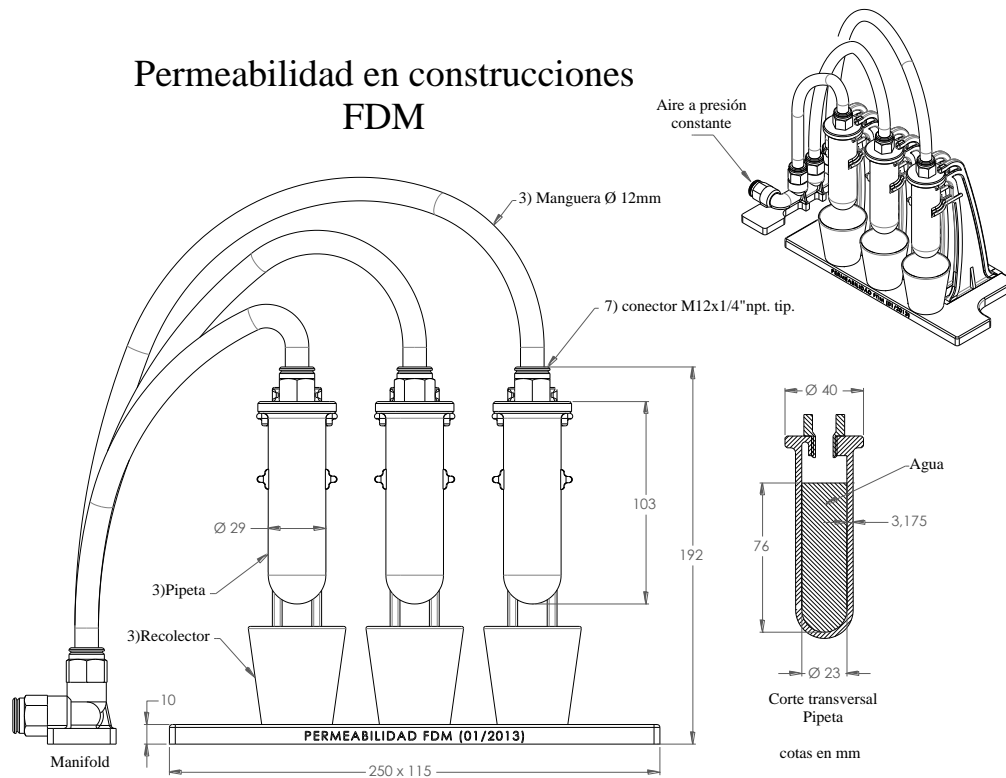


Figura 56. Esquema general de las pruebas para mostrar la influencia de la orientación de construcción en la permeabilidad de construcciones generadas mediante la tecnología FDM.

Las pipetas se diseñaron con espesor de pared constante de 3.18 mm (1/8") y capacidad para alojar 30 ml de agua. La figura 57 muestra un corte transversal y el modelo 3D de una pipeta.

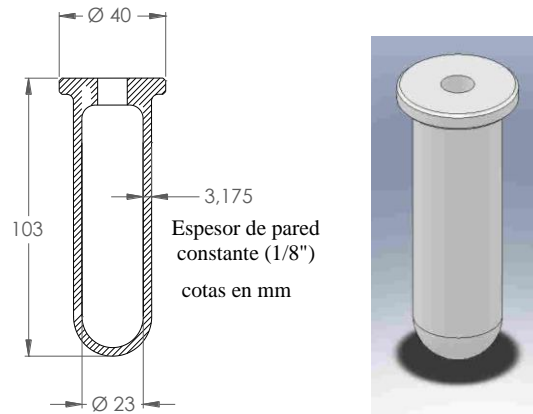


Figura 57. CAD del corte transversal de una pipeta y su modelo 3D.

El banco de pruebas fue diseñado con el objetivo de aprovechar las cualidades que ofrece la tecnología FDM, por lo que su funcionalidad y la reducción del tiempo de

construcción y materiales fueron los principales criterios de diseño. La figura 58 muestra el modelo 3D del banco de pruebas.

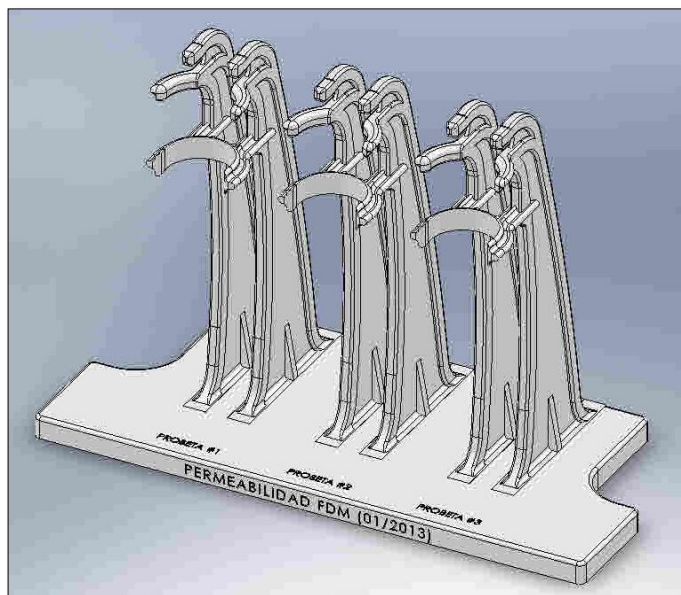


Figura 58. Modelo 3D del banco de pruebas.

Los archivos STL fueron procesados dentro de *Insight* versión 8.1, empleando para las tres pipetas los parámetros de manufactura por capa pre-establecidos en el programa. Los parámetros utilizados en la construcción de las pipetas se muestran en la tabla 13.

Parámetros de manufactura	
Espesor de capa	0.254
Estilo de contorno	uno
Ancho de contorno	0.506
Estilo de llenado	sólido
Ángulo de filamento	45°
Estilo visible de superficie	normal
Ancho de filamento interno	0.506
Gap entre filamentos internos	0.0

Tabla 13. Parámetros de manufactura por capa empleados en la construcción de las pipetas.

Las orientaciones de construcción elegidas para las pipetas fueron de 0°, 45° y 90° con respecto a la horizontal como se muestra en la figura 59. En la misma figura se puede observar el conjunto, una vez construido y aún dentro de la máquina Fortus 900mc, conteniendo los módulos que conforman al banco de prueba, el manifold y las pipetas.

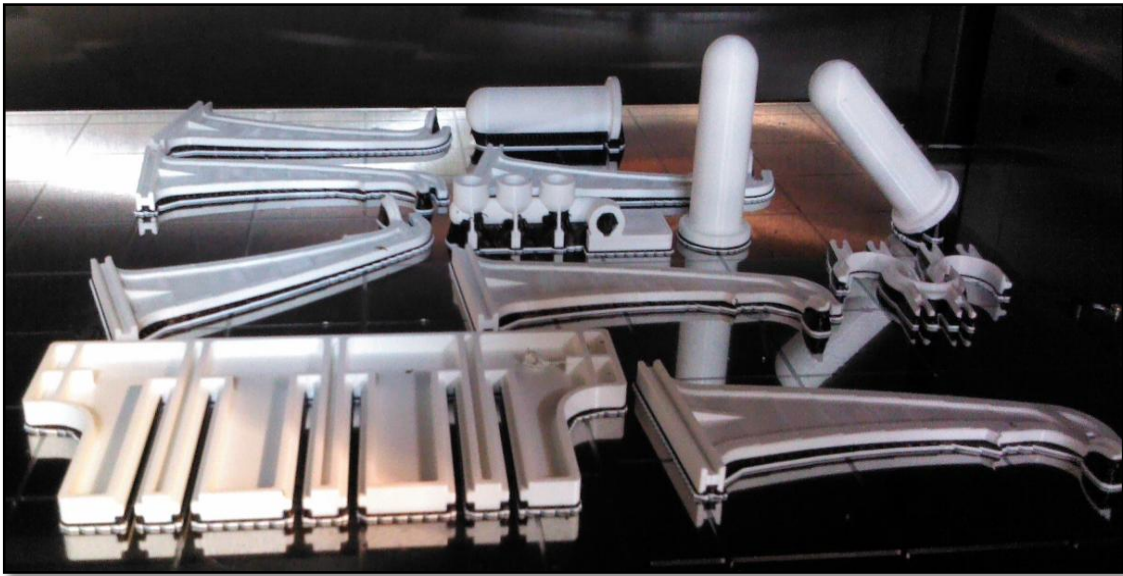


Figura 59. Pipetas y banco de pruebas; construcciones aún dentro la máquina Fortus 900mc.

Una vez realizada la construcción se removió el material de soporte (SR-20) disolviéndolo dentro de una tina con una solución de agua y detergente a 60 grados centígrados durante 24 horas.

Las pipetas fueron sometidas a un proceso de secado por 48 horas a 75 grados centígrados, con el objetivo de calcular su volumen de porosidad antes de los experimentos y relacionarlo con el volumen de agua absorbido durante el experimento. El volumen de porosidad fue calculado de acuerdo al método utilizado por Mireles *et al.*, descrito en la sección 3.3.3. Los datos obtenidos de las pipetas deshidratadas se muestran en la tabla 14.

Orientación	0°	45°	90°
Masa real (gr.)	33.30	33.27	33.16
Masa ideal (gr.)	34.57	34.57	34.57
Masa de porosidad (gr.)	1.27	1.30	1.41
Volumen poroso (cm ³)	1.22	1.25	1.36

Tabla 14. Datos de las pipetas deshidratadas.

Se realizaron tres pruebas para mostrar de manera representativa la influencia de la orientación en la permeabilidad de una construcción FDM que contenga un líquido con la viscosidad del agua. La primera prueba consistió en alojar dentro de las pipetas 30 ml de agua con pigmento y someterlo a una presión constante de 0.5 bar durante 5 horas, con objeto de entender la mecánica que sigue el fluido al ser sometido a presión. La figura 60 muestra el montaje de la prueba.

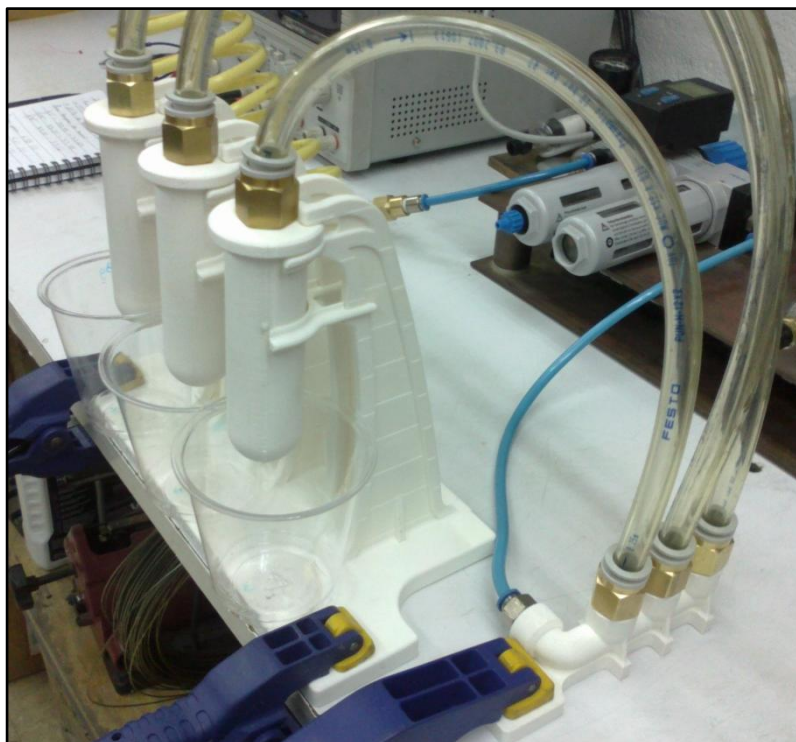


Figura 60. Montaje de la prueba de infiltración.

Para la segunda prueba se realizó de nuevo el proceso de secado de las pipetas para luego ser sometidas a un post-proceso de inmersión dentro de una solución de 90% acetona y 10% agua durante 30 segundos. Bajo las mismas condiciones de presión de aire y volumen de agua, se realizó la prueba con objeto de mostrar la influencia de un post-proceso, documentado en la literatura como sencillo y económico, en la permeabilidad de una construcción FDM.

La última prueba consistió en la inmersión completa de las pipetas en agua y aplicar aire a presión para mostrar las zonas que presentan mayor fuga, aun después de haber sido sometidas al post-proceso antes descrito.

Resultados

Prueba de permeabilidad con líquido pigmentado

La primer prueba, que consistió en alojar dentro de las pipetas 30 ml. de agua y someterlas a presión constante durante 5 horas, mostró dos tipos de comportamiento en las pipetas. El primer comportamiento, mostrado por la pipeta orientada a 0°, presentó mínima resistencia al filtrado una vez iniciada la presión, permitiendo la salida de gran parte del volumen de agua en aproximadamente 5 minutos. El segundo comportamiento, presentado por las pipetas orientadas a 45° y 90°, fue de mayor

resistencia al filtrado, absorbiendo y reteniendo parte del líquido. La figura 61 muestra el banco de pruebas al momento de detener la prueba.

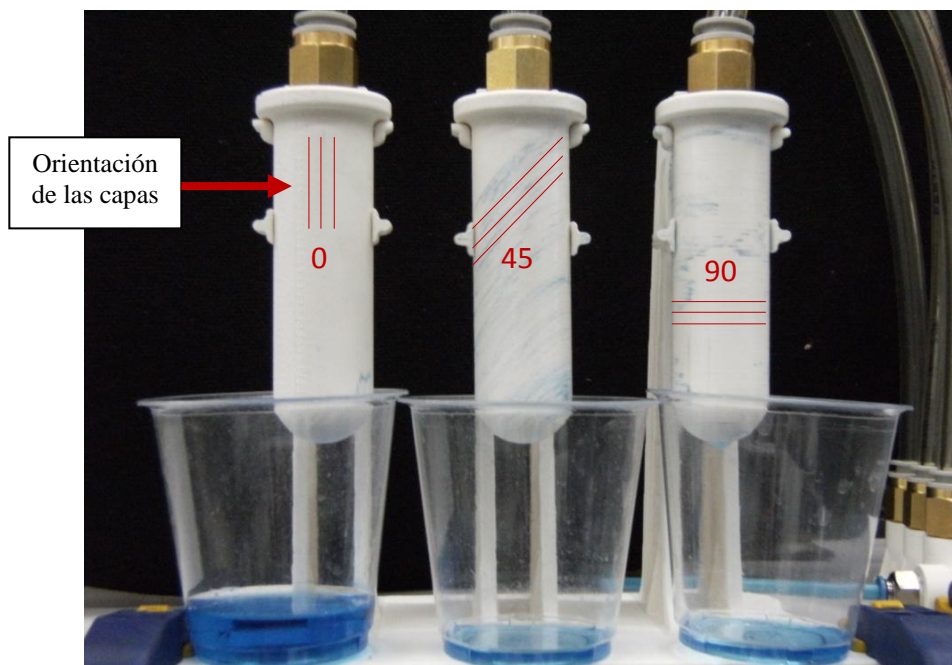


Figura 61. Banco de pruebas al finalizar la primer prueba de permeabilidad. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0° , 45° y 90° con respecto al flujo.

La figura 62 muestra las pipetas con los rastros dejados por el pigmento; se observa como la pipeta orientada a 0° solo presenta marcas del pigmento en la zona inferior, paralelas al flujo, mientras que las otras orientaciones presentan rastros de pigmentación en toda su superficie.

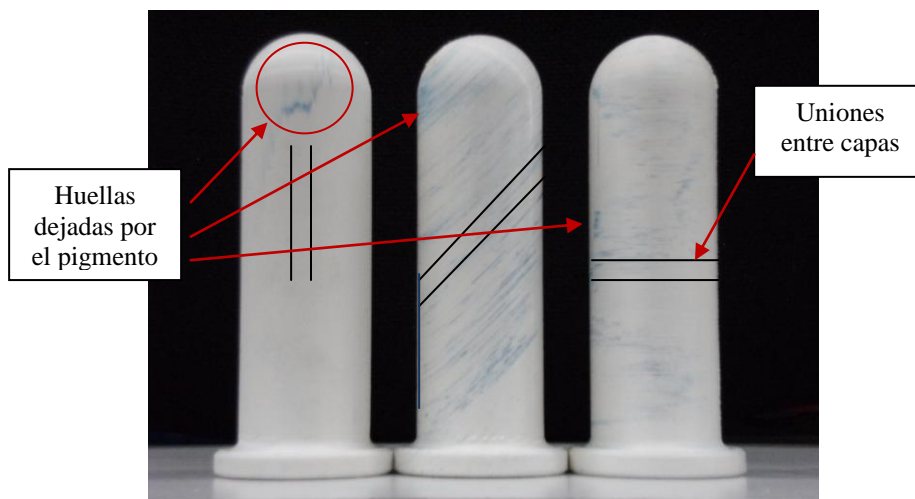


Figura 62. Huella dejada por el pigmento en las pipetas. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0° , 45° y 90° .

Los datos obtenidos del pesaje de las pipetas después de la prueba y del volumen de agua filtrada y recolectada en los recipientes (recuperada), se presentan en la tabla 15.

Orientación	0°	45°	90°
Masa de la pipeta (gr.)	33.36	33.95	34.10
Masa retenida de agua (gr.)	0.06	0.68	0.94
Volumen de agua recuperada (cm ³)	25.17	5.22	4.61

Tabla 15. Datos de las pipetas después del experimento.

La masa de agua retenida por la pipeta se calculó mediante la diferencia entre la masa de la pipeta deshidratada (antes de la prueba, tabla 14) y la masa de la pipeta después de la prueba. De los datos anteriores se observa cómo la pipeta orientada a 0° siendo la de menor porosidad, muestra la menor retención y, por lo tanto, permite la mayor filtración. En la figura 63, se presentan tres gráficos comparativos entre las orientaciones y su porosidad inicial, el volumen de agua retenido por la pipeta y el volumen de agua filtrada y recolectada.

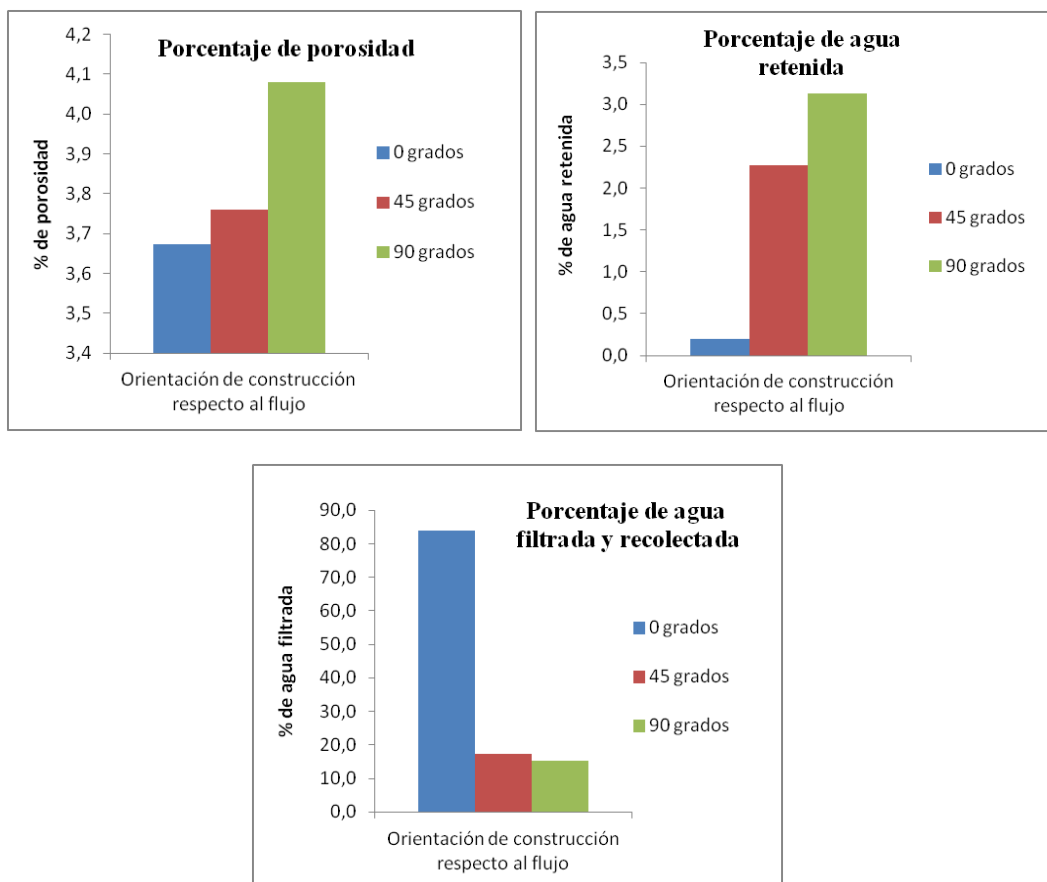


Figura 63. Gráficos comparativos entre orientaciones de construcción y porcentajes de porosidad, agua retenida y agua filtrada.

Pruebas de permeabilidad en pipetas con post-proceso

Con objeto de entender el cambio superficial que sufren las pipetas al ser sometidas a un post-proceso, en específico, a la inmersión por 30 segundos dentro de una solución 90% acetona y 10% agua, se tomaron imágenes en microscopio binocular marca Iroscope® modelo NZ-14-TU con aumento de 20x, de las pipetas antes y después del post-proceso. Estas imágenes se presentan en la figura 64.

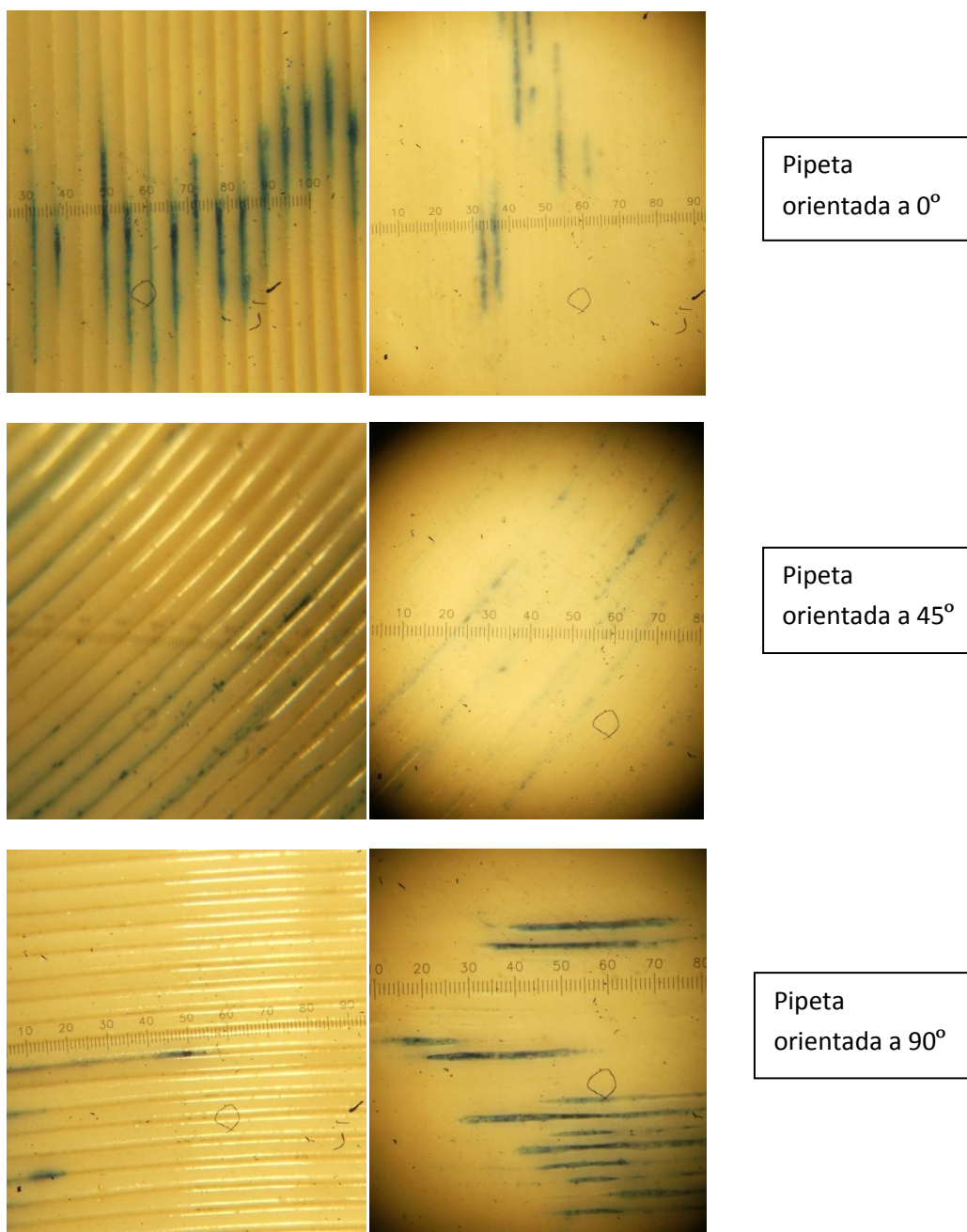


Figura 64. Imágenes de la superficie de las pipetas. Izquierda, antes del post-proceso; derecha, después de ser sometidas a un post-proceso de inmersión en acetona.

Resulta notable la distorsión que sufren los filamentos después de ser aplicado el post-proceso; en las imágenes anteriores son apenas perceptibles las uniones entre filamentos gracias a los rastros dejados por el pigmento. Antes del post-proceso, los filamentos muestran claramente su forma y sus uniones.

Los datos obtenidos de pesar las pipetas para calcular su volumen de porosidad y el volumen de solución absorbida se presentan en la tabla 16. Cabe señalar que las tres pipetas absorbieron la misma cantidad de solución a pesar de presentar diferentes volúmenes de porosidad.

Orientación	0°	45°	90°
Masa de la pipeta antes del post-proceso (gr.)	33.36	33.33	33.23
Masa de la pipeta después del post-proceso (gr.)	33.48	33.45	33.34
Volumen poroso antes del post-proceso (cm ³)	1.21	1.24	1.34
Volumen poroso después del post-proceso (cm ³)	1.05	1.08	1.18
Volumen absorbido de solución (cm ³)	0.16	0.16	0.16

Tabla 16. Datos de las pipetas antes y después del post-proceso.

Se presenta, en la figura 65, el banco de pruebas al finalizar el experimento con las pipetas ya post-procesadas. Las condiciones de volumen de agua depositado y presión de aire, así como la posición de las pipetas en el banco de pruebas, fueron las mismas que en la primera prueba (30 ml de agua y 0.5 bar de presión).

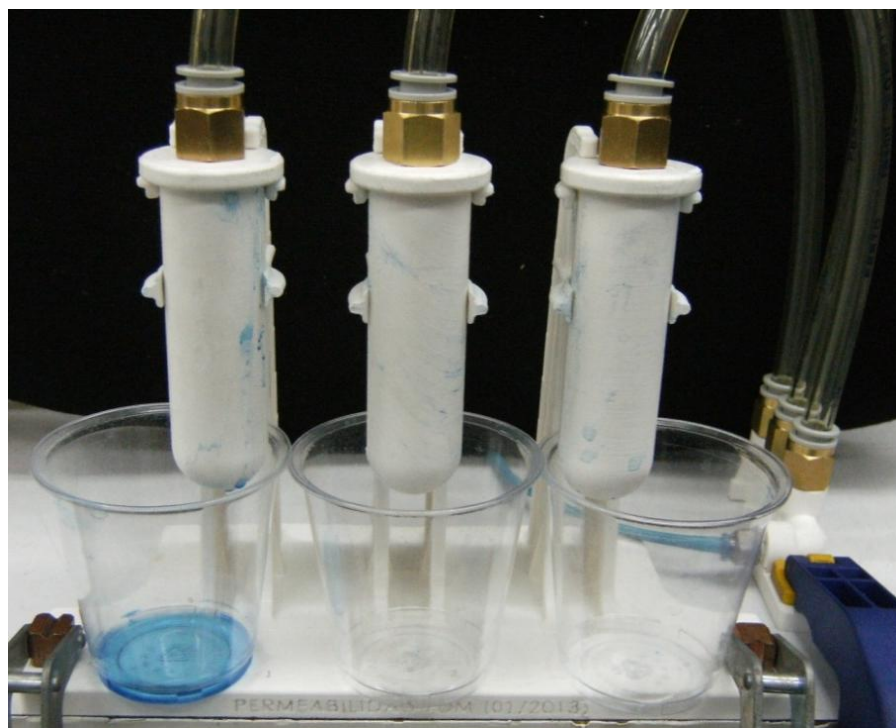


Figura 65. Banco de pruebas al finalizar la segunda prueba de permeabilidad. De izquierda a derecha, las pipetas construidas orientadas a 0°, 45° y 90° con respecto al flujo.

Como se puede observar en la figura 65, es notable la disminución de agua filtrada en la pipeta orientada a 0°, aproximadamente un 80% menor respecto a lo obtenido antes del post-proceso, además de mostrar rastros del pigmento en toda su superficie; por su parte, las orientaciones a 45° y 90° no mostraron filtración alguna. Los datos obtenidos de las pipetas después del experimento se presentan en la tabla 17.

Orientación	0°	45°	90°
Masa de la pipeta (gr.)	34.09	34.10	33.89
Masa absorbida de agua (gr.)	0.61	0.65	0.55
Volumen de agua filtrada (cm ³)	5.74	0	0

Tabla 17. Datos de las pipetas con post-proceso después del experimento.

Con los datos anteriores, se presentan en la figura 66, gráficos comparativos entre las orientaciones de construcción con respecto a la porosidad, volumen retenido de agua y porcentaje de agua filtrada y recolectada.

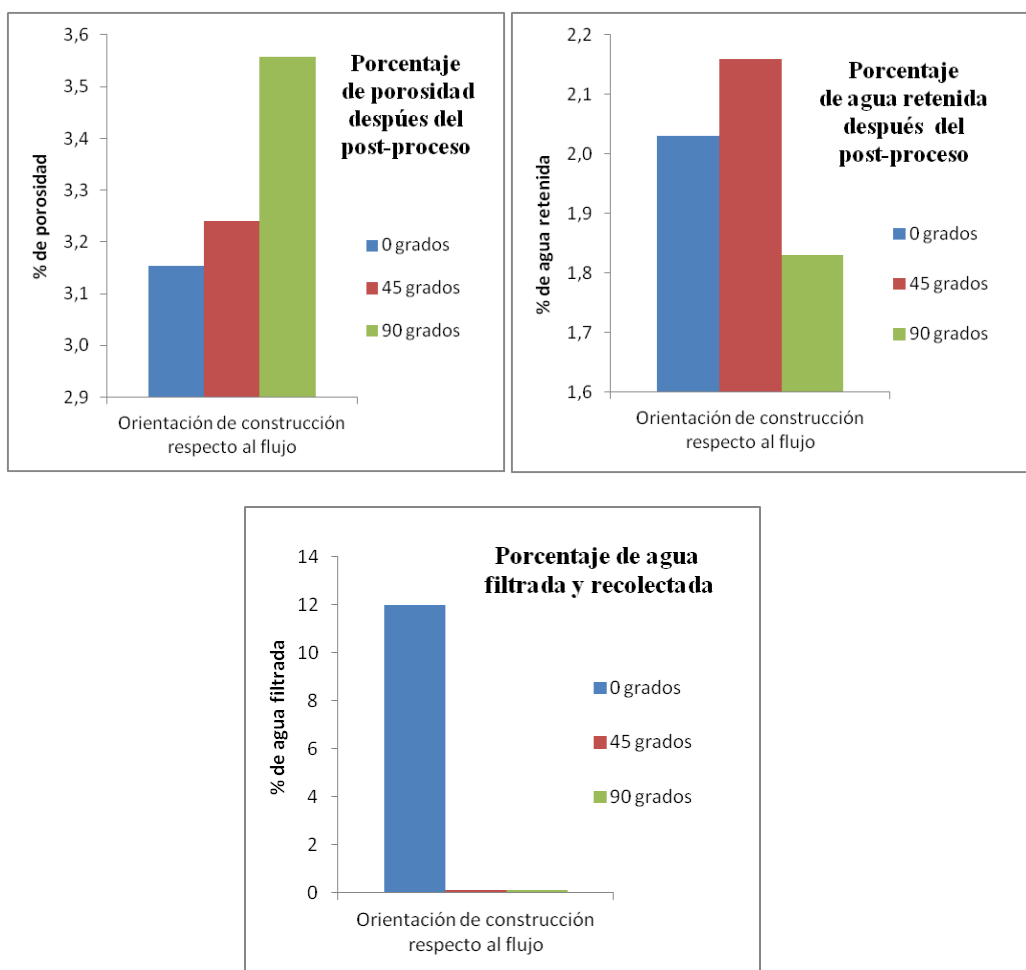


Figura 66. Gráficos comparativos entre orientaciones de construcción y porcentajes de porosidad, agua retenida y agua filtrada en las pipetas con un post-proceso.

Prueba de inmersión

La configuración del experimento se muestra en la figura 67.

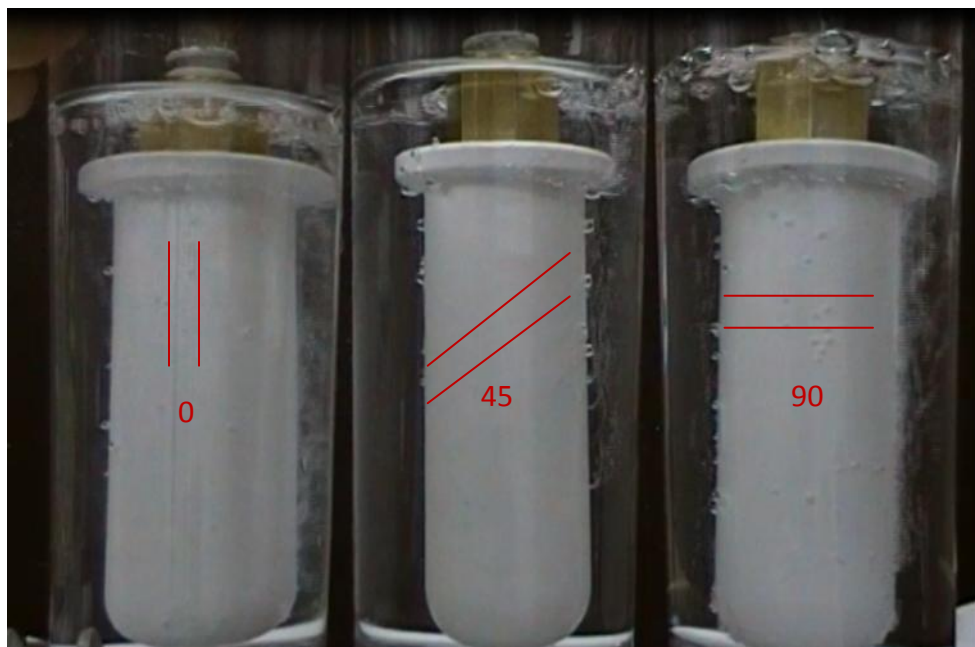
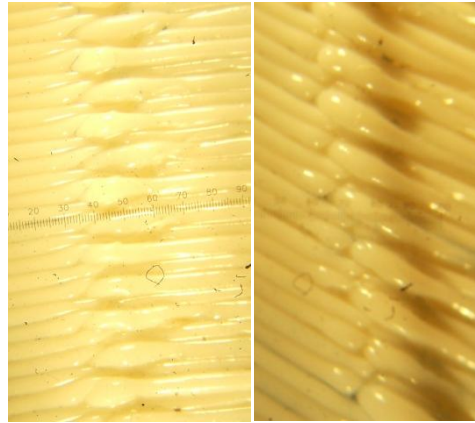


Figura 67. Prueba de inmersión. De izquierda a derecha, pipetas construidas con orientación de 0°, 45° y 90°.

La pipeta orientada a 0° presenta fugas a lo largo de la construcción, es decir, se perciben fugas a todo lo largo de las uniones entre capas. La pipeta construida a 45° muestra la menor filtración, percibiéndose homogénea y de forma puntal a lo largo de la construcción. Por su parte, la pipeta construida a 90° muestra la mayor filtración ya que ésta se continúa presentando a lo largo de la unión entre capas, siendo la orientación a 90° la que mayor número de capas contiene.

Un comportamiento interesante es el mostrado por las pipetas orientadas a 90° y 45°, donde las denominadas “costuras”, dejadas por el inicio y final de la deposición del filamento para generar el contorno de la pipeta, resultan ser una zona de clara filtración. Dichas costuras, característica de las construcciones FDM, son mostradas en la figura 68.



a)

b)

Figura 68. Costuras presentadas en las pipetas: a) orientada a 90° , b) orientada a 45° [51].

Análisis de resultados

Las uniones entre capas muestran ser las zonas de mayor filtración en una construcción FDM. El primer experimento sugiere que la unión entre capas es parcial e incompleta, como lo describen las investigaciones reportadas en la sección 3.1. Aunque la construcción se realiza dentro de una cámara a temperatura controlada, permitiendo así mantener una temperatura por encima de la T_g durante un periodo largo de tiempo, la adhesión de filamentos entre capas resulta no ser suficiente para contener un fluido.

La orientación a 0° respecto al flujo, si bien es la de menor porosidad, presenta un mínimo de volumen de líquido retenido y una filtración del 80% del líquido contenido en un periodo muy corto de tiempo. Lo anterior sugiere que al existir mínima resistencia por parte de las uniones entre capas a la filtración del fluido, no se presenta un fenómeno de permeabilidad o infiltración dentro la construcción, lo que si sucede en las orientaciones a 45° y 90° .

La orientación a 90° respecto al flujo es la de mayor porosidad, mayor número de capas y la de mayor volumen de agua retenida. Las orientaciones a 45° y 90° presentaron mínima filtración, comportamiento que se atribuye a los fenómenos de sinterizado que provocan uniones más uniformes entre los filamentos de una misma capa; así pues, la permeabilidad que se presenta entre las capas orientadas a 45° y 90° respecto al flujo, permite que el fluido se infiltre en toda la construcción y se retenga un mayor volumen del líquido. La figura 69 representa el comportamiento que sugieren los resultados de las pruebas realizadas.

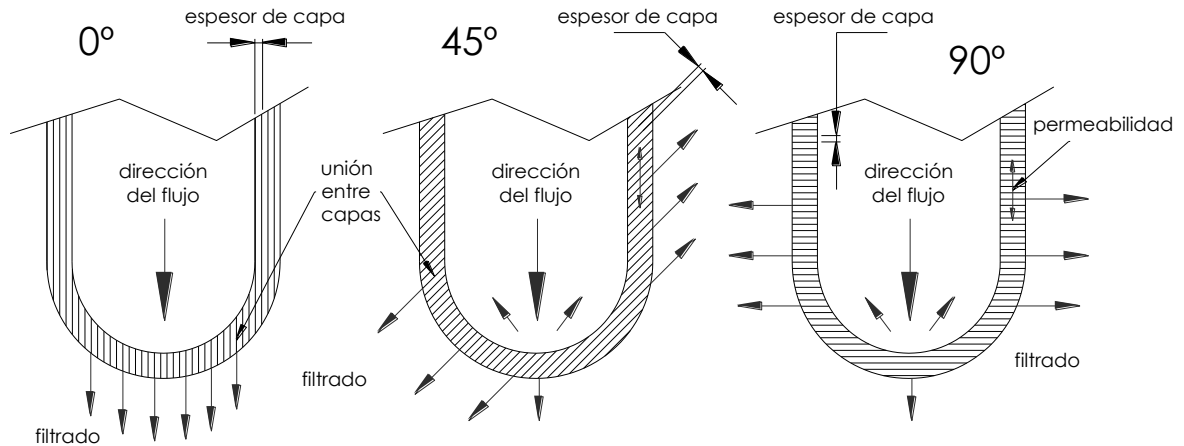


Figura 69. Mecánica sugerida del análisis de las pruebas de permeabilidad dentro de una construcción FDM.

Al someter las pipetas a un post-proceso químico, su superficie se modifica y genera una mayor adhesión entre capas, como lo demuestra la poca filtración que permitió la pipeta orientada a 0°. Como lo indican las investigaciones de sellado reportadas en el sección 3.3.3, las tres pipetas absorbieron la misma cantidad de solución de acetona con agua, ya que fueron sumergidas un mismo periodo de tiempo. Al existir una mayor resistencia a la filtración, en específico por parte de la pipeta orientada a 0°, ésta registró una retención de agua parecida a la mostrada por las otras dos pipetas en la primer prueba, lo que sugiere un efecto localizado del post-proceso en las uniones entre capas, es decir, el agente químico derrite los filamentos externos y promueve su unión, ver figura 64. La figura 70, presenta un gráfico comparativo del efecto del post-proceso en las diferentes orientaciones.

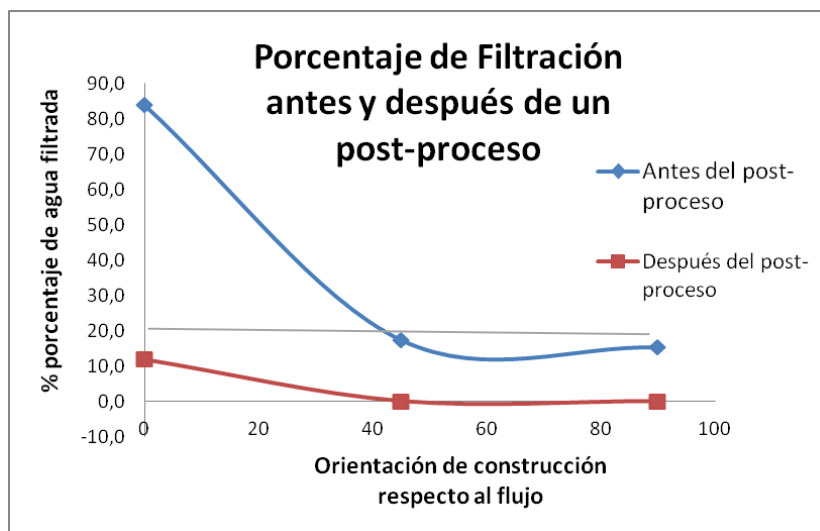


Figura 70. Gráfica comparativa de los efectos del post-proceso en la filtración a diferentes orientaciones de construcción respecto al flujo.

5. Conclusiones

Con el presente trabajo se genera una recopilación de investigaciones y trabajos relacionados a la tecnología FDM, entre ellos se encuentran los enfocados a describir el funcionamiento de la tecnología (sección 1.3), explicar los fenómenos físicos involucrados en el proceso (sección 3.1), las características de las construcciones (sección 3.3) y los parámetros de manufactura por capa (sección 3.2). En ellos se describen las dos fases del proceso FDM con objeto de entender sus principios y alcanzar una mayor comprensión de los fenómenos térmicos, los cuales determinan la calidad de las uniones y, por lo tanto, la integridad y características de las construcciones. Se describen a detalle los parámetros de manufactura por capa y las características inherentes a las construcciones, mostrando así, las capacidades más importantes de la tecnología FDM.

Por otra parte, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en el presente trabajo, ayudan a explicar, de manera práctica, la influencia de los parámetros de manufactura por capa y su repercusión en las características de las construcciones.

En la sección 4.1, enfocada a explicar los parámetros de influencia en el tiempo de construcción, se muestra la importancia del área de construcción en el tiempo de manufactura y las velocidades de deposición resultantes de cada tamaño de boquilla en función al tipo de material y su respectivo comportamiento del flujo volumétrico. Las relaciones anteriores (gráficos de las figuras 39-44) en conjunto con el entendimiento de la mecánica de la deposición, es decir, las labores de purga, limpieza y tiempo de estabilización, aportan la información necesaria que explica la relación entre boquilla, orientación de construcción y el tiempo de manufactura. La orientación define el número de capas, el material define los tamaños de boquilla disponibles y, estos a su vez, definen los anchos de filamentos que, una vez conocida la velocidad de deposición, dan la posibilidad de calcular el tiempo de construcción. Como ha sido mencionado, el material de soporte influye en el tiempo de construcción y es un parámetro único en función a cada geometría.

Resulta importante señalar que las gráficas de flujo volumétrico muestran un área mínima, por encima de la cual, los procesos de purga y limpieza no repercuten en el tiempo de construcción y permiten un mejor aprovechamiento de la tecnología. De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección 4.1, las gráficas de flujo volumétrico mostradas en las figura 40, 42 y 44, para los materiales ABS-M30, PC y PC-ABS, respectivamente, se concluye que el área mínima de construcción para los tamaños de boquilla T12, T16 y T20 es de $50 \times 10^3 \text{ mm}^2$, es decir, lo que equivaldría a un área formada por un cuadrado de 225 x 225 mm. Por su parte, la boquilla T10 muestra estabilidad en su flujo a partir de un área de $20 \times 10^3 \text{ mm}^2$.

Para complementar la información generada respecto a la relación que guarda el tamaño de boquilla y la orientación de construcción, en la sección 4.2 se obtienen resultados de valor angular respecto al tamaño de boquilla, tipo de material y orientación, generando patrones angulares para asistir en el proceso de diseño y aportar una mejor percepción del acabado superficial, tanto en el diseñador como en el usuario de la tecnología. Estas pruebas sugieren que el tamaño de boquilla T12, empleando material de modelo ABS-M30, es el de mayor exactitud para construir superficies inclinadas, y que a un mismo tamaño de boquilla, es el ABS-M30 en comparación al PC y al PC-ABS, el material de modelo que mayor exactitud angular alcanza en una construcción.

Al profundizar en los detalles de bajas dimensiones, en la sección 4.3, se muestran algunas repercusiones del ancho de filamento, estilo de contorno y distancia entre filamentos en la resolución, llenado y distorsión geométrica. Como lo sugieren los resultados de dicha sección, la carga térmica influye de manera determinante y se concluye que anchos de filamentos finos y medios son una buena opción formar dichos detalles, siempre y cuando no se dejen espacio vacíos internos que promuevan deformaciones por escurrimiento. Tanto los filamentos gruesos como la distancia entre filamentos negativa aumentan la carga térmica. Por su parte, las simulaciones generadas por el programa de cómputo *Insight* versión 8.1, son apegadas a lo que serán las trayectorias de deposición, sin embargo, para detalles de bajas dimensiones requieren de experiencia por parte del usuario para su interpretación.

Respecto a las características de permeabilidad, las pruebas realizadas en la sección 4.4, presentan resultados que sugieren una mecánica del comportamiento de la filtración e infiltración de un líquido dentro de una construcción FDM de pared constante. Se concluye que la orientación de construcción es un parámetro determinante en la infiltración presentada por una construcción, ya que es la unión entre capas donde se presenta el mayor filtrado. Así mismo, un post-proceso con una solución en base a acetona, genera una mejor unión entre capas y modifica la mecánica de filtración.

De esta manera y como fruto de este trabajo, se generó un informe técnico donde se presentan recomendaciones que auxilian al diseñador a determinar si el proceso FDM es adecuado para la manufactura de su pieza, para diseñar piezas buscando aprovechar las fortalezas que la tecnología ofrece y explicar algunas de las relación que guardan los parámetros de manufactura y la características que logran las construcciones.

6. Referencias

- 1 T. Wohlers (2012), Wohlers report 2012, Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Annual worldwide progress report, Wohlers Associates Inc., United State of America, 2012.
- 2 D.L. Bourell, M.C. Leu, D.W. Rosen (2009) Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing, Eds., Univ. of Texas. Disponible para su descarga gratuita en <http://wohlersassociates.com/roadmap2009.pdf>.
- 3 Gurr, M. and R. Mülhaupt (2012) 8.04 - Rapid Prototyping. Polymer Science: A Comprehensive Reference. M. Editors-in-Chief: Krzysztof and M. Martin. Amsterdam, Elsevier: 77-99.
- 4 Gibson, I., D. W. Rosen, (2010) Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer US.
- 5 <http://reprap.org>
- 6 Ahn D., Jin-Hwe k, Soonman k, (2009) Representation of surface roughness in fused deposition modeling, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 209, 5593-5600.
- 7 <http://www.stratasys.com>
- 8 <http://envisiontec.com/products/3d-bioplottter>
- 9 Bellini A, Gucerì S, Bertoldi M (2004) Liquefier dynamics in fused deposition. J. Manuf. Sci. Eng. pub. By ASME. 126:237–246.
- 10 Comb, J., Priedeman, W. and Turley, P. (1994). “Control parameters and material selection criteria for fused deposition modeling”, Proceedings of The Fifth International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton, Dayton, OH, 12-15, pp. 163-70
- 11 Es Said, Os., Foyos, J., Noorani, R., Mandelson, M., Marloth, R., Pregger, B.A., (2000), Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples, Materials and Manufacturing Processes, 15/1: 107–122.
- 12 Khan, Z.A., Lee, B.H., Abdullah, J., (2005), Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object, Journal of Materials Processing Technology, 169:54–61.
- 13 Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. (2002) Anisotropic material properties of fused deposition modelling ABS. Rapid Prototype J, 8(4):248–57.
- 14 Anitha, R., Arunachalam, S. and Radhakrishnan, P. (2001), Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling, Journal of Material Processing Technology , Vol. 118, pp. 385-388.
- 15 FDM Design Handbook, segunda edición, 2010. Stratasys Inc.
- 16 El-Gizawy, A.S., (2011) Process-induced Properties of FDM Products, Proceedings of The ICME, International Conference on Mechanical Engineering and Technology Congress & Exposition, ICME 2011-40936, France, CD-ROM—7 pp.
- 17 Yardimci, M.A., Güçeri, S.I. and Danforth S.C. (1995). “A phenomenological model for fused deposition processing”, Solid Freeform Fabrication Symposium 1995, University of Texas at Austin, Austin, TX, pp. 189-95.
- 18 Yardimci M.A., Gucerì S.I.(1996) "Conceptual Framework for the Thermal Process

- 19 Modeling of Fused Deposition", RP Internet Conference, Dicembre 15 - Marzo 31.
- 20 Yardimci M. A., Guceri S. 1., Agarwala M., Danforth S. C. (1996) "Part quality prediction tools for Fused Deposition processing," Proceedings of SFF Symposium, pp. 539-548.
- 21 Yardimci M. A., Guceri S. 1., Hattori T., Danforth S. C. (1997). "Thermal analysis of fused deposition", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, pp. 689-697.
- 22 Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C. and Gu, P. (2002), "Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties", Journal of Manufacturing Process, Vol. 14 No. 2, pp. 129-32.
- 23 Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu, (2008),"Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", Rapid Prototyping Journal, Vol. 14 Iss: 2 pp. 72 – 80
- 24 Li, L., Gu, P., Sun, Q. and Bellehumeur, C. (2003),"Modeling of bond formation in FDM process", The Transactions of NAMRI/SME, Vol. 31, pp. 613-20.
- 25 Rodriguez, J.F., Thomas, J.P. and Renaud, J.E. (2000), "Characterization of mesostructure of fuse-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6 No. 3, pp. 175-185.
- 26 Bellini A, Guceri S, Bertoldi M (2004) "Liquefier dynamics in fused deposition", J Manuf Sci Eng 126:237–246, pub. By ASME.
- 27 Bagsik A., Schöppner V., Klemp E., (2010), "FDM Part Quality Manufactured with Ultem*9085", 14th International Scientific Conference on Polymeric Materials, September 15. – 17, Halle (Saale).
- 28 Bagsik A., Schöppner V., (2011), "Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts Manufactured with Ultem*9085", Antec, Boston.
- 29 Sood A.K., R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra: (2010), "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modeling processed parts", Materials and Design 31, pp. 287-295.
- 30 Ang K.C., K. F. Leong, C. K. Chua, and M. Chandrashekar, (2006), "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modeling-fabricated porous structures," Rapid Prototyping Journal, vol. 12: 100-112.
- 31 Galantucci, L.M., Lavecchia, F., Percoco, G. (2010), "Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using FDM", in: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 247-250.
- 32 Galantucci, L.M., Lavecchia, F., Percoco, G. (2008), "Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts", in: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 243-246.
- 33 Villalpando, L. and J. Urbanic (2012), "Parametric Internal Matrix Structures for Components Built by Fused Deposition Modelling". Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. H. A. ElMaraghy, Springer Berlin Heidelberg: 287-292.
- 34 Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G (2009),"Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts". CIRP Ann Manuf Technol 58:189–192.

- 35 Boschetto, A., V. Giordano, et al. (2012). "Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 61(9-12): 945-956.
- 36 Vasudevarao B, Natarajan DP, Henderson M, (2000), "Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation." *Proceedings of solid free form fabrication*. Austin, USA: 252–58.
- 37 Pennington, R. C., Hoekstra, N. L., and Newcomer, J. L. (2003), "Significant factors on the dimensional accuracy of fused deposition modeling." *Proceedings of the Annual technical conference – ANTEC*, vol. 1, pp. 880–883.
- 38 Jiang, K. Y. and Gu, Y. H. (2004), "Controlling parameters for polymer melting and extrusion in FDM." *Key Engng. Mater.*, 258–259, 667–671.
- 39 Zhang, Y. and Chou, Y. K. (2006), "3D FEA simulations of fused deposition modeling process." In *Proceedings of ASME International Conference on Manufacturing science and engineering*, Ypsilanti, MI, MSEC2006-21132.
- 40 Sood A.K., R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, (2009) "Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modeling processed part using grey Taguchi method". *Material and design*30, 4243-4252.
- 41 Pandey, P. M., Venkata Reddy, N., and Dhande, S. G. (2007), "Part deposition orientation studies in layered manufacturing." *J. Mater. Processing Technol.*, 185(1–3), 125–131.
- 42 Lam A.E, Borille A.V, Gomes J.O (2008), "Some Experimental Studies of Mechanical Behavior of FDM Rapid Prototyped Parts." in *Bartolo Virtual and Rapid Manufacturing*. Taylor & Francis Group, pp. 617-628.
- 43 Mireles, J.; Adame, A.; Espalin, D.; Medina, F.; Winker, R.; Hoppe, T.; Zinniel, B.; Wicker, R., (2011), "Analysis of Sealing Methods for FDM-fabricated Parts.", *Solid freeform fabrication; an additive manufacturing conference International symposium*; 22nd, pp.185-196.
- 44 Stratasys Inc., (2011), "FDM for End-Use Parts: Tips and Techniques for Optimization", *Technical application guide*, Doc. No TAG 30-01.
- 45 Comb J., (2010), "How to design your part for Direct Digital Manufacturing". *Stratasys, Inc. White Paper*, SSYS-WP-DesignForDDM-1-12.
- 46 Ashby, M.F, Brechet, Y.J.M., Cebon, D. y Salvo, (2004). "Selection strategies for materials and processes", *Materials and Design*, 25(1), 51-67.
- 47 <http://www.stratasys.com/customer-support/cad-to-stl>
- 48 Stratasys Inc., (2011), "Comparison of Bonding Methods for FDM Materials", *Technical application guide*, Doc. No TAG 80-01.
- 49 Stratasys Inc., (2009), "Inserting Metal in FDM Parts", *Best practices*, Fortus-BP-Metalinserts-03-09.
- 50 <http://www.nextdayreprep.co.uk>. Copyright © 2012 NextDayRepRap.co.uk E&OE.
- 51 Ruiz-Huerta Leopoldo, Caballero-Ruiz Alberto, Ortega-Rodríguez Adolfo (2013). "Recomendaciones para el diseño y construcción de partes con la tecnología de Manufactura Aditiva FDM", *Informe Técnico clave ii-inme-2013-359*.

APÉNDICE

FORTUS 400mc™



Flexible, fast, predictable, and simple to operate. Manufacture Real Parts™ in a wide range of thermoplastics.

The Fortus 400mc™ allows you to manufacture Real Parts™ in-house with multiple production-grade thermoplastics, such as ABS-M30, PC, PPSF, ULTEM* 9085, PC-ABS blend and more. Fortus 400mc is a user configurable high-performance workhorse, ideal for creating Real Parts for conceptual models, functional prototypes, manufacturing tools, and end-use parts.

The Fortus 400mc coupled with Insight™ front-end processing software lets you quickly manufacture parts that match your mechanical, thermal, aesthetic and resolution needs. With the Fortus 400mc, you can accurately manufacture Real Parts with complex geometries, that are strong enough not only for functional testing, but end use as well.

Learn more about the
Fortus 400mc at stratasys.com



System Specifications

BASE SYSTEM CONFIGURATION									
Build Envelope (XYZ)	14 x 10 x 10 inches (355 x 254 x 254 mm)								
Material Delivery	One (1) Build material canister 92 in ³ (1508 cc) One (1) Support material canister 92 in ³ (1508 cc)								
UPGRADE CONFIGURATION									
Build Envelope (XYZ)	16 x 14 x 16 inches (406 x 355 x 406 mm)								
Material Delivery	Two (2) Build material canisters 92 in ³ (1508 cc) Two (2) Support material canisters 92 in ³ (1508 cc) Auto changeover between canisters								
MATERIAL OPTIONS									
Layer Thickness:	ABSi	ABS-IM30	ABS-M30i	ABS-ESD7	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM* 9085	PPSF
0.013 inch (0.330 mm)	X	X	X		X	X	X		X
0.010 inch (0.254 mm)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0.007 inch (0.178 mm)	X	X	X	X	X	X	X		
0.005 inch (0.127 mm)	X	X	X		X		X ¹		
Support Structure:	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	BASS	BASS, Soluble	BASS	BASS
Available Colors:	<ul style="list-style-type: none"> Trans-lucent Natural Trans-lucent Amber Trans-lucent Red 	<ul style="list-style-type: none"> Ivory White Black Red Blue Dark Grey 	<ul style="list-style-type: none"> Ivory 	<ul style="list-style-type: none"> Black 	<ul style="list-style-type: none"> Black 	<ul style="list-style-type: none"> Trans-lucent Natural White 	<ul style="list-style-type: none"> White 	<ul style="list-style-type: none"> Tan Black 	<ul style="list-style-type: none"> Tan
OTHER SPECIFICATIONS									
System Size/Weight	50.45 x 35.25 x 77.25 inches (1281 x 895.35 x 1962 mm)					With crate: 1511 lbs. (687 kg) Without crate: 1309 lbs. (593 kg)			
Achievable Accuracy	Parts are produced within an accuracy of +/- .005 inch or +/- .0015 inch per inch whichever is greater (+/- .127 mm or +/- .0015 mm per mm whichever is greater)* *Note: Accuracy is geometry dependent. Achievable accuracy specification derived from statistical data at 95% dimensional yield. See Fortus 400mc/360mc accuracy white paper for more information.								
Network Communication	10/100 base T connection. Ethernet protocol.								
Operator Attendance	Limited attendance for job start and stop required.								
Operating Environment	Maximum room temperature of 85°F (29.4°C). Maximum room dew point of 78°F (25.6°C).								
Power Requirements	230 VAC, 50/60 Hz, 3 phase, 16A/phase (20 amp dedicated circuit required)								
Regulatory Compliance	CE								
Software	All Fortus systems include Insight™ and Control Center™ job processing and management software.								

¹PC can attain 0.005 inch (0.127mm) layer thickness when used with SR-100 soluble support.

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)

Local Street Address
City, State, Zip
Phone #
Fax #

©2013 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM and Fortus are registered trademarks and Fused Deposition Modeling, FDM Technology, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 900mc, Insight and Control Center are trademarks of Stratasys Inc., registered in the United States and other countries. *ULTEM 9085 is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners. Product specifications subject to change without notice. Fortus400mcSellSheet-US-1013

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 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

FORTUS 900mc™



Designed and built for size, throughput, precision and repeatability.

The Fortus 900mc™ was specifically designed for direct digital manufacturing. Not only has the build envelope dramatically increased in size over previous Fortus systems, there are significant differences in its mechanical, electromechanical and electrical systems. Specifically, the head gantry is driven by ball-screw technology resulting in more accurate parts with improvements in predictability and repeatability. Additionally, the control software has been modified to leverage the system's hardware advancements. These features deliver greater throughput, accuracy, repeatability, and reliability.

Like all Fortus 3D Production Systems, the Fortus 900mc uses stable thermoplastics that continue to outperform nearly all competing technologies in accuracy and repeatability. Proven FDM (Fused Deposition Modeling) technology manufactures Real Parts™ in production-grade thermoplastics that are ideal for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools, and end-use parts.

Learn more about the Fortus 900mc at [stratasys.com](https://www.stratasys.com)



System Specifications

BASE SYSTEM CONFIGURATION																																																							
Build Envelope (XYZ)	36 x 24 x 36 inch (914.4 x 609.6 x 914.4 mm) Platen supports two (2) build zones for either a small or large build sheet																																																						
Material Delivery	Two (2) Build material canisters 92 in ³ (1508 cc) Two (2) Support material canisters 92 in ³ (1508 cc) Auto changeover between canisters																																																						
MATERIAL OPTIONS																																																							
Layer Thickness:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ABSi</th> <th>ABS-M30</th> <th>ABS-M30i</th> <th>ABS-ESD7</th> <th>PC-ABS</th> <th>PC-ISO</th> <th>PC</th> <th>ULTEM® 9085</th> <th>PPSF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>X</td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ABSi	ABS-M30	ABS-M30i	ABS-ESD7	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM® 9085	PPSF	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X																				
ABSi	ABS-M30	ABS-M30i	ABS-ESD7	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM® 9085	PPSF																																															
X	X	X		X	X	X	X																																																
X	X	X	X	X	X	X	X	X																																															
X	X	X	X	X		X																																																	
Support Structure:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Soluble</th> <th>Soluble</th> <th>Soluble</th> <th>Soluble</th> <th>Soluble</th> <th>BASS</th> <th>BASS, Soluble</th> <th>BASS</th> <th>BASS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	BASS	BASS, Soluble	BASS	BASS																																													
Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	BASS	BASS, Soluble	BASS	BASS																																															
Available Colors:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Trans-lucent Natural</th> <th>Ivory</th> <th>Ivory</th> <th>Black</th> <th>Black</th> <th>Trans-lucent Natural</th> <th>White</th> <th>Tan</th> <th>Tan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Trans-lucent Amber</td> <td>White</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>White</td> <td></td> <td>Black</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Trans-lucent Red</td> <td>Black</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Red</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Blue</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Dark Grey</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Trans-lucent Natural	Ivory	Ivory	Black	Black	Trans-lucent Natural	White	Tan	Tan	Trans-lucent Amber	White				White		Black		Trans-lucent Red	Black									Red									Blue									Dark Grey							
Trans-lucent Natural	Ivory	Ivory	Black	Black	Trans-lucent Natural	White	Tan	Tan																																															
Trans-lucent Amber	White				White		Black																																																
Trans-lucent Red	Black																																																						
	Red																																																						
	Blue																																																						
	Dark Grey																																																						
OTHER SPECIFICATIONS																																																							
System Size/Weight	109.1 x 66.3 x 79.8 inches (2772 x 1683 x 2027 mm)																																																						
System Size with manufacturing light tower	109.1 x 66.3 x 89.8 inches (2772 x 1683 x 2281 mm)																																																						
Achievable Accuracy	Parts are produced within an accuracy of +/- .0035 inch or +/- .0015 inch per inch whichever is greater (+/- .089 mm or +/- .0015 mm per mm whichever is greater)* <small>*Note: Accuracy is geometry dependent. Achievable accuracy specification derived from statistical data at 95% dimensional yield. See Fortus 900mc accuracy white paper for more information.</small>																																																						
Network Communication	10/100 base T connection. Ethernet protocol.																																																						
Operator Attendance	Limited attendance for job start and stop required.																																																						
Operating Environment¹	Maximum room temperature of 85°F (29°C). Maximum room humidity of 80%																																																						
Power Requirements¹	230 VAC (three phase) 50/60Hz, Voltage fluctuation +/- Current 40A																																																						
Additional Requirements¹	Compressed Air Required																																																						
Regulatory Compliance¹	CE																																																						
Software	All Fortus systems include Insight™ and Control Center™ job processing and management software.																																																						

¹See Fortus 900mc Site Prep Guide for detailed power and environmental specs

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)

Local Street Address
City, State, Zip
Phone #
Fax #

©2013 Stratasys Inc. All rights reserved. Stratasys, FDM and Fortus are registered trademarks and Fused Deposition Modeling, FDM Technology, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc, Fortus 900mc, Insight and Control Center are trademarks of Stratasys Inc., registered in the United States and other countries. *ULTEM 9085 is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV. All other trademarks are the property of their respective owners. Product specifications subject to change without notice. Fortus900mcSellSheet-US-1013

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 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