



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

ESTUDIO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN COMPONENTES CONSTRUIDOS POR
MANUFACTURA ADITIVA Y SU IMPACTO EN LA FABRICACIÓN DE IMPLANTES DE
PMMA POR DESMOLDEO

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

PRESENTA:
HOMERO ALBERTO CASTRO ESPINOSA

TUTOR
DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LÓPEZ PARRA MARCELO
Secretario: DR. CABALLERO RUIZ ALBERTO
Vocal: DR. RUIZ HUERTALEOPOLDO
1 er. Suplente: DR. BORJA RAMIREZ VICENTE
2 d o. Suplente: DR. RAMÍREZ REIVICH ALEJANDRO C.

Lugar donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA



FIRMA

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva Digitalización 3D y Tomografía computarizada, ubicado dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, con la tutoría del Dr. Leopoldo Ruiz.

Se agradece el soporte brindado por el proyecto PAPIME PE106417.

De igual forma a la Dra. Alba Covelo Villar y Dr. Arturo Barba Pingarrón del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la Facultad de Ingeniería por permitir el uso de sus instalaciones y equipo para la realización de las pruebas que involucraron el rugosímetro.

Agradecimientos totales

En esta sección quisiera dar los gracias a los que han sido parte de este camino recorrido para por fin cerrar este ciclo, y también, aquellos que se han mantenido desde hace un tiempo ya.

Quisiera agradecer en primer lugar a mi mamá Lulú que me devuelve el alma cada vez que creo que no puedo más y a mi papá Miguel por escucharme, descifrarme y orientarme en todo, y a mis hermanos por ser un claro ejemplo de trabajo y perseverancia.

Al Dr. Leopoldo Ruiz por dedicar su vida, tiempo y esfuerzo a algo tan grande como el MADiT, por el monumental apoyo recibido desde que llegué a este laboratorio y, sobretodo, por borrar de mi diccionario personal la palabra “imposible”.

También quisiera agradecer al Dr. Alberto por su asesoría, guía y apoyo que me ha brindado. A la vieja escuela de cuando nos llamábamos micromecánica, los que me inspiraron hacer el posgrado: El master, Ivanovich, Marcos, Pepe, Yara, César, Roque y Juan Alejandro. Y a la nueva generación: Monz, Gio, Donatello, Chumi, El químico, Ema, León, Roberts, Tania, Pablo, Adriana, Horacio y Luis, quienes hacen que las horas del laboratorio sean más entretenidas de lo que ya son.

A mis amigos de siempre: Tacho y Vale, que siempre están ahí, al pie del cañón.

¡Sin ustedes esto no hubiera sido tan genial!

He aquí mi secreto, que no puede ser más simple: sólo con el corazón se puede ver el bien; lo esencial es invisible para los ojos.

El principito

(Antoine de Saint-Exupéry)

Resumen

Dentro de las tecnologías de Manufactura Aditiva, los sistemas de extrusión de material representan la mayor cantidad de máquinas instaladas en el mundo. El Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés) es un proceso en el cual un filamento es extruido a través de una boquilla y depositado en una plataforma, una vez que se termina de depositar una capa completamente, la plataforma se desplaza hacia abajo, o el cabezal extrusor hacia arriba y la siguiente capa es extruida sobre la capa anterior, esto se repite hasta que un modelo es totalmente construido.

FDM es una tecnología que se utiliza para producir prototipos, herramental y partes de uso final sin limitaciones de complejidad geométrica. El uso de sistemas de diseño asistido por computadora y Manufactura Aditiva, ha permitido la construcción de moldes para la fabricación de implantes craneofaciales personalizados de PMMA diseñados a partir de archivos médicos de tomografía computarizada.

Debido a que el filamento es depositado capa por capa, las superficies de los moldes construidos por Manufactura Aditiva y los implantes generados a partir de ellos, presentan crestas y valles. Este efecto en componentes construidos por Manufactura Aditiva es más evidente en superficies inclinadas y es conocido “efecto de escalera” (*stair stepping effect*). Por otro lado, la rugosidad en los implantes repercute en la salud del paciente, ya que promueve la adhesión de bacterias generando procesos infecciosos, por lo cual es necesario mejorar la superficie.

En este trabajo, se estudió el impacto del acabado superficial por medio de máquina vibratoria en masa, en moldes de Policarbonato construidos por medio de Manufactura Aditiva por extrusión de hilo y, particularmente, en el efecto que produce en la fabricación de implantes de PMMA. Se determinó un tiempo para reducir la rugosidad de los componentes fabricados y se comprobó que la reducción en la rugosidad de los moldes, facilita el desmoldeo del implante de PMMA.

Contenido

Introducción.....	1
1 Antecedentes	2
1.1 Manufactura aditiva.....	2
1.1.1 Introducción a la manufactura aditiva.....	2
1.1.2 Beneficios de la manufactura aditiva.....	3
1.1.3 Proceso de fabricación en Manufactura Aditiva	4
1.2 Categorías de la manufactura aditiva	6
1.3 Niveles de aplicación de la Manufactura Aditiva.....	9
1.3.1 Manufactura Aditiva para aplicaciones médicas	11
1.4 Manufactura Aditiva en craneoplastia	15
1.5 Manufactura Aditiva como herramental para la fabricación de moldes para implantes de PMMA	17
1.6 Influencia de la rugosidad en implantes	18
2 Problemática.....	22
2.4 Planteamiento.....	22
2.1.1 Hipótesis	22
2.1.2 Objetivo.....	22
2.1.3 Alcances	22
2.1.4 Actividades	23
2.1.5 Capacidad instalada en MADiT.....	23
3 Marco teórico	24
3.1 Manufactura Aditiva.....	24
3.1.1 Extrusión de material	24
3.1.2 FDM: Modelado por Deposición Fundida de Stratasys.....	25
3.2 Características en piezas construidas por Manufactura Aditiva.....	26
3.2.1 Modelo del CAD a STL	26
3.3 Acabado superficial en FDM.....	27
3.3.2 Estrategias de rebanado de la pieza	31
3.3.3 Parámetros de fabricación	32
3.4 Post procesos utilizados en piezas construidas por FDM.....	33

3.4.1 Maquinado CNC.....	33
3.4.2 Métodos químicos.....	34
3.4.3 Acabado en masa.....	35
4 Desarrollo.....	44
4.1 Inspección de los filamentos internos y externos mediante tomografía computarizada	44
4.2 Desgaste superficial en componentes de PC y PMMA	47
4.2.1 Diseño.....	47
4.3 Impacto del acabado superficial en la apertura de moldes con y sin post proceso.	49
5 Resultados.....	55
5.1 Inspección de los filamentos internos y externos mediante tomografía computarizada	55
5.1.1 Resultados	55
5.2 Desgaste superficial en componente de PC y PMMA.....	58
5.2.1 Resultados	58
5.2.2 Análisis de resultados	63
5.3 Impacto del acabado superficial en la apertura de moldes con y sin post proceso	64
5.3.1 Resultados	64
5.3.2 Análisis de resultados	65
6 Conclusiones.....	66
7 Referencias.....	68

Índice de figuras

Figura 1	Construcción aditiva de un modelo por medio del proceso de Extrusión de Material.....	2
Figura 2	Modelos construidos por Manufactura Aditiva	3
Figura 3	Costo contra Complejidad en manufactura convencional y aditiva.....	4
Figura 4	Diagrama de flujo para la construcción de un componente	6
Figura 5	Niveles de aplicación de la Manufactura Aditiva.....	10
Figura 6	Aplicación de la Manufactura aditiva en el Modelado de concepto.....	10
Figura 7	Bisagra de metal utilizada en naves	11
Figura 8	Partes médicas utilizando distintos colores en Manufactura Aditiva.....	12
Figura 9	Dispositivos auxiliares construidos por Manufactura Aditiva	13
Figura 10	Deposición de células para un órgano de riñón	13
Figura 11	Defecto craneofacial.....	16
Figura 12	Reconstrucción craneofacial llevada a cabo en MADiT	17
Figura 13	Adhesión de S. epidermis en un material estriado PCL (Policaprolactona)	19
Figura 14	Distribución de bacterias S.Epidermis aisladas por unidad de superficie.....	20
Figura 15	Micrografía electrónica de barrido de la bacteria epidermis en PMMA	21
Figura 16	Capacidad instalada en MADiT para la realización de este proyecto	23
Figura 17	Diferentes técnicas de Manufactura Aditiva por extrusión de materiales	24
Figura 18	Manufactura Aditiva por extrusión de filamento.....	25
Figura 19	Teseleado: modelo de superficie facetado, error cordal	26
Figura 20	Efecto del espesor de capa en el acabado superficial.....	27
Figura 21	Efecto de escalonamiento	27
Figura 22	Representación del modelo de perfil para superficies FDM propuesto por <i>Ahn et al.</i>	28
Figura 23	Mediciones de rugosidad obtenidas para dos espesores de capa distintos	29
Figura 24	Pieza de prueba.....	29
Figura 25	Rebanado de una pieza con rebanamiento adaptativo.....	31
Figura 26	Imprecisiones debido al efecto escalera de la pieza construida por Manufactura Aditiva.....	32
Figura 27	Esquema del cortador utilizado en el maquinado CNC.....	34
Figura 28	Dimensiones estándar de especímenes para pruebas de tensión.....	34
Figura 29	Esquema de un equipo de acabado en masa vibratorio	36
Figura 30	Modelo virtual y espécimen construido utilizado por Boschetto et al.....	38
Figura 31	Resultados obtenidos en rugosidad en ángulos de 90° y 54°	38
Figura 32	Cambios en la rugosidad durante el post proceso de acabado superficial por tambor vibratorio	40
Figura 33	Representación esquemática de tres tipos de contacto de la media	42
Figura 34	Modos de desgaste abrasivo mecánico.....	43
Figura 35	Diseño y construcción de la pieza de policarbonato a analizar	44
Figura 36	Secciones con distintos parámetros de manufactura en las piezas de PC.....	45
Figura 37	Pieza de PC colocada dentro del tambor rotatorio	46
Figura 38	Configuración de cilindros colocados en el tomógrafo para su análisis.....	46
Figura 39	Moldes diseñados para la construcción de cilindros de PMMA.....	47
Figura 40	Piezas de estudio. Policarbonato (fila de arriba) PMMA (fila de abajo).	48
Figura 41	Configuración del sensor del rugosímetro.....	49

Figura 42	Medición de rugosidad de una pieza de policarbonato con el equipo Mitutoyo SJ 310.....	49
Figura 43	Diagrama de los puntos en los cuales se tomaron las temperaturas	50
Figura 44	a) Mediciones de temperatura en el molde b) Perfil de temperatura durante el proceso de polimerización del PMMA.	51
Figura 45	a) Diagrama del molde diseñado para el experimento b) Mecanismo propuesto para la apertura de moldes.	52
Figura 46	a) Moldes construidos dentro de la cámara de la máquina de extrusión de filamentos Fortus 400	53
Figura 47	Proceso de polimerización	54
Figura 48	Vista en corte de la pieza de policarbonato con sus respectivos contornos	55
Figura 49	Diagramas de bigote para a)1 Contorno 2)3 Contornos 3)5 Contornos	57
Figura 50	Vista del cilindro después de un proceso de 960 minutos de acabado superficial	58
Figura 51	Parámetros utilizados en una superficie genérica.	59
Figura 52	Representación de los distintos perfiles con filtros para la evaluación de rugosidad.	60
Figura 53	Longitudes de evaluación	61
Figura 54	Perfiles R de las piezas estudiadas.	62
Figura 55	La disminución gradual de Ra para los materiales PC y PMMA	63
Figura 56	Diagrama de cuerpo libre planteado.....	64

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de los procesos de manufactura.....	7
Tabla 2 Clasificación de los procesos de Manufactura Aditiva de la ASTM.....	8
Tabla 3 Uso de biomateriales en distintas partes del cuerpo.....	14
Tabla 4 Media aritmética del perfil de rugosidad para cada uno de los materiales utilizados	19
Tabla 5 Topografía superficial de PMMA con diferentes operaciones de post proceso acabado superficial.....	21
Tabla 6 Comparativa de rugosidad y resistencia de tensión en especímenes tratados y no tratados.....	35
Tabla 7 Ejemplos de media utilizadas de acuerdo a las características de la pieza.....	37
Tabla 8 Representaciones de los tipos de desgaste ocurridos.....	43
Tabla 9 a) Parámetros de manufactura empleados para la construcción de los cilindros de estudios b)Intervalo de tiempo utilizado de acuerdo a los experimentos de Boschetto et al.....	45
Tabla 10 Parámetros de manufactura para la construcción de cilindros patrón y moldes.....	48
Tabla 11 Valores de media aritmética y desviación estándar para cada sección del cilindro en distintos tiempos de trabajo.	56
Tabla 12 Rugosidad Ra para los tiempos de trabajo.	61
Tabla 13 Resultados obtenidos a partir del experimento.....	65

Introducción

En el presente trabajo se estudia el impacto del post proceso por acabado en masa vibratorio (*vibratory mass finishing*) en la superficie rugosa de moldes de policarbonato (PC-10) construidos por Manufactura Aditiva, y su impacto en el desmoldeo de implantes craneofaciales personalizados de polimetilmetacrilato (PMMA).

Esta tesis ha sido desarrollada en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT), ubicado dentro de las instalaciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El trabajo está dividido en cuatro capítulos más un apartado de conclusiones. En el primer capítulo, se aborda el concepto de Manufactura Aditiva, así como sus beneficios y clasificación. En este mismo capítulo, se explican los diferentes niveles de aplicación en los que la Manufactura Aditiva es utilizada y, particularmente, en su uso como una herramienta para el desarrollo de implantes craneofaciales personalizados a través de moldes construidos por extrusión de filamento. Dichos moldes presentan crestas y valles debido a su construcción capa por capa, estas herramientas transfieren su geometría y rugosidad a la pieza final (el implante), por lo cual requieren de un post proceso de acabado superficial para modificar esta característica.

Los implantes craneofaciales con esta rugosidad son susceptibles a la adhesión de bacterias, lo cual compromete la vida del paciente. Con esto identificado, se aborda el segundo capítulo, en el cual se plantea la problemática y se propone una hipótesis, así como el objetivo a cumplir, y los alcances y actividades en este trabajo.

El capítulo tercero, contiene la información para comprender las técnicas que se emplean para reducir la rugosidad en piezas construidas por Manufactura Aditiva, también, se detalla el proceso de acabado en masa vibratorio, el cual es empleado en esta tesis.

En el cuarto capítulo se describen los experimentos en piezas construidas con las máquinas de Manufactura Aditiva por Modelado por Deposición Fundida (FDM), con el fin de entender y realizar un seguimiento del impacto del post proceso de acabado en masa vibratorio. Las mediciones que se hicieron, fueron posibles con ayuda de un rugosímetro, con el cual se obtuvieron datos para su análisis. Adicional a esto, se comprobó que el impacto del acabado superficial facilitó el desmoldeo de implantes.

Finalmente, en el apartado de conclusiones, se sintetizan los resultados a partir de los experimentos realizados, y se hacen recomendaciones con el objetivo de apoyar en la revisión del diseño y construcción de moldes para implantes de craneoplastia personalizados.

1 Antecedentes

1.1 Manufactura Aditiva

1.1.1 Introducción a la Manufactura Aditiva

La Manufactura Aditiva (MA) permite la fabricación de componentes, en donde un modelo virtual es producido en un proceso aditivo capa por capa. La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) define a la MA como: el proceso de unir materiales para fabricar objetos a partir de un modelo digital en tres dimensiones, capa por capa, en oposición a los procesos de manufactura por desprendimiento de material como fresado y barrenado, la Figura 1 muestra la construcción gradual en la que se añade material en un modelo [1].

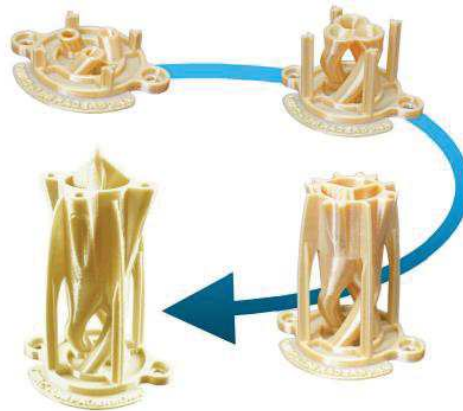
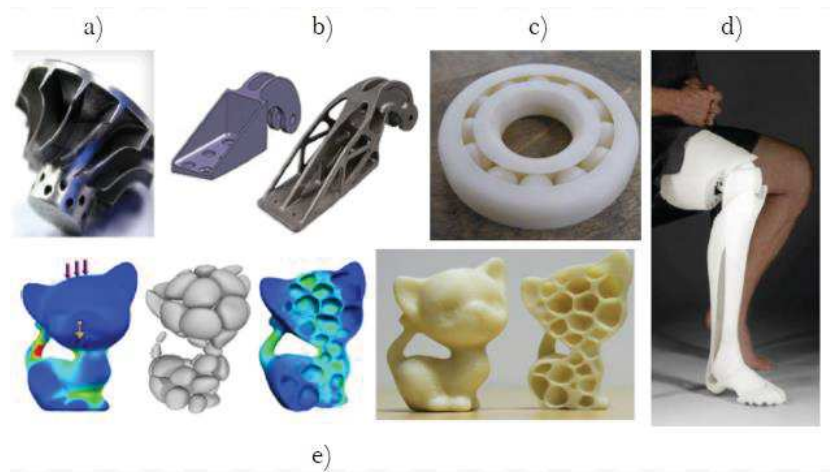


Figura 1 Construcción aditiva de un modelo por medio del proceso de Extrusión de Material

Con esta tecnología es posible construir geometrías complejas elaboradas de materiales como metales, plásticos y cerámicos, con un desperdicio mínimo de material utilizado y, en algunos casos, con la necesidad de un postproceso [2]. Además, la MA es una herramienta que ofrece la libertad de forma y habilita a los ingenieros y diseñadores a transformar modelos virtuales en 3D a piezas físicas, sin el uso de accesorios extra ni herramientas [2]. Al término Manufactura Aditiva también se le conoce en la industria como fabricación aditiva, procesos aditivos, impresión 3D, técnicas aditivas, manufactura aditiva por capas, fabricación de forma libre y prototipado rápido, esta última denominada así, por su capacidad de construir modelos físicos para validar nuevos diseños de manera casi inmediata [3].

1.1.2 Beneficios de la manufactura aditiva

En contraste con los procesos de fabricación tradicionales (maquinado, moldeado, vaciado) las tecnologías de MA reducen el material y la energía consumida, así como el agua utilizada en la eliminación de desechos y materiales tóxicos empleados [4]. También, es posible reducir los pasos de un proceso de construcción, sin importar la complejidad de la pieza, ya que, generalmente, las piezas construidas por MA se hacen en un solo ciclo [5]. Características como canales internos, espesores de capa variables, socavados, geometrías como figuras contorneadas y torcidas, agujeros ciegos, geometrías optimizadas topológicamente, piezas personalizadas y ensamblajes construidos en un solo ciclo de trabajo, son posibles de construir [1]. La Figura 2 muestra piezas que se han construido empleando MA con algunas de las características antes mencionadas.



a) Turbina construida utilizando la tecnología de Sinterización Láser de Derretimiento Directo (DMLS, por sus siglas en inglés) [6] b) Soporte antes (izquierda) y después (derecha) de un proceso de optimización construido por DMLS [7] c) Balero construido en un sólo ciclo por medio de la tecnología Modelado por Deposición Fundida (FDM por sus siglas en inglés) de: <http://www.practicalmachinist.com> d) Prótesis de pierna [6] e) Flujo de proceso de diseño y construcción de una pieza, desde su modelado con cargas estáticas hasta su construcción con estructura porosa [8].

Figura 2 Modelos construidos por Manufactura Aditiva

Estas capacidades comparadas contra las de una manufactura convencional tienen un impacto en los costos y en el diseño, de hecho, existe un término popular habilitado por la Manufactura Aditiva que se refiere que la complejidad construida por Manufactura Aditiva es libre [1], esto se muestra en la Figura 3.

De acuerdo a la Figura 3, en el uso de procesos de manufactura convencional, la complejidad hace que se incremente el costo. Mientras que con el uso de la MA el costo por construir piezas complejas se mantiene prácticamente constante. Como consecuencia de que la pieza es creada capa por capa, el costo y tiempo que lleva producir la parte compleja es esencialmente el mismo que producir una parte simple [1].

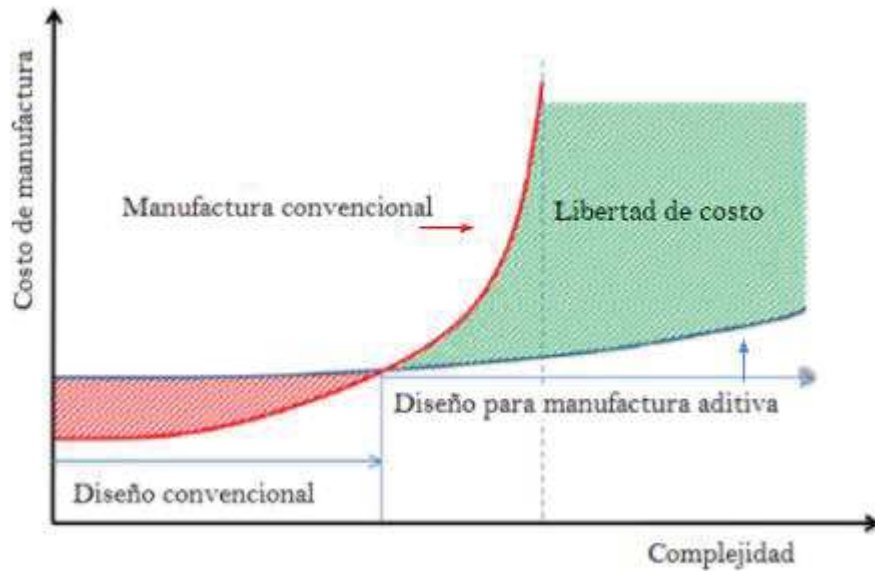


Figura 3 Costo contra Complejidad, en manufactura convencional y aditiva. En la manufactura convencional, incrementar complejidad y/o personalización conlleva un incremento de costo. Con la MA, la complejidad y la personalización se vuelven libres [1] .

1.1.3 Proceso de fabricación en Manufactura Aditiva

El proceso para la fabricación de piezas con MA implica una serie de pasos que van desde el modelo digital tridimensional hasta la parte física construida. Algunos autores, tales como Gibson [5] describen los siguientes pasos en el proceso de Manufactura Aditiva:

Paso 1: Diseño por computadora

Toda pieza que requiera ser construida por MA comienza con una idea del objeto a construir, típicamente modelada desde una paquetería de cómputo o por medio de técnicas de ingeniería de reversa, escáner tridimensional o tomografía computarizada, con la finalidad de obtener un sólido 3D o una representación de una superficie.

Paso 2: Conversión a STL

El objeto es convertido a un archivo STL (*Standard Tessellation Language*) que es una representación 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 se supone representar. Las máquinas de MA utilizan este formato ya que se ha vuelto un formato *de facto* para el cálculo de capas.

Este tipo de archivos son verificados, ya que al ser la representación triangular de una superficie, existen algunos triángulos que están volteados, caras faltantes o superpuestas y bordes mal unidos, lo cual genera un error para el siguiente paso.

Paso 3: Transferencia del STL a la máquina de manufactura aditiva

El STL se transfiere al sistema de la máquina, en este paso los parámetros como la orientación de la pieza, espesor de capa y estrategias de deposición del material de construcción son elegidos.

Paso 4: Configuración de la máquina

La máquina de MA debe estar correctamente configurada para llevar a cabo la construcción, en términos de tener el material de construcción (cantidad, fuente de energía, tiempo, etc).

Paso 5: Construcción

La construcción es un proceso automático en la cual la máquina es capaz de operar sin supervisión. Sólo el monitoreo de la máquina es necesario para asegurarse de que no existan errores, tales como quedarse sin material, energía o fallas en el programa.

Paso 6. Retiro de la pieza de la máquina de MA

La pieza debe ser retirada de la máquina cuando ha terminado la construcción. Esto requiere interacción con la máquina, la cual debe cumplir con las condiciones de seguridad adecuadas para que el operario pueda retirar la pieza.

Paso 7: Post proceso

Una vez que se remueve la pieza de la máquina, puede requerir de un post proceso que va desde la limpieza hasta el ajuste dimensional antes de su uso final.

Paso 8: Aplicación

Dependiendo del material utilizado y la complejidad de la pieza, algunas partes pueden necesitar algún proceso secundario como: lijado, limado, pulido y pintado. También existe la posibilidad de hacer el ensamble de las piezas construidas por MA con otros componentes mecánicos o electrónicos para formar el producto final, la Figura 4 contiene los pasos de construcción en MA

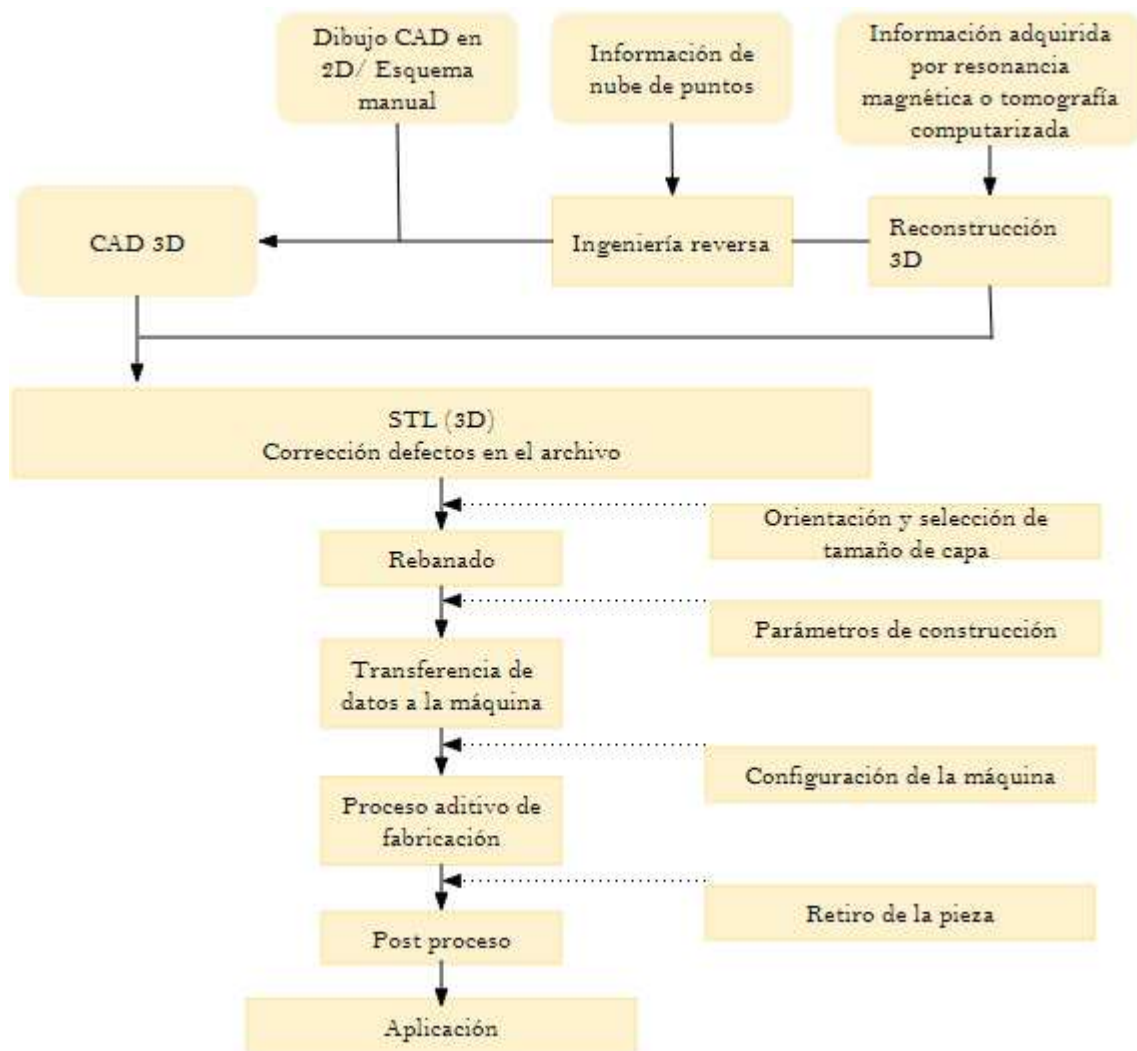


Figura 4 Diagrama de flujo para la construcción de un componente. Adaptado de [7] y [9].

1.2 Categorías de la manufactura aditiva

La MA es un conjunto de tecnologías y procesos que se han desarrollado durante los últimos treinta años; dicho desarrollo ha dado pie a que se utilice como una manera alternativa viable para la manufactura de partes finales [10]. Existen varios procesos y materiales disponibles que son utilizados en la MA, estos procesos tienen mucho en común, específicamente porque la información necesaria para el proceso proviene de un modelo digital 3D y la fabricación ocurre por la unión capa por capa. Sin embargo, hay algunas diferencias que distinguen cada uno de los procesos existentes [11].

En la literatura se encuentran diversas clasificaciones, algunos autores emplean la materia prima o la forma inicial de ésta para diferenciarlas, en forma inicial de polvo, líquido, filamento, papel o lámina. Gibson [5] hace esta clasificación en dos planos propuesto por Pham *et al.* en 1998, la cual se muestra en la Tabla 1. En dicha 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. De tal manera, que 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) [12].

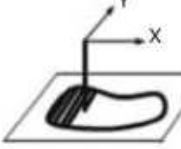
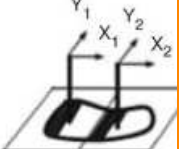
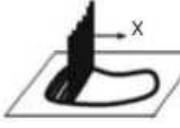
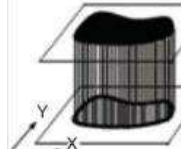
	Canal de 1D 	2 Canales de 1D 	Arreglo de Canales de 1D 	Canal de 2D 
Polímero líquido	SLA (3D Systems)	SLA (Doble rayo)	Objet	Envisiontech Micro TEC
Partículas discretas	SLS (3D Systems)	LST(EOS)	3D Printing	DPS
Material fundido	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Hoja sólida	Solido PLT (KIRA)			

Tabla 1 Clasificación de los procesos de manufactura [5].

La clasificación anterior es de utilidad para entender el principio funcional de los procesos aditivos, sin embargo, existe otra clasificación en donde se engloba una gama de tecnologías que son estandarizadas y clasificadas por la ASTM en siete categorías, agrupadas por su similitud en el mecanismo físico de transformación de la materia prima y el tipo de arquitectura de la máquina, estas categorías son: deposición mediante energía directa, fusión de cama en polvo, foto polimerización en tanque, laminación de hojas, rociado de aglutinante, rociado de material y extrusión de material [13]. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias capacidades, ventajas y limitaciones, incluyendo materiales, volumen de construcción, velocidad de procesamiento, calidad de la pieza, entendiendo esto como rendimiento mecánico, exactitud dimensional y acabado superficial. En la Tabla 2 se explican brevemente las categorías de MA antes mencionadas.

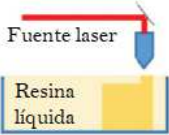
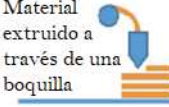
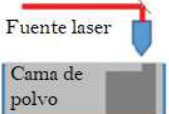



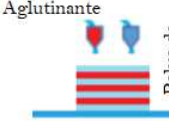
Categoría (Tecnologías)	Descripción	Materiales	Fuente de energía	Diagrama
Fotopolimerización en tanque (Estereolitografía)	Foto polímero en forma de líquido es selectivamente curado utilizando una fuente de luz	Polímeros foto curables, cerámicas (alúmina y zirconia)	Láser Ultravioleta	
Extrusión de material (FDM, robocasting, bioplotting)	Material es dispensado a través de una boquilla o extrusor	Termoplásticos, pastas de cerámica, pastas metálicas	Energía térmica	
Fusión en cama de polvo (Fusión por rayo de electrones EBM, Sinterizado Selectivo SMS, Sinterizado láser selectivo SLS, Fusión láser completa)	Energía térmica funde selectivamente regiones de material en polvo	Polímeros metales y cerámicos	Rayo láser de alto poder y rayo electrones	
Deposición mediante energía directa (Modelado de red por ingeniería láser LENS, Soldado por rayo electrónico EBW)	Energía térmica es concentrada para fundir materiales mientras que son depositados	Metales y cerámicos	Rayo láser	
Laminación de hojas (Manufactura de objetos laminados (LOM))	Hojas de material son unidas para formar objetos tridimensionales	Películas de plástico, hojas metálicas, cinta cerámica	Rayo láser	
Rociado de material (Polyjet)	Gotas de material de modelo son depositadas para formar capas	Fotopolímeros y ceras	Energía térmica	
Rociado de aglutinante (Fabricación indirecta de inyección de aglutinante Binder 3DP)	Líquido de unión se distribuye de forma selectiva para unirse con polvo de material	Polímero en polvo (resina, yeso), polvo en cerámico, polvo en metal	Energía térmica	

Tabla 2 Clasificación de los procesos de Manufactura Aditiva de la ASTM, rediseñado de [2,6,14].

En la actualidad, existen equipos que cuentan con procesos de MA en conjunto con maquinado CNC, lo que permite que piezas sean construidas con las fortalezas de los procesos aditivos y sustractivos en un mismo ciclo. Este proceso híbrido permite mejorar el acabado superficial de las piezas construidas por el proceso aditivo, las cuales, presentan crestas en la superficie como producto de ser construidas capa por capa, el CNC desbasta esta rugosidad, además que, en algunos casos el equipo híbrido permite la inspección *in situ* de la construcción [15].

La MA ha experimentado un crecimiento notable en las últimas décadas en cuestiones monetarias, ya que pasó de ser un tecnología que no se comercializaba en los ochenta a ser un mercado que representaba más de cuatro billones de dólares en 2014, y que se espera que crezca en 2020 a 21 billones de dólares. Este crecimiento ha sido posible por las mejoras en los materiales de los equipos de manufactura aditiva y a la demanda que el mercado requiere para utilizar esta tecnología en partes de uso final o herramental: con ciclos cortos de construcción, regulaciones en sustentabilidad, componentes personalizados y la posibilidad de crear nuevos modelos de negocio [7].

1.3 Niveles de aplicación de la Manufactura Aditiva

En la práctica se tienen diferentes clases de aplicación cuando se utiliza la MA. El proceso comienza con la definición de una aplicación específica, luego, los requerimientos especiales (dimensiones, calidad de superficie, temperaturas de trabajo, etc, y finalmente se construye en una máquina que pueda llenar estos requerimientos [16].

La Manufactura Aditiva se caracteriza por tener dos principales niveles de aplicación, el Prototipado Rápido y la Manufactura Rápida. El Prototipado Rápido incluye las aplicaciones como prototipos, modelos, muestras y maquetas. Mientras que la Manufactura Rápida se utiliza cuando se fabrican partes y productos de uso final, un esquema de los niveles en los que se emplea esta tecnología, se visualiza en la Figura 5.

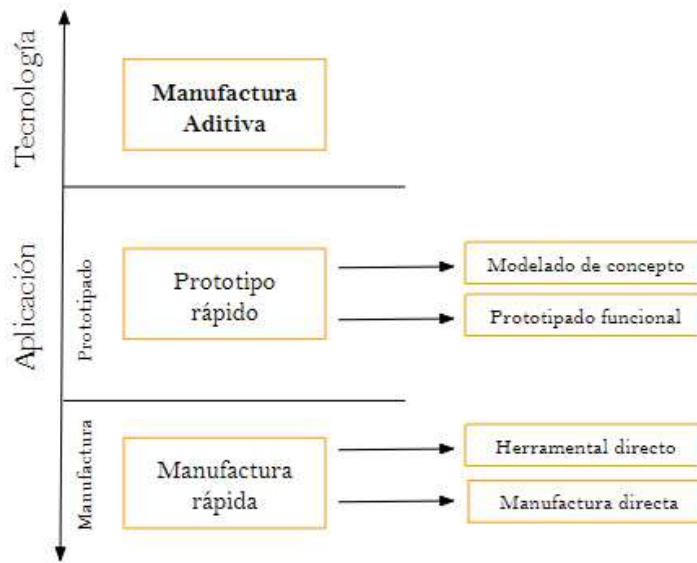


Figura 5 Niveles de aplicación de la Manufactura Aditiva adaptado de [16].

Como la Figura 5 lo indica, dentro del prototipado rápido se encuentran dos subniveles: el Modelado de concepto y el Prototipado funcional. El Modelado de concepto se refiere a la construcción de partes que sirven para verificar un concepto básico, como puede ser una estatua en el cual se pretende verificar su apariencia general y sus proporciones, en la Figura 6 se muestra un ejemplo de este tipo de uso de modelado de concepto, mientras que el Prototipado funcional es aplicado para cotejar una o más funciones del producto, para después hacer una decisión, aun cuando el modelo no se utilice como parte final.



Figura 6 Aplicación de la Manufactura aditiva en el Modelado de concepto.

La Manufactura rápida contiene todos aquellos procesos en los que la MA entrega productos finales o en su caso, partes finales que se requieren para llevar a cabo un ensamble, esto sólo si muestra todas las características y funciones que le son asignadas a la pieza durante el proceso de desarrollo de la misma. Si la pieza final es una parte positiva, se le denomina Manufactura Directa, si es negativa, es decir, un dado, molde o calibre, es llamado Herramental directo [16].



Figura 7 Bisagra de metal utilizada en naves. En la parte de atrás se encuentra el diseño anterior para maquinado, en frente está el rediseño empleando técnicas de optimización topológica, el cual ofrece la misma resistencia mecánica, pero con la mitad del peso [13].

1.3.1 Manufactura Aditiva para aplicaciones médicas

La Manufactura Aditiva se ha utilizado en aplicaciones médicas con ayuda de técnicas de escaneo tridimensional, ultrasonido, tomografía computarizada y resonancia magnética [5][5]. Estas técnicas, que inicialmente se originaron para fines de diagnóstico y visualización, encontraron su camino en la Manufactura Aditiva con ayuda de los sistemas CAD/CAM, con los que se es posible hacer simulaciones y planeaciones preoperativas de procedimientos quirúrgicos, además de la construcción de modelos complejos orgánicos y personalizados [17][17].

Particularmente, la Manufactura aditiva contribuye significativamente en aplicaciones médicas como son [5]:

- Ayuda en cirugía y diagnóstico
- Manufactura de dispositivos auxiliares
- Ingeniería de tejidos
- Desarrollo de implantes personalizados con Manufactura Aditiva

1.3.1.1 Ayuda en cirugía y diagnósticos

En el caso de ayuda cirugía y diagnóstico, la MA se ha empleado para entender la complejidad de los procedimientos quirúrgicos así como para comunicar ideas al equipo de médicos, incluso a los pacientes que van a ser intervenidos quirúrgicamente. Los modelos médicos construidos por Manufactura Aditiva también han ayudado para reducir el tiempo de cirugía para casos complejos en los que se necesita una previa planeación, incluso los equipos de MA que se emplean para estos fines, desarrollan materiales esterilizables, con el fin de ingresarlos a las salas de operación y no contaminar la zona [5].



Figura 8 Partes médicas utilizando distintos colores en Manufactura Aditiva. a) Tumor resaltado con ABS más oscuro que el hueso del cráneo b) Modelo de la vascularidad en un órgano humano [5].

En la actualidad, los modelos médicos construidos por Manufactura Aditiva tienen un rol importante en la planeación de cirugías, sin embargo, la precisión varía dependiendo el material y el proceso de manufactura utilizado, además, existe una posibilidad de errores asociados a la imagen, segmentación y manufactura [18]. Salmi et al. [18] evalúa la precisión de modelos médicos construidos por Polyjet, FDM y SLS utilizando equipos de medición como máquina por coordenadas y calibrador digital. Este trabajo indica la dificultad para determinar puntos anatómicos al momento de realizar la medición, ya que se trata de formas orgánicas, como cráneos y huesos, el utilizar los mismos puntos de referencia y la misma posición dificulta la repetición de los experimentos con los equipos de medición antes mencionados. Finalmente, sugiere utilizar equipos como tomografía computarizada y escáneres 3D para comparar los modelos digitalizados con los modelos originales en CAD.

En el caso de las cirugías craneomaxilofaciales, los modelos médicos tienen un rol crítico en este tipo de procedimientos, si el modelo no es lo suficientemente preciso, existe una posibilidad de errores fatales en la planeación pre operativa o la simulación quirúrgica [18]. Por otro lado, es posible reducir el tiempo de operación con estos modelos, lo cual repercute en la recuperación del paciente y en el costo asociado a la operación. Por ejemplo, en el caso de una cirugía maxilofacial en el Centro médico de la Universidad de Maastricht, el costo de un minuto de operación es de 16 euros, Lethaus et al. [19] reduce el tiempo de operación 25 minutos, lo cual tiene una repercusión en el tiempo y en el costo, debido a la planeación por los modelos y el prototipado rápido.

1.3.1.2 Manufactura de dispositivos auxiliares

En el caso de dispositivos médicos construidos por manufactura aditiva se tienen algunos ejemplos hechos por compañías como Siemens [5], que ha construido alineadores ortodoncistas los cuales sirven para que los dientes no se desplacen, y Phonak utiliza plantillas hechas a la medida obtenidas por digitalización 3D [20].

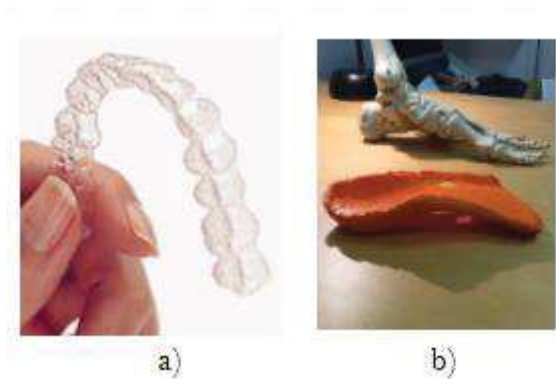


Figura 9 Dispositivos auxiliares construidos por Manufactura Aditiva a) Retenedor para dientes construido con MA b) Plantillas construidas a partir de escaneo 3D [20].

1.3.1.3 Ingeniería de tejidos

Algunos tejidos del cuerpo humano se encuentran en tres dimensiones y están constituidos por células de diferentes tipos que están arreglados en una arquitectura espacial que es relevante a la funcionalidad de cada tejido. Si los componentes individuales de un tejido (células o grupos de células) son consideradas como voxels (elementos discretos en los que una representación tridimensional está dividida) entonces, esta representación puede ser construida, capa por capa, usando técnicas de Manufactura Aditiva [21].

Los avances en la manufactura aditiva han permitido la construcción de materiales biocompatibles, células y componentes de soporte en tejidos vivos funcionales en tercera dimensión, esto ha permitido a la medicina regenerativa obtener órganos apropiados para ser implantados. Este tipo de desarrollo requiere la integración de tecnologías de distintos campos de la ingeniería, de la ciencia de biomateriales, biología celular, física y medicina. La construcción usando la MA ha sido utilizada para la generación y transplante de algunos tejidos como piel, hueso, venas, tejidos del corazón y estructuras cartilagosas [22].



Figura 10 Deposición de células para un órgano de riñón [22].

1.3.1.4 Desarrollo de implantes personalizados con Manufactura Aditiva

La MA también permite el diseño de implantes personalizados. Para lograr esto se necesita información digital proveniente de tomógrafo o resonancia magnética. Los modelos físicos ya no son requeridos, ya que la computadora (con ayuda del diseño asistido por computadora) genera el patrón para fabricar directamente el implante, reduciendo el tiempo de manufactura, complicaciones, e incluso el tiempo de cirugía [23]. La Tabla 3 resume los diferentes materiales que se utilizan empleando Manufactura Aditiva para la construcción de implantes, las propiedades mecánicas del material del implante seleccionado debe cumplir funciones como: proveer soporte, fijación y reemplazar el tejido óseo [23].

Material	Abreviación	Aplicación
Ti y aleaciones de Ti	CP-Ti Ti-6Al-4V Ti-6Al-7Nb Ti-5Al-2.5Fe Ti-1.5 Zr-4Nb-2Ta-0.2Pd Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr 83%-87%Ti-13%-17%Zr(Roxolidio)	Fijación ósea Válvula artificial, stent, fijación ósea Aplicación dental, articulación de rodilla, articulación de cadera Implante espinal Aplicaciones dentales Aplicaciones dentales Aplicaciones dentales
Acero inoxidable	316L	Aplicación dental, articulación de rodilla, articulación de cadera, herramientas quirúrgicas
Aleación cobalto cromo	Co-Cr-Mo, Co-Ni-Cr-Mo	Válvulas artificiales, fijación ósea, aplicaciones dentales, unión de rodilla, unión de cadera
Aleación de memoria de forma	NiTi	Catéteres y stents
Polímeros	PMMA, PE, PEEK	Aplicaciones dentales, cartílagos articulares superficie de unión de cadera, superficie de unión de rodilla, tejidos blandos
Bio vidrio	SiO ₂ /CaO/Na ₂ O/P ₂ O ₅	Aplicaciones dentales, implantes ortopédicos
Zirconia	Zirconia	Implantes porosos, aplicaciones dentales
Aluminio	Al ₂ O ₃	Aplicaciones dentales
Hidroxiapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Aplicaciones dentales, material de revestimiento de implante

Tabla 3 Uso de biomateriales en distintas partes del cuerpo [24].

1.4 Manufactura Aditiva en craneoplastia

Con la combinación del Diseño Asistido por Computadora, habilidades médicas y tecnologías de manufactura aditiva, es posible tratar pacientes con anomalías craneofaciales como defectos de nacimiento, malformaciones que se desarrollan durante el crecimiento, accidentes como traumas, infecciones y tumores; el tratamiento se lleva a cabo con la finalidad de obtener resultados estéticos y la recuperación de las funciones [25].

Las áreas craneal y maxilofacial son adecuadas para el desarrollo de implantes craneofaciales por el bajo estrés al que están sometidas, comparadas con otras partes del cuerpo, además de que estas áreas demandan una personalización del implante con la intención de obtener una operación exitosa [25]. El material del implante debe cumplir con los siguientes requerimientos: fuerte, inerte, no cancerígeno, maleable, fácil de trabajar, ligero, no debe ser conductor térmico, eléctrico o magnético, debe ser esterilizable y debe permitir sin obstáculos la evaluación radiológica después de haber sido implantado [26].

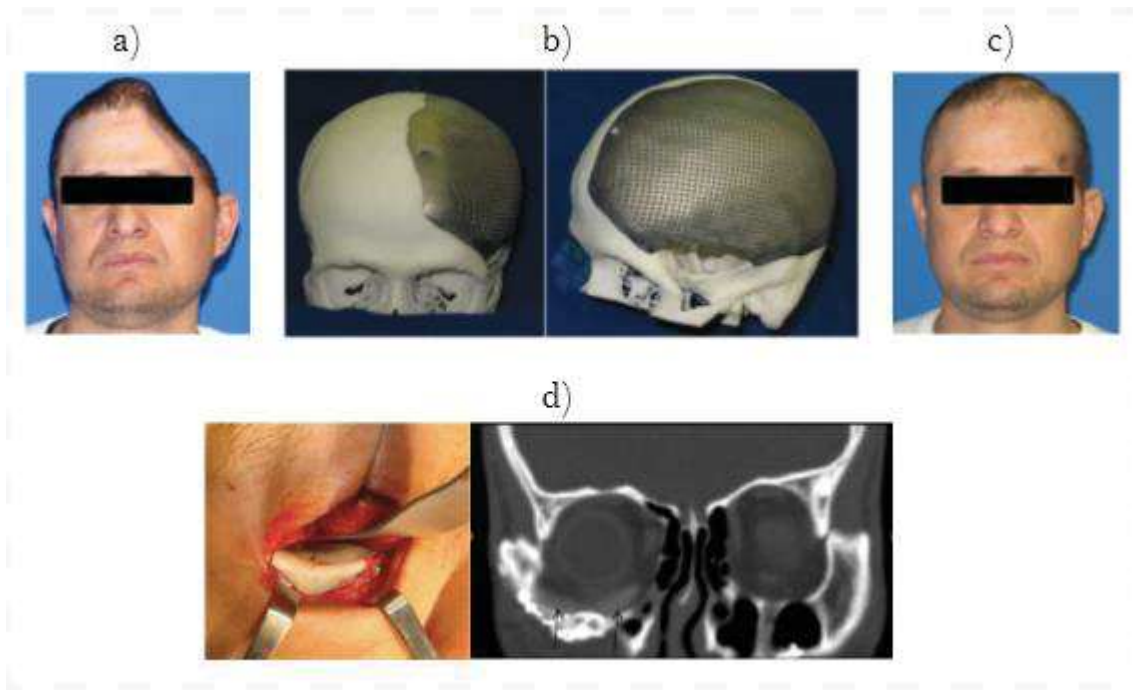
Los cirujanos utilizan su habilidad y capacidad para tratar a los sobrevivientes de este tipo de lesiones, los cuales presentan falta de continuidad ósea en el cráneo produciendo defecto o deformidad. Un paciente que ha sufrido una craneotomía (esto es: una parte del cráneo, llamada colgajo óseo, se elimina con el fin de acceder al cerebro por distintas razones) puede sufrir del síndrome post craneotomía; los síntomas de este síndrome incluyen cefalea, mareo, astenia, insomnio, incapacidad para concentrarse, depresión y ansiedad [27].

Diversas técnicas y materiales se han utilizado para la reconstrucción craneoplástica, así como diferentes procesos de manufactura involucrados. Nazimi et al. [28] utiliza PEEK en la reconstrucción orbital de una fractura utilizando ayuda CAD, este material es uno de los materiales más utilizados en craneoplastia, implantes dentales y corrección de defectos en el cráneo [29–31], ya que es un material no poroso que presenta propiedades mecánicas parecidas a las del hueso humano y su biocompatibilidad ha sido reportada en varios casos de éxito [30][30], sin embargo, la desventaja de este material es su radiopacidad, la cual puede dificultar su inspección cuando se utiliza tomografía médica [28].

Jardini et al. [32] utiliza la tecnología fusión en cama de polvo para fabricar implantes de titanio y, además, además construye modelos por medio de estereolitografía para corroborar su diseño y ensamble con la lesión. Cabe resaltar que el titanio es fuerte, biocompatible y presenta alta resistencia a la corrosión, sin embargo, al igual que el PEEK, genera artefactos en las imágenes de diagnóstico por Tomografía Computarizada.

Staffa et al. [33] utiliza implantes personalizados de hidroxiapatita, los cuales, tienen la propiedad de evitar infecciones y ser bioabsorbido por el cuerpo, ser construidos para lesiones de más de veinticinco centímetros cuadrados, cabe mencionar que este material es utilizado desde 1997 donde la experiencia clínica ha mostrado resultados post operatorios exitosos [34].

Por otra parte, en el caso los termoplásticos, Espalin et al. [35] reportó en su trabajo el uso del PMMA por medio de un sistema de extrusión de materiales por deposición fundida para fabricar estructuras para distintas aplicaciones incluyendo reconstrucciones craneofaciales y espaciadores ortopédicos, este sistema aún no está disponible comercialmente y no es posible su uso en hospitales públicos.



a) Defecto de la parte izquierda del cráneo b) Implante de titanio c) Reconstrucción final [32] d) Implante de PEEK para la reconstrucción del piso orbital derecho [28].

Figura 11 Defecto craneofacial

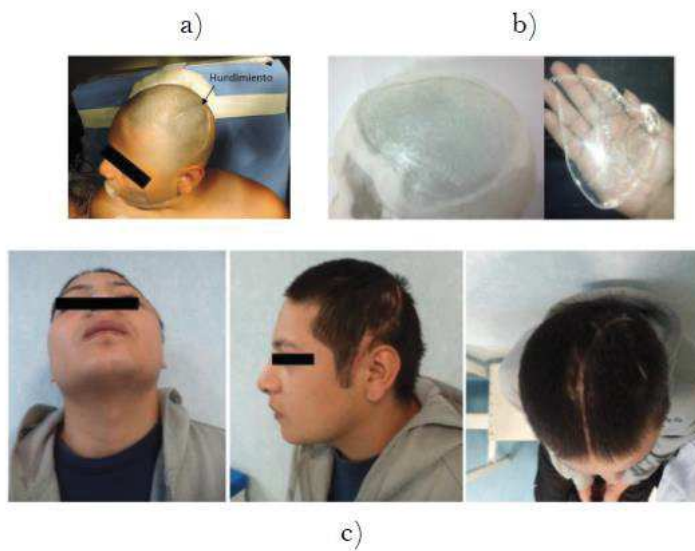
1.5 Manufactura Aditiva como herramienta para la fabricación de moldes para implantes de PMMA

En 2014 en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) lograron la construcción de implantes craneofaciales de polimetilmetacrilato (PMMA) a partir de moldes fabricados con MA, específicamente utilizando la tecnología de modelado por deposición fundida [17].

El proceso de fabricación de los implantes craneofaciales comienza con la generación de una representación digital tridimensional a partir de un archivo de tomografía la cual se guarda como un archivo STL. A partir de la representación tridimensional se diseña el implante y posteriormente los moldes, los cuales se construyen en máquina de prototipado rápido por extrusión de filamento.

El PMMA es un termoplástico transparente con propiedades biocompatibles con tejidos, células y sangre, además, es adecuado para la esterilización. Sin embargo, una desventaja de este material es que se comporta de manera frágil cuando se somete a cargas, es por eso que se usa en craneoplastía, ya que esta región no sufre de cargas. Finalmente se llenan de una mezcla reactiva

Con dicho procedimiento ha sido posible la manufactura de implantes de PMMA, tal es el caso del presentado en 2014 de un paciente masculino de 22 años referido por el Hospital General de México para la reconstrucción ósea, con el diagnóstico de secuelas de craneotomía por traumatismo [3]. La evolución del paciente puede observarse en la Figura 12:



a)Hundimiento del paciente b)Implante de PMMA c) Resultado después de la operación

Figura 12 Reconstrucción craneofacial llevada a cabo en MADiT

1.6 Influencia de la rugosidad en implantes

Existen diferentes biomateriales que se utilizan para la fabricación de implantes, estos biomateriales presentan características mecánicas particulares que son implantadas dentro del cuerpo humano por distintas razones. Sin embargo en algunos casos, se presentan infecciones en dispositivos implantados como articulaciones, válvulas de corazón, catéteres vasculares e implantes de dientes [36].

Estas infecciones, relacionadas a los implantes, son las complicaciones más comunes en los biomateriales, los cuales, representan un lugar cómodo para la colonización de bacterias [36]. Estos dispositivos dentro del cuerpo fallan cuando una bacteria se adhiere y prolifera en la superficie del biomaterial, estos organismos producen sustancias poliméricas extra celulares y forman una biocapa, la cual es extremadamente resistente a mecanismos de defensa del cuerpo humano y a tratamiento antibiótico, y, la mayoría de las veces, la única solución a un implante infectado es su remoción quirúrgica [37].

Aún cuando existen distintos tratamientos de prevención de infecciones, estas siguen ocurriendo en 0.2-17.3% de los casos de prótesis de ortodoncia [38], también el 14.8% de artroplastia de las revisiones para cadera y el 25.2% de artroplastia de la rodilla realizadas en Estados Unidos durante 2005-2006 presentaban infecciones [39].

La mayoría de las infecciones son causadas por bacterias como *Staphylococcus* genus y *Staphylococcus epidermis*; el proceso de adhesión de bacterias se lleva, generalmente, a través de interacciones de van der Waals, de tal manera que la bacteria llega a la superficie, superando las barreras de energía de repulsión electrostática, y luego forma colonias, creando así la biocapa. Diversas investigaciones indican que la adhesión de polisacáridos N-acetyl- β (1,6)-glucosamina (PIA/PNAG) juegan un importante papel, no sólo en la creación de la biocapa, sino también en la adhesión de la bacteria [40]. No obstante, el mecanismo exacto de adhesión aún no se ha determinado, dada la compleja combinación de factores que influyen como el tipo de bacteria, el ambiente in vivo y el material del implante utilizado [36].

La textura de la superficie tiene influencia en la adhesión de bacterias en catéteres, implantes de dientes y en sistemas industriales. La electrónica de barrido ha demostrado que las irregularidades en la superficie sirven como puntos de inicio preferenciales para que las bacterias se adhieran, provocando nidos en los cuales los microorganismos se protegen de esfuerzos cortantes, este proceso hace que las células bacterianas se queden adheridas irreversiblemente a la superficie, esto se observa en la Figura 13 [41].

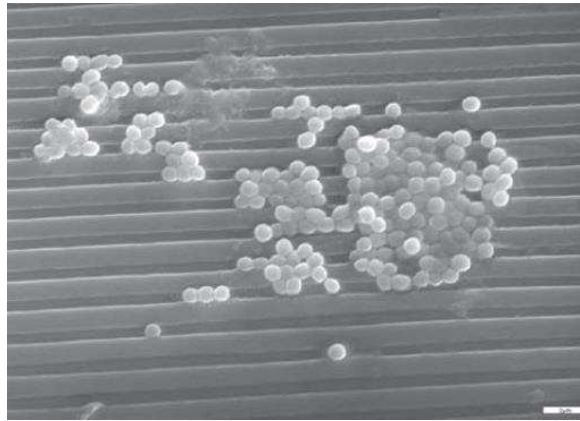


Figura 13 Adhesión de *S. epidermidis* en un material estriado PCL (Policaprolactona) [41].

Las superficies rugosas tienen una mayor área de contacto con las bacterias que con las superficies lisas, además, las depresiones pueden proveer mejores sitios para la colonización, tal lo indica *Yoda et al.* [36][36] en su investigación, en la cual utiliza cinco biomateriales diferentes; para cada uno de ellos, lleva a cabo un proceso de acabado superficial con el cual reduce la rugosidad en piezas en forma de cilindros y en el otro los utiliza con la rugosidad que el fabricante proporciona. El material y la rugosidad se muestran en la Tabla 4, sus resultados se indican en la Figura 14 y muestran que existe mayor adherencia de bacterias en material con mayor rugosidad, es decir, sin un post proceso acabado superficial, además, en materiales con alta biocompatibilidad como la aleación de titanio (Ti-6Al-4V), titanio puro comercial (Cp-Ti) y el acero inoxidable (SUS316L) se presenta más adherencia de bacterias que en materiales como el Oxinium y la aleación de cobalto cromo molibdeno (Co-Cr-Mo), esto porque el Ti-6Al-4V, Cp-Ti y SUS316L (a pesar de presentar las rugosidades más bajas) proveen de mejores condiciones a los organismos debido a que presentan superficies hidrofílicas, Boks et al.[42] reporta que la unión entre la *S. epidermidis* y una superficie hidrofóbica está limitada y en menor incremento, mientras que una superficie hidrofílica, esta adhesión aumenta con el tiempo de contacto. Tang et al. [43] concluye que en una superficie hidrofóbica hay menos bacterias adheridas

	Grupo fino (nm)	Grupo rugoso (nm)
Oxinium	8.5	30.0
Co-Cr-Mo	5.8	12.0
Ti-6Al-4 V	7.1	16.5
Cp-Ti	5.6	22.0
SUS316L	1.8	7.2

Tabla 4 Media aritmética del perfil de rugosidad para cada uno de los materiales utilizados [36].

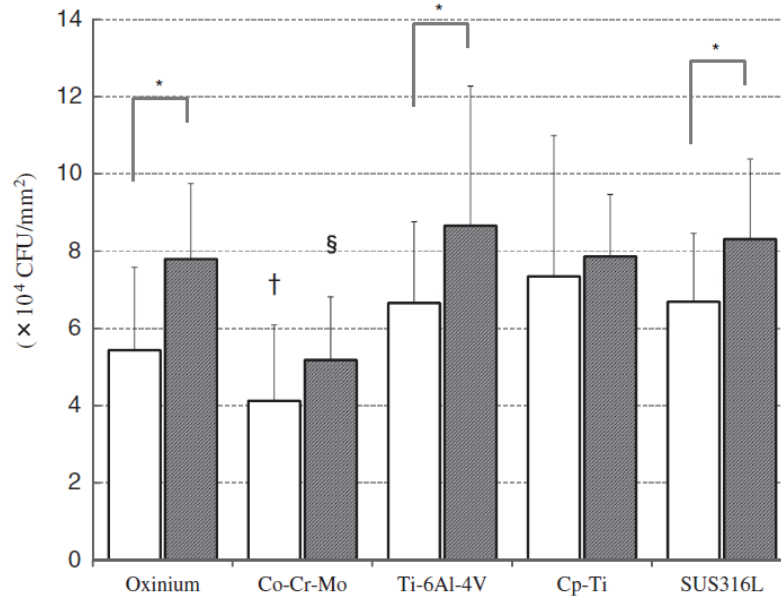


Figura 14 Distribución de bacterias *S. Epidermis* aisladas por unidad de superficie (CFU/mm²) adheridas a la rugosidad en la superficie de materiales [36].

Las superficies poliméricas no son la excepción, ya que se ha encontrado que las irregularidades en estas superficies también promueven la adhesión bacteriana y la deposición de la biocapa, mientras que la superficie lisa en estos materiales no favorece la adhesión bacteriana ni la formación de la biocapa [44]. Taylor et al [41] estudia la adhesión de las bacterias *Pseudomonas Aureginosa* y *Staphylococcus Epidermis* en piezas de polimetilmetacrilato pulidas con distintos grados de papel de carburo de silicón, las distintas rugosidades se observan en la Tabla 5, Taylor et al. concluye que un pequeño incremento en la rugosidad de este material ($Ra=0.124$ mm) repercute en un incremento significativo en la adhesión de bacterias contra una superficie lisa ($Ra=0.04$ mm). La Figura 15 muestra la incubación de la bacteria epidermis en una rugosidad procesada con P400 en PMMA después de una hora de incubación. El autor indica, a través de sus resultados que las bacterias se adhieren más a defectos de la superficie, como las crestas y valles.

Tipo de rugosidad	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)
Suave	0.04	0.94	2.61
P1200	1.24	10.1	13.8
P400	1.86	14.5	20.9
P120	3.66	25.3	28.8
Blaste fuerte	2.16	17.0	23.4
Blaste suave	7.89	44.4	53.9

Tabla 5 Topografía superficial de PMMA con diferentes operaciones de post proceso acabado superficial, donde Ra se refiere a la media aritmética del perfil de rugosidad medido desde la línea central, Rz la distancia media entre los picos más altos y los valles más bajos y Rmax la distancia máxima del valle al pico.

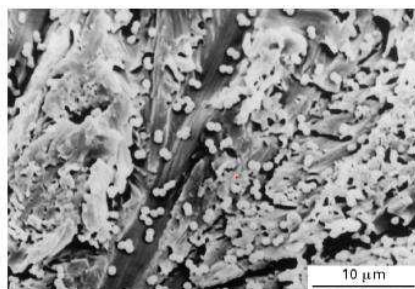


Figura 15 Micrografía electrónica de barrido de la bacteria epidermis en una rugosidad procesada con P400 en PMMA después de una hora de incubación.

Quiryen et al. [45] muestra, que un incremento en la rugosidad de la superficie de resina por encima de una rugosidad de $0.2 \mu\text{m}$ resulta en un incremento en la colonización de bacterias en comparación de superficies lisas de $0.12 \mu\text{m}$. Estudios posteriores in vitro indicaron que un incremento en la rugosidad (arriba de $0.8 \mu\text{m}$) tienen un efecto en la formación de placa para implantes orales. Con estos estudios Quiryen et al. [45] establece un umbral de $0.2 \mu\text{m}$, por debajo del cual no se podría esperar una reducción adicional de acumulación de bacterias y si un incremento en acumulación de placa, lo que podría incrementar el riesgo de caries e inflamación periodontal.

2 Problemática

2.1 Planteamiento

Los moldes fabricados utilizando Manufactura Aditiva por extrusión de filamento presentan rugosidad superficial debido a que su construcción se realiza capa por capa [17]. Se tiene reportado que moldes contruidos por MA transfieren su geometría y rugosidad a las piezas fabricadas en ellos [46]. Los implantes fabricados a partir de los moldes de policarbonato no son la excepción, por lo cual requieren un post proceso manual de acabado superficial con el fin de disminuir la rugosidad [17]. La rugosidad juega un papel importante en los implantes de PMMA ya que, de acuerdo a la literatura revisada en el capítulo anterior, se tiene identificado que implantes con estas características son más susceptibles a la adhesión de bacterias y a las subsecuente formación de la biocapa en comparación con superficies lisas, esto, tiene un impacto en el desarrollo de procesos infecciosos que comprometen la vida del paciente. Por otro lado uno de los retos del diseño del molde, es la apertura del mismo para la obtención de la pieza de trabajo, ya que esto es una actividad laboriosa y que debe llevarse a cabo con cuidado, principalmente por los bordes del implante, los cuales, son más delgados que el resto de la pieza y son los que hacen contacto con el cráneo, permitiendo así que se lleve a cabo el ensamble entre el implante y el cráneo.

Con el fin de reducir la rugosidad en los implantes fabricados y facilitar el desmoldeo del implante, se propone utilizar el post proceso de acabado en masa por máquina vibratoria para conocer el impacto que tiene en la rugosidad.

2.1.1 Hipótesis

Un cambio en el acabado superficial de moldes empleados para la elaboración de implantes, repercute de manera positiva en el proceso de fabricación de implantes de PMMA.

2.1.2 Objetivo

Estudiar el post proceso de acabado superficial en componentes manufacturados de manera aditiva, y el efecto que produce en la fabricación de implantes de PMMA por moldeo.

2.1.3 Alcances

1. Cuantificar la rugosidad en moldes manufacturados de MA, y su consecuencia en la fabricación de implantes de PMMA.
2. Identificar el efecto del acabado superficial en la apertura del molde para fabricar implantes de PMMA.

2.1.4 Actividades

1. Diseño y construcción de piezas de estudio y moldes de PC.
2. Fabricación de piezas de estudio de PMMA a partir de los moldes de PC.
3. Tratamiento del acabado superficial de las piezas de estudio de PMMA y PC
4. Medición de la disminución de rugosidad en distintos intervalos de trabajo de las piezas descritas
5. Cuantificación de la facilidad con la que se abren los moldes con y sin post proceso de acabado superficial cuando se fabrican las piezas de PMMA.
6. Establecer una serie de recomendaciones para la fabricación de implantes de PMMA a partir de los moldes construidos por Manufactura Aditiva.

2.1.5 Capacidad instalada en MADiT

El MADiT cuenta con los equipos de MA por extrusión de material Fortus 900 y Fortus 400 (Figura 16a), para la construcción de piezas de estudio y moldes de PC.

También se cuenta con el equipo de acabado en masa Giant de la serie W esta máquina pertenece a la familia del tambor giratorio con vibración (Figura 16b). Cuando la máquina comienza a operar, se realiza un movimiento vibratorio el cual hace que exista un trabajo entre la pieza de interés, la media, el agua y el abrasivo que está dentro del equipo. Como primer paso se pretende estudiar el impacto del proceso de acabado en masa en las piezas construidas por FDM, para proponer un tiempo de procesamiento de piezas construidas con los materiales



Figura 16 Capacidad instalada en MADiT para la realización de este proyecto. a) Máquinas Fortus 900 y 400 b) Giant serie W.

3 Marco teórico

3.1 Manufactura Aditiva

3.1.1 Extrusión de material

El sistema de extrusión de material deposita material en forma de flujo continuo, capa por capa para la fabricación de objetos. Las máquinas de MA por extrusión fuerzan el material a salir a través de una boquilla o un orificio mientras que ésta se desplaza en el plano de construcción. Una vez que se termina de depositar una capa completamente, la plataforma se desplaza hacia abajo, o el cabezal extrusor hacia arriba, y la siguiente capa es extruida sobre la capa anterior [13].

El material extruido debe encontrarse en un estado semi-sólido cuando sale a través de la boquilla, además que debe solidificar permaneciendo en esa forma y lugar, finalmente, el material debe unirse a la capa que ya ha sido extruida previamente, para obtener una estructura sólida [5].

Vaezi et al. [14] clasifica el proceso de extrusión de materiales en dos subgrupos: con derretimiento y sin derretimiento, esta clasificación puede apreciarse en el siguiente diagrama, junto con sus principales técnicas:

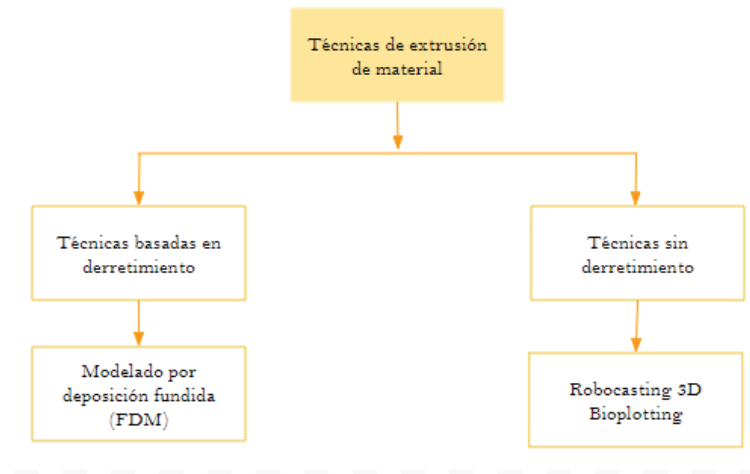


Figura 17 Diferentes técnicas de Manufactura Aditiva por extrusión de materiales [14].

En el caso de la extrusión de material sin derretimiento, se tiene la capacidad de procesar termoplásticos en forma de inicial de polvos, pellets y líquidos, en esta subcategoría se utiliza aire comprimido o en algunos casos gas inerte para extruir el material, de manera que la construcción se lleva a cabo en un medio líquido [12].

En el caso de la extrusión de material con derretimiento se utiliza temperatura para controlar el estado del material. El material calentado se licua dentro de un depósito para que fluya a través de una boquilla y se una con el material adyacente antes de que se solidifique. Este proceso es similar al método convencional del proceso de extrusión de polímeros. Sólo que en este caso el extrusor se encuentra de manera vertical [5].

3.1.2 FDM: Modelado por Deposición Fundida de Stratasys

La tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM por sus siglas en inglés) es un proceso de MA por extrusión de material en el que un componente es fabricado, capa por capa, depositando un filamento que es extruido a través a de un orificio o una boquilla. El filamento se proporciona a la máquina mediante un mecanismo de rodillo de presión como se observa en la Figura 18a. El material es calentado hasta a estado semi-fundido y extruido a través de un cabezal extrusor que se desplaza en el plano x-y para ser depositado en una plataforma dentro de un ambiente controlado, al terminar una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo y construye la siguiente capa [11, 47]. Las características de las capas se aprecian en la Figura 18b.

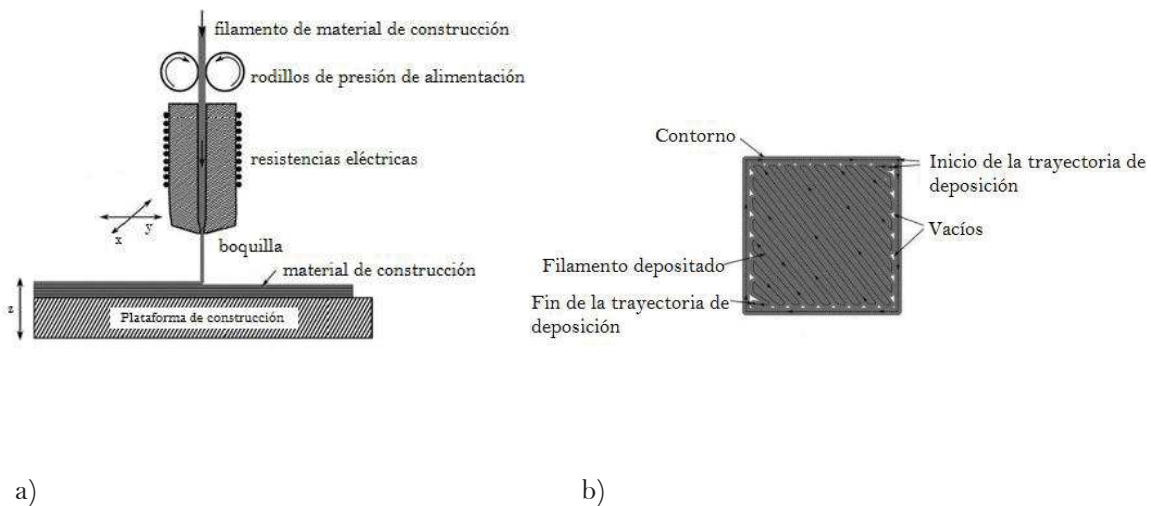


Figura 18 Manufactura Aditiva por extrusión de filamento a) Esquema de un proceso de manufactura aditiva de extrusión genérico b) Trayectorias de filamento depositado con un solo contorno y unidireccional de una capa.

El primer proceso basado en la extrusión de materiales fue el modelado FDM fue patentado en 1992, estos sistemas representan la mayor capacidad instalada de máquinas de MA en el mercado [13]. La mayor fortaleza de la tecnología FDM es el rango de materiales y las propiedades mecánicas resultantes de las piezas construidas. Mientras que una de las debilidades de esta tecnología es el tiempo de construcción, ya que la aceleración de estos sistemas son menores que otras tecnologías por la inercia que involucra los cabezales extrusores [12].

3.2 Características en piezas construidas por Manufactura Aditiva

3.2.1 Modelo del CAD a STL

En todos los procesos de Manufactura Aditiva, es necesario un modelo CAD de la parte para ser construida. Hoy en día, se utiliza un modelo teseado (formato de archivo de estereolitografía o STL) el cual se ha convertido en un estándar en la industria de la Manufactura Aditiva para representar datos de un CAD. Un formato STL contiene la lista de las coordenadas de los vértices de los triángulos y sus vectores normales los cuales aproximan la superficie al modelo [9]. La Figura 19 muestra el modelo teseado de una porción de una superficie.

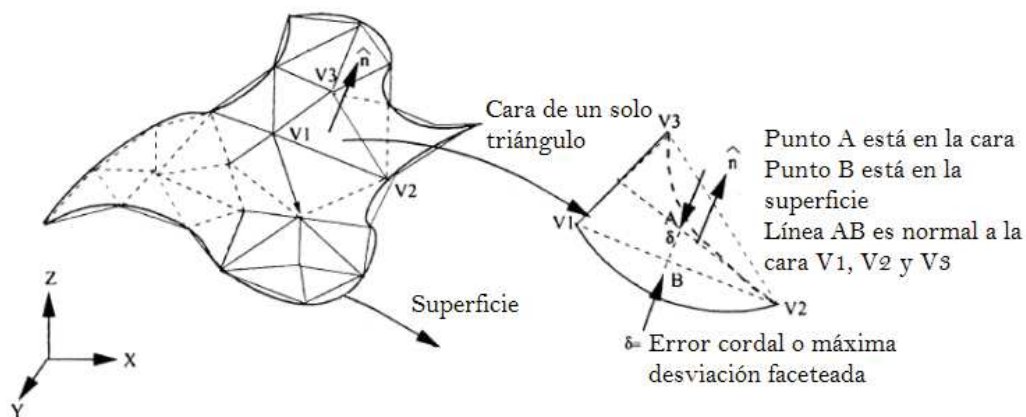


Figura 19 Teseado: modelo de superficie faceteado, error cordal [9].

A la desviación entre la superficie original del modelo CAD y su triángulo correspondiente en su forma teseada, se le denomina error cordal. Si el tamaño de los triángulos se reduce, la desviación entre la superficie del modelo y la superficie aproximada de los triángulos también se reduce [48].

Toda vez que el modelo es convertido a formato STL, es necesario que este modelo sea rebanado por algún programa de la máquina. Los bordes de cada rebanada pueden quedar dentro o a fuera de la

representación triangular con la que originalmente se obtuvo el archivo STL. Este fenómeno se conoce como problema de contención. El proceso de rebanado y la deposición de material capa por capa conlleva una serie de imperfecciones y pobre acabado superficial [9]. En la Figura 20 se observa que entre más pequeña es la capa, más parecido y suave es la parte construida.

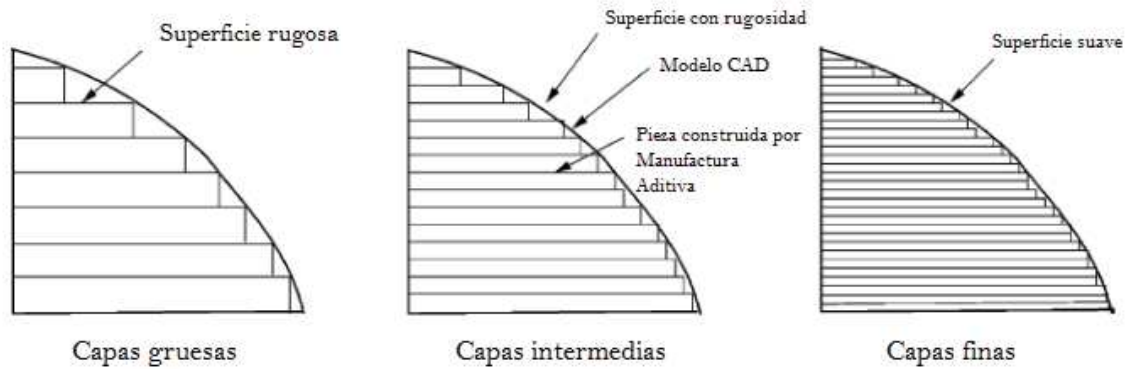


Figura 20 Efecto del espesor de capa en el acabado superficial [9].

3.3 Acabado superficial en FDM

Las partes construidas por FDM contienen superficies con texturas rugosas y menos tolerancia geométrica en comparación con otras tecnologías de Manufactura Aditiva [49]. La consecuencia de depositar capa por capa hace que la superficie de una pieza construida por este proceso presente crestas en la superficie como se muestra en la Figura 21. Este efecto es comúnmente conocido como efecto de escalonamiento (*stair-stepping effect*).

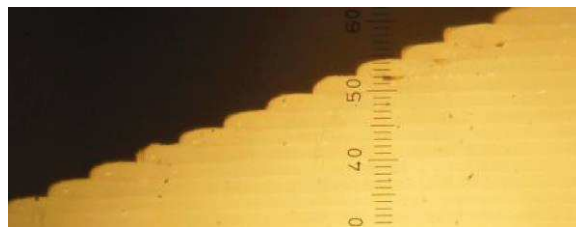


Figura 21 Efecto de escalonamiento [12].

Varios grupos de trabajo [9, 50-52] han llevado a cabo diferentes investigaciones y experimentos para entender, evaluar y predecir la rugosidad en la superficie. Reducir el espesor de capa reduce la rugosidad en la superficie, sin embargo, esta reducción aumenta el tiempo de construcción. De hecho, el espesor de capa y la orientación tienen mayor impacto en la rugosidad de la parte. De acuerdo los experimentos desarrollados por Vasudevarao et al. [50], la temperatura, el ancho de filamento y la separación entre ellos no tienen influencia en la superficie. En general, las superficies horizontales, que son paralelas a la cama de construcción son las más suaves, y las superficies verticales (ortogonales a la cama de construcción) tienen la mayor rugosidad [11].

Ahn et al. [51] propone un modelo matemático de la rugosidad con relación al ángulo de construcción de la superficie, el espesor de la capa y la sección transversal del filamento, en este trabajo muestra que los valores de la rugosidad promedio en superficies cercanas a 90 grados son menores a los obtenidos por superficies a otros ángulos de construcción, el perfil del modelo se muestra en la Figura 22.

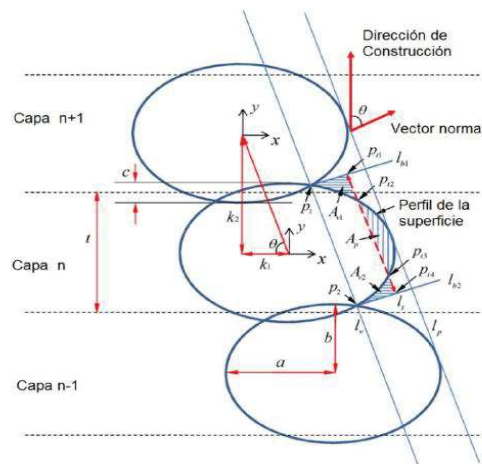


Figura 22 Representación del modelo de perfil para superficies FDM propuesto por Ahn et al. [51].

Este modelo identifica una región indeterminada, en los ángulos 0 a 30° y de 150° a 180° respecto de la horizontal, en donde las mediciones en una construcción con diferentes debido a que no se presenta una

intersección entre filamentos. La Figura 23 muestra las mediciones obtenidas en su investigación, en donde compara la rugosidad promedio para dos especímenes con espesores de capa distintos.

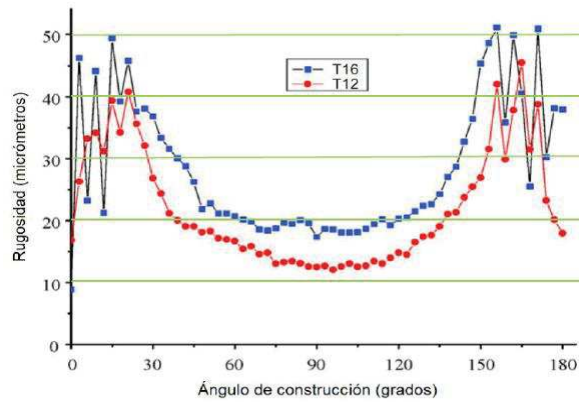


Figura 23 Mediciones de rugosidad obtenidas para dos espesores de capa distintos: $T16=0.254$ [mm] y $T12=0.177$ [mm] [51].

Parámetros de manufactura como el ancho del filamento y la separación entre ellos tienen impacto en la rugosidad de la superficie, así como la temperatura del material de modelo [53]. Para la tecnología FDM, la rugosidad mínima que se logra es con la boquilla 0.127 [mm], que es el valor mínimo que existe hasta ahora.



Figura 24 Pieza de prueba [51].

Armillotta et al. [54] menciona que existen factores, que también afectan la calidad de la superficie en piezas construidas por extrusión de filamento, estas son:

1. Problema en la exactitud de deposición de las máquinas
2. La tasa de deposición no puede ser menor a la proporcional al diámetro de la boquilla

3. La contracción y los esfuerzos residuales que ocurren cuando el polímero se solidifica
4. La remoción de soportes de partes de la pieza que se encuentran en voladizo deja marcas en la misma.

Ahn et al. [51] concluye que el valor de la rugosidad de la superficie se debe, principalmente, al espesor de la capa y la orientación en la que se construye la pieza, en la Figura 24 se muestra la pieza de estudio que utilizó este autor.

En general, las características de rugosidad en piezas construidas por MA, no son satisfactorias para ciertas aplicaciones, por lo que las piezas construidas necesitan operaciones de acabado superficial [11].

3.3 Técnicas para mejorar el acabado superficial

En la literatura se encuentran distintas estrategias que se han utilizado para modificar el acabado superficial de piezas construidas por Manufactura Aditiva. Galantucci et al. [53] divide estas técnicas en cuatro categorías principales:

- i) Orientación de construcción
- ii) Estrategias de rebanadas de la pieza
- iii) Parámetros de fabricación
- iv) Post proceso

3.3.1 Orientación de construcción

Con esta estrategia se reduce la rugosidad mediante el desarrollo de algoritmos en función de la calidad superficial, tiempo de construcción y complejidad de la estructura de soporte, con la intención de identificar la orientación deseable de la pieza a construir [55].

La mayoría de las investigaciones han estudiado la orientación en el proceso de MA de estereolitografía (SL). Son algunas las investigaciones que se han desarrollado en el proceso FDM, en donde el acabado superficial tiene más impacto debido al efecto escalera que en el proceso SL [56].

Thrimurthulu et al. [56] propone una técnica para mejorar el acabado superficial y reducir el tiempo de construcción en piezas FDM por medio de algoritmos, propone un método para predecir la rugosidad en las piezas antes de construirlas. Con la intención de reducir el post proceso de maquinado CNC para mejorar el acabado superficial construidas por FDM, SLA y SLS [52]. En este trabajo se utiliza una metodología para determinar una orientación óptima de fabricación, a través de ecuación que exprese la distribución de la rugosidad en la superficie y su relación con el post proceso CNC de modelos CAD complejos.

Alexander et al. [57] propone un método para calcular el costo y la orientación, demostrando que estas dos cuestiones están asociadas. En este trabajo se analiza los problemas de orientación de modelos contruidos por SL y FDM con el que se puede aplicar en un amplio espectro de técnicas de Manufactura Aditiva.

3.3.2 Estrategias de rebanado de la pieza

En esta estrategia, el rebanamiento adaptativo se tiene la flexibilidad de producir piezas con distinta rugosidad en la superficie variando el espesor de la capa [58]. Como se muestra en la Figura 24:

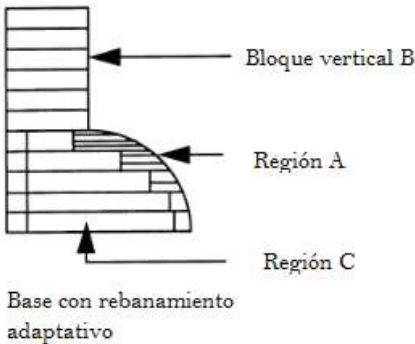


Figura 25 Rebanado de una pieza con rebanamiento adaptativo [58].

Con esta estrategia el usuario es capaz de variar la altura delta, definida como el error asociado con el efecto escalera y que es la distancia normal máxima entre el CAD y la capa. Además es posible variar el tipo de deposición (excesiva o deficiente) [58] . Esto se observa en la Figura 26.

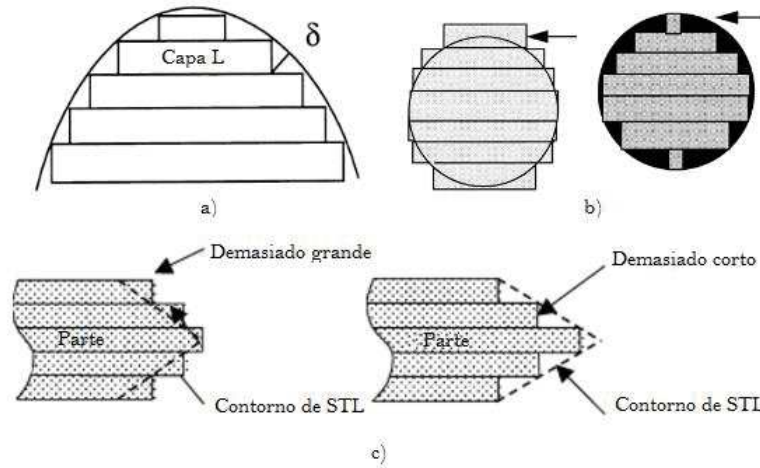


Figura 26 Imprecisiones debido al efecto escalera de la pieza construida por Manufactura Aditiva b)Imprecisiones de la deposición c)Ilustración de casos cuando la deposición es demasiado grande o corto comparado con el STL [58,59].

La desviación entre el CAD y la capa se calcula y se determina con el espesor de la capa para minimizar esta desviación, el usuario es capaz de imponer una rugosidad a lo largo de la superficie de todo el modelo. Sin embargo, es posible variar la rugosidad dependiendo la región en el objeto [58]. Kumar et al. [60] propone un método para calcular el error en la superficie, este método aproxima la pared fuera entre dos contornos sucesivos por medio de un parche, este parche y delta disminuye la altura, es decir disminuye la desviación, lo cual incrementa el número de capas (disminuyendo el espesor).

3.3.3 Parámetros de fabricación

Dependiendo del proceso de manufactura aditiva, es posible modificar los parámetros de manufactura para estudiar el impacto que tiene en la rugosidad. Zhou et al. [61] realizó un diseño de experimentos Taguchi para reducir el número de experimentos y encontrar la relación entre la salida (rugosidad y

precisión dimensional) y la entrada (parámetros de manufactura) en piezas construidas por la tecnología sinterizado selectivo por laser.

3.4 Post procesos utilizados en piezas construidas por FDM

Con la finalidad de mejorar el acabado superficial algunos post procesos se han utilizado en piezas construidas por FDM. Estos métodos se clasifican en tres categorías: maquinado CNC (*Computed Numerical Control*), métodos químicos y acabado en masa [47].

3.4.1 Maquinado CNC

El maquinado CNC es un método de remoción de material que mejora el acabado superficial de piezas construidas por FDM, como su nombre lo indica, este método utiliza un CNC con una herramienta de corte, como la que se encuentra en la Figura 27, para remover las crestas de una pieza previamente anclada. Pandey et al. [62] desarrolló un mecanizado de corte caliente, el cual permitió obtener promedios de rugosidad de $0.7 \text{ } [\mu\text{m}]$ en una superficie con 45° inclinación con $100 \text{ } [\mu\text{m}]$ de promedio de rugosidad inicial.

a)

b)

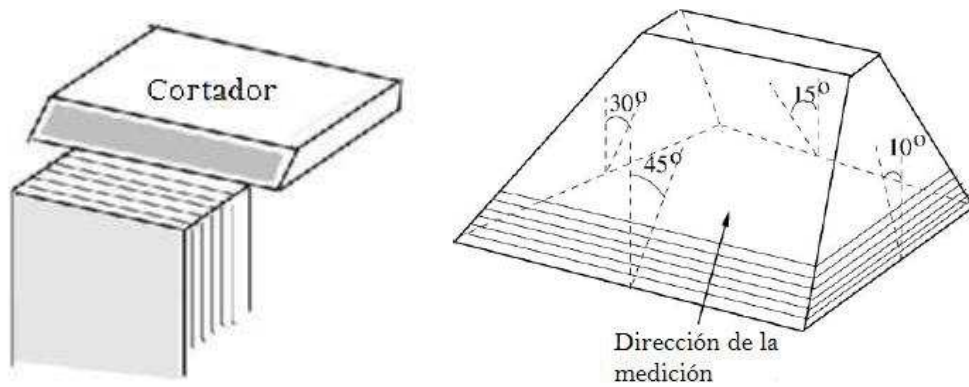


Figura 27 Esquema del cortador utilizado en el maquinado CNC [9].

Si bien es cierto que este proceso mejora la rugosidad de la superficie, está limitado por el tamaño de la herramienta cortadora para algunas geometrías como cavidades y barrenos, particularmente en el caso presentado, sólo se puede utilizar para los ángulos mostrados en la Figura 27, además este maquinado CNC necesita un código de programación lo cual eleva el tiempo de operación.

3.4.2 Métodos químicos

Galantucci et al. [53] estudió los métodos químicos de acabado superficial (suavizado) y su impacto en los parámetros de resistencia a la tensión y flexión, sumergiendo piezas como la mostrada en la Figura 28 en dimetilcetona, piezas construidas de ABS con diferentes parámetros de construcción. Los resultados de estos estudios se indican en la Tabla 6.

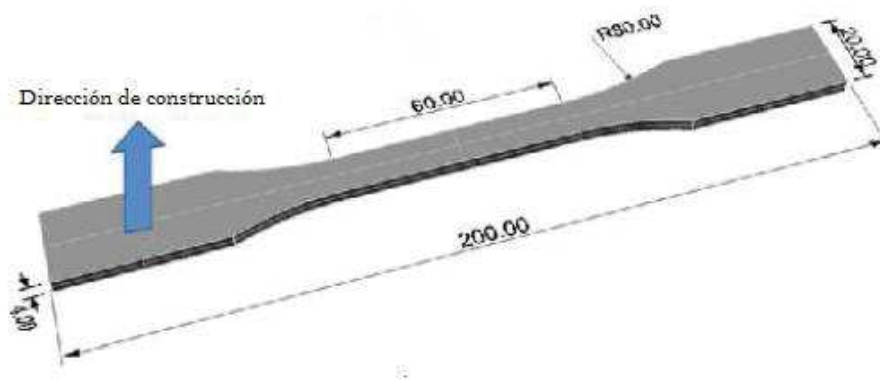


Figura 28 Dimensiones estándar de especímenes para pruebas de tensión [53].

Ángulo de filamento	Ancho de filamento	Rugosidad de especímenes no tratados	Rugosidad de especímenes tratados			Resistencia a la tensión de especímenes no tratados	Resistencia a la tensión de especímenes tratados		
			180°	300°	420°		180°	300°	420°
0	0.404	4.37	4.42		1.88	19.80	17.5	16.80	
0	0.479	25.63		3.19		18.10		17.2	
0	0.554	31.53	7.64		2.53	19.72	18.4	16.4	
30	0.404	37.32		3.09		19.24		16.2	
30	0.479	28.43	6.63	3.63	3.03	20.33	17.2	17.5	18.62
30	0.554	33.01		4.53		20.77		20.0	
60	0.404	41.32	6.32		2.74	19.63	15.6	15.23	
60	60.479	32.94		4.03		21.18		17.1	
60	0.554	48.34	16.7		3.76	21.21	17.8	16.84	

Tabla 6 Comparativa de rugosidad y resistencia de tensión en especímenes tratados y no tratados [63].

Las propiedades de resistencia a la tensión (disminuyen) así como la rugosidad. Este proceso no requiere de la manipulación del operario una vez que inicia, sin embargo, sólo ha sido probado para el polímero ABS.

3.4.3 Acabado en masa

Esta tecnología consiste en colocar la pieza dentro de un contenedor junto con agua, media (material granular) y un compuesto abrasivo, procesadas todas al mismo tiempo (de ahí que el nombre sea en masa) por medio de movimiento. El acabado se lleva a cabo en las superficies, así como en los bordes mediante una acción de desgaste. Existe una amplia gama de acabado en masa, por ejemplo: tambor giratorio, tambor giratorio con vibración, agitador de volteo vibratorio, tambor centrífugo, entre otros. La Figura 29 muestra un esquema de un equipo de acabado en masa vibratorio [64].

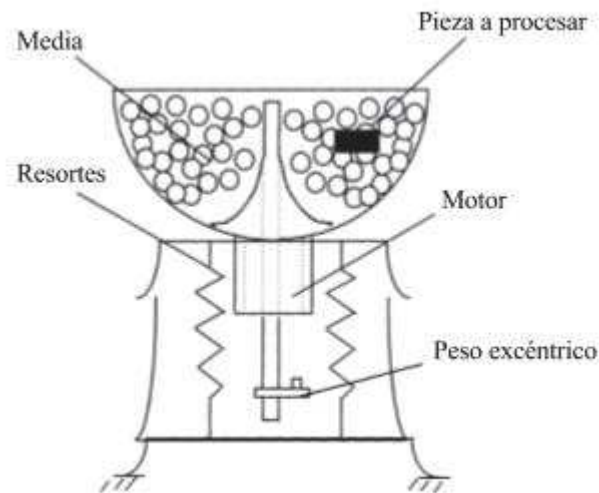


Figura 29 Esquema de un equipo de acabado en masa vibratorio [65].

La media se refiere a los elementos consumibles usados en el proceso de acabado en masa. La principal función de la media es la de abrasar y pulir los bordes, también ayuda a mantener las piezas de trabajo del choque entre ellas, si existen dos o más durante el proceso [64].

3.4.3.1 Consideraciones para la selección de media

La existencia de distintas composiciones y forma de media, junto con la diversidad de equipos de acabado en masa, hacen posible llevar a cabo varias operaciones simultáneamente, lo cual también hace que exista una gran cantidad de variables a tomar en cuenta. La primera consideración para realizar una configuración en el proceso, es la elección del tipo de media, ya que es la herramienta de corte [66] y la segunda es conocer cuál será el objetivo utilizar el acabado en masa.

De acuerdo a Chiancola et al. [66] es necesario revisar la pieza de trabajo y advertir el material, las dimensiones y el peso. Este autor considera los ángulos, agujeros, bordes, filetes y ranuras de la pieza de trabajo ya que la media seleccionada debe llegar a todas las superficies a procesar. Así como la forma de la media, el tamaño de la media también está en virtud de la forma de la pieza, establecer un tamaño de media ayuda a la prevención de choques entre las piezas de trabajo, media demasiado grande para la pieza puede causar pellizcos en la pieza, mientras que media de menor tamaño permite que la media se deslice por su superficie y también permite el desgaste en áreas limitadas como agujeros, ranuras y avellanados, sin embargo, propicia la colisión de las piezas de trabajo. Es importante recordar que el tamaño de la media seleccionada afectará la cantidad de material removido, cuanto mayor sea el tamaño de la media, mayor peso y energía serán generados.

La forma de la media está definida también por la aplicación específica de la parte de trabajo, las formas son variadas. Se debe tomar en cuenta la selección de la forma de la pieza para acceder a todas las superficies y que no queden estancadas en los agujeros y permitir una fácil remoción del contenedor. La

media triangular provee acción uniforme y es efectiva para llegar a agujeros y áreas remotas, ya que sus esquinas permiten penetrar en estas, las partes planas de la media triangular son adecuadas para trabajar bordes planos; los cilindros son ideales para trabajar principalmente en agujeros mientras que la media en forma de diamante tiene bordes afilados que llegan a las esquinas y ranuras; los conos son muy versátiles ya que su forma permite parcialmente entrar en agujeros sin atorarse en la pieza y finalmente, con las esferas, se logra una acción uniforme de trabajo y de contacto de la superficial, esta media se utiliza principalmente para suavizar superficies rugosas. Algunas formas de la media se observan en la Tabla 7 [66].

En la segunda consideración (el objetivo de llevar a cabo un proceso de acabado en masa), los objetivos pueden ser: limpiar la pieza, modificar la dureza, modificar el color, reducir la rugosidad, pulir, etc. de acuerdo a la media, es posible llevar a cabo cada uno de estos objetivos. Existen cuatro tipos de media definidos por la industria: agresivo, intermedio, templado y no abrasivo. La media agresiva son utilizadas para una máxima remoción de material y un ciclo de tiempo más rápido, la intermedia es utilizada también para remover material y disminuir la rugosidad. La templada se utiliza para proveer un mínimo de remoción de material y pulir. Finalmente, la media no abrasiva sirve para dar brillo a la pieza [66].

Material no deseado y rebabas en piezas duras como aceros son utilizados se utilizan medias agresivas. con ingredientes extra en estos materiales óxido de aluminio y carburo de silicio, estos ingredientes, más su peso y su dureza hacen que sea adecuada para metales ferrosos. Mientras que para materiales como aluminio, magnesio, latón y zinc es adecuado utilizar media intermedia [66].

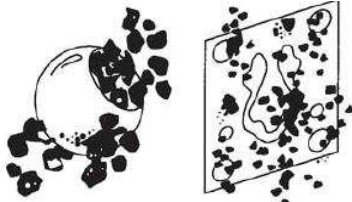

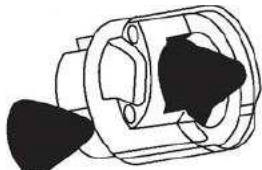
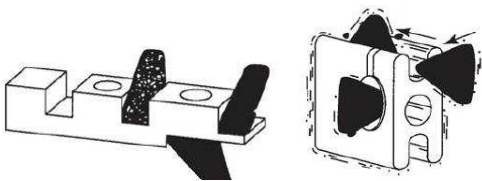
<p style="text-align: center;">Media de forma aleatoria</p> <p>Este tipo de media es capaz de remover marcas provocadas por la herramienta de corte, generar radios, mejorar la resistencia a fatiga y disminuir la rugosidad</p>	<p style="text-align: center;">Media cilíndrica</p> <p>Los cilindros de esta media son capaces de trabajar en características circulares, en este caso en un retenedor de rodamiento de bolas</p>
	
<p style="text-align: center;">Media cónica</p> <p>Este tipo de media es capaz de trabajar sin estancamiento y sin distorsionar la superficie de la pieza</p>	<p style="text-align: center;">Media triangular</p> <p>La media triangular es seleccionada en aquellos casos en donde se necesita acción uniforme y atacar agujeros ciegos</p>
	

Tabla 7 Ejemplos de media utilizadas de acuerdo a las características de la pieza [66].

3.4.3.2 Acabado en masa por tambor rotatorio en piezas construidas por Manufactura Aditiva

Se tiene identificado en la literatura que el acabado en masa rotatorio ha sido empleado para el post proceso de piezas fabricadas en Manufactura Aditiva [47]. No obstante, es necesario conocer las variables que influyen en el comportamiento de la pieza, particularmente en la rugosidad final.

Este método, comúnmente utilizado en la industria de los metales, puede lograr varias operaciones como desbaste y pulido [47]. Recientemente el acabado en masa ha sido utilizado para procesar piezas construidas por FDM, de hecho, Stratasys sugiere el uso de tambores vibratorios y centrífugos para desgastar el efecto escalera.

En 2015 Boschetto et al. [47] estudió el acabado superficial por tambor giratorio en piezas construidas de FDM, el experimento consistió en la construcción de especímenes como los que se encuentran en la Figura 30, estos especímenes son cubos conectados con un incremento de ángulo de 18° en un intervalo de 0° a 180° . La rugosidad promedio inicial se midió y se registró el impacto del tambor giratorio con diferentes tiempos. Los resultados obtenidos para dos ángulos se indican en la Figura 30.

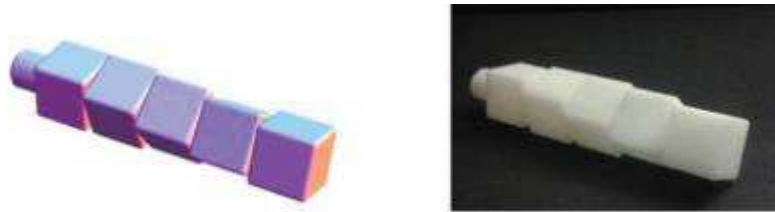


Figura 30 Modelo virtual y espécimen construido utilizado por Boschetto et al. [47].

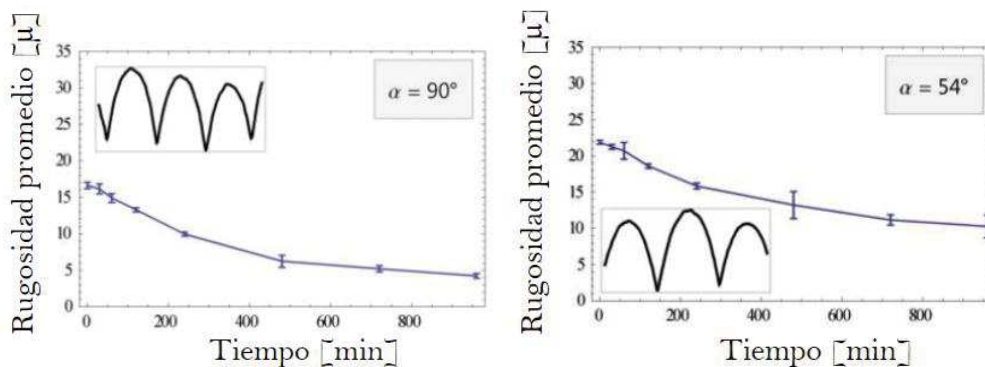


Figura 31 Resultados obtenidos en rugosidad en ángulos de 90° y 54° [47].

En general, el acabado en masa tiene ciertas ventajas respecto al maquinado CNC y al acabado químico, por ejemplo [47]:

- 1) Prácticamente todos los materiales pueden ser procesados
- 2) No tiene limitaciones en cuanto a la geometría de la pieza (barrenos, concavidades, y componentes no simétricos pueden ser procesados)
- 3) La pieza no necesita anclarse
- 4) No necesita operadores especializados

3.4.3.3 Acabado en masa por acabado vibratorio (Vibratory finishing)

El acabado vibratorio se utiliza en este trabajo para procesar piezas construidas por MA. Cabe mencionar que este post proceso vibratorio se ha utilizado en la industria desde los años cincuenta, y que existe poca información que describe los fundamentos y la mecánica de remoción del material de la pieza, la mayor parte de la información disponible se ha desarrollado a partir de hallazgos empíricos más que de investigaciones científicas. El acabado vibratorio se utiliza con la intención de mejorar la apariencia superficial, la resistencia al desgaste, incrementar la dureza, limpiar y secar superficies [67].

Esta técnica ha sido utilizada en metales, cerámicos y plásticos, con el uso de una gran variedad de media, tales como bolas de acero, esferas cerámicas rugosas y cilindros [65], esta media se mueve mediante vibraciones dentro de una cámara y desarrolla un flujo circulatorio en el que la pieza a procesar es sometida a la acción del impacto con la media, la media interactúa con la pieza a través de una combinación de impactos normales y deslizamientos. La vibración proviene de un motor eléctrico que hace rotar uno o más ejes con pesos excéntricos, este peso y la velocidad del sistema determinan la amplitud y la frecuencia de la vibración [68].

La configuración de un equipo se muestra en la Figura 29. La cámara en donde se lleva a cabo la operación puede ser un contenedor ovalado o redondo o bien, un tubo largo con una sección transversal en forma de U [65], mientras que la media de esta máquina consiste en materiales de distintas formas, donde el material está compuesto de forma granular. Aun cuando existen varias formas que se utilizan son pirámides, conos, cilindros y esferas con lados máximos de 25 mm o menos. La clasificación de la media no está estandarizada por lo que se clasifica de acuerdo a la acción de corte y se les conoce como: trabajo rudo, medio y bajo [65].

Las características sobresalientes de este proceso son [69]:

- Acabado superficial uniforme en toda la pieza
- Capacidad de operar en bordes internos
- Alcance final (saturación) del acabado superficial después de un tiempo específico

Estas son las razones del porqué este proceso aún se utiliza en la industria a pesar de que la tasa de remoción de material es más lenta en comparación con otros procesos abrasivos; las dos primeras características se deben al libre movimiento de los elementos del proceso como la media y los abrasivos. La tercera razón, que causa que se obtenga una saturación del acabado superficial, es que se llega a una

rugosidad final en la cual esta ya no se puede reducir más, lo que hace del post proceso de acabado en masa por vibración un proceso predecible [69].

Las primeras investigaciones acerca de este post proceso se llevaron a cabo por Gillespie en 1975 [70], Sofronas y Taraman en 1979 [71] y Hashimoto en 1996 [72]. Gillespie llevó a cabo experimentos con diferentes tipos de media y dos tipos de media hechos de acero y aluminio. Los cambios en las características finales, como el material removido, dimensiones de la pieza y rugosidad de la superficie fueron reportados en su trabajo. Un modelo capaz de decidir la aplicabilidad del proceso vibratorio para varias condiciones de procesado usando los datos obtenidos se presentaron, pero este modelo sólo fue aplicable para las medias utilizadas. A partir de este trabajo Gillespie siguió desarrollando su trabajo con el acabado en masa hasta presentar un libro que presenta información detallada acerca de este post proceso [69].

Hashimoto y Debra [72] midieron el material removido y la rugosidad final de piezas de acero sometidas a la estación vibratoria, encontraron que el material removido depende de su rugosidad inicial e incrementa si la rugosidad incrementa. Con base en sus experimentos, se encontró que la rugosidad final de la pieza se satura después de cierto periodo de acabado. Los resultados pueden observarse en la siguiente Figura 32.

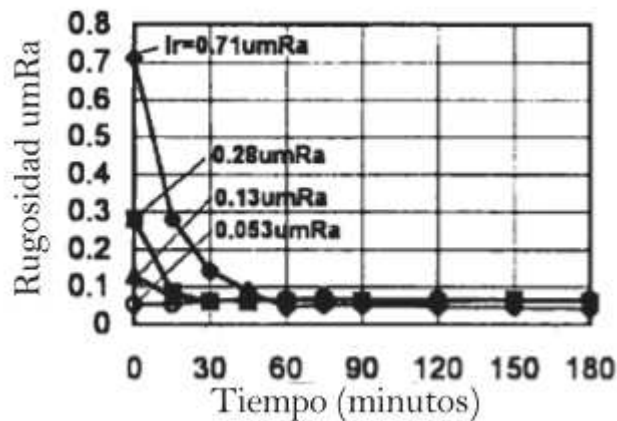


Figura 32 Cambios en la rugosidad durante el post proceso de acabado superficial por tambor vibratorio [72] .

De acuerdo a la figura anterior, para la gráfica de acabado superficial contra el tiempo, las siguientes ecuaciones describen el proceso [64]:

$$S = A_1 t \quad \text{Ecuación 1}$$

$$F(t) = f_0 - f_\infty e^{-t/T} + f_\infty \quad \text{Ecuación 2}$$

$$R = A_2 t^m \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

S = Material removido

$F(t)$ = Rugosidad a un tiempo determinado

f_0 = Rugosidad inicial

f_∞ = Rugosidad final

t =Tiempo de la pieza de trabajo en el equipo de acabado superficial vibratorio

T es una constante de tiempo en horas, la cual se determina con los resultados graficados de rugosidad contra tiempo

R = Radio del borde después del tiempo de proceso

A_1, A_2 y m son constantes

Soforonas et al. [71] estudió las variables de control, tales como la dureza de la pieza, tiempo de proceso, tamaño de media, frecuencia de vibración sobre el impacto que tiene sobre la reducción de dimensiones, como, radio del borde y la altura, y también sobre la superficie rugosa, mediante un enfoque estadístico con 33 experimentos. De este estudio, la frecuencia de la vibración es identificada como el parámetro más importante, seguidos del tamaño de la media y el tiempo de proceso. La dureza de la media de trabajo se encontró que no tenía o producía cambio en la superficie final.

Wang et al. [65] trabajó con aleaciones de aluminio (AA1100-0 y AA6061-T6) y midió las fuerzas de contacto normales en una máquina de acabado en masa vibratoria mediante un sensor colocado dentro del contenedor, los datos obtenidos los correlacionó con la rugosidad superficial y dureza en las piezas, para esto controló tres variables: tamaño de media (media esférica de 7 mm, 9 mm y 11 mm de diámetro), tipo de lubricación (agua, seco y con lubricante), tiempo de operación y tipo de aleación (AA1100-0 y AA6061-T6). Wang encontró que las condiciones de desgaste por parte del impacto son uniformes en todas las superficies de la pieza, además que la media más grande produce una dureza mayor debido a que existe una mayor energía cinética, promoviendo la deformación plástica. En el caso de la rugosidad final, esta varía dependiendo del tipo de lubricación utilizado, dependiendo del tipo de lubricante, este disminuye el daño en la superficie por impacto, porque distribuye los esfuerzos de contacto uniformemente, promoviendo deslizamiento entre la media y la pieza de trabajo por medio de la reducción del coeficiente de fricción.

Yabuki et al. [73] también exploró las fuerzas de contacto de la máquina de acabado superficial por vibración, con el uso de sensores capacitivos de fuerza normales y tangenciales para medir dichas fuerzas. Con los impactos sensados y a través de una cámara instalada dentro de la máquina, Yabuki indica que existen diferentes modos en los cuales la media hace contacto con la pieza de trabajo mediante: a) un impacto directo b) deslizamiento de la media con la pieza de trabajo y c) media estacionada con elementos adyacentes rodando sobre ella. Estos tipos de impacto pueden observar en la Figura 33.

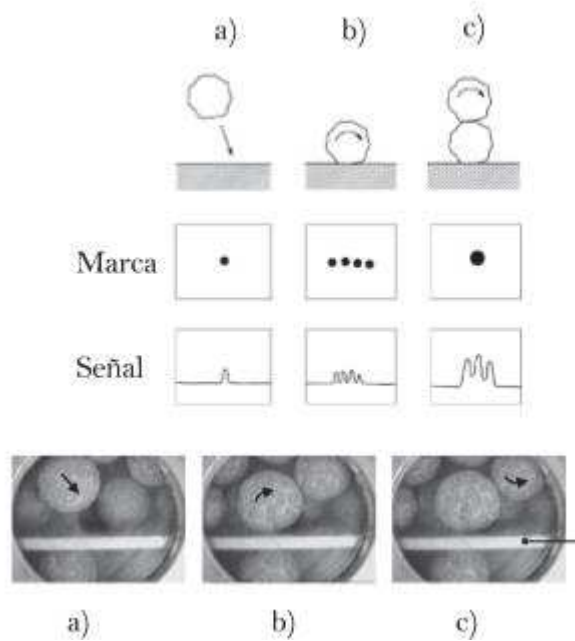


Figura 33 Arriba representación esquemática de tres tipos de contacto de la media, con su respectiva señal y marca en la pieza de trabajo a) un impacto directo b) deslizamiento de la media con la pieza de trabajo y c) media estacionada con elementos adyacentes rodando sobre ella . Abajo: Tomas de video que muestran los tipos contacto [73].

El material removido de la pieza es el desgaste, desde un punto de vista mecánico el desgaste es visto como indeseable, sin embargo en un proceso de modificación de superficie, el desgaste puede controlarse. Típicamente los mecanismos de desgaste causan fracturas, disolución mecánica y derretimiento de material en la superficie. Existen cuatro tipos de mecanismos de abrasión: adhesivo, abrasivo, por fatiga y corrosivo. De los cuatro tipo de desgaste, el corrosivo es el que no ocurre en el proceso de acabado en masa por vibración [69], estos mecanismos de abrasión se muestran en la Tabla 8.

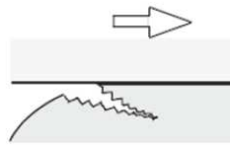
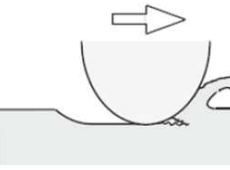
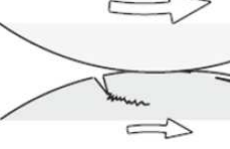
Desgaste	Descripción	Descripción gráfica
Adhesivo	Ocurre cuando dos superficies con propiedades similares hacen contacto. Si la fuerza de unión entre las superficies es mayor que la fuerza aplicada, el esfuerzo cortante cause deformación plástica en el área de contacto. Cuando esta deformación plástica excede al esfuerzo último de ruptura, ocurre la fractura del material y por ende el desgaste.	
Abrasivo	El mecanismo de desgaste por abrasión se define como aquel, en el que la media penetra y remueve material desde la superficie dura a una más suave.	
Fatiga	Este mecanismo de desgaste ocurre cuando existe un número repetido de contactos en la superficie.	

Tabla 8 Representaciones de los tipos de desgaste ocurridos [69].

Un mecanismo de desgaste mecánico abrasivo se genera en tres modos:

- 1) Corte
- 2) Formación de cuñas
- 3) Formación de surcos

El corte, como su nombre lo indica, se caracteriza por el corte del material a lo largo de la pieza, con la formación de virutas y usualmente ocurre bajo condiciones de fricción baja. La formación de cuñas ocurre cuando una gran fricción y el desgaste adhesivo causa deformación plástica y una zona agrietada en forma de cuña en el extremo de la superficie desgastada. La formación se debe también a una deformación plástica y el material es empujado hacia los lados [69]. Esto puede apreciarse en la Figura 34:

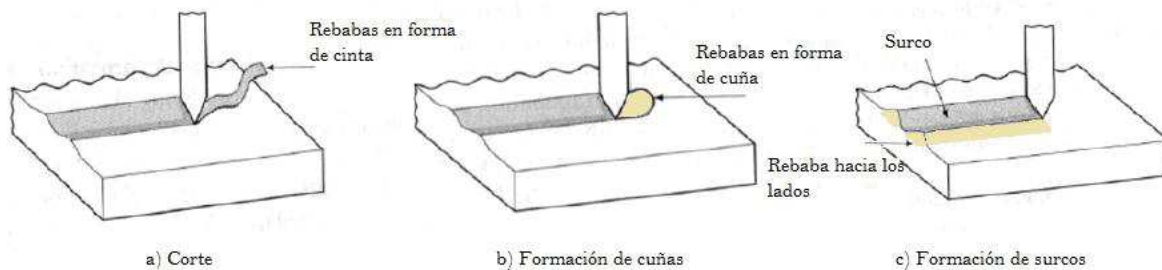


Figura 34 Modos de desgaste abrasivo mecánico.

4 Desarrollo

El presente capítulo consta de tres secciones, en las cuales, se plantean las actividades a realizarse para cumplir con los objetivos de este trabajo, posteriormente, se muestran los resultados en el siguiente capítulo. En la primera sección se plantea inspeccionar el daño causado por el proceso de acabado superficial por máquina vibratoria en los filamentos internos de componentes de Policarbonato construidos por Manufactura Aditiva con distintos parámetros de construcción, es decir, con cinco, tres y un solo contorno externos definidos. Para conocer el impacto en dichos filamentos se utilizó el Tomógrafo Industrial Nikon Metrology XT H 225, el cual permite realizar una inspección visual interna sin necesidad de cortar o destruir el componente.

La segunda sección está dedicada a cuantificar el desgaste de la superficie en componentes construidos de policarbonato y en polimetilmetacrilato. Las piezas de PC fueron manufacturadas directamente en el equipo por extrusión de filamento Fortus 400, mientras que las piezas de PMMA fueron fabricadas a partir de moldes de PC, también construidos en el equipo de manufactura aditiva antes mencionado. El desgaste fue medido con el rugosímetro Mitutoyo SJ 310 en distintos intervalos de trabajo, estas pruebas se hicieron con base en los experimentos de Boschetto et al. [47].

En la tercera sección, se compara la facilidad de apertura entre un molde sin ser procesado con acabado superficial y el otro con 16 horas en la máquina vibratoria. Para esto se diseñó un mecanismo el cual permite medir la fuerza que se necesita para abrir los moldes.

4.1 Inspección de los filamentos internos y externos mediante tomografía computarizada

Se diseñó una pieza, la cual se muestra en la Figura 34, con 30 mm de altura y 20 mm de diámetro. Con el fin de comprender el impacto del proceso de acabado en masa vibratorio en los filamentos internos y externos, la pieza se construyó considerando cuatro secciones con distintos parámetros de manufactura. La parte superior de la pieza tiene una configuración sparse, es decir, una estructura hueca que corresponde a la base y no es considerada en el experimento, las secciones consecuentes tienen diferente cantidad de filamentos externos: la sección uno contiene un filamento, la sección dos contiene tres filamentos y la sección tres tiene cinco contornos. Esto se muestra en la Figura 35.

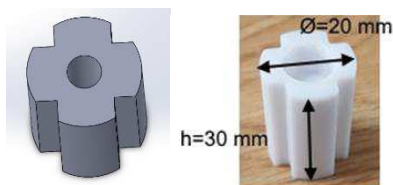


Figura 35 Diseño y construcción de la pieza de policarbonato a analizar



Figura 36 Secciones con distintos parámetros de manufactura en las piezas de PC a) Imagen CAD del componente diseñado b) Secciones con distintos contornos c) Configuración de los contornos en el componente.

Las piezas fueron construidas con la máquina por FDM Stratasys Fortus 400, con policarbonato y soporte PC con una boquilla T16. El programa de cómputo Insight v10.1 fue usado para controlar la configuración de los parámetros de manufactura que se encuentran en la Tabla 9a. Para el tratamiento de acabado superficial, se utilizó el intervalo que Boschetto et al. [47] emplea en sus experimentos, este intervalo de trabajo se muestra en la Tabla 9b.

Parámetro de manufactura		Intervalo de medición [min]
Ancho de filamento	0.4064 [mm]	0
Estilo de contorno	Grupos con 5,3 y 1	30
Estilo de superficie visible	Mejorado	60
Estilo de llenado	Sparse	120
Ángulo de filamento	45	240
Distancia entre filamentos (air gap)	0.0	480
		720
		960

a)

b)

Tabla 9 a) Parámetros de manufactura empleados para la construcción de los cilindros de estudios b)Intervalo de tiempo utilizado de acuerdo a los experimentos de Boschetto et al. [47].

Para el tratamiento de acabado superficial, se utilizó la estación vibratoria de acabado superficial (Giant, USA). La media utilizada corresponde a una media cerámica de un 1 ¼ “ de altura y una base de 1 ⅛” , y se utilizó una proporción de 48:1 de líquido compuesto de concentración. El cilindro fue colocado dentro del equipo como se indica en la Figura 37.

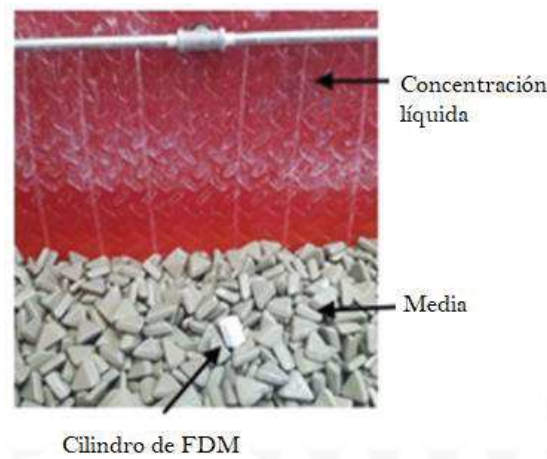


Figura 37 Pieza de PC colocada dentro del tambor rotatorio en donde también se observa la media utilizada y la concentración líquida

Toda vez que las piezas fueron procesadas en el tambor vibratorio de acuerdo al intervalo de la Tabla 9b, los cilindros fueron estudiados por medio del sistema de tomografía computarizada Nikon Metrology XT H225ST, con los siguientes parámetros: 90 Kv, 11.7 w, tiempo de exposición 267 ms, y 3142 imágenes. Los sistemas de tomografía computarizada se basan en los diferentes coeficientes de absorción de los materiales al ser penetrados por rayos X. La tomografía computarizada es la única tecnología capaz de inspeccionar la geometría interna y externa de un componente sin la necesidad de cortarlo o destruirlo. Esta tecnología es utilizada en la industria para el control de calidad de piezas de trabajo con características internas no accesibles, por ejemplo: piezas construidas por Manufactura Aditiva o componentes multimaterial [74].

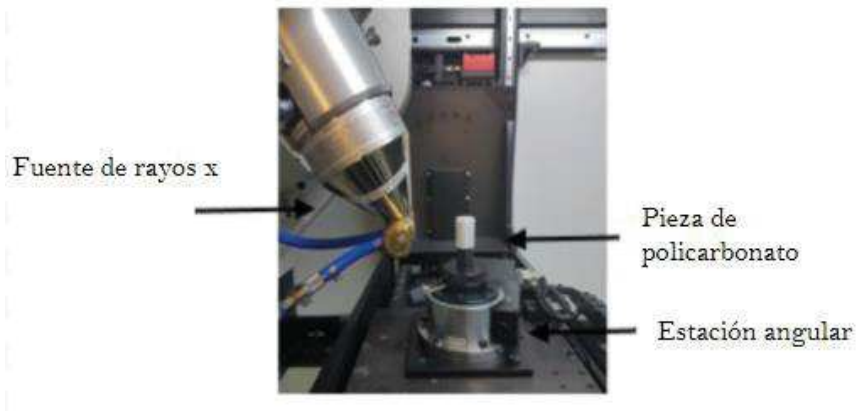


Figura 38 Configuración de cilindros colocados en el tomógrafo para su análisis.

4.2 Desgaste superficial en componentes de PC y PMMA

4.2.1 Diseño

Para cuantificar el desgaste de la superficie en componentes cilíndricos construidos de policarbonato y polimetilmetacrilato, se diseñaron cilindros de 15 mm de altura y 20 mm de radio para ser construidos directamente en PC con Manufactura Aditiva, mientras que los componentes de PMMA fueron construidos a partir de los moldes. La geometría del cilindro patrón y de los moldes diseñados se observa en la Figura 39.

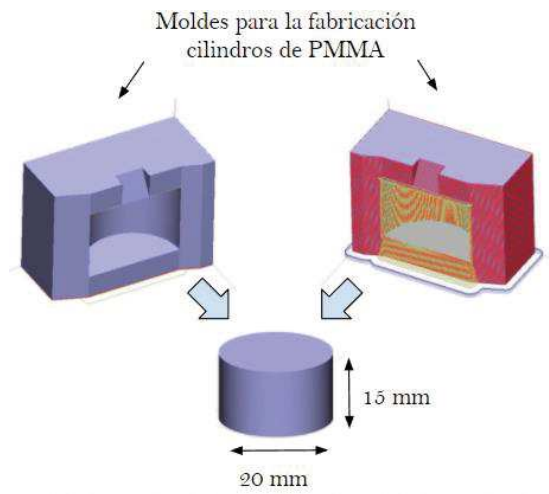


Figura 39 Moldes diseñados para la construcción de cilindros de PMMA

En la sección 4.1 se mostró que el proceso de acabado en masa por tambor vibratorio no daña los filamentos internos y que la reducción de la rugosidad se comporta de la misma manera sin importar la cantidad de filamentos externos con los que esté configurada la pieza, por lo que el cilindro fue construido utilizando una boquilla T16 de 0.254 mm con los siguientes parámetros de construcción.

Parámetro de manufactura	
Ancho de filamento	0.4064 [mm]
Estilo de contorno	5 contornos
Estilo de superficie visible	Mejorado
Estilo de llenado	Sparse
Ángulo de filamento	45
Distancia entre filamentos (air gap)	0.0 [mm]

Tabla 10 Parámetros de manufactura para la construcción de cilindros patrón y moldes.

Una vez construidas las piezas en FDM, se llevó a cabo la polimerización empleando los moldes, los cuales fueron recubiertos previamente con PVA (acetato polivinilo, película separadora) ya que en este tipo de moldes el PMMA se adhiere al llevarse la reacción, el PVA facilita el desmoldeo porque forma una película antiadherente de un espesor milimétrico que protege las áreas de contacto entre los moldes y el cilindro. El PMMA que se utilizó fue un polímero comercial conformado por una parte líquida y otra parte en forma de polvo. Se mantuvo una relación estequiométrica de 2 partes de polvo a 1 parte de líquido, una vez mezclados los componentes, se dejó reaccionar el material a temperatura ambiente, hasta alcanzar una consistencia viscosa. Esta mezcla reactiva fue empacada en los moldes a una presión de 220 kPa, luego, se introdujo en un horno a 90° C para que comenzara la reacción. Después de 3 horas los moldes fueron retirados de la estufa y enfriados hasta llegar a la temperatura ambiente, enseguida se realizó la extracción de la pieza contenida en los moldes. En la Figura 40 se muestra las piezas construidas de policarbonato y aquellas de PMMA que fueron obtenidas a partir de los moldes [3].



Figura 40 Piezas de estudio. Policarbonato (fila de arriba) PMMA (fila de abajo).

Las piezas de estudio mostradas en la Figura 40 fueron analizadas con el rugosímetro Mitutoyo SJ-310, este equipo se compone de una aguja que es la que se introduce entre los picos y valles (generalmente es de diamante), un captador que es el que registra los movimientos de la aguja, un patín que se apoya en la superficie y sirve de filtro mecánico, un sistema de motorización que empuja y arrastra la aguja sobre la superficie, un sistema de electrónica que registra los datos del captador, los procesa y obtiene los parámetros deseados, esto se observa en la Figura 41.

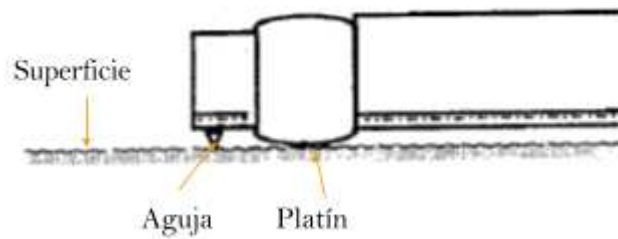


Figura 41 Configuración del sensor del rugosímetro [75].

Los cilindros fueron colocados como lo indica la Figura 42, cada uno de los 16 cilindros tanto de PC y PMMA fueron estudiados de la misma manera.



Figura 42 Medición de rugosidad de una pieza de policarbonato con el equipo Mitutoyo SJ 310.

4.3 Impacto del acabado superficial en la apertura de moldes con y sin post proceso.

Debido a la naturaleza del proceso de construcción capa por capa de los moldes de PC que se utilizan para la fabricación de piezas de PMMA, la superficie rugosa promueve la interacción entre el PC y el PMMA, es decir, estos dos materiales disímiles se adhieren al momento de llevarse a cabo la reacción, en la cual, existe un incremento en la temperatura del sistema por el calor que genera el proceso reactivo. Por tal motivo, dichos moldes son recubiertos con una película de PVA para evitar cualquier interacción química entre el PC y la mezcla de PMMA.

Almanza-Arjona et al. [77] estudió la temperatura en distintas partes de los moldes cuando se lleva a cabo la reacción del PMMA. Este trabajo reporta las temperaturas generadas por la mezcla reactiva en el molde, específicamente en el centro de la reacción, en la parte interna y externa del molde, tal y como se indica en la Figura 43.

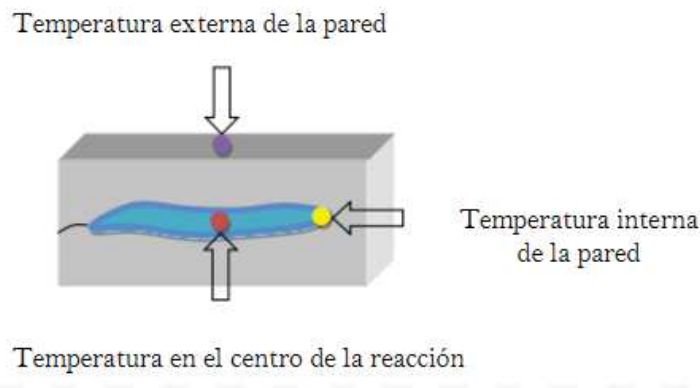


Figura 43 Diagrama de los puntos en los cuales se tomaron las temperaturas [77].

El calor desprendido de la reacción genera un incremento de la temperatura de la mezcla reactiva de 70.3 a 93.7 °C, el perfil de temperatura, así como la temperatura máxima se muestran en la Figura 42. La película de PVA es resistente a la reacción y es capaz de resistir temperaturas de 200°C. Esta película facilita el desmoldeo porque forma una película separadora antiadherente de un espesor milimétrico que protege las áreas de contacto entre los moldes y el PMMA, en el caso de los moldes de policarbonato utilizados para la fabricación de implantes, se ocuparon tres capas de PVA, con la cual se obtiene un capa final milimétrica de 0.11 [mm] de espesor.

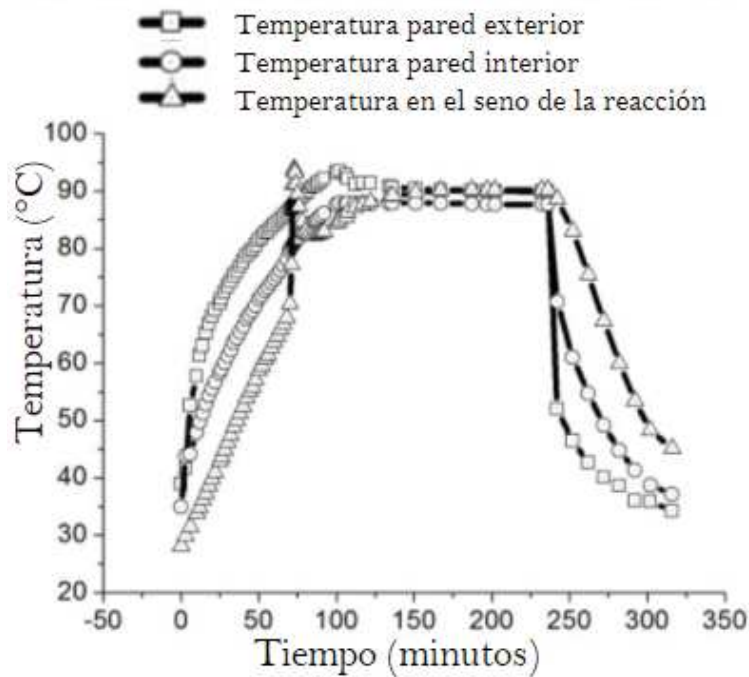
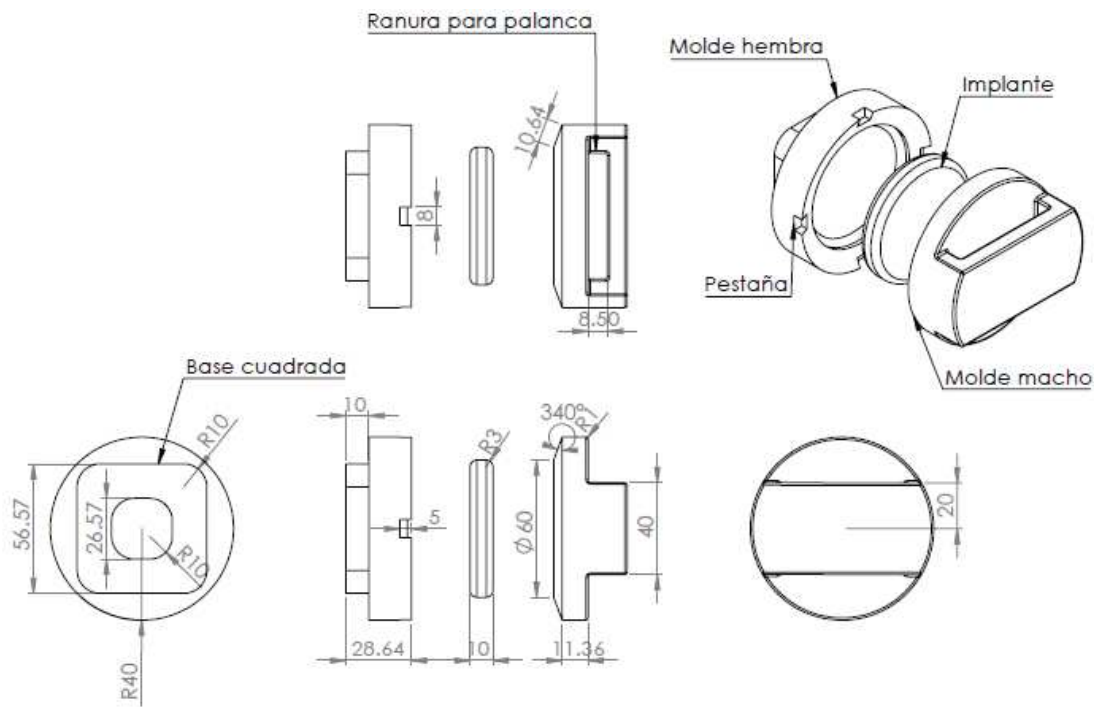


Figura 44 a) Mediciones de temperatura en el molde b) Perfil de temperatura durante el proceso de polimerización del PMMA [77].

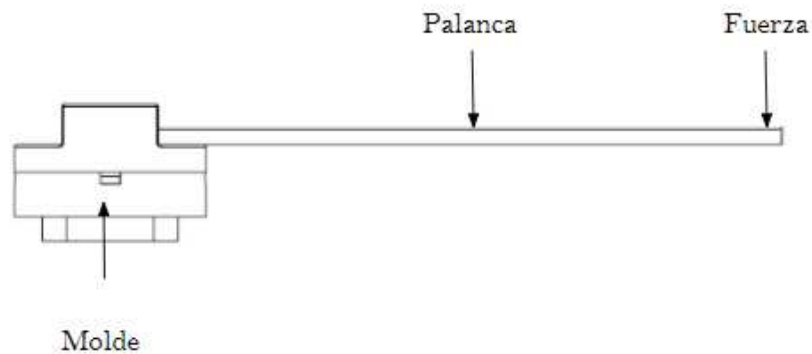
Aún cuando la película de PVA es empleada, la extracción de los implantes que se encuentran dentro de los moldes es una tarea que debe realizarse con cuidado, ya que zonas como el contorno del implante son más delgadas que el resto y pueden llegar a romperse al momento de la apertura del molde, lo que hace que el desmoldeo de la pieza final se convierta en una tarea laboriosa y tardada.

Por tal motivo, se requiere saber si el proceso de acabado superficial facilita el desmoldeo. Para conocer esto, se diseñaron moldes de forma circular que cumplen con las especificaciones descritas en Ruiz-Huerta [78] para la fabricación de moldes construidos por manufactura aditiva para la fabricación de implantes craneofaciales. El molde se conforma de un molde hembra y uno macho, ambos con un espesor de 10 [mm], el área de contacto entre estos moldes es de 10 [mm] además, cuenta con “pestañas” las cuales sirven de canales por donde sale el material excedente al momento de compactar la mezcla reactiva. El implante obtenido a partir de estos moldes es de 10 [mm] de espesor y representa un implante para una lesión craneofacial grande [3]. El diseño del molde se muestra en la Figura 45a.

El molde diseñado permite evaluar la fuerza necesaria para ser abierto: el molde macho presenta una ranura, en la cual se puede acoplar una palanca, mientras que el molde hembra está diseñado con una base cuadrada que permite ser apretada en una prensa de banco. Esto se muestra en la Figura 45b. El experimento consiste en llevar a cabo una polimerización en un juego de moldes con tratamiento superficial y en uno sin post proceso y así, conocer el momento para abrirlos.



a)



b)

Figura 45 a) Diagrama del molde diseñado para el experimento b) Mecanismo propuesto para la apertura de moldes.

Se construyeron dos pares de moldes (hembra y macho) de PC con la misma máquina por extrusión de filamento y los mismos parámetros utilizados que las piezas estudio de PC (Tabla 9). De acuerdo a la geometría propuesta para el mecanismo de apertura, la construcción requirió material de soporte. Toda vez construidos, uno de ellos fue tratado durante 16 horas de trabajo en la máquina de acabado en masa por tambor vibratorio y el otro se utilizó sin ninguna modificación. Los dos juegos de moldes fueron cubiertos con tres capas de PVA. Los moldes de Policarbonato se muestran en la Figura 45.

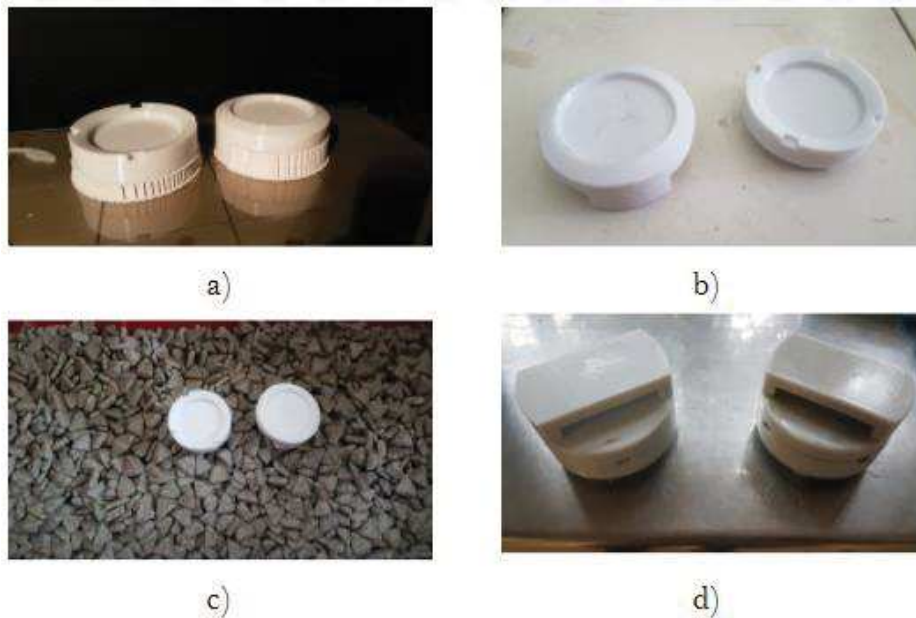
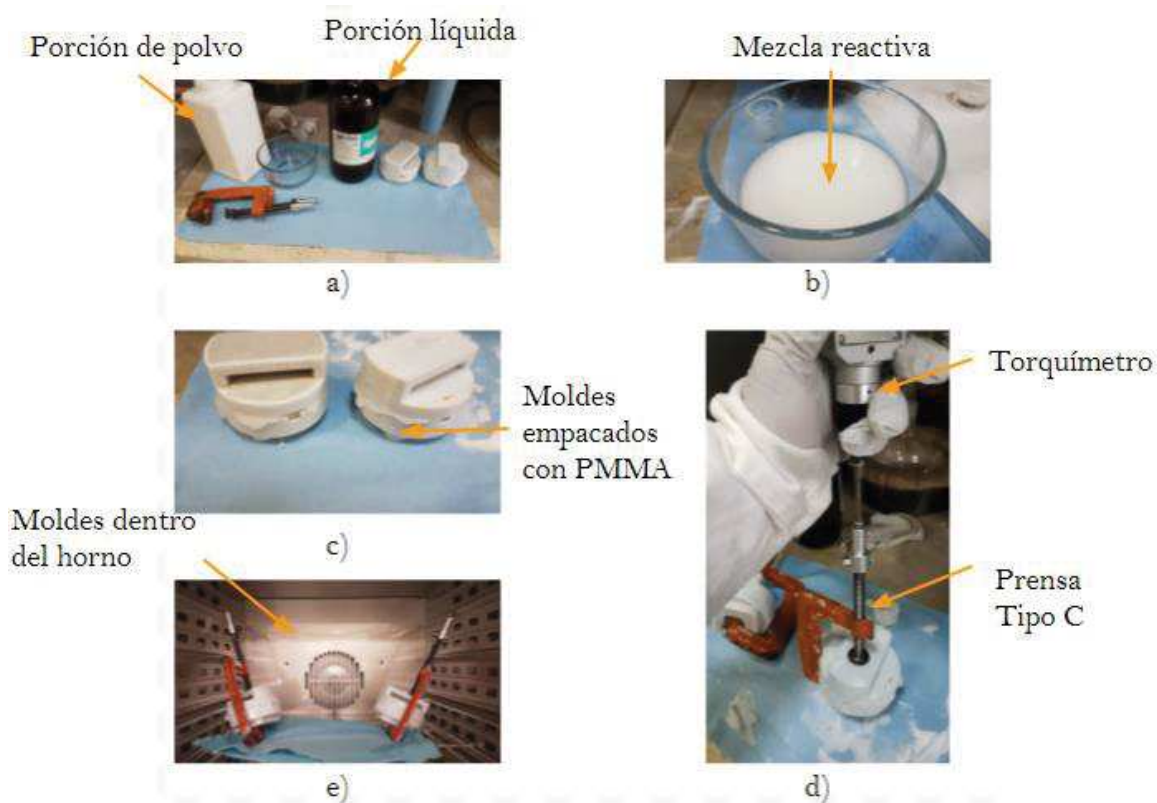


Figura 46 a) Moldes construidos dentro de la cámara de la máquina de extrusión de filamentos Fortus 400 b) Moldes sin material de soporte c) Juego de moldes dentro de la estación vibratoria d) Molde en bruto (izquierda) y molde con acabado superficial (derecha)

Se llevó a cabo la polimerización en los juegos de moldes, para esto, se utilizó un cemento comercial de dos componentes: polvo y líquido (Opticryl, México). De acuerdo con las indicaciones del fabricante, la relación estequiométrica que se debe ocupar es de 2:1, es decir, dos porciones de polvo por cada porción de líquida. La mezcla reactiva fue depositada en los juegos de moldes correspondientes y fue empacada a una presión de 220 [kPa] ya que el punto de ebullición del PMMA es de 100°C, si la reacción se lleva a cabo a presión atmosférica y a una temperatura de 90°C, el monómero cambia de fase y genera burbujas en la pieza, la presión aplicada antes mencionada incrementa la temperatura de ebullición, además, funciona para que las cadenas del polímero del material sean alineadas de manera mecánica y produzcan una alineación entre ellas, causando así, que el PMMA sea transparente, si esta presión no es suficiente, la pieza resultará opaca [77].

La presión es conocida mediante un torquímetro (Cedar DID-4, Sugisaki Meter Co, Ltd, Japón) y unas prensas tipo C con un tornillo acoplado en la parte superior. La relación que existe entre la fuerza de apriete con el torque se detalla en Castro-Espinosa et al [3].

Toda vez empacado el polímero y conocida la presión en ambos moldes, estos fueron colocados en un horno a una temperatura de 80°C durante 3 horas. Transcurrido este tiempo, se retiraron los moldes del horno, así como las prensas tipo C.



a) Material utilizado para la polimerización b) Mezcla reactiva c) Empaque del PMMA en los moldes d) Apriete de los moldes con ayuda de las prensas tipo C y el torquímetro e) Moldes colocados dentro del horno a 80°C.

Figura 47 Proceso de polimerización

Los moldes fueron colocados en una prensa de banco, así como la palanca dentro de la ranura. Del otro lado de la palanca se colocó un contenedor, en el cual se vertió agua cada 200 ml, lo cual permitió tener incrementos de peso de 1.962 [N].

5 Resultados

5.1 Inspección de los filamentos internos y externos mediante tomografía computarizada

5.1.1 Resultados

Después de que se llevó a cabo la tomografía los datos obtenidos, estos fueron procesados y las proyecciones fueron reconstruidas utilizando el programa de cómputo Volume Graphics software VGStudio Max 2.2. Los filamentos externos fueron inspeccionados a través de cortes transversales a la pieza como se indica en la Figura 48, de tal manera que se apreciaran los valles y picos. La altura media de la rugosidad se obtuvo con la medición del valle al pico, en otras palabras, la amplitud que se forma por los filamentos adyacentes.

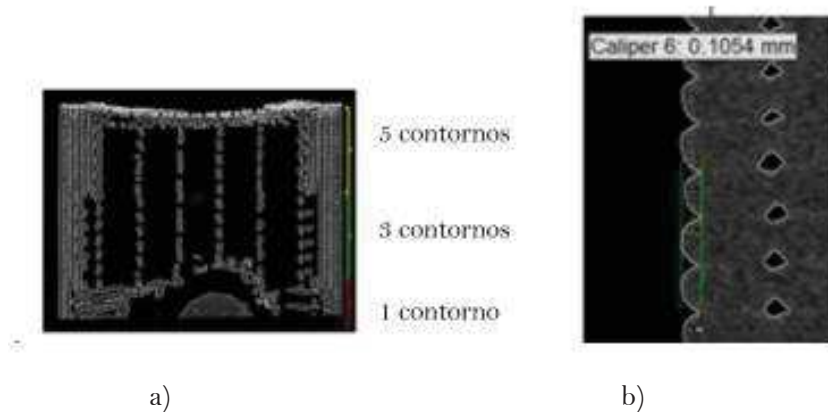
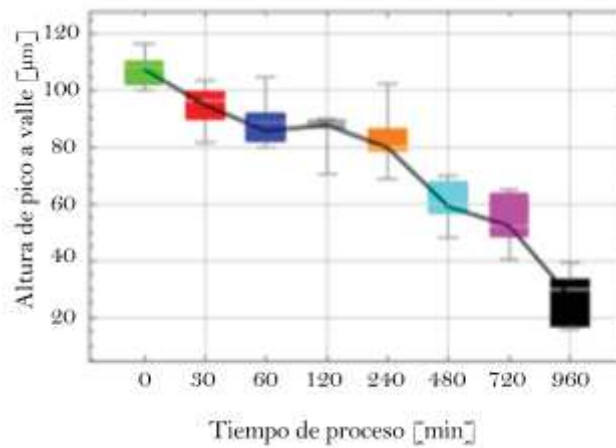


Figura 48 a) Vista en corte de la pieza de policarbonato con sus respectivos contornos b) Medición de la amplitud

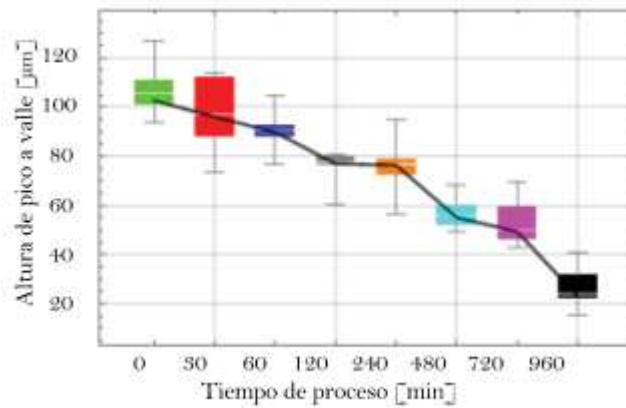
Se tomaron diez medidas para cada una de las tres secciones en cada intervalo de trabajo. Los datos obtenidos se analizaron con ayuda del programa Wolfram Mathematica 10.0 Student Edition. La Tabla 11 muestra estos valores y la Figura 49 los mismos datos representados en diagramas de bigote.

Intervalo	Sección con un contorno		Sección con 3 contornos		Sección con 5 contornos	
	x	σ	x	σ	x	Σ
0	107.75	5.28	106.69	9.42	104.71	7.38
30	94.9	6.94	97.97	13.15	91.7	7.28
60	88.91	7.6	90.25	8.67	89.89	6.86
120	86.1	6.23	75	7.79	76.42	5.9
240	94.05	10.63	76.16	9.61	72.68	9.22
480	60.07	7.33	56.58	6.1	53.35	5.72
720	54.43	8.8	52.94	8.77	52.42	7.19
960	27.45	8.99	26.63	8.04	28.25	5.55

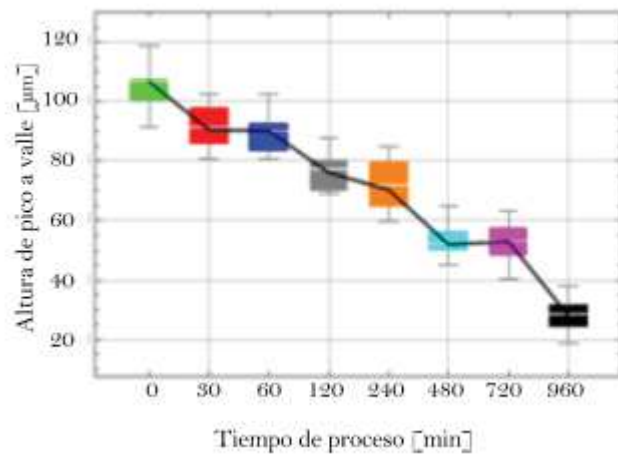
Tabla 11 Valores de media aritmética y desviación estándar para cada sección del cilindro en distintos tiempos de trabajo.



a)



b)



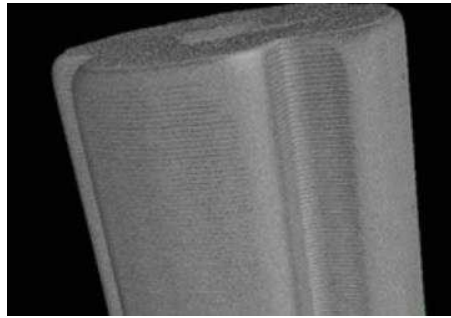
c)

Figura 49 Diagramas de bigote para a)1 Contorno 2)3 Contornos 3)5 Contornos

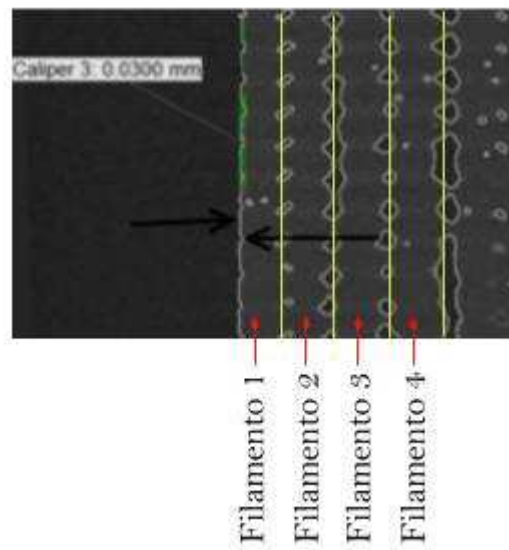
5.1.2 Análisis de resultados

De acuerdo a la Figura 49, la rugosidad decrece respecto al tiempo en las tres secciones del componente construido. Se observa que este comportamiento se presenta de manera semejante en dichas secciones. Después de ocho horas de proceso, la amplitud de las crestas es reducida en un 50%. Sin embargo, se necesitan 16 horas de trabajo para reducir la rugosidad un 80%.

Es posible asegurar que después de aplicar 16 horas de trabajo, ningún filamento interno es dañado, sin importar la cantidad de filamentos externos con la que es configurado el componente en su construcción. Esto puede corroborarse en la Figura 50b.



a)



b)

Figura 50 a) Vista del cilindro después de un proceso de 960 minutos de acabado superficial b) Medida de la amplitud, obsérvese que ningún filamento interno es dañado.

5.2 Desgaste superficial en componente de PC y PMMA

5.2.1 Resultados

Las superficies producidas por cualquier método de fabricación presentan irregularidades que tienden a formar un patrón o textura característica en su extensión. La rugosidad puede ser evaluada por parámetros y funciones (como parámetros de altura, parámetros de longitud de onda, espaciado y parámetros híbridos [76]).

El valor del promedio de rugosidad, representado como Ra, es la variación media de la distancia de un perfil de superficie a la línea central de medición. Definido como:

$$Ra = \frac{1}{l} \int |f(x)| dx \dots \text{Ecuación 4}$$

Donde es la longitud l definida, f(x) es la distancia medida en la superficie del perfil a la línea media, indicada en la Figura 51 [11].

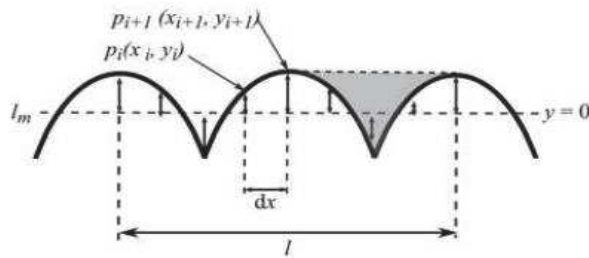


Figura 51 Parámetros utilizados en una superficie genérica (referencia) con puntos definidos como (pi) en intervalos uniformemente espaciados de longitud dx sobre la medida de longitud l. Las distancias medidas en la dirección y desde la línea central es usada en calcular la rugosidad [11].

El valor Ra (descrito en la sección 3.2.1) así como los perfiles de superficie, que se describen a continuación son determinados con ayuda de métodos de perfilometría, estos métodos son estandarizados por la norma ISO-4287-1997 para piezas construidas por Manufactura Aditiva [11].

El perfil de superficie es obtenido en una gráfica de dos dimensiones con ayuda de un sistema de rastreo como el rugosímetro Mitutoyo SJ 310. El perfil de rugosidad de la superficie resulta de la intersección de la superficie con un plano perpendicular a esta misma superficie (Figura 52a). Este perfil sin filtro (Perfil P) es el perfil de superficie medido sin ninguna modificación. Cuando se aplica un filtro a los valores de medición utilizando la longitud de onda de corte λ_c a este perfil, se obtiene el perfil de ondulación W (Figura 45b), cuando se aplica un filtro paso bajas y paso altas se obtiene una línea media del perfil R (Figura 52c). La variable para determinar el límite entre rugosidad y ondulación es el corte λ_c . Los tipos de perfiles se identifican mediante las letras mayúsculas P, R o W. La altura total Pt, Wt y Rt del perfil correspondiente es el valor máximo entre el pico más alto y el valle más hondo a lo largo de la longitud de evaluación del perfil.

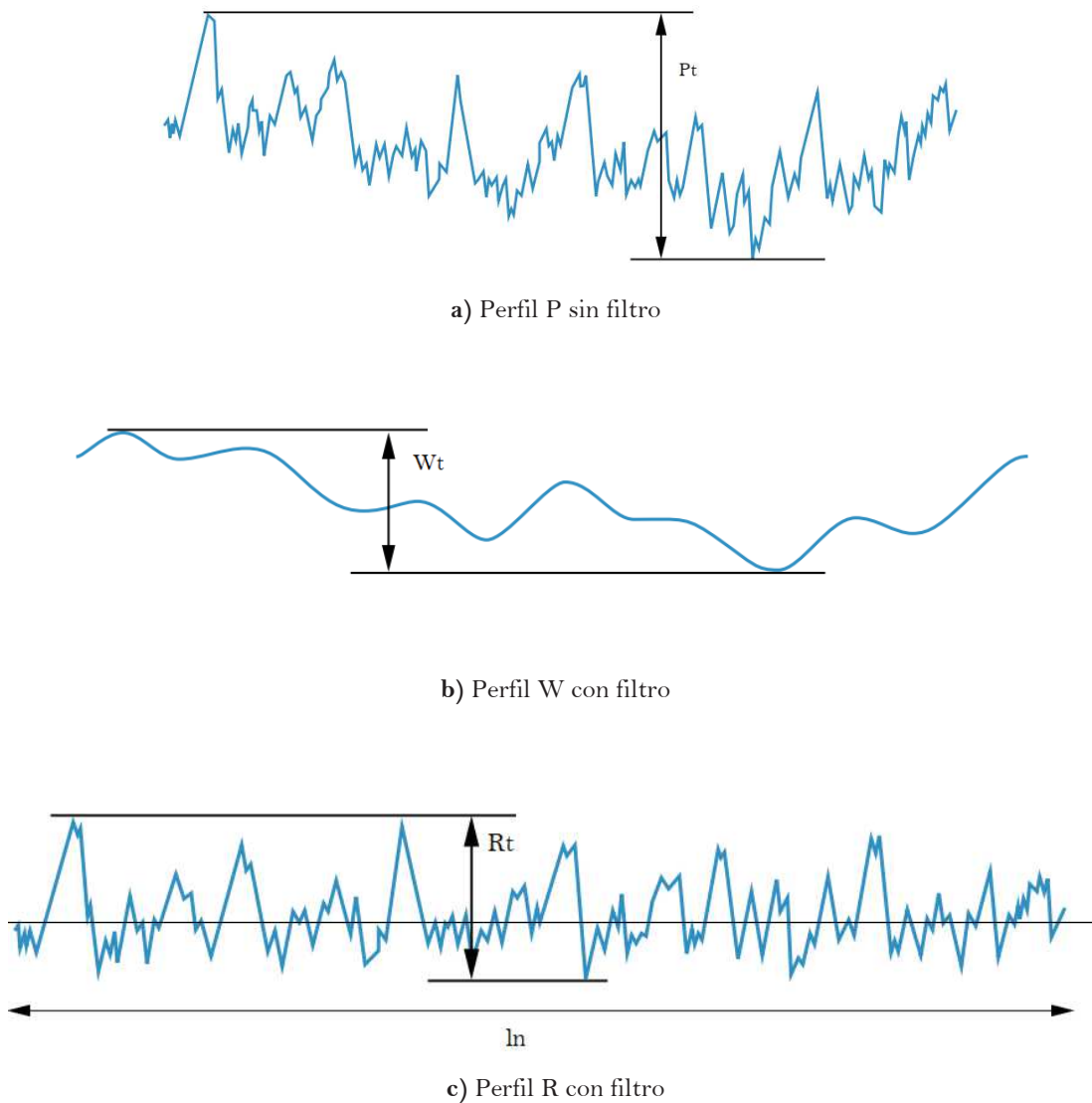


Figura 52 Representación de los distintos perfiles con filtros para la evaluación de rugosidad.

En la Figura 53 se muestra la longitud l_t que es la longitud total de la prueba durante el monitoreo de la superficie. Este valor debe ser más grande que la longitud l_n , con el cual se forma el perfil de rugosidad con el filtro. Los parámetros de rugosidad se definen con ayuda de la longitud l_n , la cual es determinada usando cinco muestras de longitud l_r . La longitud de l_r corresponde a la de corte λ_c .

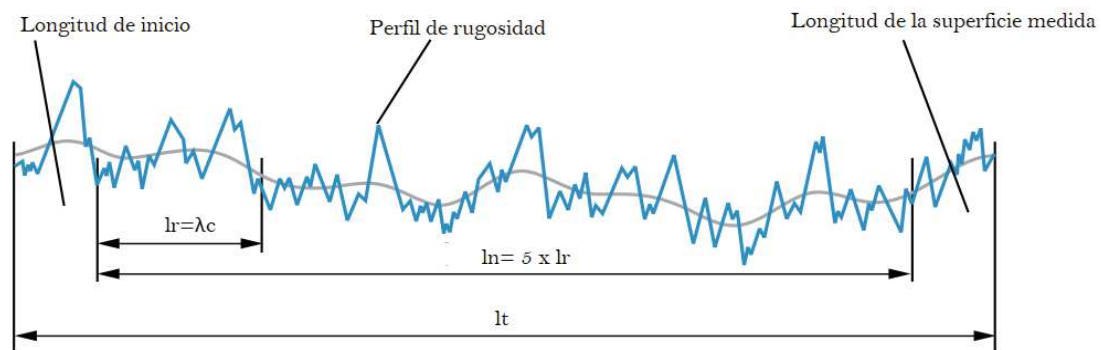


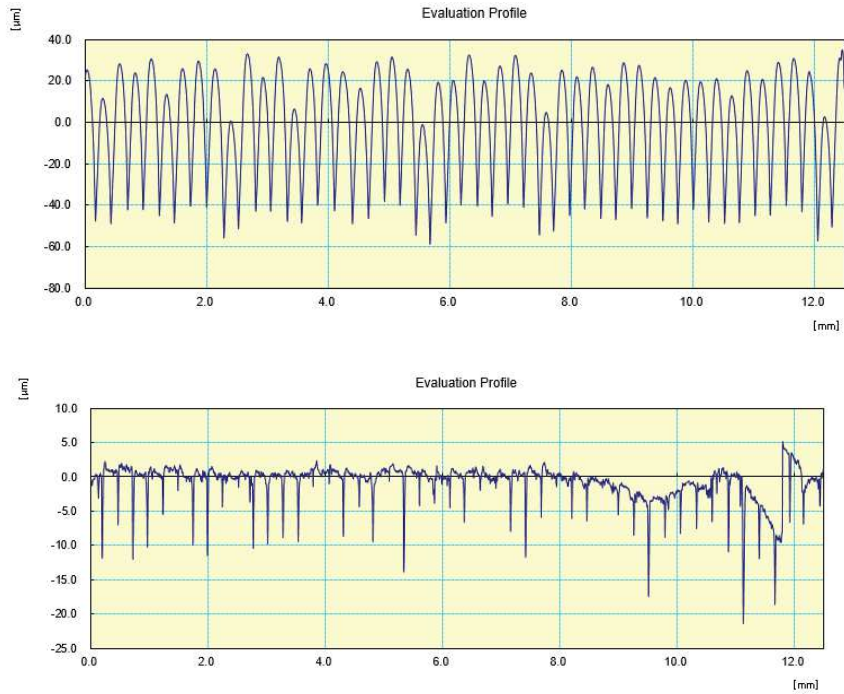
Figura 53 Longitudes de evaluación

A partir de la lectura del rugosímetro, se obtuvieron los datos de Ra, Rq y Rz, para cada de las piezas de Policarbonato y de PMMA en los tiempos correspondientes, estos datos se muestran en la Tabla 12.

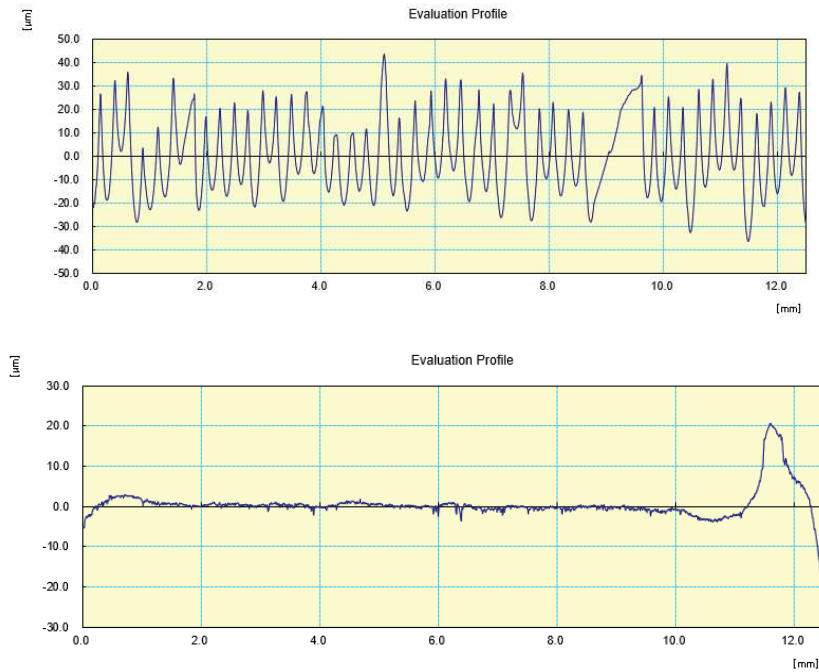
Tiempo	Rugosidad PC	Rugosidad en PMMA
	Ra[μm]	Ra[μm]
0	19.048	13.278
30	17.073	12.424
60	15.568	6.552
120	13.380	4.324
240	9.586	3.722
480	5.77	3.544
720	2.629	3.303
960	1.497	1.759

Tabla 12 Rugosidad Ra para los tiempos de trabajo.

Por otro lado, el programa del rugosímetro muestra los perfiles P de las superficies estudiadas. En la Figura 54 se aprecia el perfil de rugosidad para el tiempo 0 de piezas de PMMA y PC, así como del tiempo de trabajo de 960 minutos.



a) R del policarbonato (arriba) para el tiempo 0 minutos, (abajo) para el tiempo 960 minutos.



b) Perfil P del Polimetilmetacrilato (arriba) para el tiempo 0 minutos, (debajo) para el tiempo 960 minutos.

Figura 54 Perfiles R de las piezas estudiadas.

5.2.2 Análisis de resultados

La Tabla 12 para el tiempo 0, muestra el valor inicial del PC antes de haber sido tratado. El valor Ra inicial coincide con las mediciones hechas por Ahn et al. [51] en el cual mide la rugosidad en componentes construidos con una boquilla T16 que corresponde a 0.254 mm a una inclinación de 90 grados. El valor de Ra del policarbonato comienza en 19.048 [μm] y termina en el valor de 1.497 [μm] para 960 minutos de trabajo.

A pesar de haber sido fabricado a partir de moldes de PC, el valor Ra inicial del PMMA es de 13.278 [μm] y no coincide con el valor del PC (19.048 [μm]). El valor final del Ra para 960 minutos disminuye a 1.759 [μm]. La disminución gradual de Ra para los materiales PC y PMMA se observan en la Figura 55.

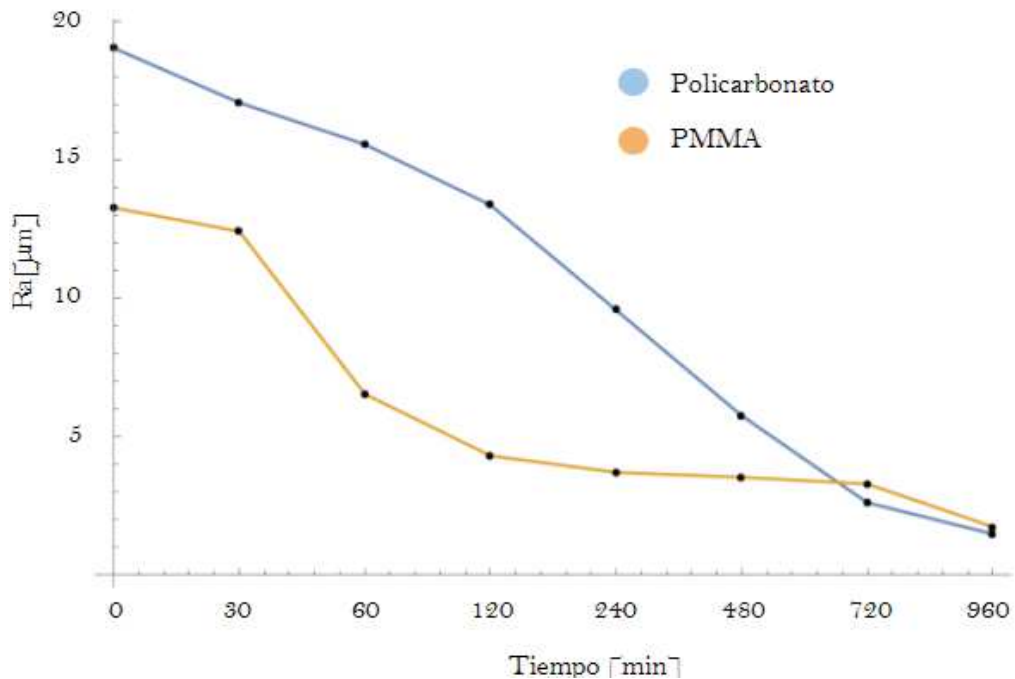


Figura 55 La disminución gradual de Ra para los materiales PC y PMMA

5.3 Impacto del acabado superficial en la apertura de moldes con y sin post proceso

5.3.1 Resultados

Primero, se llevó a cabo el experimento con el molde sin tratamiento superficial, para esto, se agregó de manera gradual 200 [ml], finalmente, este molde resistió 2.4 litros agua, es decir 2.4 [Kg] ya que la densidad del agua es de 1 [Kg/L]. Por otro lado, el molde con post proceso soportó 0.8 litros de agua, esto es 0.8 [Kg].

Toda vez medida la masa para abrir los moldes, se calculó la fuerza ejercida por el agua, la palanca y la cubeta, mediante la Segunda Ley de Newton. Obtenidas las fuerzas, se calculó el momento ejercido por la solera, la cubeta y el líquido contenido en esta. En la Figura 56 se muestra el diagrama de cuerpo libre que fue utilizado en los cálculos.

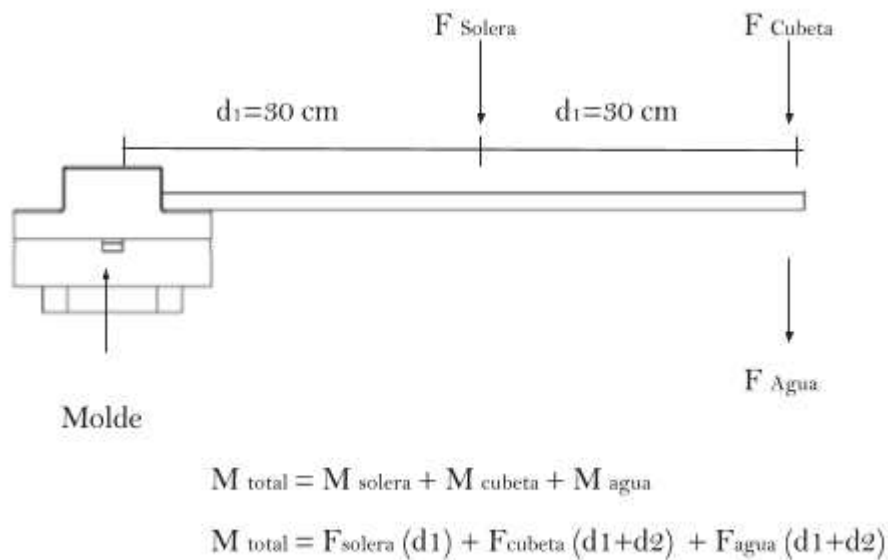


Figura 56 Diagrama de cuerpo libre planteado

	Cálculos para molde sin post proceso	Cálculos para molde con post proceso
Litros de agua utilizados	2.4 [L]	0.8 [Lt]
Masa de agua	2.4 [Kg]	0.8 [Kg]
Peso del agua	23.544 [N]	7.848 [N]
Masa de la cubeta	1.36 [Kg]	1.36 [Kg]
Peso de la cubeta	13.3416 [N]	13.3416 [N]
Masa de la cubeta	0.325 [Kg]	0.325 [Kg]
Peso de la solera	13.34 [N]	13.34 [N]
Momento total	26.133 [N m]	16.715 [N m]

Tabla 13 Resultados obtenidos a partir del experimento

5.3.2 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en el experimento y expuestos en la Tabla 13, indican que el molde sin tratamiento superficial se abrió con un par de fuerza de 26.133 [N m], mientras que el molde con post proceso superficial, fue abierto con 16.715 [N m], esto refleja que se ocupa mayor par de fuerza para abrir un molde con mayor rugosidad que uno que es tratado mediante algún post proceso, ya que existe una diferencia de 10 [N m] entre dichos moldes.

6 Conclusiones

En el presente trabajo se utilizó la tecnología de acabado en masa por tambor vibratorio para el tratamiento de componentes construidos por Manufactura Aditiva, con el fin de explorar el desgaste producido en piezas, particularmente construidas con policarbonato. Adicional a esto, se ocupó el acabado en masa para mejorar la superficie en moldes con los cuales se fabrican implantes craneofaciales personalizados de PMMA, y se comprobó si este tratamiento tenía relación con la dificultad de abrir el molde, problema que se tiene cuando se fabrican implantes con esta material biocompatible y moldes de policarbonato.

En la sección 3 se realizó una recopilación de investigaciones y trabajos relacionados con el acabado superficial utilizados en elementos construidos por FDM. En la actualidad son utilizados tres posts procesos: maquinado CNC, métodos químicos y acabado en masa; el maquinado CNC mejora la rugosidad de la superficie, sin embargo, está limitado por el tamaño de la herramienta de corte la cual no puede llegar a geometrías como cavidades y barreno, así mismo, la pieza necesita anclarse a una base, lo cual reduce la libertad de trabajo. En el caso de los métodos químicos, estos disminuyen la rugosidad, pero se afectan las propiedades mecánicas del elemento tratado. Finalmente, el acabado en masa puede ser utilizado en una amplia gama de materiales y su limitante geométrica se asocia a las características de la media utilizada. En el caso de la tecnología utilizada en este trabajo (acabado vibratorio) esta se ocupa en la industria desde los años cincuenta en componentes metálicos, no obstante, existe poca información que describe los fundamentos y mecánica de remoción de la pieza, la mayor parte de esta información disponible se ha desarrollado a partir de hallazgos empíricos y la media que se utiliza no está estandarizada.

Por tal motivo, se presentan en la sección 4 una serie de experimentos para conocer el impacto del acabado en masa en los filamentos externos de policarbonato de MA. Para esto, en la Sección 4.1, se fabricaron cilindros con distintos parámetros de construcción, con el objetivo de inspeccionar el daño causado por el post proceso más allá de los filamentos externos de la construcción, después de 16 horas de ser tratados. La tomografía computarizada mostró que ningún filamento externo es dañado, sin importar la cantidad con los que la pieza sea configurada.

En la sección 4.2 se cuantifica la reducción de la rugosidad de la superficie a través del tiempo, por medio de un rugosímetro en componentes de policarbonato comparados contra componentes de polimetilmetacrilato en distintos intervalos de trabajo. Los resultados de las Figuras 65,66 y 67 muestran que el policarbonato tarda más en disminuir su rugosidad que el PMMA, este último reduce su rugosidad en un 50% desde la primera hora de trabajo, mientras que el PC necesita de cuatro horas de trabajo para lograr este mismo porcentaje.

Para el último experimento del capítulo 4, se diseñó un molde para medir el par de fuerzas necesario para abrir un molde de PC para la fabricación de piezas de PMMA. Dicho molde, permitió evaluar la fuerza necesaria para ser abierto mediante una palanca, el experimento consistió en llevar a cabo una polimerización en un molde sin ser post procesado y el otro con 16 horas de trabajo. El experimento indicó que se requiere mayor par de fuerza ($26.133[\text{N m}]$) para abrir el molde sin tratamiento superficial

comparado contra 16.715 [N m] del molde con tratamiento, lo cual hace que se facilite la apertura del molde.

A distintas rugosidades iniciales, 13.278 [μm] para el PMMA y 19.048 [μm] para el PC, estos materiales reducen su rugosidad después de 960 minutos de trabajo a 1.759 [μm] y 1.497 [μm] respectivamente. Con base en los experimentos de la sección 4.2 y 4.3, se concluye que es necesario que el molde de PC sea tratado previamente a la polimerización para que el desmoldeo sea más fácil, con la intención de aprovechar que la rugosidad de las piezas fabricadas a partir de los moldes de PC es menor, obteniendo un implante final de PMMA más suave, sin necesidad de tratarlo.

7 Referencias

- [1] B. P. Conner *et al.*, “Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services,” *Additive Manufacturing*, vol. 1–4, pp. 64–76, Oct. 2014.
- [2] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, Jul. 2015.
- [3] C.-E. Homero, “Manufactura aditiva como una herramienta para el desarrollo de moldes para PMMA,” (*Tesis de licenciatura*), 2014.
- [4] C. Cozmei and F. Caloian, “Additive Manufacturing Flickering at the Beginning of Existence,” *Procedia Economics and Finance*, vol. 3, pp. 457–462, Jan. 2012.
- [5] I. Gibson, “Additive Manufacturing Technologies.” 2010.
- [6] W. Gao *et al.*, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *Comput. Aided Des. Appl.*, vol. 69, pp. 65–89, Dec. 2015.
- [7] M. K. Thompson, “Design for additive manufacturing trends, opportunities, considerations and constraints.” 2016.
- [8] C. Comotti, D. Regazzoni, C. Rizzi, and A. Vitali, “Additive Manufacturing to Advance Functional Design: An Application in the Medical Field,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 3, p. 031006, Sep. 2017.
- [9] P. M. Pandey, N. V. Reddy, and S. G. Dhande, “Real time adaptive slicing for fused deposition modelling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 1, pp. 61–71, 2003.
- [10] Cotteler, “The 3D opportunity primer, the basics of additive manufacturing_Deloitte.pdf.”
- [11] B. N. Turner and S. A. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 250–261, 2015.
- [12] A. Ortega, “Investigación de las capacidades de la tecnología de Manufactura Aditiva FDM,” *Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2014.
- [13] Wohlers, “Wohlers report.” 2012.
- [14] M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, and S. Yang, “Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 8, no. 1, pp. 19–50, 2013.
- [15] “Hybrid Manufacturing Technologies.” [Online]. Available: <http://www.hybridmanutech.com/hybrid-manufacturing.html>.
- [16] A. Gebhardt, “Understanding additive manufacturing,” *Hanser Publications*, 2011.
- [17] L. Ruiz-Huerta, Y. C. Almanza-Arjona, A. Caballero-Ruiz, H. A. Castro-Espinosa, C. M. Díaz-Aguirre, and E. E. y Pérez, “CAD and AM-fabricated moulds for fast cranio-maxillofacial implants manufacture,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 31–39, 2016.
- [18] M. Salmi, K.-S. Paloheimo, J. Tuomi, J. Wolff, and A. Mäkitie, “Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing),” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, vol. 41, no. 7, pp. 603–609, Oct. 2013.
- [19] B. Lethaus, L. Poort, R. Böckmann, R. Smeets, R. Tolba, and P. Kessler, “Additive manufacturing for microvascular reconstruction of the mandible in 20 patients,” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, vol. 40, no. 1, pp. 43–46, Jan. 2012.
- [20] C. P. Monés, “Plantillas con tecnología 3D,” *Centre Podologic*. [Online]. Available: <https://www.podologosbarcelona.es/plantillas-3d.htm>. [Accessed: 14-Nov-2017].
- [21] R. Ilagan, S. Rapoport, B. Shepherd, and S. Presnell, “Tissue Engineering through Additive Manufacturing,” in *Kidney Development, Disease, Repair and Regeneration*, Elsevier, 2016, pp. 555–568.
- [22] S. V. Murphy and A. Atala, “3D bioprinting of tissues and organs,” *Nat. Biotechnol.*, vol. 32, no. 8, pp. 773–785, Aug. 2014.

- [23] A. L. Jardini *et al.*, “Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing,” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, vol. 42, no. 8, pp. 1877–1884, Dec. 2014.
- [24] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, “Material issues in additive manufacturing: A review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 185–200, 2017/1.
- [25] I. Drstvensek *et al.*, “Applications of rapid prototyping in cranio-maxillofacial surgery procedures,” *Int J Biol Biomed Eng*, vol. 1, pp. 29–38, 2008.
- [26] U. Spetzger, V. Vougioukas, and J. Schipper, “Materials and techniques for osseous skull reconstruction,” *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 110–121, Apr. 2010.
- [27] H. Rotaru *et al.*, “Cranioplasty with custom-made implants: analyzing the cases of 10 patients,” *J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 70, no. 2, pp. e169–76, Feb. 2012.
- [28] A. J. Nazimi, M. Md Yusoff, R. Nordin, and S. Nabil, “Use of polyetheretherketone (PEEK) in orbital floor fracture reconstruction – A case for concern,” *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology*, vol. 27, no. 4, pp. 536–539, 2015/7.
- [29] M. M. Kim, K. D. O. Boahene, and P. J. Byrne, “Use of customized polyetheretherketone (PEEK) implants in the reconstruction of complex maxillofacial defects,” *Arch. Facial Plast. Surg.*, vol. 11, no. 1, pp. 53–57, Jan. 2009.
- [30] A. Thien, N. K. K. King, B. T. Ang, E. Wang, and I. Ng, “Comparison of polyetheretherketone and titanium cranioplasty after decompressive craniectomy,” *World Neurosurg.*, vol. 83, no. 2, pp. 176–180, Feb. 2015.
- [31] A. Schwitalla and W.-D. Müller, “PEEK dental implants: a review of the literature,” *J. Oral Implantol.*, vol. 39, no. 6, pp. 743–749, Dec. 2013.
- [32] A. L. Jardini *et al.*, “Improvement in Cranioplasty: Advanced Prosthesis Biomanufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 49, pp. 203–208, 2016.
- [33] G. Staffa *et al.*, “Custom made bioceramic implants in complex and large cranial reconstruction: a two-year follow-up,” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, vol. 40, no. 3, pp. e65–70, Apr. 2012.
- [34] C. D. C. M. D. Aguirre, C. D. E. B. M. Sánchez, and C. D. V. Calcáneo, “Diferentes aplicaciones de los implantes aloplásticos elaborados en metilmetacrilato y silicón,” *Cirugía Plástica*, vol. 19, no. 1–3, pp. 51–56, 2009.
- [35] D. Espalin, K. Arcaute, and D. Rodriguez, “Fused deposition modeling of patient-specific polymethylmethacrylate implants,” *Rapid Prototyping*, 2010.
- [36] I. Yoda *et al.*, “Effect of surface roughness of biomaterials on Staphylococcus epidermidis adhesion,” *BMC Microbiol.*, vol. 14, p. 234, Sep. 2014.
- [37] M. Katsikogianni and Y. F. Missirlis, “Concise review of mechanisms of bacterial adhesion to biomaterials and of techniques used in estimating bacteria-material interactions,” *Eur. Cell. Mater.*, vol. 8, pp. 37–57, Dec. 2004.
- [38] C. B. Phillips *et al.*, “Incidence rates of dislocation, pulmonary embolism, and deep infection during the first six months after elective total hip replacement,” *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 85-A, no. 1, pp. 20–26, Jan. 2003.
- [39] A. B. Wymenga, J. R. van Horn, A. Theeuwes, H. L. Tmuytjens, and T. J. Slooff, “Perioperative factors associated with septic arthritis after arthroplasty: Prospective multicenter study of 362 knee and 2 651 hip operations,” *Acta Orthop. Scand.*, vol. 63, no. 6, pp. 665–671, 1992.
- [40] F. Götz, “Staphylococcus and biofilms,” *Mol. Microbiol.*, vol. 43, no. 6, pp. 1367–1378, Mar. 2002.
- [41] R. L. Taylor, J. Verran, G. C. Lees, and A. J. Ward, “The influence of substratum topography on bacterial adhesion to polymethyl methacrylate,” *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 9, no. 1, pp. 17–22, Jan. 1998.
- [42] N. P. Boks, H. J. Busscher, H. C. van der Mei, and W. Norde, “Bond-strengthening in staphylococcal adhesion to hydrophilic and hydrophobic surfaces using atomic force microscopy,” *Langmuir*, vol. 24, no. 22, pp. 12990–12994, Nov. 2008.
- [43] P. Tang *et al.*, “Effect of Superhydrophobic Surface of Titanium on Staphylococcus Aureus Adhesion,” *J. Nanomater.*, vol. 2011, pp. 2:1–2:8, Jan. 2011.

- [44] T. R. Scheuerman, A. K. Camper, and M. A. Hamilton, "Effects of Substratum Topography on Bacterial Adhesion," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 208, no. 1, pp. 23–33, Dec. 1998.
- [45] C. M. L. Bollenl, P. Lambrechts, and M. Quirynen, "Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: A review of the literature," *Dent. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 258–269, Jul. 1997.
- [46] A. Bonyár, H. Sántha, M. Varga, B. Ring, A. Vitéz, and G. Harsányi, "Characterization of rapid PDMS casting technique utilizing molding forms fabricated by 3D rapid prototyping technology (RPT)," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 7, no. 2, pp. 189–196, Nov. 2012.
- [47] A. Boschetto and L. Bottini, "Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 686–696, 2015.
- [48] N. Benhnam, "Surface roughness estimation for FDM systems," Master of Applied Science, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada 2011.
- [49] R. Singh, S. Singh, I. P. Singh, F. Fabbrocino, and F. Fraternali, "Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process," *Composites Part B*, vol. 111, pp. 228–234, Feb. 2017.
- [50] B. Vasudevarao, D. P. Natarajan, M. Henderson, and A. Razdan, "SENSITIVITY OF RP SURFACE FINISH TO PROCESS PARAMETER VARIATION."
- [51] D. Ahn, J.-H. Kweon, S. Kwon, J. Song, and S. Lee, "Representation of surface roughness in fused deposition modeling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 15–16, pp. 5593–5600, Aug. 2009.
- [52] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 3–4, pp. 593–606, 2007/3.
- [53] L. M. Galantucci, F. Lavecchia, and G. Percoco, "Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 189–192, 2009.
- [54] A. Armillotta, "Assessment of surface quality on textured FDM prototypes," *Rapid Prototyping Journal*, Apr. 2013.
- [55] P.-T. Lan, S.-Y. Chou, L.-L. Chen, and D. Gemmill, "Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus," *Comput. Aided Des. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 53–62, 1997/1.
- [56] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, and N. Venkata Reddy, "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 6, pp. 585–594, 2004/5.
- [57] P. Alexander, S. Allen, and D. Dutta, "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing," *Comput. Aided Des. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 343–356, 1998/4.
- [58] K. Mani, P. Kulkarni, and D. Dutta, "Region-based adaptive slicing," *Comput. Aided Des. Appl.*, vol. 31, no. 5, pp. 317–333, Apr. 1999.
- [59] Y. Y. Chiu, Y. S. Liao, and S. C. Lee, "Slicing strategies to obtain accuracy of feature relation in rapidly prototyped parts," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 7–8, pp. 797–806, 2004/6.
- [60] M. Kumar and A. Roy Choudhury, "Adaptive slicing with cubic patch approximation," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 224–232, 2002.
- [61] J. G. Zhou, D. Herscovici, and C. C. Chen, "Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 3, pp. 363–379, 2000/2.
- [62] "Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling_Pandey_2002.pdf" .
- [63] "Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling_ Galantucci_2010.pdf" .
- [64] L. Gillespie, *Mass finishing handbook*. Industrial Press, 2006.
- [65] S. Wang, R. S. Timsit, and J. K. Spelt, "Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum," *Wear*, vol. 243, no. 1–2, pp. 147–156, Aug. 2000.
- [66] M. Chiancola, "Choosing the right media to meet mass finishing goals," *Met. Finish.*, vol.

93, no. 12, pp. 37–39, 1995.

[67] J. Domblesky, V. Cariapa, and R. Evans, “Investigation of vibratory bowl finishing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 41, no. 16, pp. 3943–3953, Jan. 2003.

[68] A. Mohajerani and J. K. Spelt, “Numerical modeling of the edge rounding of brittle materials by vibratory finishing,” *Wear*, vol. 268, no. 7–8, pp. 1002–1012, Mar. 2010.

[69] P. K. Prakasam, “Experimental investigation of surface modification mechanism in vibratory finishing process,” 2015.

[70] L. R. K. Gillespie, “A quantitative approach to vibratory deburring effectiveness,” *SME Tech. Report.*, 1975.

[71] A. Sofronas and S. Taraman, “Model development and optimization of vibratory finishing process,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 23–31, Jan. 1979.

[72] F. Hashimoto and D. B. DeBra, “Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 303–306, Jan. 1996.

[73] A. Yabuki, M. R. Baghbanan, and J. K. Spelt, “Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher,” *Wear*, vol. 252, no. 7–8, pp. 635–643, 2002/4.

[74] L. Ruiz-Huerta, A. Hernández-Contrera, and A. Caballero-Ruiz, “Computed tomography aided porosity comparison between ABS Filaments and FDM Manufactured Pieces,” *ASPE 2017*, 2016.

[75] “Medición de la rugosidad superficial,” *Escuela técnica superior de Ingeniería, Bilbao*.

[Online]. Available: http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/745_ca.pdf. [Accessed: 16-Nov-2017].

[76] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman, “Roughness parameters,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 123, no. 1, pp. 133–145, Apr. 2002.

[77] Y. C. Almanza-Arjona, H. A. Castro-Espinosa, L. Ruiz-Huerta, and A. Caballero-Ruiz, “Instrumentación para la medición de la temperatura de polimerización del PMMA en moldes de PC para implantes Craneofaciales,” *SOMI Congreso de Instrumentación*, 2014.

[78] L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, A. Cecilia-Almanza, and H. Castro-Espinosa, “Informe técnico ‘Optimización de manufactura de implantes craneofaciales de polimetilmetacrilato PMMA,’” *Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico*.

