

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO
EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO Y
SU APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE REPUESTOS
PARA LA INDUSTRIA DE CONFECCIONES**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el
bachiller:**

LUIS GREGORI BASTIDAS ESPINOZA

ASESOR: Mg. Víctor Girón Medina

Lima, Junio del 2016

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la utilización de la técnica de prototipado rápido en uno de los procesos de la fundición por revestimiento y su aplicación en la fabricación de repuestos para la industria de confecciones.

En primer lugar se procedió a investigar acerca de las tecnologías existentes del prototipado rápido. Luego se averiguo las tecnologías de impresión en la PUCP, las cuales son las siguiente: modelado por deposición fundida (FDM sus siglas en inglés) empleada en una máquina Fortus 400mc y la tecnología polyjet empleado en una máquina Objet 30pro. De ambas tecnologías se seleccionó la más adecuada para la elaboración de modelos y moldes. Después se realizó un cuadro comparativo de las características físicas, operaciones y materiales empleados, concluyendo que la mejor tecnología para la fundición por revestimiento es la Polyjet,

Para desarrollar del proceso de fundición se seleccionó, como caso práctico, un pie prensa tela perteneciente a una máquina textil de costura recta. La tecnología seleccionada, se utilizó para la elaboración de moldes para el inyectado de cera y luego emplearlo en el proceso de fundición por revestimiento. También, se elaboró una metodología, en el cual se detallan los parámetros y secuencia de pasos que se deben realizar para su fabricación.

El diseño del molde para inyectado de cera se elaboró en un software CAD considerando las formas constructivas como gradiente de desmoldeo, pliegues y canto, espesor de pared y material empleado. Además, según Krekeler durante el proceso de fundición por revestimiento existe una contracción del 2.5% [1], lo cual se tuvo en cuenta al momento de diseñar el molde. Para el proceso de inyectado se selecciona la cera Kerr flex plast blue, ya que posee buen control dimensional, rigidez, dureza en estado sólido y es accesible en el mercado. Luego, continua el proceso de fundición, en este caso se empleó una máquina de centrifugado para aumentar la presión en el vaciado del metal fundido al molde refractario.

Como resultado se obtuvo el pie prensa tela a base de bronce, siguiendo la metodología planteada, con una contracción dimensional de 2.6% que comprende la variación de medida del molde en el software CAD hasta la medida de la pieza fundida final. Además, el molde impreso con tecnología polyjet funcionó adecuadamente durante el inyectado, ya que la pieza en cera presento buena calidad de detalle, manipulación y fácil desmoldeo.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO Y SU APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE REPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DE CONFECCIONES.

ÁREA : Producción ± 50

PROPUESTO POR : Ing. Víctor Girón Medina

ASESOR : Ing. Víctor Girón Medina

TESISISTA : Luis Gregori Bastidas Espinoza

CÓDIGO : 20084728

FECHA : 22 de mayo del 2015


DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En la PUCP se dispone de máquinas de prototipado rápido, laboratorio de fundición, máquina de medición por coordenadas, centro de mecanizado. Es posible aplicar estas facilidades en el campo de la fundición de tal manera de lograr caminos alternativos que permitan fabricar piezas que en el país son, tradicionalmente, importados. Ya que, resultan ser muy costosas de producir cuando los lotes requeridos son pequeños, a manera de ejemplo se puede mencionar el caso de repuestos para la industria de confecciones cuya forma compleja amerita el uso de la fundición, en especial, la fundición por revestimiento.

Se encarga la labor de resumir las posibles aplicaciones de la técnica de prototipado en el campo de la fundición, enfatizando el caso de fundición por revestimiento. Luego, plantear una metodología para la producción de un repuesto de la industria textil por medio del proceso de fundición por revestimiento, aplicando la técnica de prototipado rápido en el proceso.






PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO EN EL PROCESO DE
FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO Y SU APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE
REPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DE CONFECCIONES.

Introducción

1. Estado del arte del prototipado rápido y su uso en la fundición de metales.
2. Fundición por revestimiento, formas constructivas en la fundición por revestimiento.
3. Desarrollo de una metodología que combina la técnica de fundición por revestimiento con el uso de prototipado rápido.
4. Aplicación de la metodología propuesta al proceso de fabricación de un repuesto para la industria de confecciones, realizable en los laboratorios de la PUCP.

Observaciones y Recomendaciones (opcional)

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Ing. Víctor Girón Medina
Asesor



DEDICATORIA



A dios por brindarme la oportunidad de estudiar y ser mi guía en todo momento.

A mis queridos padres por ser mi fortaleza y apoyo incondicional.

A mis tíos, abuelos y hermana por sus sabios consejos, apoyo y cariño.

A mis amigos por su comprensión y cariño.

ÍNDICE

Introducción	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	3
<u>Capítulo 1. Estado del arte del prototipado rápido y su uso en la fundición de metales</u>	4
1.1. Prototipado rápido	4
1.2. Tecnologías del prototipado rápido	7
1.2.1. Procesos por medio de base líquido	7
1.2.1.1. Estereolitografía.....	7
1.2.1.2. Polyjet.....	8
1.2.1.3. Modelado por deposición fundida.....	9
1.2.2. Procesos por medio de partículas discretas.....	10
1.2.2.1. Sinterización selectiva por láser	10
1.2.2.2. Función por haz de electrones	11
1.2.2.3. Impresión en tres dimensiones.....	12
1.2.3. Procesos por medio de láminas sólidas	13
1.3. Aplicaciones en la fundición.....	16
1.3.1. Fundición en área	16
1.3.1.1. Fundición en arena con ayuda de láminas sólidas	17
1.3.1.2. Fundición en arena con ayuda de Polyjet.....	18
1.3.1.3. Impresión en tres dimensiones utilizado en la fundición en arena	18
1.3.2. Fundición por revestimiento	19
1.3.2.1. Fundición por revestimiento con ayuda de FDM	20
1.3.2.2. Fundición por revestimiento con ayuda de Polyjet.....	20
1.3.2.3. Fundición por revestimiento con ayuda de Thermojet	21
1.3.2.4. Fundición por revestimiento con ayuda de impresión en tres dimensiones.....	21
1.3.2.5. Fundición por revestimiento con ayuda de sinterización selectiva por láser	22
1.4. Tecnologías existentes en la PUCP	22
1.4.1. Aplicaciones y comparaciones de las tecnologías existentes.....	24
1.4.2. Propiedades de los materiales de impresión	26
1.4.2.1. Materiales de trabajo en la Fortus 400mc	26

1.4.2.2. Materiales de trabajo en la Objet30 pro.....	27
---	----

Capítulo 2. Fundición por revestimiento, formas constructivas en la fundición por revestimiento.....28

2.1 Fundición por revestimiento o cera perdida	28
2.2 Prototipado rápido en la fundición por revestimiento.....	29
2.2.1. Prototipado rápido para la creación de modelos	30
2.2.1.1. Modelos de material termoplástico	30
2.2.1.2. Modelos en cera.....	31
2.2.2. Prototipado rápido para la creación de moldes	31
2.2.2.1. Moldes de acero.....	32
2.2.2.2. Moldes de material termoplástico.....	33
2.2.3. Beneficios	34
2.2.4. Criterios de selección de la técnica de prototipado rápido para la fundición por revestimiento	35
2.3. Problemas comunes en la fundición por revestimiento	37
2.4. Materiales empleados en la fundición por revestimiento	38
2.4.1. La cera.....	38
2.4.1.1. Tipos de cera	39
2.4.1.2. Selección de cera.....	40
2.4.2. Materiales refractarios.....	41
2.5. Formas constructivas en la fabricación de modelos para la fundición por revestimiento	45
2.5.1. Juntas de pared	46
2.5.2. Cambios de sección.....	47
2.5.3. Espesor mínimo de pared	48
2.5.4. Espesor máximo de pared	48
2.5.5. Radios	49
2.5.6. Planitud.....	49
2.5.7. Acabado superficial.....	50
2.6. Formas constructivas en la fabricación de moldes para la fundición por revestimiento	50
2.6.1. Selección de material para la elaboración de molde para inyectado	50
2.6.2. Pliegues y cantos.....	51
2.6.3. Gradiente de desmoldeo.....	51
2.6.4. Espesor de pared de los moldes.....	52

<u>Capítulo 3. Determinación de una metodología que combine la técnica de fundición por revestimiento con el uso de prototipado rápido</u>	53
3.1. Repuesto a producir	53
3.2. Metodología para el proceso de fabricación de pie prensa tela perteneciente a una máquina de costura recta industrial.....	56
3.2.1. Descripción del proceso de diseño e impresión de molde.....	56
3.2.2. Descripción del proceso de inyectado de cera	57
3.2.3. Descripción de proceso de fundición por revestimiento.....	58
<u>Capítulo 4. Aplicación de la metodología propuesta al proceso de fabricación de un repuesto para la industria de confecciones, realizable en los laboratorios de la PUCP</u>	62
4.1. Equipos e instrumentos a utilizar	62
4.2. Materiales empleados	63
4.3. Reproducción de pie prensa tela.....	67
4.4. Diseño e impresión de molde.....	70
4.5. Desarrollo de la fundición por revestimiento.....	71
4.5.1. Inyectado de cera	71
4.5.2. Armado de árbol de cera.....	73
4.5.3. Preparación del yeso Satín	74
4.5.4. Vaciado del yeso.....	76
4.5.5. Fundición del molde de cera	78
4.5.6. Fusión y colado de metal	79
4.6. Variaciones dimensionales obtenidas durante el proceso de fabricación del pie prensa tela.....	83
4.7. Implementación del proceso de fundición por revestimiento con ayuda del protoipado rápido en el laboratorio de manufactura de la sección de Ingeniería mecánica – PUCP.....	85
Conclusiones	87
Bibliografía.....	89
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Número	Descripción	Página
1.1	Resumen de las tecnologías en el prototipado rápido	15
1.2	Aplicaciones	24
1.3	Comparación técnica entre las tecnologías existentes en la PUCP	25
1.4	Propiedades de los materiales utilizados en la Fortus 400mc	26
2.1	Problemas comunes en los moldes de cera	37
2.2.	Propiedades de ceras comerciales	40
2.3	Grados de alúmina con mayor densidad, alta temperatura de sintonización y, relativamente, buen rendimiento mecánico	44
2.4	Contienen un mayor porcentaje de alúmina y son más económicos de producir	44
2.5	Propiedades mecánicas de los materiales refractarios	45
2.6	Relación de espesores mínimos para diferentes materiales	48
2.7	Desviación permisible con respecto al espesor de sección	49
2.8	Desviación permisible con respecto a la longitud de la sección	50
2.9	Acabados superficiales obtenidos después de la fundición	50
3.1	Resultados obtenidos del análisis químico al pie prensa tela	55
4.1	Especificaciones técnicas de la inyectora de cera	63
4.2	Tabla de selección de tecnología Polyjet y FDM	65
4.3	Parámetros para el inyectado de cera	71
4.4	Contracciones obtenidas durante el proceso de fabricación del pie prensa tela	84
4.5	Listado de equipos disponibles en la PUCP	85
4.6	Listado de equipos por implementar en la PUCP	86
4.7	Materiales y utensilios por implementar en la PUCP	86

INDICE DE FIGURAS

Número	Descripción	Página
1.1	Procesos involucrados en el prototipado rápido	4
1.2	Tecnologías de prototipado rápido por adición de materiales	6
1.3	Estereolitografía	7
1.4	Tecnología polyjet	8
1.5	Modelado por deposición fundida	9
1.6	Sinterización por láser	11
1.7	Máquina de fusión por haz de electrones	12
1.8	Impresión en tres dimensiones	13
1.9	Fabricación de objetos por laminado	14
1.10	Procesos implicados en la fundición por arena	16
1.11	Procesos de fundición en arena con ayuda de láminas sólidas	17
1.12	Procesos de fundición en arena con ayuda de polyjet	18
1.13	Molde impreso para fundición	19
1.14	Impresión en 3D en la fundición por revestimiento	19
1.15	Fundición por revestimiento utilizando FDM-ABS y producto final	20
1.16	Procesos de fundición por revestimiento con tecnología de impresión en tres dimensiones	21
1.17	Modelo desechable a base de Castforme	22
1.18	Fortus 400mc. Ubicado en la sección VEO de la PUCP	23
1.19	Objet30 Pro. Ubicado en la sección VEO de la PUCP	24
2.1	Secuencia de procesos durante la fundición por revestimiento	29
2.2	Pieza obtenida por impresión en ABS	30
2.3	Anillo obtenido por impresión en cera	31
2.4	Inyectado de cera en molde termoplástico	32
2.5	Molde para inyectado de suela de zapato obtenido por mecanizado	33
2.6	Moldes de material termoplástico ABS	33
2.7	Piezas impresas en cera	38
2.8	Problemas de solidificación en uniones de pared	46
2.9	Formas recomendadas de unión de paredes	47
2.10	Cambios de sección	47

2.11	Medidas en un cambio de sección	48
2.12	Medidas de radio en fundición del espesor	49
2.13	Consideraciones en el diseño de pliegues y cantos	51
2.14	Pendiente para diferentes profundidades de molde	52
3.1	Máquina de costura recta industrial	53
3.2	Pie prensa tela	54
3.3	Zona de desgaste	54
3.3	Máquina de análisis químico: BUNKER Q8 MAGELLAN	55
3.4	Proceso de análisis químico a la pieza inferior del pie prensa tela	55
3.5	Secuencia de procesos en la fundición por revestimiento	58
3.6	Procesos de calentamiento del molde de yeso	59
3.7	Diagrama de flujo de los procesos que intervienen en la fabricación del pie prensa tela	61
4.1	Prototipo impreso con la tecnología FDM, material ABS	64
4.2	Superficie rugosa, tecnología FDM	64
4.3	Prototipo impreso con tecnología Polyjet, material verowhite	65
4.4	Cera Kerr flex plast	66
4.5	Yeso Satín Cast 20	67
4.6	Pieza 1 superior	67
4.7	Pieza 2 inferior	68
4.8	Proyecto de perfiles	68
4.9	Cilindros macho y hembra para hallar el ajuste experimental	69
4.10	Modelos del pie prensa tela en Software CAD	70
4.11	Molde para inyectado de cera correspondiente a la pieza 1	70
4.12	Molde para inyectado de cera correspondiente a la pieza 2	70
4.13	Proceso de impresión de los moldes para la pieza 1 y 2	71
4.14	Inyectado de cera en el molde impreso con tecnología polyjet	72
4.15	Piezas de cera con problema de llenado incompleto	72
4.16	Proceso de armado de árbol de cera	73
4.17	Soldar el árbol de cera a la base cilíndrica	74

4.18	Relación de agua y revestimiento para la mezcla	75
4.19	Preparación de la mezcla de agua y revestimiento	75
4.20	Adición de alcohol al árbol de cera	76
4.21	Preparación del recipiente cilíndrico con el árbol de cera	76
4.22	Adición de alcohol al árbol de cera	77
4.23	Vertido de la mezcla agua-revestimiento al cilindro que contiene el árbol de cera	77
4.24	Ciclo de vibración y vacío	78
4.25	Molde de yeso en el horno para fundir y evacuar la cera	78
4.26	Elevar la temperatura a 700°C del molde de yeso	79
4.27	Máquina de centrifugado	79
4.28	Fundición de bronce	80
4.29	Inicio del vertido del metal fundido	80
4.30	Extracción del molde de yeso de la maquina centrifuga	81
4.31	Sumergir el molde de yeso en un balde con agua	81
4.32	Limpieza de la superficie de la pieza fundida	82
4.33	Pieza fundida final, sin acabado	82
4.34	Pulido y niquelado, pieza 1	83
4.35	Pulido y niquelado, pieza 2	83

INTRODUCCIÓN

Años atrás, la fabricación de moldes y modelos era una tarea de gran complejidad realizada por personas especializadas en ese rubro. La fabricación de prototipos tiene una secuencia de procesos de manufactura, operaciones de máquinas y herramienta, lo cual tiene una demanda de tiempo y costos elevados. Estos eran realizados por modeleros expertos a quienes demandaba semanas o meses con la restricción de realizar pruebas de funcionalidad del producto final; por tanto, tenían una baja probabilidad de obtener un producto de buena calidad a bajo costo.

Sin embargo, con los avances tecnológicos y nuevas técnicas, aproximadamente, por los años 80 se desarrolla la técnica del prototipado rápido llamada estereolitografía e inicia la comercialización de sus primeras máquinas. Hoy en día, existen más de 30 tecnologías y es un campo que está siendo explorado por sus beneficios en la fabricación de piezas de forma compleja y rápida. Peter Hilton, presidente de Tecnología Consultoría Estratégica en Concord, MA, cree que "los costos de herramientas y tiempos de desarrollo pueden reducirse en un 75% o más [2].

La técnica de prototipado rápido, en el Perú, no es muy común así como sus beneficios. En la PUCP existe una sección de impresión 3D, en el cual desarrollan trabajos de investigación. Por tal motivo, se pretende identificar la tecnología más viable, existente en la PUCP, para utilizarlo como ayuda rápida en la fundición de metales. A partir de esta selección se utilizará la fundición por revestimiento para obtener piezas de máquinas de la industria textil. Como ejemplo aplicativo se fabricará pie prensa tela perteneciente a una máquina textil de costura recta industrial. Con esto se demostrará la aplicación de esta técnica para la producción de repuestos pequeños, cuya formas complejas demanda de tiempos y costos elevados para su fabricación por métodos convencionales.

Objetivo General

- Evaluar las posibles aplicaciones del prototipado rápido en la fundición de metales con la tecnología existente en la PUCP y plantear una metodología para la fabricación de un repuesto de la industria de confección utilizando la técnica de prototipado, como ayuda rápida, en unos de los procesos de la fundición por revestimiento.

Objetivos Específicos

- Resumir las diversas tecnologías en el prototipado rápido.
- Identificar las tecnologías aplicables en el campo de la fundición.
- Identificar, en la PUCP, las máquinas y su tecnología de prototipado rápido.
- Seleccionar el o los materiales de impresión que mejor se ajusten para su uso en la fundición de metales.
- Describir los posibles procesos de fundición en los que se puede utilizar prototipo impreso.
- Seleccionar la impresora 3D que proporcione mejores beneficios para obtener el prototipo y que este se pueda utilizar en la fundición por revestimiento.
- Seleccionar el material de impresión de la pieza acorde a la tecnología, previamente, seleccionada.
- Determinar los parámetros de diseño y los materiales que se utilizaran durante todo el proceso para la obtención del producto final.
- Identificar las variaciones de contracción entre el modelo inicial y el producto final a partir del experimento realizado en la universidad.

Hipótesis

Es posible utilizar la técnica del prototipado rápido, con tecnología existente en la universidad, como ayuda rápida en la fundición por revestimiento para la producción de repuestos de máquinas pertenecientes a la industria de confecciones y que su tamaño de lote justifique su fabricación.



CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE DEL PROTOTIPADO RÁPIDO Y SU USO EN LA FUNDICIÓN DE METALES.

1.1. Prototipado rápido

El prototipado rápido o también llamado impresión 3D es un conjunto de tecnologías que contribuyen a la fabricación y prueba de prototipos sin la planificación de procesos manufactura, selección de herramientas o accesorios.

Máquinas de prototipado rápido son dispositivos mecánicos utilizados para convertir, diseños generados por computadora, en prototipos físicos como por ejemplo: machos, moldes de inyección para plásticos, electrodos de erosión, piezas con calidad de producción en pequeña cantidad, etc [2]. Los pasos que se encuentran involucrados en estos procesos se muestran en la Figura 1.1.

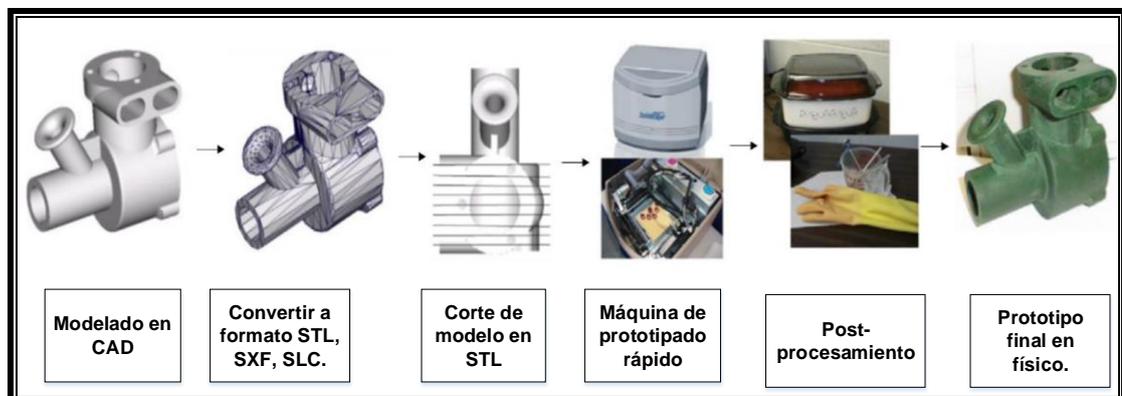


Figura 1.1 Procesos involucrados en el prototipado rápido. [3]

Hoy en día, existen varios tipos de máquina de prototipado rápido disponibles comercialmente capaces de fabricar objetos de buena resistencia mecánica; ya que, recientes innovaciones en esta tecnología como por ejemplo EBM (fusión por haz de electrones) permiten obtener modelos o moldes de metal cuya resistencia se puede comparar con una pieza de acero mecanizado u obtenido por fundición, lo cuales sirven como prototipos funcionales

El prototipado rápido tiene diversas tecnologías que se clasifican de acuerdo al esquema que se presenta en la Figura 1.2.



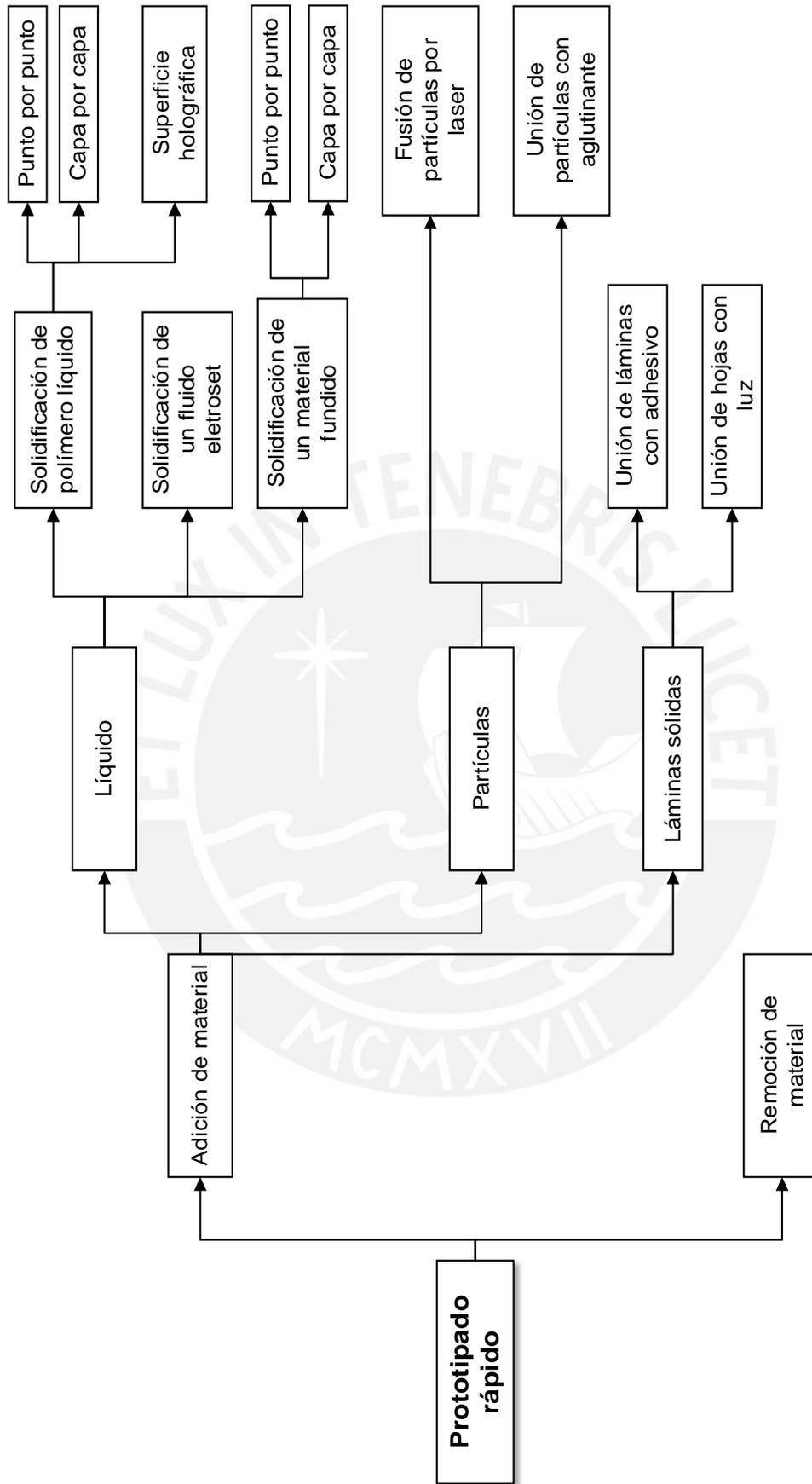


Figura 1.2. Tecnologías de prototipado rápido por adición de materiales. [4]

1.2. Tecnologías del prototipado rápido.

1.2.1. Procesos por medio de base líquido

1.2.1.1. Estereolitografía

Este proceso utiliza el principio de curación de un fotorpolímero líquido, el cual se solidifica cuando se expone a los rayos ultravioleta (UV). El haz de láser ayuda a curar el fotorpolímero proporcionando energía necesaria para la polimerización. La máquina que desarrolla este proceso, se muestra en la Figura 1.3., consiste en un cubo lleno de fotorpolímero líquido, una plataforma, que puede subir y bajar verticalmente, y un láser UV de helio-cadmio o de ion argón.

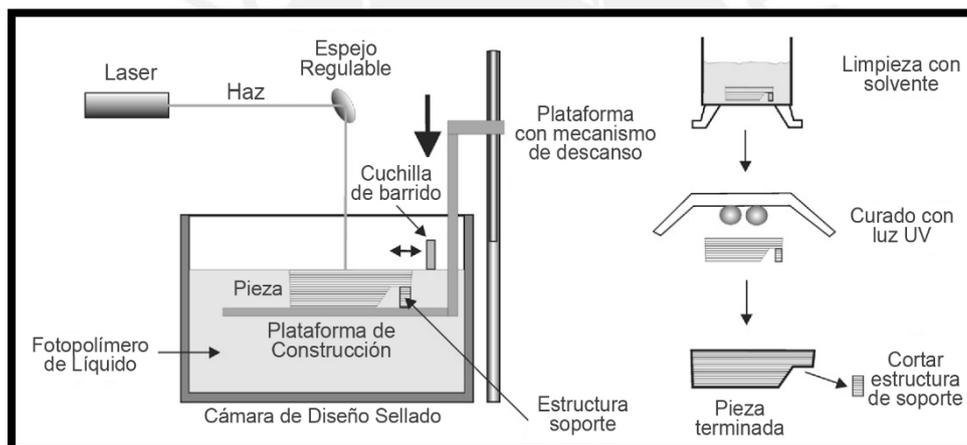


Figura 1.3. Estereolitografía. [5]

Teniendo el diseño del modelo en un software CAD, se envía la información para que se imprima. Su funcionamiento consiste en que el láser se mueva sobre el plano X-Y y proyecte la primera capa sobre el fotorpolímero líquido. Después de que se escaneo la primera capa, el haz de luz cura la parte proyectada de un cuerpo sólido delgado de fotorpolímero. Finalmente, la plataforma desciende lo suficiente para cubrir el polímero sólido con una capa de polímero líquido y así continuamente hasta terminar con el diseño del modelo.

Los aspectos de diseño por considerar en esta tecnología son los siguientes: [5]

- Se puede realizar piezas de formas complejas creados en CAD.

- Se debe otorgar una buena posición de impresión de la pieza con el fin de reducir la cantidad de apoyo y por ende el uso de material en la impresión.
- Se llega a obtener una resistencia a la tracción de hasta 75 MPa, dependiendo del material utilizado.
- Opción de aumentar el espesor de la capa en algunas zonas de la pieza para obtener mejor resistencia.
- Permite utilizar procesos como un post mecanizado para generar roscas.

1.2.1.2. Polyjet

Este proceso se muestra en la Figura 1.4, y se puede comparar con el de inyección de tinta, en el cual los cabezales expulsan el fotopolímero en la zona de trabajo y con la ayuda de unas bombillas ultravioleta, curan y endurecen, rápidamente, capa por capa. Al finalizar el trabajo, se obtiene una pieza con superficie lisa cuyas capas pequeñas logran medir 16µm como mínimo [6].

Los materiales utilizados son dos, el primero es con el que se realiza un diseño rápido del molde, mientras que el segundo material es un soporte soluble el cual se utiliza como andamiaje o soporte haciendo posible realizar geometrías y cavidades complejas. Las ventajas con las que cuenta es que minimiza la limpieza de partes, evita tener una larga duración de curado, grosores más pequeños, lo cual permite mejores acabados.

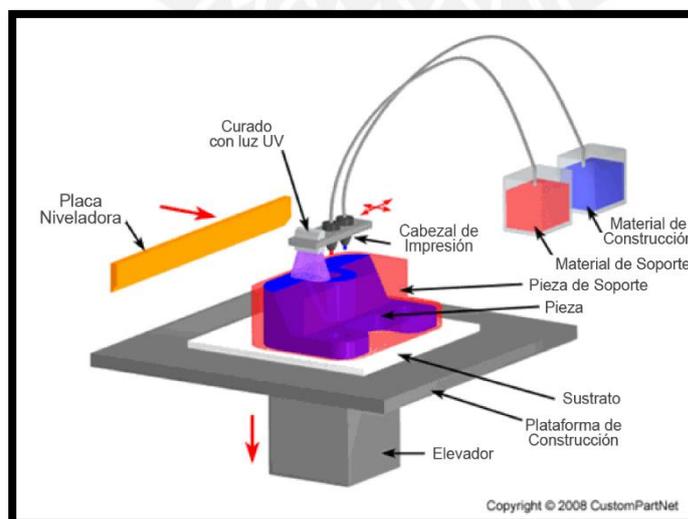


Figura1.4. Tecnología Polyjet. [7]

- Las estructuras de soporte deben ser diseñados y fabricados.
- Los apoyos pueden tomar la forma de cajas o techo.
- Se debe otorgar una buena posición de impresión de la pieza con el fin de reducir la cantidad de apoyo estructuras y por ende el uso de material en la impresión.
- Más adecuado para pequeñas cantidades, componentes de la sección media.
- Es difícil construir secciones de pared delgada, ángulos agudos o bordes afilados en el plano vertical debido a presión de contacto con el material extruido de la boquilla.
- Se puede producir estructuras internas en la parte interior para ahorrar peso / volumen, por ejemplo, una estructura reticular.
- Se requiere material de soporte soluble.
- Resistencia a la tracción es de aproximadamente dos tercios de la fuerza del mismo termoplástico que ha sido moldeada por inyección.
- Resistencia a la tracción para termoplásticos: ABS = 35 MPa, PC = 60 MPa.

1.2.2. Procesos por medio de partículas discretas

1.2.2.1. Sinterización selectiva por láser

Este proceso se puede apreciar en la Figura 1.6, y fue patentado por Carl Deckard en 1989 en la Universidad de Texas. Consiste en que una capa de polvo, cuyo tamaño está alrededor de las 50 micras, es repartida en una plataforma por medio de un rodillo y se calienta justo a una temperatura menor a la de fusión. Luego, por medio de un láser de dióxido de carbono se funde, de forma selectiva, las partículas de polvo de acuerdo al diseño generado en un programa CAD 3D. Finalizada la primera capa, la plataforma desciende (aproximadamente 0.10-0.15mm) y se extiende otra capa de polvo. Este proceso se repite continuamente hasta obtener el diseño en físico. Finalmente se remueve el polvo y se recicla.

Los materiales que se pueden utilizar en este proceso son los siguientes: [5]

- Polímeros: ABS, PVC, nylon, poliéster, poli estireno.
- Cera.
- Metales.(Se utiliza como aglutinante)
- Cerámica (Se utiliza como aglutinante)

Las consideraciones económicas son: [5]

- Utilización de materiales es alta.
- El material de polvo es reutilizable para otras impresiones.
- El coste del material en polvo es de bajo a moderado, dependiendo del tipo.
- Económico para producciones de 1-50, dependiendo del tamaño y complejidad.
- Viable para grandes volúmenes.

Los aspectos de diseño son: [5]

- Las piezas se pueden mecanizar mediante procesos convencionales.
- Se tiene una eficiencia de compactación de un 99%.
- La pieza acabada se puede pintar y recubrir su superficie para un mejor aspecto de diseño.
- Diámetro en polvo es por lo general entre 20 y 100 micras.

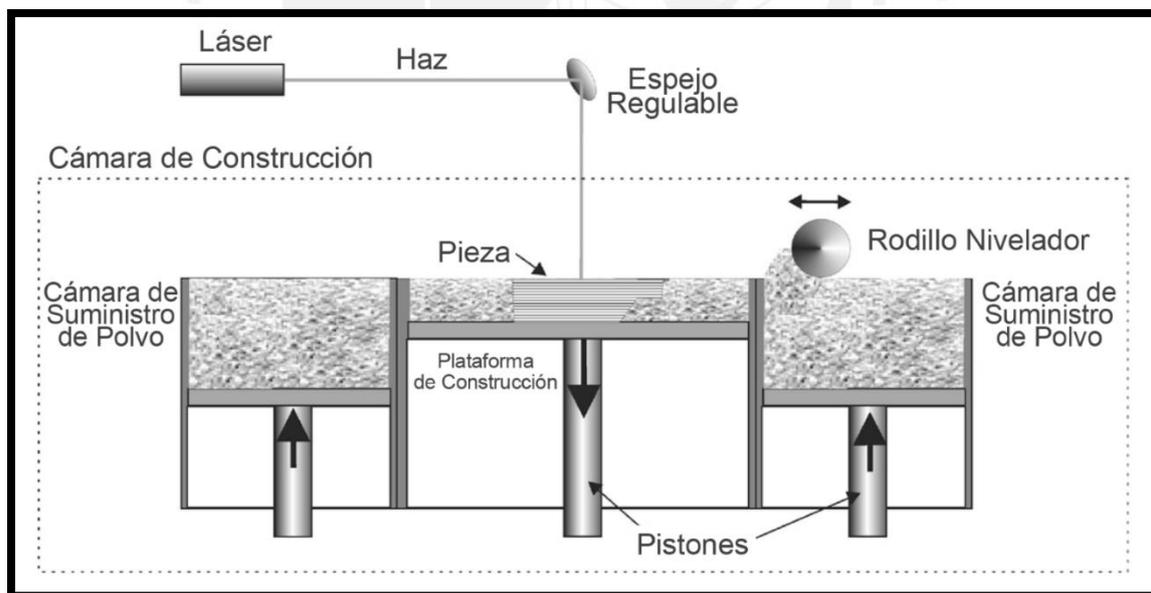


Figura1.6. Sintonización por láser. [5]

1.2.2.2. Fusión por haz de electrones

En este proceso se trabaja con metal en polvo. Este material se funde utilizando haz de electrones, el cual es dirigido por bobinas electromagnéticas proporcionando un rápido control para fundir capa por capa de materiales como el titanio, cromo, cobalto,

Este proceso permite utilizar materiales en polvo que, por lo general, son mezclas de polímeros y fibras. Una ventaja de esta máquina es la flexibilidad, permite agregar accesorios como cabezales para obtener una impresión a colores funcionando, similarmente, como una impresora de inyección de tinta. Sin embargo, las piezas que se obtiene por este medio, suelen ser porosas y no tienen mucha resistencia.

Las consideraciones económicas son [5]:

- El proceso es automatizado y flexible, pero requiere mano de obra calificada.
- Los materiales son de bajo costo.
- Utilización de materiales es alta.
- El exceso de material en polvo es reutilizable.
- Los costos del equipo son bajos.

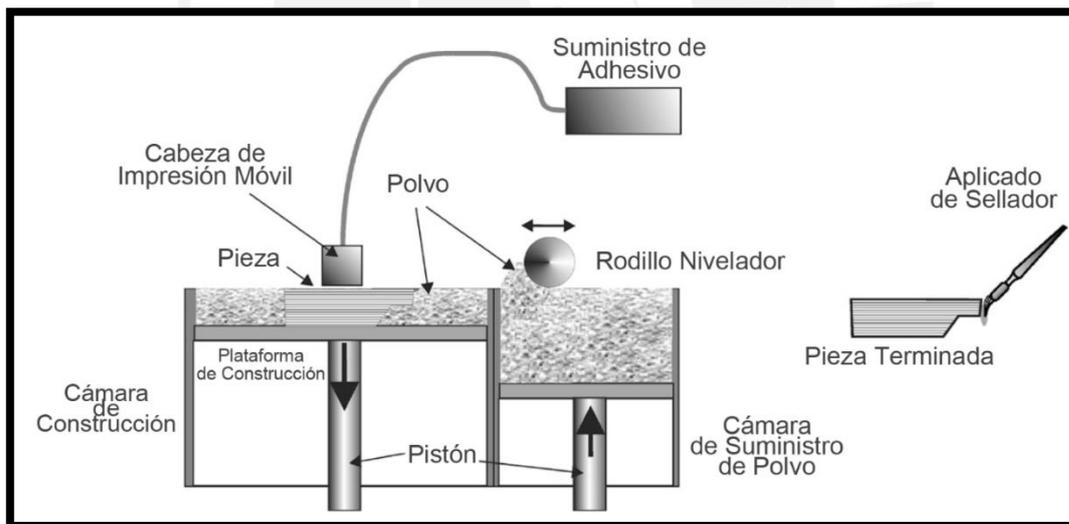


Figura1.8. Impresión en tres dimensiones. [5]

1.2.3. Proceso por medio de láminas sólidas

En este proceso se utiliza un rodillo para ejercer presión a la lámina revestida con un adhesivo. Esta lámina (termoplásticos, metal o cerámico) se corta por medio de un láser de CO₂, en una plano 2D, dirigido por espejos y cabezas ópticas. Al finalizar el proceso de corte de plano, la base desciende lo suficiente para aplicar la otra lámina y así hasta culminar el diseño en 3D (Figura1.9).

Las consideraciones económicas son: [5]

- Su velocidad puede variar dependiendo del tipo de material y la complejidad del diseño.
- El tiempo de entrega es menor a una semana.
- Costo de material, bajo.
- El consumo de material es de bajo a moderado.
- El material de desecho no es reutilizable.

Los aspectos de diseño son: [5]

- No es adecuado para procesos de mecanizado convencionales debido a la posibilidad de delaminación.
- Tiempo y costos de acabado puede ser de moderada a alta.

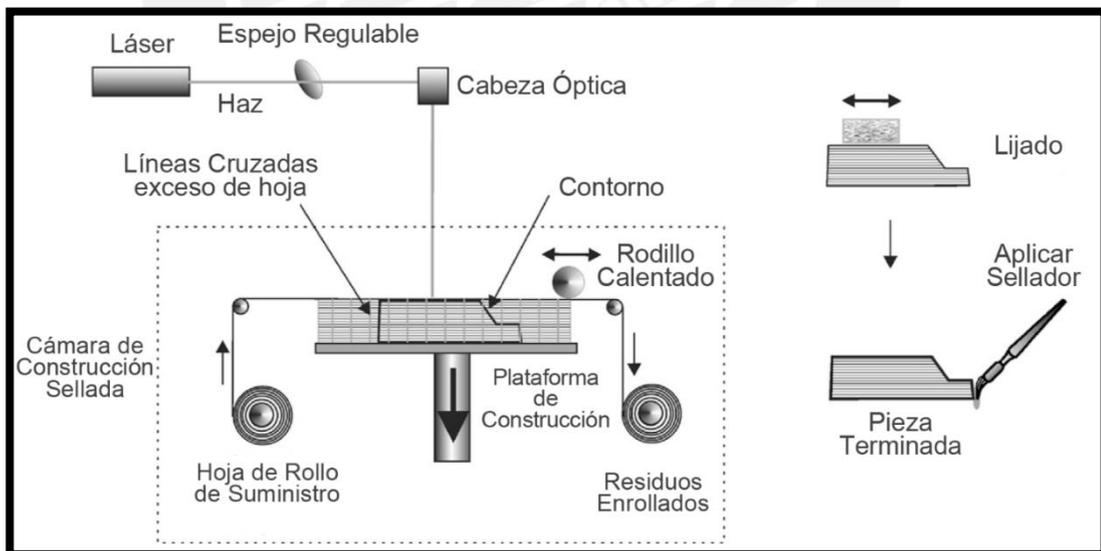


Figura1.9.Fabricación de objetos por laminado. [5]

Tabla 1.1 Resumen de las tecnologías en el prototipado rápido. [5, 9, 10]

Tecnología	Fase de alimentación	Técnica de creación de capa	Materiales	Dimensiones típicas (mm)	Precisión/Rugosidad	Aplicaciones
Esteriolitografía	Líquido	Curado de capa líquida	elastómeros, epoxi, uretano, acrílico, vinilo	600x500x500	Tolerancias: $\pm 0,1$ a $\pm 0,2$ mm. Rugosidad: 2 micras.	Prototipos no funcionales, modelos médicos, patrones de fundición.
Polyjet	Líquido	Curado de capa líquida	Fotopolímeros	500x400x200	Rugosidad: 16 μ m	Prototipos con buenos detalles, plantillas de montaje.
FDM	Líquido	Extrusión de plástico fundido	Bobinas de filamento: cera, elastómeros Cerámica como aglutinante, Material de apoyo: cera, nylon	600x600x500	Tolerancia: $\pm 0,1$ a 0,25 mm.,	Modelos funcionales para pruebas experimentales, patrones y núcleos para procesos de fundición, modelos médicos.
Sinterización por láser	Capa de polvo	Láser	Polvos termoplásticos fusibles al calor Metales en polvo como aglutinante: acero inoxidable, titanio, aceros aleados, tungsteno, aluminio, cerámica en polvo, arena de moldeo	450x375x325	Tolerancia: ± 0.05 a $\pm 0,25$ mm., rugosidad: 7.10 μ	Modelos funcionales para pruebas experimentales; patrones, moldes y machos para fundición y moldeo, suministro medico e implantantes dentales, sector aeroespacial.
Fusión por haz de electrones	Capa de polvo	Haz de electrones	Titanio, aleaciones de titanio, cobalto.	200x200x180		
Impresión en 3 dimensiones	Polvo	Aglutinante por goteo	Forma de polvo: acero inoxidable, bronce, cerámica, arena de molde, yeso. Aglutinante líquido: cera, resina, epoxi, poliuretano, elastómero.	600x500x400	Tolerancia: ± 0.1 a ± 0.5 mm., Rugosidad: 60 μ m	Modelos conceptos, modelos para fundición y moldeo, patrones y núcleos para fundición, modelos arquitectónicos, modelos para análisis de elementos finitos
Lámina Sólida	Láminas	Adhesivo sensible al calor	Hoja delgada de termoplásticos, lámina de metal y cerámica.	800x550x500	Tolerancias: $\pm 0,1$ a $\pm 0,25$ mm., Rugosidad: 30-40 μ	Grandes modelos concepto, prototipos no funcionales, modelo de herramienta, patrones de colado y núcleos.

1.3. Aplicaciones en la fundición

La técnica del prototipado rápido (RP siglas en inglés) se está desarrollando muy rápido debido a los beneficios que nos otorga en el campo de la ingeniería, medicina, diseño industrial, etc.

En nuestro caso se abordará, con mayor importancia, la utilización de esta técnica como ayuda rápida en el campo de la fundición de metales. Esta tecnología se puede emplear, principalmente, en la fundición por arena y fundición por revestimiento.

1.3.1. Fundición en arena

La técnica de prototipado rápido tiene gran participación en la fundición en arena para la fabricación de componentes. En este tipo de fundición el moldeo se realiza con arena verde, el cual es una mezcla de arena, arcilla, agua y otros materiales. Los procesos implicados en la fundición por arena se aprecian en el esquema de la Figura 1.10.

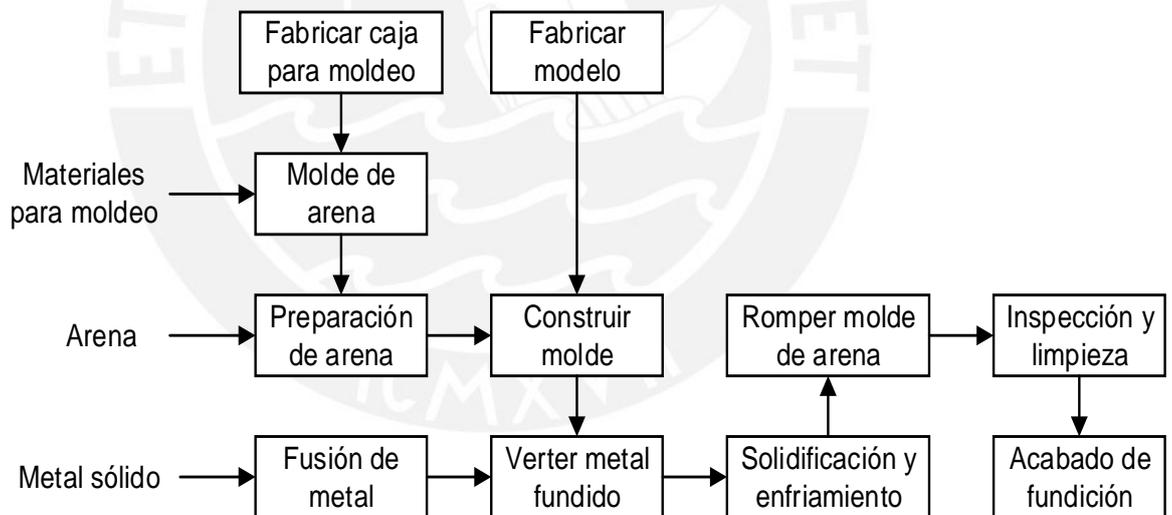


Figura1.10. Procesos implicados en la fundición por arena. [11]

Los principales pasos para la realización de una fundición por arena son los siguientes:

- Preparación del modelo patrón
- Apisonamiento de arena alrededor del modelo
- Sistema de llenado para la entrada del fluido
- Fabricación de machos y la configuración de núcleo en el molde
- Vertido del metal fundido por la cavidad de entrada.

Generalmente, para el desarrollo de este tipo de fundición se necesita de trabajadores calificados, ya que la fabricación de modelos y cajas necesitan ser elaborados con buena calidad y acorde al diseño establecido. Esto puede iniciar a partir de dibujos 2D o de modelos elaborados a mano a base de arcilla, madera, poliestireno expandido u otro material.

Por tal motivo, es así que durante el proceso de diseño del modelo o molde el prototipado rápido entra como una ayuda con tecnologías como láminas Solidas, Polyjet e impresión en tres dimensiones.

1.3.1.1. Fundición en arena con ayuda de Láminas Sólidas.

Esta técnica se utiliza en la fabricación de modelos tanto para la fundición por arena como para la fundición por revestimiento. Los resultados obtenidos bajo este sistema otorgan una calidad dentro del rango aceptable y, además, un 25% de ahorro en los costos [12].

Para realizar los modelos, que pueden ser de hojas de papel, plástico, material compuesto o metal, se deben considerar ciertos puntos como son la compatibilidad geométrica, fuentes de error y propagación, contracciones, deterioro debido a los efectos ambientales y la cantidad de uso.

La Figura 1.11, muestra los procesos para realizar la fundición con arena con ayuda rápida de la tecnología de Láminas Solidas.

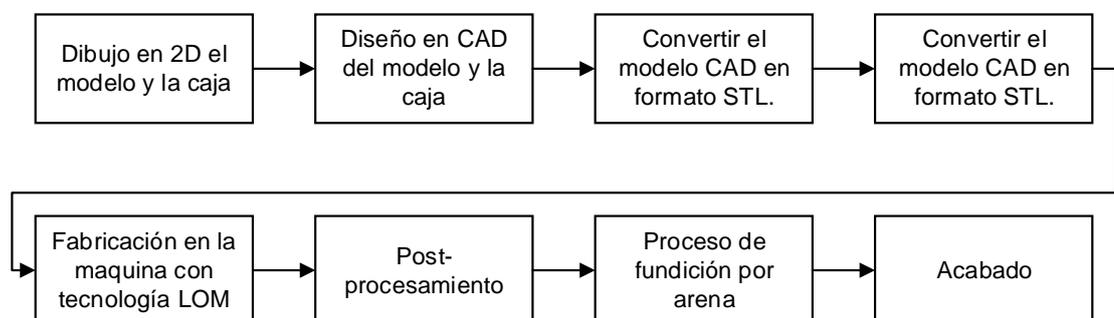


Figura1.11. Procesos de fundición en arena con ayuda de láminas sólidas. [11]

1.3.1.2. Fundición en arena con ayuda de Polyjet

Esta tecnología utiliza fotopolímeros para generar modelos de alta resolución y ser empleados en la fundición en arena. Imprimir con tecnología polyjet permite obtener modelos detallados y superficies lisas, debido a la buena calidad de impresión a base de materiales que se ajustan a los requeridos para el proceso de fundición en área [11]. En la figura 1.12, se muestra como la tecnología Polyjet es utilizada en la fabricación de un componente de latón.

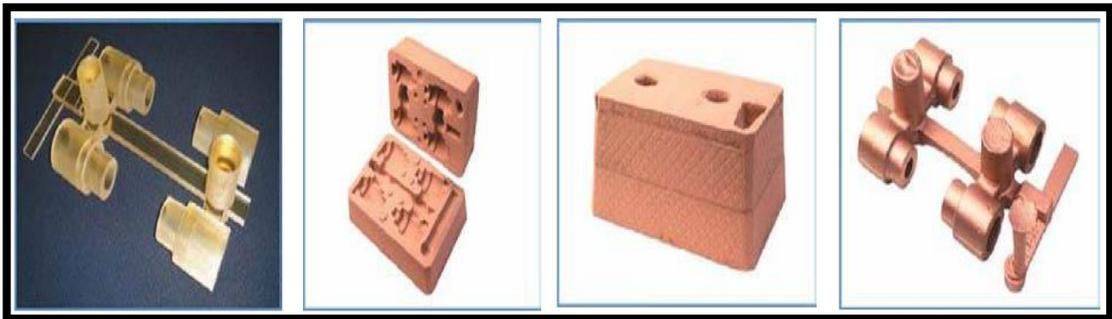


Figura1.12. Procesos de fundición en arena con ayuda de Polyjet. [11]

1.3.1.3. Impresión en tres dimensiones utilizado en la fundición en arena

Para esta aplicación se utilizan impresoras 3D que tiene la tecnología de impresión en tres dimensiones. Esta es la que mejor se acomoda para crear, directamente desde un programa CAD, moldes y machos de forma compleja a base de arena de sílice, cromita, circón entre otros y emplea aglutinantes de compuestos orgánicos como el silicato, fenólica.

De esta manera se elimina el proceso de fabricación del modelo, para luego continuar con el moldeo tradicional con arena verde. Los pasos a seguir para realizar la fundición en arena con esta tecnología son: primero se realiza un diseño en un programa CAD en la computadora como el Rapix3D, en el cual se puede analizar, manipular y verificar la pieza antes de la impresión con una precisión de ± 0.011 pulg o ± 0.3 mm. Segundo, se realiza la configuración de la caja de trabajo y luego se imprime. Después se realiza la limpieza de las partes impresas y, finalmente, se unen las partes con un pegamento para formar la pieza a fundir [13].

En la siguiente imagen (Figura 1.13) se muestra el molde impreso al cual se le vierte el metal fundido y, finalmente, se destruye para obtener la pieza fundida. Para realizar este tipo de moldes de sílice se utiliza una impresora Exone con sistema S-Print.



Figura1.13. Molde impreso para fundición. [14]

1.3.2. Fundición por revestimiento

Otro método de fundición en el cual se puede aplicar la técnica de prototipado rápido es en la fundición por revestimiento. Se utiliza impresoras 3D que emplean como material de trabajo la cera, se obtiene el modelo en físico y se evita el proceso de inyectado, o para la elaboración de moldes para su posterior proceso de inyectado de cera o plástico.

Esta tecnología cumple un rol importante en este tipo fundición es así que en el esquema de la Figura1.14, se puede observar las posibles formas de empleo.

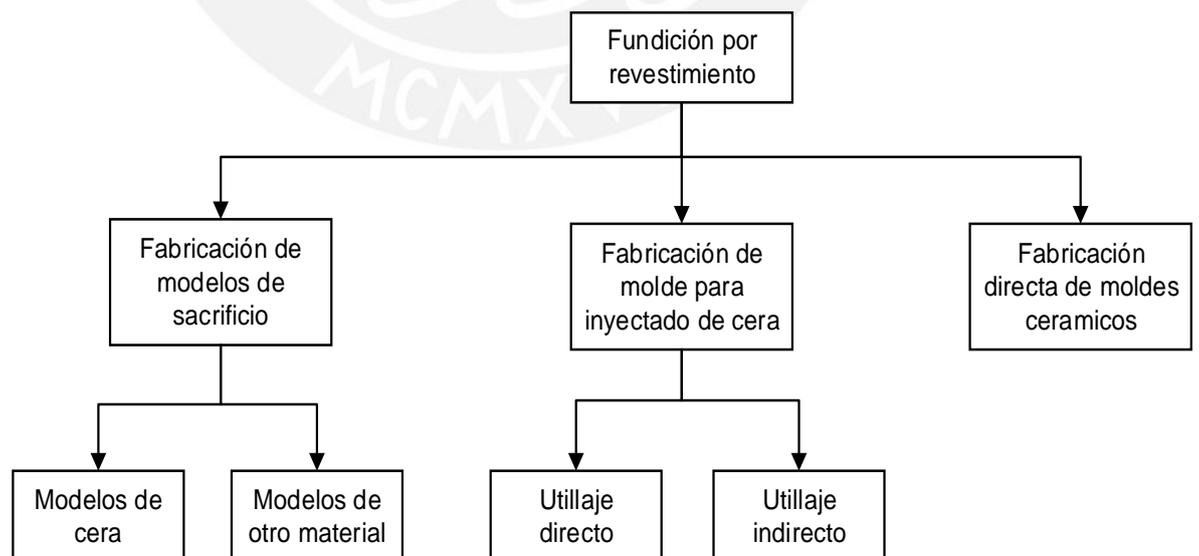


Figura1.14. Impresora 3D en la fundición por revestimiento. [11]

1.3.2.1. Fundición por revestimiento con ayuda de FDM

Existen empresas que ofrecen la tecnología de impresión para realizar modelos a base de cera o ABS, los cuales son adecuados para ser fundidos o quemados y extraídos de la carcasa cerámica. Esto genera una simplificación de pasos respecto al proceso tradicional de la fundición [11].

La ventaja que se tiene al obtener modelos impresos con ABS son las siguientes: rigidez y su capacidad de manipulación sin dañarse, estabilidad dimensional, limpieza y su facilidad de construcción en el programa CAD (Figura 1.15). Sin embargo, presenta la desventaja de obtener una superficie rugosa lo cual no contribuye en tener una buena precisión dimensional [11].

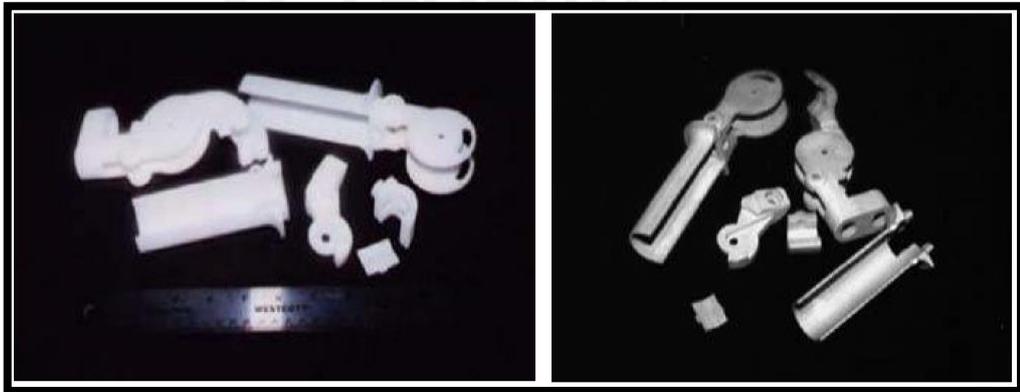


Figura 1.15. Fundición por revestimiento utilizando FDM-ABS y producto final. [11]

1.3.2.2. Fundición por revestimiento con ayuda de Polyjet

La característica más resaltante de la utilización de esta tecnología en la fundición por revestimiento es que la resolución de impresión de los modelos de cera presenta muy buena calidad de detalles y acabado superficial, lo cual resulta adecuado para la fundición de piezas de precisión.

Características resaltantes del uso de esta tecnología:

- Posee una microestructura más densa en comparación con las tecnologías FDM y SLS.
- El modelo se funde a temperaturas relativamente bajas con poca o ninguna ceniza residual.
- El modelo no presenta estructura porosa y no necesita de sellado o recubrimiento.

- Durante la fundición por revestimiento no presenta signos de agrietamiento en el molde.
- Existe un ahorro significativo de tiempo y costo en comparación a métodos convencionales para la obtención de modelo patrón.

1.3.2.3. Fundición por revestimiento con ayuda de Thermojet

Con esta tecnología se puede imprimir modelos por medio de un proceso de pulverización aditiva capa por capa, similar a una impresora de inyección de tinta. Estos modelos de cera son utilizados directamente en la fundición por revestimiento.

Es un proceso que puede producir gran número de piezas con beneficios en la calidad y facilidad de uso durante la fundición por revestimiento [15].

1.3.2.4. Fundición por revestimiento con ayuda de impresión en tres dimensiones

Con este tipo de impresión se pueden producir piezas de cera para ser utilizadas como modelos. Luego de imprimir el modelo, este se recubre con materiales cerámicos para luego fundir la cera y verter el metal. Además, esta tecnología se puede emplear para imprimir, directamente, el molde refractario utilizado en el vertido de metal fundido.

En la siguiente figura 1.16 se muestran los procesos a realizar para obtener el producto final empleando la tecnología mencionada.



Figura 1.16. Procesos de fundición por revestimiento con tecnología de impresión en tres dimensiones. [11]

1.3.2.5. Fundición por revestimiento con ayuda de Sinterización selectiva por láser

Esta tecnología de sintonización selectiva por láser puede utilizar el poliestireno llamado Windform Ps desarrollado por CRP o la CastForme elaborado por DTM Coporation (Figura 1.17). Ambos materiales a diferencia del poliestireno tradicional tienen aditivos que mejoran el acabado superficial y la reproducción de detalles [11].

Estos materiales tienen un bajo contenido de cenizas y producen piezas fundidas de buena calidad. La fabricación de una pieza por medio de esta técnica tiene como finalidad obtener un modelo cuyo material tenga similitud con la cera, por tanto incluye unos procesos después de la impresión; estos consisten en una inmersión en cera líquida para sellar las porosidades en la superficie y otorgarle rigidez.

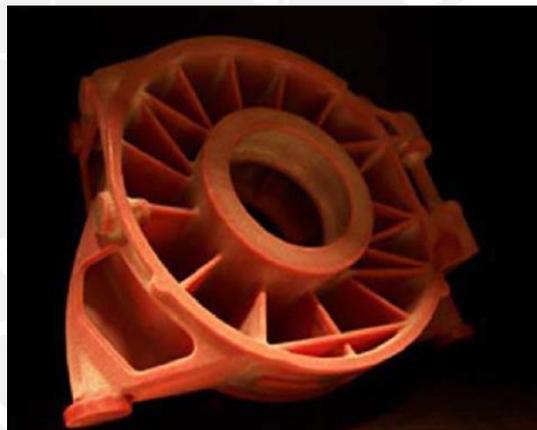


Figura 1.17. Modelo desechable a base de CastForme. [11]

1.4. Tecnologías existentes en la PUCP

La universidad tiene dos impresoras 3D a disposición de estudiantes, profesores, y personas externas a la PUCP. Estas se encuentran ubicadas en el salón VEO, del Centro de Innovación Tecnológica, con las cuales se realizan una serie de experimentos, trabajo de investigación y servicios a terceros.

Estas impresoras son las siguientes:

- **Especificaciones de la Fortus 400mc**

Esta impresora 3D utiliza la tecnología “Modelado por deposición fundida”, el cual fue patentado por la empresa Stratasys. La Fortus 400mc (Figura 1.18) trabaja con materiales termoplásticos lo que permite obtener piezas en 3D de buena resistencia mecánica, aplicación de alto impacto, soporta alta temperatura y productos químicos.



Figura1.18. Fortus 400mc. Ubicado en la sección VEO de la PUCP.

- **Objet30 Pro**

La tecnología que emplea la objet30 Pro (Figura1.19) es Polyjet, la cual puede imprimir hasta en 8 diferentes materiales obteniendo piezas de forma compleja, detalles complicados, superficies lisas, espesores de pared delgada y es resistente a altas temperaturas.



Figura1.19. Objet30 Pro. Ubicado en la sección VEO de la PUCP

1.4.1. Aplicaciones y comparación de las tecnologías existentes.

Tabla1.2 Aplicaciones. [16]

FDM	Ambos	POLYJET
Mayor rendimiento	Modelos de termo-formado	Mayor precisión
Modelo concepto de bajo costo	Prototipado moderado	Modelo de concepto estético
Alta exigencia de prototipos		Modelo visual
Platillas y accesorios		Modelos claros y transparentes
Fundición en arena		Fundición en área y fundición por revestimiento
Bajo volumen		Molde para inyectado
Modelo de pasta de papel		Uso dental
Núcleos compuesto soluble		Prototipos de caucho

Tabla 1.3. Comparación técnica entre las tecnologías existentes en la PUCP. [17]

Características Tecnológicas	Fortus 400mc	Object30 Pro
	FDM	Polyjet
Materiales de impresión	ABS - ESD7, ABSi, ABS-M30, ABS-M30i, FDM Nylon 12, PC, PC-ABS, PC-ISO, PPSF	Material rígido transparente (VeroClear), Material rígido opaco blanco (VeroWhitePlus), Material rígido opaco azul (VeroBlue), Material rígido opaco negro (VeroBlack), Material rígido opaco gris (VeroGray), Material similar al polipropileno (DurusWhite), Material para alta temperatura (RGD525)
Material de soporte	Se utiliza un material de fácil ruptura para PC-ISO, ULTEM y PPSF; soluble o de ruptura para PC	Soporte FullCure 705 de fotopolímero no tóxico similar a un gel
Tamaño de la bandeja	355 x 254 x 254 mm (14 x 10 x 10 pulgadas) 406 x 355 x 406 mm (16 x 14 x 16 pulgadas)	300 x 200 x 150 mm (11,81 x 7,87 x 5,9 pulgadas)
Suministro de material	Una bahía para material y recipientes de soporte. Dos bahías para material y recipientes de soporte (con mayor tamaño de bandeja).	Cuatro cartuchos sellados de 1 kg (2,2 lb)
Grosor de capas	0,330 mm (0,013 pulgadas), 0,254 mm (0,010 pulgadas), 0,178 mm (0,007 pulgadas), 0,127 mm (0,005 pulgadas)	28 micras (0,0011 pulgadas); 16 micras para material VeroClear (0,0006 pulgadas)
Precisión	Las piezas se fabrican con una precisión de $\pm 0,127$ mm ($\pm 0,005$ pulgadas) o $\pm 0,0015$ mm/mm ($\pm 0,0015$ pulgada/pulgada), la que resulte mayor. (La precisión depende de la geometría. La especificación de precisión que se puede conseguir determinada a partir de datos estadísticos con un rendimiento dimensional del 95%).	0,1 mm (0,0039 pulgadas) podría variar dependiendo de la geometría de la pieza, el tamaño, la orientación, el material y el método de pos procesamiento
Tamaño/peso del sistema	1281 x 896 x 1962 mm (50,5 x 35,5 x 77,3 pulgadas)/con cajón: 786 kg (1,511 lbs.), sin cajón: 593 kg (1,309 lbs.)	Máquina: 82,5 x 62 x 59 cm (32,28 x 24,4 x 23,22 pulgadas); 93 kg (205 libras)
Requisitos de alimentación	230 VCA, 50/60 Hz, 3 fases, 16 A/fase (se requiere circuito dedicado de 20 amperios)	Monofásico: 100-120V, 50-60 HZ; 7A 200-240V;50-60 Hz; 3.5A

1.4.2. Propiedades de los materiales de impresión

1.4.2.1. Materiales de trabajo en la Fortus 400mc

La tecnología FDM con la que trabaja la Fortus 400mc son los termoplásticos, los cuales se calientan para otorgarles la forma deseada y luego se enfrían para que esta se endurezca y se conserve.

La mayor cantidad de termoplásticos están contruidos por cadenas principales muy largas de átomos de carbono, enlazados entre sí mediante fuerzas intermoleculares o de Van der Waals. Algunas veces, se enlazan también átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre en forma covalente con la cadena molecular principal. Los átomos o grupos adheridos están enlazados en forma covalente a los átomos de la cadena principal. En los termoplásticos, las largas cadenas moleculares están ligadas entre sí por los enlaces secundarios [18].

En la siguiente tabla 1.4 se muestran algunas propiedades de los materiales que se pueden emplear para la impresión de un prototipo en la Fortus 400mc.

Tabla 1.4. Propiedades de los materiales utilizados en la Fortus 400mc. [17]

Material	Estructura	Gravedad específica	Dureza Rockwell	Tensión de rotura (Mpa)	Alargamiento a la fractura	Módulos		Temperatura (°C)	
						Tracción (Gpa)	Flexión (Gpa)	Transición vítrea	Fusión
ABS	Amorfa	1.05	110 R	42	27%	2.4	2.4	107-115	
Acrílico	Amorfa	1.18	91 M	68.7	6%	3.1	3.3	100-105	130
Nylon	Semicristalina	1.12	110 R	73.1	83%	2.1	2.4		250
Polycarbonato	Amorfa	1.21	120 R	69.4	96%	2.6	2.4	145-148	
Poliéster			120 R						
PBT	Amorfa, Semicristalina	1.42	120 R	57.1	36%	2.7	2.9		220
PET	Amorfa, Semicristalina	1.32	110 R	55	130%	2.7		73-78	250
Polietileno									
LDPE	Semicristalina (55% cristalina)	0.92	60 R	11	190%	0.21	0.27		110
HDPE	Semicristalina (90% cristalina)	0.96	63 R	20.3	380%	0.91	1.1		130
Polipropileno	Semicristalina	0.94	96 R	36.8	120%	1.9	1.4		160
Cloruro de polivinilo									
Rígido	Amorfa	1.4		40	60%		3	75-105	200
Flexible	Amorfa			13	320%			75-105	

1.4.2.2. Materiales de trabajo en la Objet30 pro

El material utilizado en esta impresora es un fotopolímero, el cual es sensible a la luz de determinada longitud de onda. El fotopolímero es un material compuesto cuya base es un polímero gelatinoso que se solidifica al ser expuesto a la luz ultravioleta y se convierte en una superficie dura.

Este material es un tipo de polímero que se puede considerar material compuesto, ya que se componen de agrupamientos atómicos diferentes de dos o más micro o macro constituyentes que varían en forma, composición química y son insolubles entre sí, con la finalidad de formar un compuesto cuyas propiedades son superiores a las de sus componentes individuales [18].

Los materiales utilizado en la Objet30 pro son los siguientes:

- **Material opaco rígido**

La gamas de materiales son los siguientes: material rígido opaco blanco (VeroWhitePlus RGD835), material rígido opaco gris (VeroGray RGD850), material rígido opaco azul (VeroBlue RGD840), material rígido opaco negro (VeroBlackPlus RGD875) [17].

- **Material transparente (VeroClear)**

En la marca Stratasys este material es conocido como VeroClear RGD 810, el cual es incoloro y se puede obtener piezas con buena estabilidad dimensional, detalles complejos y simulación de termoplásticos transparentes [17].

- **Materiales de polipropileno simulado (RGD450 y RDG430)**

Estos materiales son fotopolímero que simulan el aspecto y las propiedades mecánicas de polipropileno. Por tal motivo, tienen buena resistencia y durabilidad para crear prototipos. [17]

CAPÍTULO 2

FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO, FORMAS CONSTRUCTIVAS EN LA FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO

2.1. Fundición por Revestimiento o cera perdida

La fundición por revestimiento es una técnica de fundición utilizada para obtener piezas pequeñas y de forma compleja. Consiste en la inyección de cera en un molde, una vez obtenido el modelo de cera, se aplica un revestimiento refractario en todo su contorno. Luego se funde la cera para, finalmente, vaciar el metal fundido.

Los aspectos importantes a considerar durante todo el proceso de inyectado de cera son: la fluencia de la cera en el molde, la expansión térmica de la cera durante la inyección, la contracción térmica de la cera durante la solidificación y su posterior enfriamiento durante su permanencia dentro del molde. La falta de consideración de estos aspectos también afecta a la precisión dimensional del producto final fundido. Por tal motivo, se deben realizar los moldes considerando estas variaciones dimensionales. Por ejemplo, la tolerancia dimensional para este tipo de fundición es de $\pm 0.1\text{mm}$ comparado con los $\pm 0.75\text{mm}$ de la fundición con arena.

Los pasos básicos para el desarrollo de la fundición por revestimiento están resumidas en los siguientes puntos y también se aprecian en la Figura 2.1:

- Producción de un modelo fundible con el calor, generalmente la cera, aunque

también se puede utilizar plástico.

- Montaje de estos patrones en el sistema de llenado, lo cual incluye: bebedero, canal, boca de alimentación.
- Someter el modelo a un baño de material refractario para producir un molde resistente a altas temperaturas.
- Calentar el molde refractario para fundir la cera o el plástico.
- Vertido del metal fundido en el molde para producir la pieza a fabricarse.
- Retirar el material refractario (romper) y realizar el acabado final a la pieza.

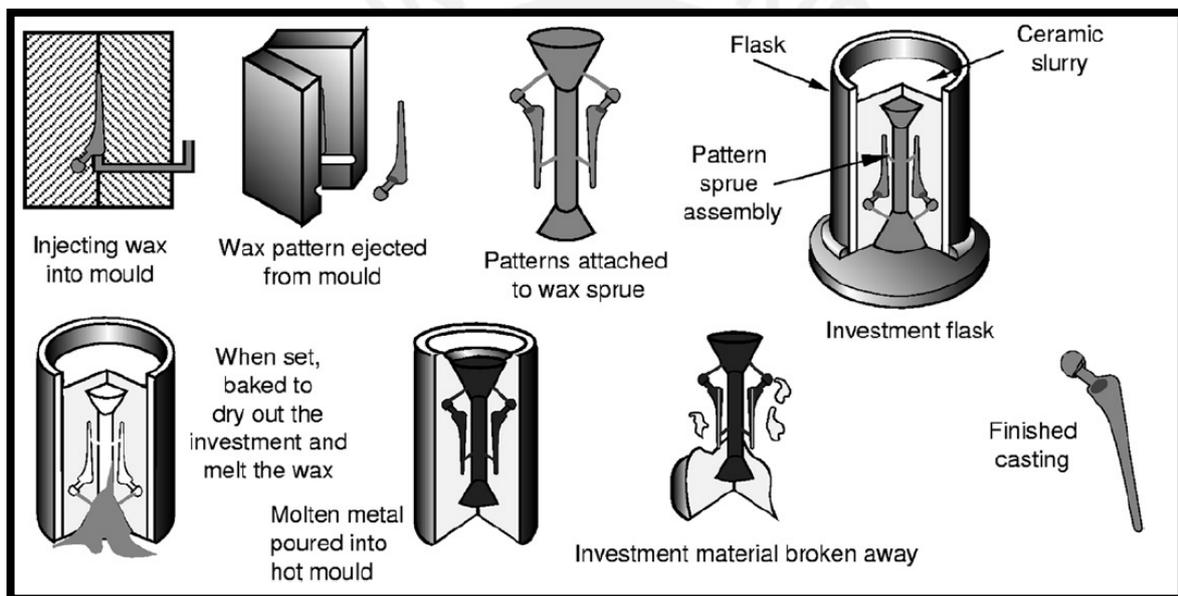


Figura 2.1 Secuencia de procesos durante la fundición por revestimiento. [5]

2.2. Prototipado rápido en la fundición por revestimiento

El prototipado rápido se puede utilizar como una ayuda rápida en la fundición por revestimiento ya sea para la generación de moldes o modelos. Esta posee beneficios frente a otros métodos convencionales en cuanto a la complejidad de diseño y el tiempo de producción, pero se debe considerar ciertos criterios para la selección de una tecnología adecuada.

2.2.1. Prototipado rápido para la creación de modelos

Existen tecnologías de prototipado que facilitan la obtención de modelos para utilizarlos como ayuda rápida en la fundición por revestimiento. Esto pueden ser impresos de diversos materiales poliméricos o ceras para que sean cubiertos con materiales refractarios, luego fundirlos y para obtener un molde hueco donde verter el metal líquido.

Para este proceso se debe tener ciertas consideraciones como son: el acabado superficial, las tolerancias, su comportamiento durante la fundición y la cantidad de cenizas que se desea obtener en el molde final.

Las tecnologías que se pueden considerar para este proceso son: Estereolitografía, sintonización selectiva por láser, thermojet, polyjet, FDM.

2.2.1.1. Modelos de material termoplástico

Estos moldes son obtenidos por impresión con una tecnología que trabaje con materiales termoplástico (Figura 2.2).

Se utilizan materiales termoplásticos tales como el ABS, polietileno, nylon, polipropileno, etc. Estas pueden presentar una resistencia mayor que la cera y pueden proteger de daños a las secciones delgadas. Sin embargo, tiene una tendencia a causar agrietamientos en el molde al momento de su eliminación.



Figura 2.2 Pieza obtenida por impresión en ABS. [19]

2.2.1.2. Modelos en cera

Los modelos de cera son los más utilizados en el campo de la fundición por revestimiento (Figura 2.3). Existen tecnologías del prototipado rápido como FDM que pueden imprimir, directamente, el modelo en cera eliminando el proceso de inyectado. De acuerdo a las características técnicas de la impresora se obtendrá un mejor detalle y acabado superficial de la pieza para un posterior proceso de fundición por revestimiento [20].

Las ceras son de bajo costo y con una variedad de propiedades disponibles en el mercado. Estas deben tener la capacidad de mantener la forma deseada a lo largo del procedimiento de inmersión en el revestimiento.



Figura 2.3 Anillo obtenido por impresión en cera. [20]

2.2.2. Prototipado rápido para la creación de molde

Cuando se desea realizar un molde para cantidades pequeñas resulta inconveniente emplear mucho tiempo para su fabricación. En especial cuando el molde presente dificultades, debido a la complejidad de la forma, precisión y acabado superficial. Sin embargo, con la tecnología de prototipado rápido se podrá obtener una rapidez y un ahorro económico en su fabricación.

La geometría del prototipo a desarrollar juega un rol importante, ya que cuando este molde se utilice durante el inyectado puede generar un aumento de presión y temperatura y, como consecuencia, falle. Por tal motivo, se debe considerar aquellas limitaciones como lo son:

- ✓ Forma o geometría: precisión dimensional, características de la cavidad puede necesitar insertos metálicos.
- ✓ Materiales: de acuerdo a las propiedades mecánicas del material seleccionado se determinará la vida útil del molde.
- ✓ Proceso: se debe aplicar refrigeración externa en la superficie del molde.

El diseño y fabricación de una pieza por medio de la fundición por revestimiento requiere de la preparación de un molde para su posterior inyectado de cera o plástico (Figura 2.4). Por tal motivo, se debe evaluar la cantidad de lote que se producirá y el tipo de material que se le inyectará, de acuerdo con estas consideraciones podemos seleccionar entre un molde de acero o de polímero.



Figura 2.4 Inyectado de cera en molde de material termoplástico.

2.2.2.1. Moldes de acero

Los moldes de acero (Figura 2.5) se fabrican, generalmente, por medio de un mecanizado (arranque de viruta), estos tipo de moldes son adecuados cuando la producción a fabricar es alta, puesto que presentan un menor desgaste y mayor resistencia a las altas presiones de inyección. Además, cuando el diseño resulta complejo se puede utilizar la tecnología de impresión de fusión por haz de electrones.



Figura 2.5 Molde para inyectado de suela de zapato obtenido por mecanizado. [21]

2.2.2.2. Molde de material termoplástico

Estos tipos de moldes se pueden obtener utilizando la tecnología de prototipado rápido. En un programa CAD se diseña el molde de acuerdo a la pieza a fabricar, luego se obtiene en físico con ayuda de una impresora 3D. Como ya mencionamos en capítulo 1, existen diversas tecnologías de impresión, por tanto podemos seleccionar el material polimérico que más se adecue a nuestras necesidades.

Los moldes que se elaboran de esta manera no poseen la misma resistencia mecánica y durabilidad que un molde de acero (Figura 2.6). Sin embargo, esta tecnología nos brinda la ventaja de obtener moldes con formas complejas en un tiempo y costo mucho menor.



Figura 2.6 Moldes de material termoplástico ABS. [22]

2.2.3. Beneficios: [23]

- El beneficio más resaltante de esta tecnología se aprecia en el ahorro de tiempo para la producción de prototipos (bajo volumen de producción). Se pueden imprimir los modelos, directamente, a base de cera y, de acuerdo a su complejidad, dependerán los días de entrega.
- Para el desarrollo de un nuevo producto por métodos tradicionales, como el mecanizado o tallado de madera, se debe realizar una serie de pruebas para tener una aprobación final de acuerdo a las características del modelo principal. Esto genera un mayor tiempo y costo de inversión. Sin embargo, todo esto se eliminará por medio de un modelo creado en un programa CAD y obtenerlo en físico por la impresión 3D.
- Conforme se va realizando la producción de un nuevo componente, lo más probable, es que haya cambios en su diseño durante el proceso. Esto genera mayor tiempo de trabajo y elevación de costos para su modificación. Por tal motivo, la creación de modelos por medio de la técnica del prototipado rápido elimina la posibilidad de producir modelos físicos para luego corregir sus errores, debido que las modificaciones pueden realizarse en el programa CAD generando vistas previas y simulación del diseño final.
- Los modeleros por más experiencia que posean puede tener dificultades al momento de diseñar un modelo que se utilizaría durante el proceso de fundición por revestimiento. Puesto que puede presentar problemas como lagrimeos, contracción o una mala estructura metalográfica.
- Por medio del prototipado rápido se realizan todas las pruebas de comportamiento del nuevo prototipo durante la fundición así como sus características particulares como agujeros y ranuras.
- El obtener un modelo patrón de forma rápida ayudará a evaluar su comportamiento, como su resistencia de carga en el diseño de árboles, y costos. Esto es importante si con el diseño se desea obtener un volumen alto de producción.

- Una pieza de cera impresa ayudará al fundidor, en un menor tiempo de espera, a localizar fácilmente las zonas que puedan tener problemas durante el proceso de fundición y tomar las precauciones necesarias para su desarrollo.
- En un mundo competitivo siempre se busca establecer vínculos estratégicos con los clientes. Por tanto, al obtener piezas fundidas con un ahorro de tiempo se tendrá una mejor negociación y satisfacción de los clientes, ya que la obtención de componentes nuevos por medio de la fundición tradicional involucra varias pruebas, generando mayor tiempo de espera.

2.2.4. Criterios de selección de la técnica de prototipado rápido para la fundición por revestimiento. [23]

- Cada fundición que se desea realizar solicita una determinada precisión dimensional. La mayoría de estas se realizan con una tolerancia de ± 0.1 mm sobre el modelo principal; sin embargo, no todas las tecnologías de prototipado, actualmente disponibles, logran obtener esta precisión.
- La gran parte de tecnología de impresión realizan su diseño depositando el material capa por capa, por tal motivo las superficies inclinadas presentan pequeñas escaleras. Existen sistemas cuyo espesor de capa es menor a 0.1mm y otro de mayor espesor, lo cual se ve reflejado en la pieza fundida.
- Es deseable que la tecnología de prototipado nos permita obtener piezas modelo a base de cera; sin embargo, no todas trabajan con ese tipo de material y se realizan la impresión con otro tipo de material. Al momento de fundir materiales termoplásticos puede dejar residuos internos difíciles de quitar contaminando y variando en el diseño final del producto.
- Los modelos obtenidos por prototipado rápido se distorsionan en climas cálidos. Por tal motivo, algunas tecnologías producen prototipos con una mejor estabilidad y robustez para soportar el tiempo, el clima, el transporte y su manipulación.

- Se debe tener cuidado con la tecnología que se trabaja para no tener problemas de defectos tales como porosidad de superficie. Existen tecnologías o problemas de diseño CAD en que la unión no son las adecuadas y su impresión es incompleta, lo cual no se puede apreciar a simple vista haciendo necesario observarlo con un microscopio. Estos errores son invisibles hasta obtener la pieza fundida, en el cual aparecen pequeños defectos en la superficie de colado.
- Algunas tecnologías que imprimen en cera no requieren de algún cambio y otros necesitan de un post tratamiento que consiste en un sellado para evitar la entrada o absorción del material refractario.
- Considerar en la selección de tecnología los rendimientos de trabajo como son: el tiempo de impresión, calidad y la variedad de materiales de trabajo.
- Tener en cuenta las dimensiones del modelo que se desea fabricar y si esta encaja o es posible para la tecnología de impresión disponible. Los sistemas más grandes construyen modelos de 20 pulgadas.
- No todos los sistemas de impresión son baratos, todo depende del volumen de impresión, su complejidad de diseño, material de impresión y tiempo empleado en su desarrollo.
- Estos sistemas no están disponibles en todos los países, por tanto se debe considerar su fiabilidad y apoyo para la realización de mantenimiento y la obtención de material de impresión.
- Considerar que existen tecnología de impresión que tardan más de un día en la impresión de la pieza; además, se debe considerar si puede realizar el trabajo de forma autónoma o requiere de un personal para su operación.

2.3. Problemas comunes en la fundición por revestimiento

En la siguiente tabla 2.1. Se muestran los problemas comunes en los moldes de cera. [24]

Problema	Causas	Soluciones
Burbujas	Insuficiente cantidad de cera en el inyector.	Agregar cera.
	La cera está muy caliente o muy fría.	Calibrar la temperatura de la cera.
	Deficiente montaje entre el molde y la boquilla.	Utilizar menor presión. Ajuste correcto del molde y boquilla.
Llenado incompleto del molde	La presión de inyección es demasiado.	Aumentar la presión de inyección.
	Baja temperatura de la cera.	Aumentar la temperatura de la cera.
	Molde frío.	Ampliar el bebedero de alimentación.
	Bebedero de alimentación muy delgado.	Aumentar los respiradores.
	Respiradores insuficientes	Limpiar las rejillas de ventilación y mantenerlas abiertas con talco.
	Respiradores obstruidos o sucios Inyector obstruido	Limpiar la boquilla del inyector.
Llenado excesivo del molde	Presión demasiado alta.	Disminuir presión
	Presión de sujeción incorrecta en el molde	Calibrar para la presión.
	Cera demasiado caliente.	Hacer un nuevo molde y cortar con herramienta adecuada.
	Demasiado tiempo de inyección	Bajar la temperatura de la cera. Disminuir tiempo de inyección.
Cera pegajosa	Molde muy caliente.	Aumentar tiempo de enfriamiento.
	El molde se abre muy pronto.	Bajar la temperatura de la cera.
	Cera muy caliente.	Aumentar tiempo de enfriamiento del molde antes de volver a usar.
Depresión	Insuficiente presión.	Bajar la temperatura de la cera.
	Cera muy caliente.	Aumentar la presión de inyección.
	Tiempo de inyección muy bajo.	Aumentar tiempo de inyección
	Bebedero demasiado delgado.	Seleccionar cera de menor contracción
	Molde muy frío.	
	Cera con contracción excesiva.	No retirar rápido el modelo del molde
Pobre acabado superficial	Baja presión de inyección.	Aumentar la presión de inyección.
	Demasiada pulverización.	Reducir la cantidad de talco.
	Molde muy frío.	Pre-tratamiento del molde
	Cera muy fría.	Limpiar el molde con spray.
Aletas	Alta presión de inyección.	Realizar un nuevo molde.
	Baja presión de sujeción.	Limpiar las rejillas de ventilación.
	Respiradores insuficientes u obstruidos.	Ventilación adicional.
	Cera muy caliente.	Bajar la temperatura de la cera.
La cera tiende a romperse	El molde se abre de forma incorrecta.	Abrir el molde y solucionar el problema.
	Tiempo de enfriamiento muy largo.	Poco tiempo de enfriamiento.
	Cera frágil.	Preferir ceras más flexibles.

2.4. Materiales empleados en la fundición por revestimiento.

2.4.1. La Cera

La cera es uno de los materiales más importantes utilizados durante el proceso de la fundición por revestimiento (Figura 2.7). Aunque puede ser reemplazada por otros materiales tales como el plástico o el poliestireno expandido, su fácil accesibilidad en el mercado y uso, durante el proceso, la convierte en una primera opción para los que realizan este tipo de fundición.

Durante el proceso de la fundición por revestimiento, antes de verter el metal fundido en la cascarilla formada a base de materiales refractarios, previamente, debe fundirse y escurrir el modelo de cera obtenido por prototipado rápido o inyectado en un molde.

Estas ceras son mezclas complejas cuyos constituyentes son ácidos, alcoholes, ésteres e hidrocarburos saturados. Pueden clasificarse en cera natural, ceras sintéticas, ceras de hidrocarburos. Son producidos bajo ciertos criterios de control para que posean un buen comportamiento mecánico y térmico.

Los aditivos utilizados para la fabricación de ceras están conformado por lo siguiente: resinas para aumentar cuerpo y fuerza, plásticos, materiales de carga, aceites y plastificantes.

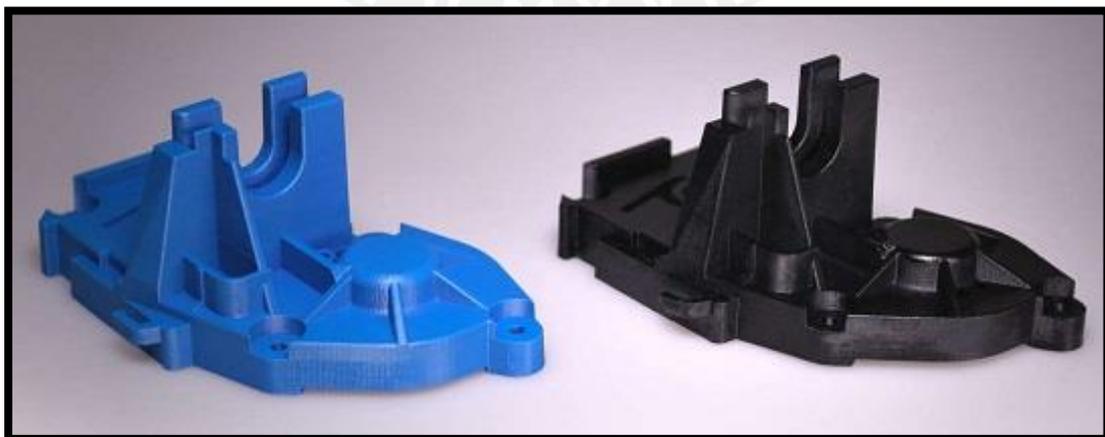


Figura 2.7 Piezas impresas en cera [25].

2.4.1.1. Tipos de cera

Las ceras utilizadas en este tipo de fundición son una mezcla compleja de muchos compuestos. Estos pueden clasificarse en tres categorías:

- Ceras naturales: no son de un uso común ya que pueden tener propiedades inconsistentes, un alto contenido de cenizas y su precio suele ser alto.

Las ceras que se encuentran en este grupo son por ejemplo: la cera conocida como Carnauba, el cual tiene un punto de fusión alto (83°C), un bajo coeficiente de expansión, dureza y no es pegajosa. Otra cera vegetal es la Candelilla, tiene un bajo coeficiente de expansión térmica, dureza media, y ligeramente pegajosa. La cera de abeja tiene un punto de fusión de 64°C, pero debido a su suavidad y costo elevado no es común utilizarlo en la fundición.

- Ceras de hidrocarburos naturales: estas ceras se obtienen de derivados del aceite crudo de petróleo. Se subdividen en:
 - o Cera Parafina: se encuentran disponibles en puntos de fusión en un rango de 52 a 68°C. tiene un color translucido y presenta una microestructura cristalina. Este tipo de ceras son de bajo costo, buena lubricidad, baja viscosidad cuando se funde y de bajo costo. Por estas razones, son muy utilizados en la fundición. Sin embargo, su fragilidad y alta contracción son puntos a tener cuidado.
 - o Ceras intermedias: estas ceras poseen una estructura semi-microcristalina. Obtenidas de aceite de alto punto de ebullición. Son opacas, duras pero menos frágiles que las ceras parafina.
 - o Ceras micro-cristalina: se obtienen a partir de los residuos del aceite. Poseen un peso molecular mayor a diferencia de las ceras parafina, tiene un color opaco y una estructura cristalina fina.
- Ceras sintéticas: Estas ceras poseen un bajo punto de fusión, baja viscosidad, se pueden fundir sin presentar agrietamiento de las cascarras delgadas. Pueden ser inyectados a bajas temperaturas y presiones, lo cual implica una reducción de costos.

Tabla 2.2. Propiedades de algunas ceras comerciales. [26, 27,28]

TIPO DE CERA				
Clasificación	Nombre	Temperatura de fusión (°C)	Densidad (g/cm^3)	Cenizas (%)
Natural	Carnauba	83.9	0.9704	0.1032
	Cera de abeja	65.1	0.9433	0.0042
	Candelilla	65 - 69	0.969	
Hidrocarburos	Parafina	55.9	0.8908	0.001
	Microcristalinas	50.7	0.9098	0.0047
Sintéticas	Cera mico MC95	107 - 110	--	--
	Cera polietilénica	101 - 114	--	--
	Cera DSP	90 - 110	--	--

2.4.1.2. Selección de cera

Cada vez que se desee realizar un modelo de cera se debe realizar una selección adecuada de este material; por tal motivo, se recomienda lo siguiente: [27]

- Inyección: punto de reblandecimiento, propiedades reológicas, rango de congelación, capacidad de duplicar los detalles, acabado superficial y el tiempo de configuración.
- Control dimensional: contracción de solidificación, la tendencia a la cavitación, la distorsión, expansión/contracción térmica y la estabilidad.
- Manipulación, montaje y eliminación: lubricidad, resistencia al impacto, rigidez, dureza, estabilidad y capacidad de soldadura.
- Fundición de la cera: punto de reblandecimiento, la viscosidad, difusividad térmica, expansión térmica y el contenido de ceniza.
- Otros: facilidad de obtención, fácil reciclaje, toxicidad y factores ambientales.

2.4.2. Materiales refractarios

La real academia española define a los materiales refractarios como aquellos cuerpos que resisten la acción del fuego sin cambiar de estado ni descomponerse. Complementando esta información, según la norma española UNE, su definición más precisa es la siguiente: los materiales refractarios se caracteriza por ser resistentes a elevadas temperaturas sin que su resistencia mecánica y/o resistencia a la corrosión se vea afectada.

Las condiciones más solicitadas de este material o situaciones de trabajo a soportar son las siguientes:

- Térmicas
 - Temperaturas elevadas
 - Cambios bruscos de temperatura
 - Refractariedad
 - Dilatación
 - Conductividad térmica

- Mecánicas
 - Compresión, flexión y tracción
 - Vibraciones
 - Abrasión y erosión
 - Porosidad y densidad

- Químicas
 - Escorias
 - Permeabilidad
 - Gases y vapores
 - Ácidos

En el campo de la fundición por revestimiento se utilizan los materiales refractarios y aglutinantes para crear varias capas de partículas finas y gruesas hasta vestir, totalmente, el modelo de cera. Posteriormente, se continúan con los tratamientos térmicos de secado, sinterizado y vitrificación de las partículas para formar una cascara

resistente a las altas temperaturas del metal fundido. Las piezas que se obtienen por este método de fundición muestran un detalle fino, una superficie lisa y buena precisión dimensional [17].

La selección del material refractario utilizado se debe realizar de acuerdo a las propiedades del molde que se desea tener. Los puntos a considerar son los siguientes:

- Pureza
- Refractibilidad
- Estabilidad dimensional
- Expansión térmica
- Conductividad térmica
- Compatibilidad con la aleación
- Tamaño y distribución de partículas
- Costo

El material seleccionado debe ser el adecuado para soportar las temperaturas a la cual se vierte el metal fundido para que no se genere una fusión. En la elección del material refractario se debe evitar en lo más mínimo las pequeñas cantidad de sales, metales alcalinos o de óxido de hierro puesto que disminuye su punto de fusión.

Asimismo, este material debe presentar una estabilidad lo cual evite ser susceptible a la hidratación o alguna reacción que se genera con los materiales que está en contacto (el molde de cera o el metal fundido). Por otro lado, la conductividad térmica dependerá del tamaño y la distribución de las partículas. Esto debe ser tomado en cuenta por la solidificación que se genera debido a la transferencia de calor que existe entre la capa interior y exterior de la carcasa.

La gama de materiales refractarios utilizados en la elaboración de moldes o cascaras para este tipo de fundición son los siguientes:

- **Sílice:** la formula química que representa este material refractario es SiO_2 (dióxido de silicio). Proporciona una buena refractariedad, lo cual ayuda a la resistencia del choque térmico de los molde, presenta una baja porosidad. Sin embargo, su uso es limitado debido al alto coeficiente de expansión térmica.

Hay tres estructuras básicas de sílice: cuarzo, tridimita y cristobalita. Según un diagrama de estabilidad térmica se tiene que el cuarzo bajo hasta los 573°C, cuarzo alto entre 573 y 870°C, tridimita alta entre 870°C y 1470°C y la cristobalita alta entre 1470 a 1710°C. A temperaturas mayores se obtiene la sílice en fase líquida [18].

- **Circón:** Sus principales ventajas son de alta refractariedad, la resistencia a la humectación por metales fundidos y la disponibilidad.
- **Dolomita:** Es un carbonato de doble calcio y magnesio, contiene 58% de CaO y 42% de MgO. Las características de este mineral es que le brinda buena rigidez al molde y resistencia al choque térmico. Sin embargo, tiene una alta sensibilidad a la hidratación, pero para combatir este problema se le agrega alquitrán [29].
- **Feldespato:** Este material se obtiene de la descomposición del granito y de las rocas ígneas. Los feldespatos se dividen en dos grandes grupos: feldespato potásicos y feldespato sódicos-cálcicos. [17]

Tienen una gran importancia en el negocio de la cerámica, ya que se puede tener un buen control sobre la sinterización del producto, buena resistencia al choque térmico, refractaridad y reduce el encogimiento de la cascara.

- **Bentonita:** es un compuesto formado por minerales del grupo de las esmécticas y son capaces de aumentar su volumen o formar geles tixotrópicos según sea la proporción de agua con la que se mezcla. Es considerada una arcilla y posee mayor porcentaje de silicio que de alúmina. Entre las características más resaltantes de este material figuran la buena propiedad absorbente (ideal para materiales no ferrosos) y la impermeabilidad. [30]

Si el metal fundido utilizado en la fundición es el hierro, la bentonita le otorgará buenos acabados, evitando deformaciones en el producto final.

- **Alúmina:** este material se puede encontrar en dos formas, un grupo de alta alúmina con un 99% y la otra con un grado de alúmina entre 80 y 99%. Además, estos dos grupos se dividen en subgrupos según el tipo, la pureza y el grado de

servicio. La diferencia de los grupos radica, principalmente, en la cantidad de impurezas y agentes que afecten el proceso de sinterización [31].

La característica de este material es que tiene una mayor resistencia que la sílice o la mulita y, a diferencia de los refractarios de sílice, este es menos reactivo frente a muchas aleaciones. Por tal motivo, se utilizan en la fundición con aleaciones.

En las siguientes tablas 2.3 y 2.4 se mostrarán las características de la alúmina y su aplicación a diferente porcentaje de Al_2O_3 .

Tabla 2.3 Grados de alúmina con mayor densidad, alta temperatura de sinterización y, relativamente, buen rendimiento mecánico. [31]

Grado	Al_2O_3 min %	Porosidad %	Densidad g/cm^3	Aplicación
A1	99.6	0.2 - 3	3.75 - 3.95	Estructural
A2	99.8	< 1	3.97 - 3.99	Lámparas
A3	99.5	< 1	3.90 - 3.99	Máquina herramienta
A4	99.6	3 - 6	3.75 - 3.85	Refractario
A5	99	1 - 5	3.76 - 3.94	Horno

Tabla 2.4 Contienen un mejor porcentaje de alúmina y son más económicos de producir. [31]

Grado	Al_2O_3 %	Porosidad %	Densidad g/cm^3	Aplicación
A6	96.5 - 99	1 - 5	3.71 - 3.92	Mecánica eléctrica
A7	94.5 - 96.5	2 - 5	3.60 - 3.90	Aislante, piezas de desgaste
A8	86 - 94.5	2 - 5	3.40 - 3.90	Aislante, piezas de desgaste, refractario
A9	80 - 86	3 - 6	3.30 - 3.60	Aislante, piezas de desgaste, refractario

- **Yeso:** es un conglomerante que varía de acuerdo a la humedad, está conformado, químicamente, por sulfato de calcio con dos moléculas de agua ($SO_4Ca.2H_2O$). Las propiedades de este material son su buena estabilidad volumétrica, excelente adherencia, un rápido fraguado y modificable, aislante, bajo costo, buena resolución de copia del modelo, poca solubilidad en agua, etc. [32].

Durante el proceso de fundición por revestimiento los moldes de yeso, para el colado de metal fundido, tienen una baja permeabilidad y por tal motivo los gases no pueden salir. Para corregir este problema, el metal fundido es sometido a una presión de vacío o se puede mejorar la permeabilidad deshidratando el molde en una autoclave por un lapso de 6 – 12 horas y luego se rehidratan en aire durante 14 horas. Este tipo de material refractario se encuentra limitado por la temperatura máxima de trabajo, el cual es $1200^{\circ}C$, por esa razón se utiliza, únicamente, para fundir materiales como el aluminio, magnesio, zinc y algunas aleaciones en base a cobre [32]

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de los materiales refractarios. [27, 29, 30, 31]

Material	Gravedad específica	Coefficiente de expansión térmica	Punto de fusión ($^{\circ}C$)	Observación
Sílice	2.21	0.5×10^{-6}	1710	
Circón	4.2 a 4.6	4.5×10^{-6}	2420	puede disociar de zirconio líquido + sílice líquido a $1600^{\circ}C$
Dolomita			2300	Alta sensibilidad a la hidratación
Feldespatos	2.5 – 2.75		1.110 - 1.530	
Bentonita	2.58		1600 - 1750	
Alúmina	3.9	9.5×10^{-6}	2050	

2.5. Formas constructivas en la fabricación de modelos para la fundición por revestimiento

Para que el proceso de fundición por revestimiento pueda realizarse de forma eficiente y rentable, debe considerarse ciertas reglas o especificaciones constructivas

elementales. Estas se encuentran relacionadas a ciertos parámetros que se debe considerar como por ejemplo: nervios, partes macizas, prevención de poros, espesor de pared, cerámica empleada, radios, agujeros, contracciones, roscas de tornillos, prevención de poros y cuñas.

2.5.1. Juntas de pared

Para tener un buen diseño al juntar las paredes se debe evitar tener ángulos agudos (Figura 2.8). Para el caso en que se tenga paredes de diferente espesor que se desean unir, estas deben tener una inclinación aproximada de 1:5 a 1:10 y asimismo reforzarlas con nervios [33].

Un buen diseño para la fundición debe tener lo mínimo de secciones juntas para evitar los ángulos agudos. También se debe tener en cuenta, que el espesor de las secciones debe tener las dimensiones requeridas sin mucha variación para tener la resistencia que se desea y evitar los enfriamientos locales a baja velocidad. Se debe considerar, que si agregamos una sección diferente esta generará un punto caliente, aumentando el tiempo de enfriamiento en casi un 50% [33]. Como se aprecia en la Figura 2.8.

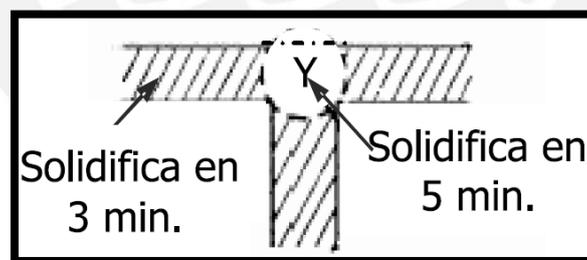


Figura 2.8 Problemas de solidificación en uniones de pared. [34]

Para prevenir esto problemas se recomienda las soluciones que se aprecian en la Figura 2.9:

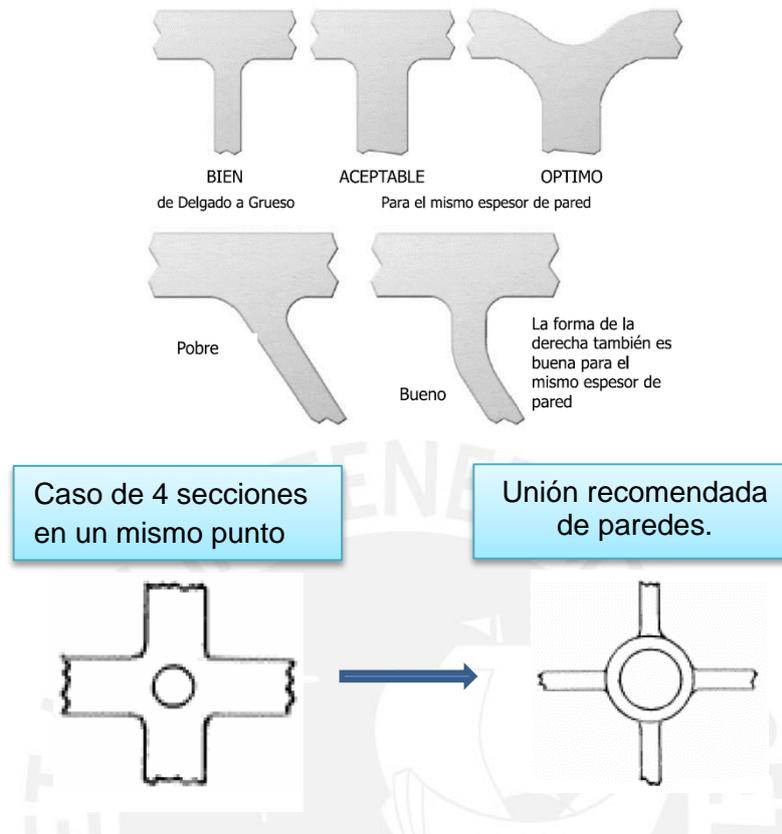


Figura2.9 Formas recomendadas de unión de paredes. [34, 35]

2.5.2. Cambios de sección

Al momento del diseño se debe evitar en lo más mínimo el cambio de sección o evitar que las esquinas tengan un ángulo agudo, así como se puede apreciar en la Figura 2.10.

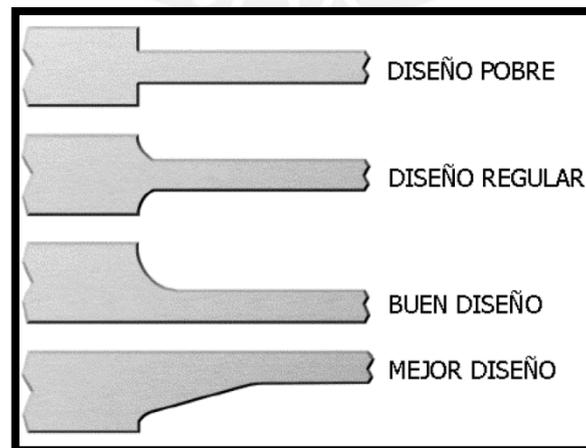


Figura2.10 Cambios de sección. [35]

En caso de tener cambio de sección, se recomienda que la diferencia entre los espesores sea la mínima y no mayor a 2. Sin embargo, si el cambio es mayor a 2 se recomienda realizar un cambio a forma de cuña como se muestra en la Figura 2.11 [33].

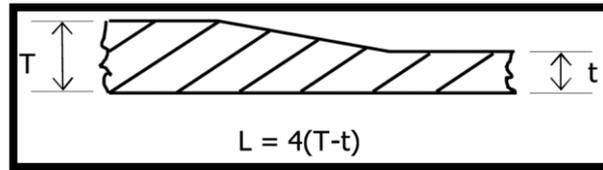


Figura 2.11 Medidas a un cambio de sección. [34]

2.5.3. Espesor mínimo de pared

El tipo de material fundido con el que se trabajará y la distancia de recorrido serán los parámetros a considerar para determinar el espesor mínimo de pared [33]. En la siguiente tabla 2.6 se muestran las relaciones de los espesores mínimos para diferentes materiales.

Tabla 2.6 Relación de espesores mínimos para diferentes materiales. [36]

Metales	Espesor mínimo de pared en mm
Acero de bajo carbono	1.8
Acero de alto carbono	1.5
Acero inoxidable, serie 300	1
Acero inoxidable, serie 400	1.5
Aluminio	1
Berilio - Cobre	0.75

2.5.4. Espesor máximo de pared

El espesor máximo se encuentra limitado por el tipo de fundición que se está empleando. Para el caso de la fundición por revestimiento el espesor de pared máximo, recomendado, es 25.4 mm [33].

2.5.5. Radios

The investment casting institute recomienda lo siguiente: se deben utilizar radios y filetes internos para minimizar las contracciones y agrietamientos para disipar el calor, generando una mejor solidificación y sin alteración de las propiedades mecánicas finales de la pieza fabricada [33].

Se debe minimizar, en el diseño, el número de filetes, en la siguiente Figura 2.12 se recomienda la medida que debe tener el radio en función del espesor de pared.

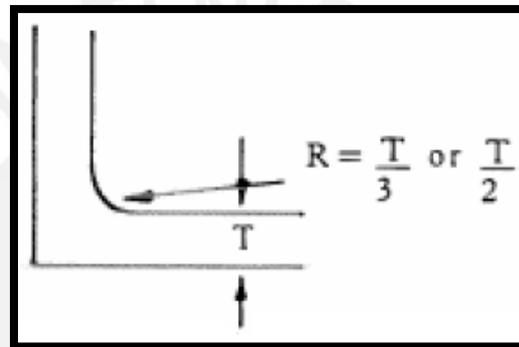


Figura 2.12 Medidas de radio en función del espesor. [34]

2.5.6. Planitud

Según Hitchiner, las tolerancias para rectitud axial son ± 0.127 mm por cada 25 mm. La planitud está en función de la contracción volumétrica del modelo y del metal durante su enfriamiento [33]. En las tablas 2.7 y 2.8 se muestran las tolerancias recomendadas para planitud.

Tabla 2.7 Desviación permisible con respecto al espesor de sección. [36]

Espesor mm (in)	Concavidad por cada 42 cm ² (6 in ²) de superficie
Sobre 6.5 (mayor de 250.)	Insignificante (insignificante)
6.5 a 13 (0.251 a 0.500)	0.102 mm LTI (0.004 in.LTI)
13 a 25 (0.501 a 1.000)	0.201 mm LTI (0.008 in.LTI)
25 a 50 (1.001 a 2.000)	0.406 mm LTI (0.016 in.LTI)

Tabla 2.8 Desviación permisible con respecto a la longitud de la sección. [36]

Longitud mm (in)	LTI como pieza fundida
25 (0.984)	0.25 (insignificante)
50 (1.968)	0.38 (0.004 in. LTI)
100 (3.937)	0.50 (0.008 in. LTI)
150 (5.905)	0.75 (0.016 in. LTI)

2.5.7. Acabado superficial

Esta depende del tipo de material del modelo y de metal fundido. En la tabla 2.9 se muestra los acabados superficiales que se puede obtener con el metal fundido.

Tabla 2.9 Acabados superficiales obtenidos después de la fundición. [36]

Metal	Valor promedio Ra (μm)
Aluminio	1.50-2.50
Cobalto cromo	2.00-2.50
Acero inox. Serie 300	2.25-3.20
Acero inox. Serie 400	2.50-3.20

2.6. Formas constructivas en la fabricación de moldes para inyectado empleado en la fundición por revestimiento

2.6.1. Selección de material para la elaboración de molde para inyectado

La selección de material es muy importante porque de esta dependerá el acabado de la pieza a producir, el tipo de proceso con el que se trabajará, la cantidad de unidades a producir y costos.

Existen moldes de aceros, silicona, caucho, polímeros, materiales compuesto, etc. Además, con la tecnología de prototipado rápido, se puede realizar los moldes. Para ello, se debe realizar una correcta selección de la tecnología y el material de impresión, ya que influirán en el acabado superficial y resistencia mecánica del molde.

2.6.2. Pliegues y cantos

Los pliegues y cantos de los moldes deben presentar un radio lo más amplio permisible sin alterar el diseño de la pieza (Figura 2.13). Esto se realiza para evitar tener concentradores de tensiones, cuando los radios son demasiado pequeños, provocando la rotura de la pieza [36].

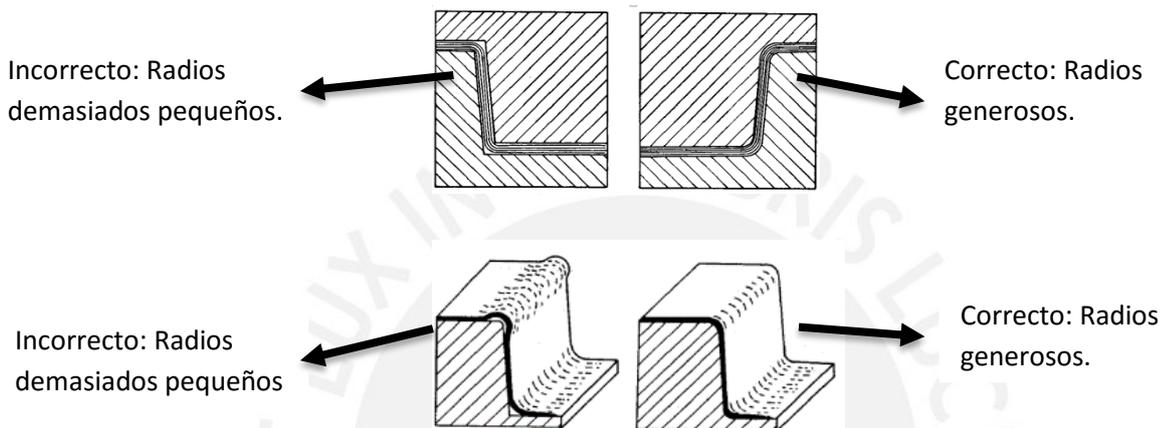


Figura 2.13 Consideraciones en el diseño de pliegues y cantos. [37]

2.6.3. Gradiente de desmoldeo

A los moldes se les realiza una inclinación o pendiente a la pared para evitar que el modelo, de un material diferente al molde, quede aprisionado y se dificulte su extracción. Esta sucede debido a las contracciones que sufren el modelo y el molde. En la Figura 2.14 se puede apreciar las pendientes recomendadas para diferentes profundidades del molde. [37]

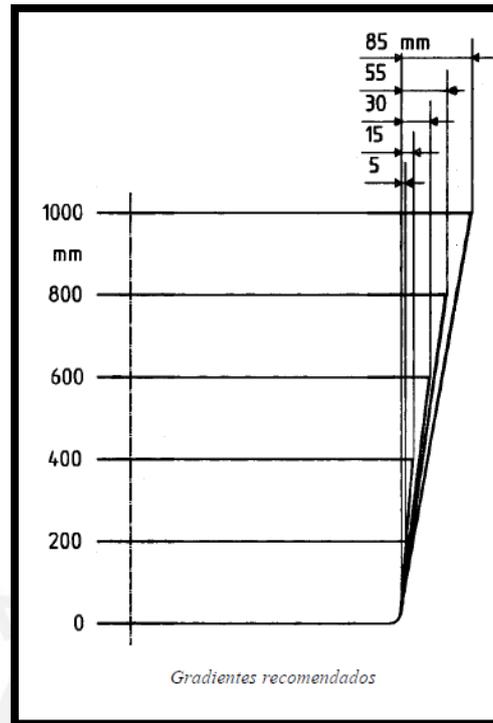


Figura 2.14 Pendiente para diferentes profundidades de molde [37]

2.6.4. Espesor de pared de los moldes

Los espesores de pared deben ser lo más reducido posible, ya que de esto dependerá el ahorro de material y el tiempo de fabricación. Sin embargo, estos deben asegurar una buena rigidez para evitar que el molde se deforme o si el espesor es bastante puede provocar un enfriamiento irregular de la pieza [37].

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA QUE COMBINE LA TÉCNICA DE FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO CON EL USO DE PROTOTIPADO RÁPIDO

3.1. Repuesto a producir

La pieza que se seleccionó para su fabricación es un pie prensa tela perteneciente a una máquina de costura recta industrial (Figura 3.1). Estas piezas (Figura 3.2), están sometidas a un desgaste acentuado en la parte inferior debido a la fricción que se genera cuando está en contacto con la platina. (Figura 3.3).

Debido a que se puede generar un arranque por desgaste, formación de ondas, etc. Se debe seleccionar un material adecuado para este tipo de aplicación.



Figura 3.1 Máquina de costura recta industrial.



Figura 3.2. Pie prensa tela

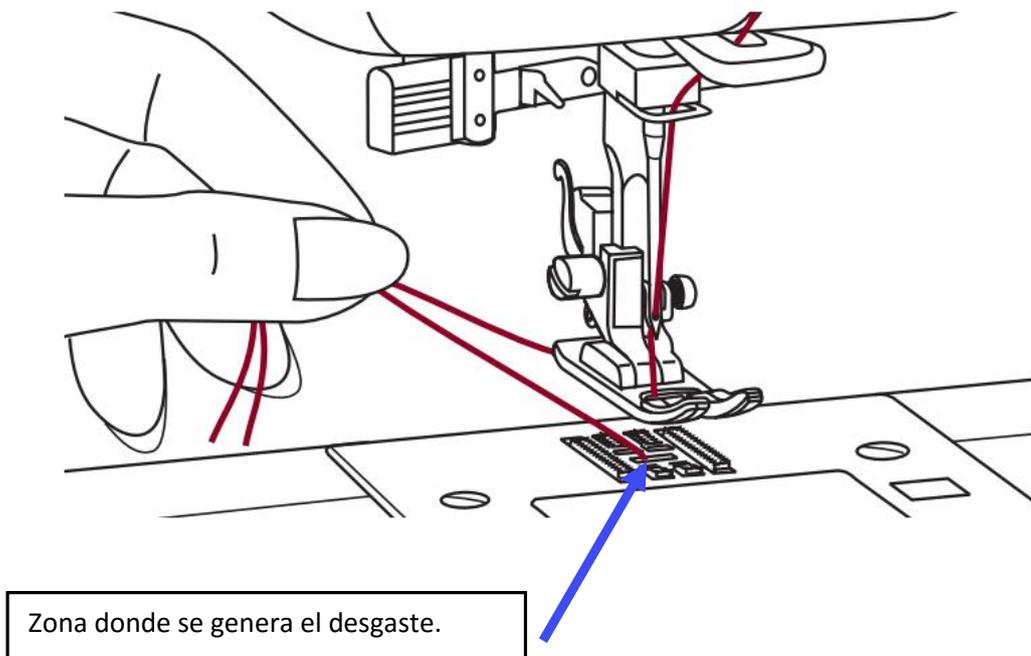


Figura 3.3 Zona de desgaste

Para conocer el tipo de material de la pieza se realizó un análisis químico en el laboratorio de materiales de la PUCP y así determinar el acero que se iguale o asemeje en los porcentajes de elementos químicos. En la siguiente Figura 3.3 se puede apreciar la máquina que se utilizó para el desarrollo de esta prueba y en la Figura 3.4 se muestra el proceso del análisis químico.



Figura 3.3. Máquina de análisis químico: BRUKER Q8 MAGELLAN.



Figura 3.4. Proceso de análisis a la Pieza inferior del pie prensa tela.

El resultado arrojó la siguiente Tabla 3.1 con los componentes químico y su porcentaje presente en el material.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del análisis químico al pie prensa tela

Nombre de la pieza	Pie prensa tela				
Elemento Químico	C	Mn	P	S	Si
Contenido	0.25	0.53	0.03	0.09	0.35

Con los resultados obtenidos el acero que se asemeja al contenido de elementos químicos es el AISI SAE 1020, el cual es utilizado en piezas pequeñas sometidas a desgaste. Sin embargo, como caso práctico nosotros emplearemos bronce para la fabricación de la pieza.

3.2. Metodología para el proceso de fabricación de pie prensa tela perteneciente una máquina de costura recta industrial

Para el proceso de fundición por revestimiento se utilizará la técnica de prototipado rápido en la fabricación de moldes para el inyectado de cera y luego obtener la pieza en bronce. Por tal motivo, se necesitará establecer una metodología de pasos que faciliten un buen diseño del producto, considerando todos los parámetros de diseño pertinentes, minimizando el tiempo y costo de producción.

3.2.1. Descripción del proceso de diseño e impresión de molde

- Verificar que el prototipo a fabricar cumple con los requerimientos para ser elaborado por fundición por revestimiento, caso contrario seleccionar un método más sencillo para su producción. Es recomendable para piezas entre 0.0006kg. y 230 kg.
- Para obtener el diseño de la pieza a fabricar, se deben elaborar los planos 2D o utilizar un proyecto de perfiles para conseguir una réplica de la pieza con un aumento, determinado por la máquina, y poder realizar la toma de medidas.
- Si se verifican los puntos anteriores, se debe proceder a seleccionar la tecnología (considerando sus limitaciones) de prototipado rápido que mejor se adecue para la obtención de la pieza.
- Seleccionar el material de impresión, estas se encontrarán limitadas por la tecnología de impresión seleccionada.
- Continuar con el diseño de la pieza en un software 3D como por ejemplo: Autodesk Inventor o Solidworks.

- Para el diseño en el software, tener en consideración todas las contracciones que sufrirá la pieza desde la impresión hasta la fundición, las tolerancias dimensionales y acabado superficial. Asimismo, evaluar las especificaciones técnicas de la pieza, si lo hay, para su fabricación.
- Después de realizar el modelo en 3D, se procede a elaborar el molde, en el mismo software. Ahora se debe considerar las características de diseño de un molde según se explica en el capítulo 2.
- Elaborar las restricciones necesarias al molde, para evitar el juego entre ambas partes y no tener problemas durante el inyectado de la cera.
- Para tener un ajuste más preciso entre cavidad superior e inferior del molde, se recomienda hallar de manera experimental un ajuste adecuado.
- Verificar los detalles o cambios de diseño de último momento.
- Una vez finalizado el diseño, guardar el archivo en formato STL, compatible con el software de la impresora.
- Finalizada la impresión, corroborar que el molde cumple con las tolerancias dimensionales asignadas durante el diseño.

3.2.2. Descripción del proceso de inyectado de cera

- Seleccionar el equipo para el inyectado de cera en el que las temperaturas oscilen entre 43 °C a 90°C y ajustar la presión de aire en un intervalo de 3 a 10 libras pero no pasar de 15 libras [38]. Ceras líquidas se inyectan a temperaturas más altas y menor presión; ceras sólidas, a temperaturas más bajas y mayor presión.
- Seleccionar la cera que se utilizará en el inyectado para obtener el modelo. Entre las más comunes se encuentran las ceras de parafina y microcristalinas.
- Determinar la presión, temperatura y tiempo de inyectado.

- Después del proceso de inyectado. Verificar las dimensiones y acabado superficial del modelo de cera. Si es posible mejorar en acabado con un soldador de cera.

3.2.3. Descripción del proceso de fundición por revestimiento

En la siguiente Figura 3.5 se puede apreciar una secuencia de procesos para el desarrollo de la fundición por revestimiento, el cual se explicará paso a paso más adelante.

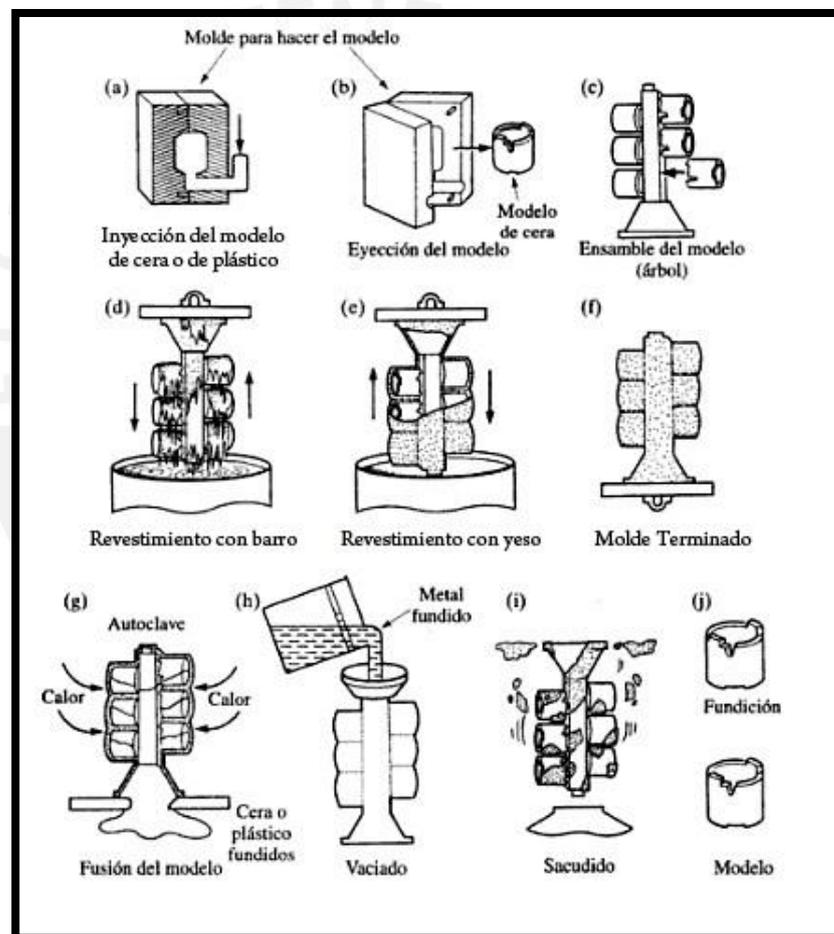


Figura 3.5. Secuencia de procesos en la fundición por revestimiento. [32]

- El modelo obtenido en cera es cubierto por el material refractario. Este material puede ser sílice, circón, silicato de aluminio, alúmina, yeso, etc. La selección de este material dependerá del metal fundido que estará en contacto con la carcasa.

- Preparar el material refractario seleccionado. Esto implica, moler el material a un determinado tamaño de partícula, juntar los materiales refractarios en proporciones adecuadas, en caso que sean varios materiales, y su mezcla con un aglutinante.
- Posteriormente, se realiza el recubrimiento uniforme de la pieza. Este proceso puede ser de dos maneras: la primera es bañar la pieza con el material preparado hasta obtener el espesor adecuado de capa, y la segunda es sumergirlo en un cilindro lleno de material cerámico.
- Luego se somete a vibraciones para eliminar el aire atrapado y asentar el material refractario.
- Procede con la eliminación del modelo fundiendo la cera. Para esto, se introduce en un horno de secado, eliminando un 70% de la cera. Después, se lleva a un horno de cocción donde calienta entre 230 y 270°C para que se funda el resto de cera y se aglutine más la masa de material refractario.
- El molde cocido se vuelve a calentar hasta un rango de 650 y 750°C, como se puede apreciar en la Figura 3.6, para luego verter el metal fundido. La adición se realiza a una temperatura cercana a la temperatura de fusión del metal para que esta pueda fluir con mayor facilidad hasta llenar todos los espesores más delgados, proporcionando un mejor control dimensional durante la contracción del metal y el molde durante el enfriamiento.

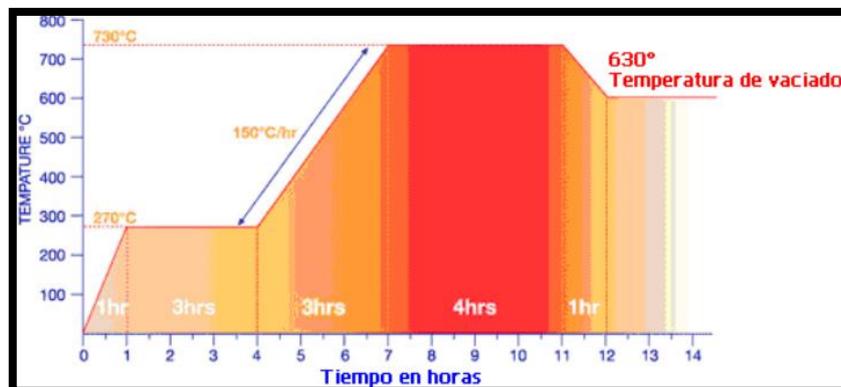


Figura 3.6 Proceso de calentamiento del molde de yeso. [39]

- Se continúa con el desmolde, para lo cual se rompe el molde y se separa de la pieza.
- Los pequeños defectos superficiales y rebabas, producidos por grietas se pueden eliminar con cintas abrasivas o muelas neumáticas.
- Finalmente se realiza un control de calidad, el cual consiste en la verificación dimensional empleando un vernier, micrómetro, plantillas o protectores de perfiles, etc.



DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE PIE PRENSA TELA

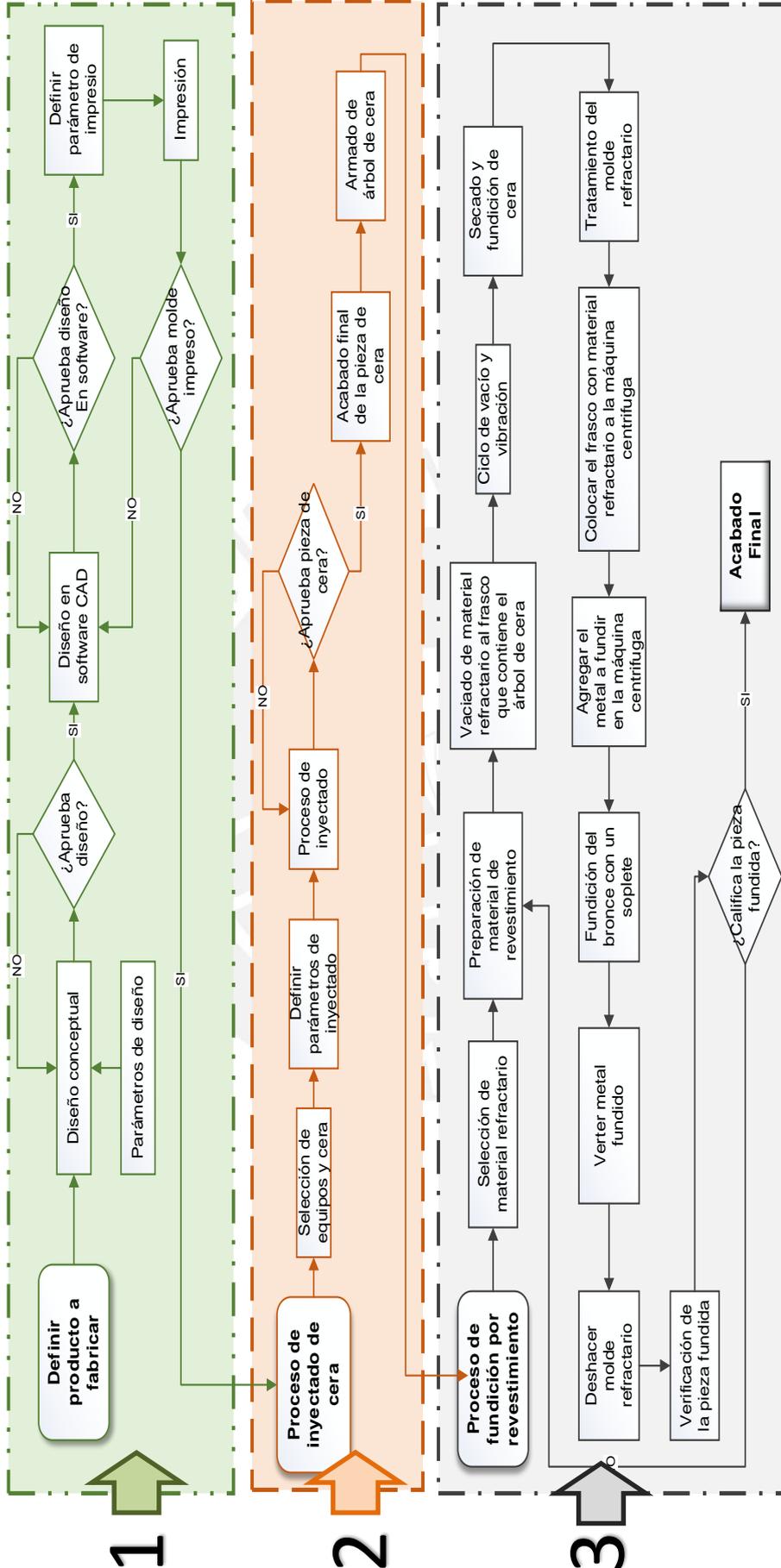


Figura 3.7 Diagrama de Flujo de los procesos que intervienen en la fabricación del pie prensa tela. [Elaboración propia]

Capítulo 4

Aplicación de la metodología propuesta al proceso de fabricación de un repuesto para la industria de confecciones, realizable en los laboratorios de la PUCP.

La tesis tenía como objetivo ser desarrollado en las instalaciones de la universidad. El proceso de impresión 3D de los moldes para el inyectado de cera se realizó con tecnología existente en la PUCP; sin embargo, el área de fundición, ubicado en el laboratorio de manufactura, no posee todos los equipos, utensilios e insumos necesarios para llevar a cabo el proceso de fundición por revestimiento. Por tal motivo, se buscó el apoyo de una empresa externa para poder realizar la fabricación del pie prensa tela.

La empresa que presto sus instalaciones para que este proyecto se realice fue “Servicios de Vaciados Carillo” dedicada a la fabricación de joyas de oro y plata. Este lugar cuenta con equipos, algunos de ellos adaptados, utensilios e insumos.

4.1. Equipos e instrumentos a utilizar

Los recursos necesarios para la realización del proceso de impresión del molde y el proceso de fundición por revestimiento están conformado por los equipos e instrumentos que se señalan a continuación:

- Para el proceso de impresión del molde
 - Impresora 3D Objet 30pro con tecnología polyjet.
 - Computadora con un software CAD y compatibilidad para guardar el archivo en formato STL.
 - Limatones, espátula y pinzas

- Proceso de fundición por revestimiento
 - Balanza digital marca ACCULAB, modelo VICON capacidad 10kg, precisión $\pm 1gr$.
 - Es deseable que la máquina inyectora cumpla con las especificaciones técnica de la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de la inyectora de cera.

Capacidad de la Cera	4 litros.
Temperatura del inyector	55 – 90°C
Temperatura Ambiente	4 – 45°C
Suministro de aire	1 lps, 450 Kpa a 690 Kpa
Energía eléctrica	220V,580w,50/60Hz.

- Mechero de gas y espátulas.
- Limatones, pinzas y alicate de corte
- Cilindro de acero y base de goma con capacidad de $118cm^3$.
- Horno para el secado del material refractario y fundición de la cera, con capacidad de alcanzar temperatura de 500°C.
- Soplete que funciona con gas y oxígeno.
- Máquina para centrifugado

4.2. Materiales empleados

- Tecnología y material de impresión.

Para seleccionar la tecnología de impresión se realizó impresiones de prueba. En las Figuras 4.1 y 4.2 se aprecia un prototipo impresión con tecnología FDM en ABS y en la Figura 4.3 un molde prototipo impreso con tecnología polyjet con material verowhite. Las propiedades mecánicas de ambos materiales se pueden apreciar en el anexo1. Para elegir una de estas dos tecnologías de impresión, disponibles en la PUCP, se elaboró la tabla 4.2 donde se procedió a asignar un puntaje que va de 1, valor mínimo, y 3, puntaje máximo acorde a las características físicas, operación, tipo de material y la tabla 1.3 del capítulo 1., el cual es un resumen sobre estas dos tecnologías.

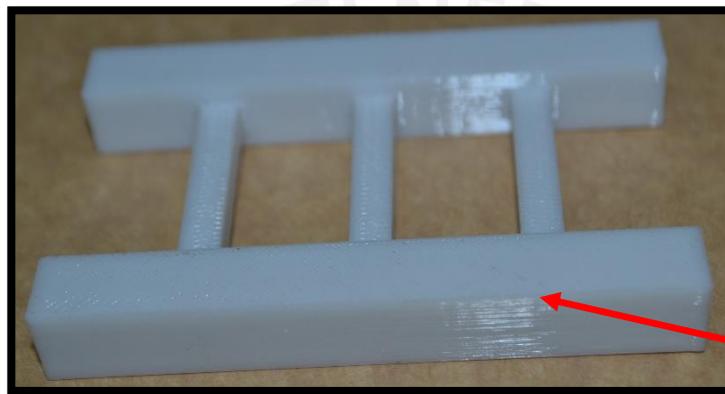


Figura 4.1. Prototipo impreso con tecnología FDM, material ABS

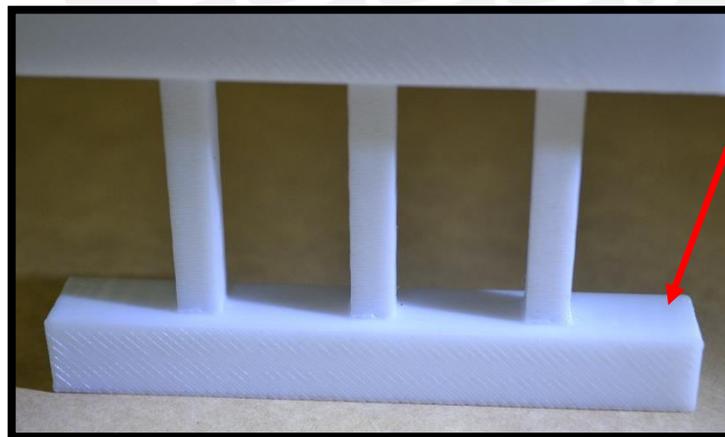


Figura 4.2. Superficie rugosa, tecnología FDM

Se observa la rugosidad superficial y la separación de las capas al depositar en material, durante la impresión, en el plano X-Y.



Figura 4.3. Prototipo impreso con tecnología polyjet, material verowhite.

Tabla 4.2. Tabla de selección de tecnología Polyjet y FDM

		Tecnología de impresión Polyjet	Tecnología de impresión FDM
Operaciones	Tiempo de proceso	3	2
	Pre-proceso	2	3
	Post- proceso	3	3
	Entorno	3	3
	Flexibilidad de uso	3	3
Características físicas	Acabado superficial	3	1
	Detalles	3	1
	Precisión	2	3
	Tamaño	3	3
Materiales	Rígido	3	3
	Flexible	3	1
	Duro	2	3
	Transparente	3	1
	Alta resistencia	1	3
	Compatibles	3	3
		40	36

- Selección de Cera

Para este proceso de selección se consideró la tabla 2.2 del capítulo 2 y los criterios de selección descritos en el punto 2.4.1.2. Por tanto, se seleccionó la cera que pertenezca a la familia de los hidrocarburos- microcristalina, el cual también es accesible en el mercado.

Al buscar este producto en el mercado se encontró la cera para fundición por revestimiento Kerr flex Plast blue como se muestra en la Figura 4.4 y las características técnicas en el anexo 2. Esta pertenece a la familia mencionada en el párrafo anterior y posee un contenido de cenizas muy bajo (0.003%). Para realizar el proceso de fundición se compró una bolsa de cera de 1 kg.



Figura 4.4. Cera Kerr flex Plast

- Material refractario para la elaboración del molde.

El material para la fabricación del pie presa tela es acero. Sin embargo, por ser un caso práctico, se utilizó el bronce por tener una temperatura de fusión menor al acero. Debido a esta selección de metal, se utilizó el Yeso satín cast 20 (Figura 4.5.), el cual es apropiado para trabajar con materiales cuya temperatura de fusión llega a los 1000°C. Es muy utilizado por los joyeros pues otorgar buenos acabado a las piezas de oro o plata. Las características y preparación del yeso satín cast 20 se pueden apreciar en el anexo 3.



Figura 4.5. Yeso Satin Cast 20

4.3. Reproducción del pie prensa tela

Para la elaboración del modelo seleccionado se realizaron varios procesos. Primero, se dividió, la pieza, en dos partes como se puede ver en las siguientes figuras 4.6 y 4.7:



Figura 4.6. Pieza 1 superior

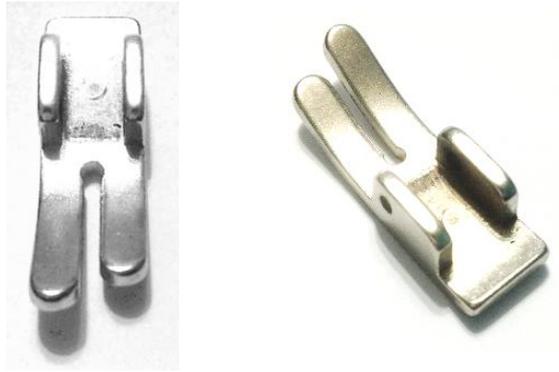


Figura 4.7. Pieza 2 inferior

Para el desarrollo de la pieza en 3D, previamente, se necesitó realizar mediciones para el cual se utilizó un vernier, micrómetro y un goniómetro. Además se utilizó una máquina proyectora de perfiles (Figura 4.8), del taller de manufactura de la PUCP, para obtener un dibujo con una proyección de 10x, logrando obtener las medidas de zonas poco accesibles para el instrumento de medición.



Figura 4.8. Proyector de perfiles

Una vez obtenidas las medidas de la pieza, se necesitó considerar las variaciones dimensionales que iba afectar el modelo durante el proceso de fabricación para lo cual se otorgó una tolerancia dimensional por contracción. Por tanto, se tuvo en consideración lo siguiente:

- Variación dimensional debido a la impresión

De las especificaciones técnicas de la impresora Objet 30pro y de la tabla 1.3 la precisión dimensional que se puede obtener es un ± 0.1 mm. Además, se decidió hallar la tolerancia de ajuste de forma experimental, ya que el juego entre las dos cavidades del molde debe ser lo mínimo posible para evitar problemas de deslizamiento durante el inyectado de la cera. Se realizaron 3 impresiones de cilindros hembra y macho con ajuste de 0.4mm, 0.2mm, 0.1mm y se puede apreciar en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Cilindro macho y hembra para hallar el ajuste experimentalmente.

Con esto se determinó, experimentalmente, un ajuste de 0.1mm.

- Contracción lineal durante el proceso de fundición por revestimiento

Durante todo el proceso que involucra la fundición por revestimiento, resulta mayor la contracción que la dilatación y se encuentra entre un 0.5 y un 2.5 % de las dimensiones de la pieza [1]. En el caso del bronce posee una tasa lineal de contracción de 1.5%.

Finalmente, teniendo en cuenta todas las variaciones dimensionales que se producirá en la pieza, se elaboró el diseño del modelo en un programa CAD (Autodesk inventor). Obteniendo la siguiente Figura 4.10 y sus características físicas.

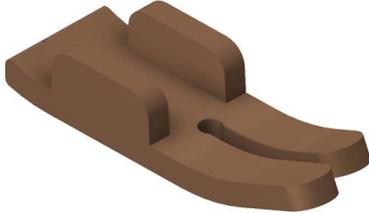
Pieza 1 - Superior		Pieza 2 - Inferior	
	<p>Volumen de la pieza = 1,5 cm³</p> <p>Peso= 16g.</p> <p>Material = Bronce (aleación de cobre y estaño)</p>		<p>Volumen de la pieza = 1,3 cm³</p> <p>Peso= 11g.</p> <p>Material = Bronce (aleación de cobre y estaño)</p>

Figura 4.10. Modelos del pie prensa tela en software CAD.

4.4. Diseño e impresión de molde

Siguiendo la metodología plateada en el capítulo 3 y los criterios para el diseño de molde planteados en el capítulo 2 , se diseñó el molde para inyectado de cera en el software CAD para la pieza 1 y 2 así como se muestra en la Figura 4.11 y 4.12, luego se convierte en el formato STL, el cual es compatible con la impresora 3D.

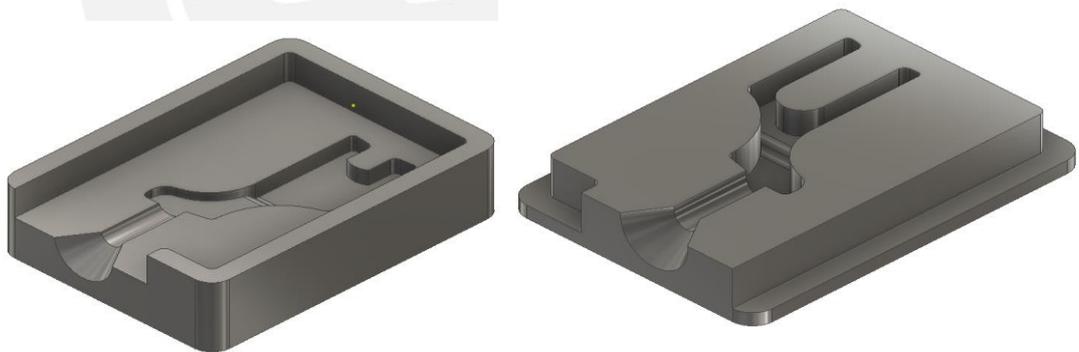


Figura 4.11. Molde para inyectado de cera correspondiente a la pieza 1.

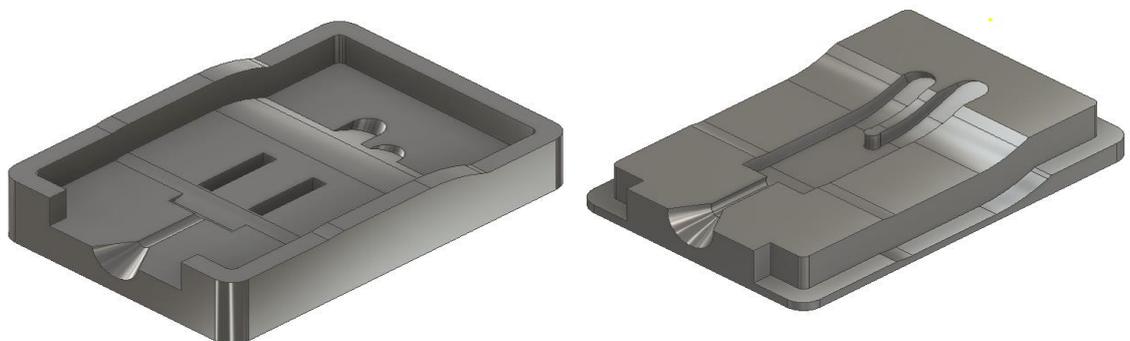


Figura 4.12. Molde para inyectado de cera correspondiente a la pieza 2.

En las siguientes Figuras 4.13 se observa el proceso de impresión capa por capa. Este proceso demoró aproximadamente 2:30 horas y se realizó en la sección VEO.



Figura 4.13 Proceso de impresión de los moldes para la Pieza1 y 2.

4.5. Desarrollo de la fundición por revestimiento

Una vez obtenido el molde impreso se realizan los siguientes pasos para obtener la pieza fundida en bronce.

4.5.1. Inyectado de cera

Este proceso se realizó bajo los parámetros de la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros para el inyectado de cera

Parámetros	
Tipo de Cera	Cera Kerr flex Plast
Temperatura de fusión	68°C
Tiempo de calentamiento	5 minutos
Presión aire de inyectado	Entre 3 y 10 libras
Tiempo de inyectado	5 a 7 segundos
Tiempo para extracción del molde	1 y 1:30 minutos

Se agregó los trozos de cera al inyector y luego se calentó hasta llegar a su temperatura de fusión. Si la cera se calienta demasiado esta tiene a adherirse al molde, esto generará rechupes y complicará la extracción del modelo. Por tal motivo, debemos contralar la temperatura con el termostato del inyector.

Durante el inyectado, presionar con ambas manos el molde, empujarlo contra la boquilla del inyector, como se muestra en la siguiente Figura 4.14, manteniendo un ángulo de 90° respecto a la salida del fluido del inyector.



Figura 4.14. Inyectado de cera en el molde impreso con tecnología polyjet.

Mantener empujando el molde al inyectar durante unos 5 segundos para evitar que ocurra un llenado incompleto del molde como se puede apreciar en la Figura 4.15.



Figura 4.15. Piezas de cera con problemas de llenado incompleto.

4.5.2 Armado de árbol de cera

Se seleccionan los modelos de cera que se emplearán para la fundición. Con una lima fina se le otorga un acaba final a la pieza de cera y se procede a armar un árbol con ayuda de una pinzas para soldar la cera (Figura 4.16).



Figura 4.16. Proceso de armada de árbol de cera

El siguiente paso, es pesar el árbol de cera para saber la cantidad de bronce se necesitará fundir.

Peso del árbol: 6.64 g

Densidad de la cera (ρ_{cera}): $0.9 \frac{g}{cm^3}$

Volumen de cera = $\frac{6.64 \text{ gr.}}{0.9} = 7.38 \text{ cm}^3$

Densidad del bronce (ρ_{bronce}): $8.9 \frac{g}{cm^3}$

Cantidad de bronce a emplear:

$$\text{Peso de bronce (g)} = \rho_{bronce} \times \text{Volumen de cera} =$$

$$8.9 \times 7.38 = 65.7 \text{ g}$$

Agregamos un 10% más de metal fundido, al resultado obtenido resultado, para evitar problemas de pérdida y tener un llenado completo, lo cual sería 72.6 g.

Luego, el árbol de cera se suelda a una tapa cilíndrica como se aprecia en la Figura 4.17. Esta es la tapa del cilindro donde se verterá el material refractario.



Figura 4.17. Soldar el árbol de cera a la tapa cilíndrica

4.5.3. Preparación del yeso Satín

Se siguió la recomendación del proveedor del material refractario para la preparación. Esta consiste en lo siguiente:

- Primero debemos tener las medidas del recipiente cilindro que se utilizará para agregar el yeso satín. Luego obtenemos el volumen y lo dividimos entre 20 para determinar el número de libras de revestimiento necesario para llenar el frasco.

Datos:

Diametro = 10 cm

Ato = 15 cm

Para determinar el contenido del frasco en pulgadas cubicas:

$$Volumen_{frasco\ redondo} = \pi \times 5^2 \times 15 = 1178.1cm^3 = 71.9inch^3$$

$$\frac{71.9}{20} = 3.595\ libras$$

La relación de agua y revestimiento se encuentra en el recuadro marcado en la Figura 4.18.

Heavy Castings Heavy Ladies Rings, Men's Rings & School Rings 38 ml water to 100 g powder						Regular Castings Ladies Rings, Pendants, Filigree & Intricate Wax Patterns 40 ml water to 100 g powder				
Weight / lbs.	grams	Water av. oz	ml	Yields cubic inch	Yields cubic cent.	Water av. oz.	ml	Yields cubic inch	Yields cubic cent.	
1/2	227	3.0	86	10.5	174	3.2	91	11	179	
1	454	6.1	172	21	349	6.4	182	22	359	
5	2268	31	862	107	1745	32	908	110	1794	
10	4535	61	1724	213	3490	64	1816	219	3589	
15	6803	92	2586	320	5235	96	2724	329	5383	
20	9070	122	3448	426	6980	128	3632	438	7178	
25	11338	153	4310	533	8725	160	4540	548	8972	

Figura 4.18. Relación de agua y revestimiento para la mezcla.

Entonces se tiene:

- Revestimiento 3.5 libras
 - 635 ml de agua
- Una vez obtenida la proporción de agua y revestimiento a utilizar, se procede a realizar la mezcla, vertemos ambos materiales al recipiente cilíndrico y mezclamos (Figura 4.19), con una espátula durante 3 a 4 minutos. Luego agregamos, aproximadamente, 20 gr. de alcohol (Figura 4.20), esto funcionará como antiadherente entre el material refractario y el modelo de cera.



Figura 4.19. Preparación de la mezcla de agua y revestimiento.



4.20. Adición de alcohol a la mezcla agua y revestimiento.

4.5.4. Vaciado del yeso

- La tapa cilíndrica, donde se soldó el árbol de cera, se coloca en la base del cilíndrico (Figura 4.21).



Figura 4.21. Preparación del recipiente cilíndrico con el árbol de cera.

- Después se esparce alcohol en el árbol de cera para evitar que el revestimiento se pegue a la cera (Figura 4.22).



Figura 4.22. Adición de alcohol al árbol de cera.

- Finalmente vertemos el refractario preparado hasta que el recipiente cilíndrico quede completamente lleno.



Figura 4.23. Vertido de la mezcla agua-revestimiento al cilindro que contiene el árbol de cera.

- Después de verter todo el revestimiento este se coloca a ciclo de vibración y vacío para tener una mezcla uniforme y evitar burbujas o nodos (Figura 4.24). Este proceso demandó un tiempo de 1.5 minutos [36].



Figura 4.24 Ciclo de vibración y vacío.

4.5.5. Fundición del molde de cera

- El recipiente cilíndrico se introduce a un horno de tal forma que la cera se funda y, por gravedad, salga por la parte inferior.
- El tiempo en el horno será de 4 horas a una temperatura de 250°C para evacuar la cera y eliminar la humedad del yeso (Figura4.25). En este caso se empleó un horno eléctrico modificado.



Figura 4.25. Molde de yeso en el horno para fundir y evacuar la cera.

- Luego el cilindro se coloca en un horno por un tiempo de 4 horas a una temperatura de 700°C (Figura 4.26). Esto tiene la finalidad de que el yeso se encuentre a una temperatura cercana a la del bronce fundido y evitar el choque térmico entre el metal fundido el molde cerámico. [35]



Figura 4.26. Elevar la temperatura a 700°C del molde de yeso.

4.5.6. Fusión y colado de metal.

- Para realizar el vertido de metal fundido se utilizó una máquina centrífuga como se aprecia en la Figura 4.27. Se empleó esta máquina, ya que utiliza la fuerza de inercia causada por la rotación para otorga una mayor presión al momento de verter el metal fundido. Esto tiene como consecuencia una mejor distribución del metal fundido en el molde de yeso. [29]



Figura 4.27. Máquina de centrifugado

- Se coloca el metal a fundir y el cilindro refractario en la máquina rotatoria. Con un soplete se funde el metal a una temperatura de 900 ° C, aproximadamente, luego se gradúa la velocidad de giro e inicia el proceso colado de metal fundido en el molde de yeso. Figuras 4.28 y 4.29.



Figura 4.28 Fundición del bronce



Figura 4.29 Inicio del vertido de metal fundido

- Al final del vaciado de metal fundido, con unas pinzas se extrae el cilindro refractario (Figura 4.30), lo sumergimos a un balde con agua y se rompe el yeso para extraer la pieza en bronce (Figura 4.31).



Figura 4.30. Extracción del molde yeso de la maquina centrifuga.



Figura 4.31. Sumergir el molde de yeso en un balde con agua.

- Con un cepillo metálico se remueve el yeso que esta adherido a la superficie del metal. También esta se sumerge en un ácido para ayudar a remover el material refractario (Figura 4.32).



4.32 Limpieza de la superficie de la pieza fundida.

- Por último, con un alicate se corta cada pieza de metal del árbol para luego continuar con el acabado final (Figura 4.33).



Figura 4.33. Pieza fundida final, sin acabado.

- Para concluir, a la pieza 1 y 2 se le realizó el acabado, el cual consistió en el pulido y un niquelado de cada una de las piezas (Figura 3.34 y Figura 3.35), para proporcionar resistencia a la corrosión y desgaste.



Figura 3.34. Pulido y niquelado, Pieza 1



Figura 3.35. Pulido y niquelado, Pieza 2

4.6. Variaciones dimensionales obtenido durante el proceso de fabricación del pie prensa tela

Una vez obtenido la pieza fundida se elaboró la tabla 4.4, en el cual se realizó las mediciones a las secciones que deberán encajar con la máquina. Se tomaron 4 medidas por sección, se halló el promedio de la contracción lineal de cada medida y el promedio total de la contracción lineal. Estas variaciones comprenden desde el momento que se realizó el molde en el software CAD hasta la pieza fundida.

La contracción lineal está definida por:

$$C_s = \frac{L_i - L_f}{L_i}$$

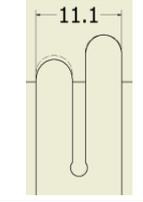
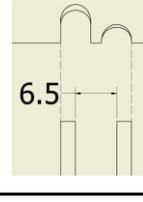
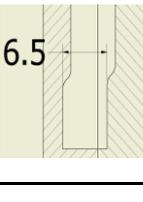
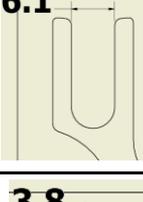
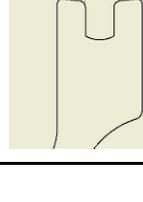
Donde:

C_s = Contracción lineal

L_i = Dimensión de la cavidad del molde

L_f = Dimensión del modelo final

Tabla 4.4. Contracciones obtenidas durante el proceso de fabricación del pie prensa tela.

Unidad de medida : milímetros (mm)						
Medida modelo en software 3D	Molde impreso	Modelo en cera		Pieza de metal fundida		Contracción lineal (%)
		Promedio		Promedio		
	10.95	10.75	10.74	10.65	10.68	3.83
10.70		10.70				
10.75		10.70				
10.75		10.65				
	6.45	6.35	6.38	6.30	6.33	2.69
6.40		6.30				
6.40		6.35				
6.35		6.35				
	6.55	6.35	6.38	6.25	6.28	3.46
6.40		6.30				
6.40		6.30				
6.35		6.25				
	6.15	6.15	6.01	5.95	5.90	3.28
5.90		5.85				
5.90		5.90				
6.10		5.90				
	3.95	3.90	3.85	3.85	3.81	-0.33
3.85		3.80				
3.85		3.80				
3.80		3.80				
Promedio de contracción lineal (%)						2.60

4.7. Implementación del proceso de fundición por revestimiento con ayuda del prototipado rápido en el laboratorio de manufactura de la sección de Ingeniería mecánica – PUCP

Debido a la falta de equipos en el área de fundición del laboratorio de manufactura de la PUCP. Se realizó el siguiente listado de equipos, utensilios y materiales para que el proceso de fundición por revestimiento sea realizable en las instalaciones de la universidad.

Primero se elaboró un alista de todos los equipos que están disponibles en el laboratorio de manufactura de la sección de ingeniería mecánica. Luego ver cuales se encuentran operativos o no y finalmente agregar los equipos, materiales y utensilios faltantes para el desarrollo de este tipo de fundición de acuerdo a las tablas 4.5, 4.6 y 4.7.

Tabla 4.5. Listados de equipos disponibles en la PUCP.

Equipos disponibles en el laboratorio de manufactura de la PUCP		
Equipo	Descripción	Estado
GF	Máquina para someter a ensayos de tracción a las probetas refractarias.	Operativo
GF	Maquina realizar ensayos de compresión a las probetas refractarias.	Inoperativo
GF	Tamizador, para separar el material refractario por granulometría.	Operativo
GF	Medidor de permeabilidad de probetas refractarias.	Operativo
GF	Compactadora.	Operativo
	Horno, máxima temperatura de trabajo: 300°C.	Inoperativo
Simpson Machinen AG	Mezclador de arena	Operativo
	Horno con crisol a GLP	Operativo

Tabla 4.6. Listado de equipos por implementar en la PUCP.

Equipos por implementar
Descripción
Inyectora de cera
Horno eléctrico con capacidad de 700°C
Soldador de cera

Tabla 4.7. Materiales y utensilios por implementar en la PUCP.

Materiales y utensilios por implementar
Descripción
Cera
Material refractario
Bisturí
Base de goma
Cilindros
Guantes resistentes al calor
Pinzas

CONCLUSIONES

- Se fabricó el pie prensa tela a base de bronce, material empleado como caso práctico. La metodología planteada para el proceso de fabricación de este producto, por medio de la fundición por revestimiento con ayuda del prototipado rápido, fue de gran ayuda pues se necesitó una secuencia de pasos detallados y parámetros de trabajo que se deben seguir para obtener un buen producto.
- Se concluyó que la tecnología de prototipado rápido si se puede aplicar como una ayuda en la fundición por revestimiento. De acuerdo a la tabla de valoración, de las tecnologías existentes en la PUCP, realizadas en el capítulo 4 se encontró que la tecnología de impresión con polyjet es la más adecuada para la impresión de moldes para el inyectado de cera.
- De los materiales con los que trabaja la objet 30pro, se seleccionó el material de impresión verowhite debido que tiene buena reproducción de los detalles en la impresión, resistencia mecánica y es accesible en el mercado peruano.
- Para piezas que no requieran de un buen acabado superficial, se puede emplear la tecnología FDM e imprimir el prototipo en ABS. La ventaja es que el material de impresión en un termoplástico, el cual se puede emplear o sustituir a un modelo de cera. Sin embargo, se debe realizar un estudio del material refractario y aglutinante, adecuado, para su empleo.
- Se realizó una impresión para hallar de manera experimental la precisión de la impresora object 30pro con tecnología polyjet, la cual es de 0.1mm. Este dato fue importante para otorgar el ajuste adecuado a los moldes (cada molde se dividió en dos partes) y evitar un juego excesivo del molde durante el inyectado.
- Para el inyectado de cera se seleccionó la cera Kerr flex Plast, debido a sus propiedades reológicas, manipulación, inyectado y control dimensional. En el caso del material refractario, se empleó el yeso satín 20, ya que es resistente a temperaturas de trabajo de 1200°C (mayor a la temperatura de fusión del bronce 900°C), tiene buena estabilidad dimensional y de bajo costo.

- Durante el inyectado de la cera solo se pudo controlar la temperatura con el termostato de la máquina. La presión de inyectado se proporcionó de manera empírica, ya que la máquina no tenía un manómetro para controlar ese parámetro. Por tal motivo, se obtuvieron piezas de cera con problemas de llenado incompleto y rechupes.
- El horno empleado para el secado del yeso y la fundición de la cera es adaptado y no posee un sistema de extracción y recuperación de la cera. Por ese motivo, la cera empleada durante el proceso se perdió. Existen hornos especiales para este proceso, lo cual reduce los costos de fabricación.
- Al final del proceso de fabricación del pie prensa tela se ha obtenido una contracción lineal de 2.6%, desde la medida del modelo en el programa CAD hasta la pieza de metal fundido.



Bibliografía

- [1]. KREKELER, K.A. “Fundición por modelo perdido”. Microfundición. Barcelona: Gustavo gili, pp. 16.
- [2]. CHARTIER, Thierry y BADEV Alexander, “Rapid prototyping of ceramics” Handbook of advanced ceramics. Oxford: Elsevier.
- [3]. CHANG, Kuang-Hua, “Rapid prototyping”. Production manufacturing and cost estimating using CAD/CAE. Oxford: Elsevier, pp.194.
- [4]. J.P Kruth, “Material inccress manufacturing by rapid prototyping technologies”.pp. 603-614.
- [5]. K.G. Swift and J.D. Booker, “Rapid prototyping processes”. Manufacturing process selection handbook. Oxford: Elsevier. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080993607000082>. [Último acceso: 30 Junio 2015].
- [6]. KALPAKJIAN, “Manufacturing Processes”. Fifth edition. New Jersey: Prentice Hall. 2008.
- [7]. CUSTOMPARTNET “Jetted photopolymer”. [En línea]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>. [Último acceso: 20 Julio 2015].
- [8]. ARCAM “Electron beam melting”. [En línea]. Available: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>. [Último acceso: 15 Octubre 2015].
- [9]. KAMRANI Ali and ABOUEL Emad. “Engineering design and rapid prototyping”. London, 2010.
- [10]. DAHOTRE, Narendra and HARIMKAR, Sandip. “Laser Fabrication and Machining of Materials”. New Yrok, 2008.

- [11].MUNISH CHHABRA RUPINDER SINGH, (2011),"Rapid casting solutions: a review", Rapid Prototyping Journal, Vol. 17 Iss 5 pp. 328 350.
- [12].B. Mueller and D. Kochen. "Laminated object manufacturing for rapid prototyping and pattern making in foundry industry". Computers in Industry. Pp.47-53.
- [13].STEEN William and MAZUMDER Jyotirmoy. "Laser material processing". New York, 2010.
- [14].EXONES digital, "Sand printing process". [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=LFGnjcoeDng>. [Último acceso: 5 Mayo 2015].
- [15].TROMANS, G. "Development in Rapid Casting", Wiley,New York,2004.
- [16].GOENGINNEER. "3D printing 101 – FDM & Polyjet Basics". [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=BAJMi8n2wso>. [Última consulta: 20 Setiembre 2014].
- [17].STRATASYS. "Tecnologías". [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/es>. [Última consulta: 2 Abril 2015].
- [18].SMITH, William and HASHEMI, Javad. "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales", McGraw-Hill. España, 2004.
- [19].CHIMAK 3D. "Tecnología ABS". [En línea]. Available: <http://www.chimak3d.com/>. [Última consulta: 8 Setiembre 2015].
- [20].SICNOVA 3D. "Cera". [En línea]. Available: <http://sicnova3d.com/impresoras-3d/cera>. [Última consulta: 16 Octubre 2015].
- [21].XIELI MOULD. "Molde de inyección de zapato cerrado y semi-cerrado en goma EVA". [En línea]. Available: <http://www.shoe-mould.es/1-6-eva-close-shoe-mould.html>. [Última consulta: 23 Octubre 2015].
- [22].INTEREMPRESAS. "Unilever utiliza moldes de inyección impresos en 3D de

- Stratasys". [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/132369-Unilever-utiliza-moldes-de-inyeccion-impresos-en-3D-de-Stratasys.html>. [Última consulta: 12 Noviembre 2015].
- [23].P.M. Dickens R. Stangroom M. Greul B. HolmerK.K.B. Hon R. Hovtun R. Neumann S. Noeken D. Wimpenny, (1995),"Conversion of RP models to investment castings", Rapid Prototyping Journal, Vol. 1 Iss 4 pp. 4 – 11.
- [24].VALERIO, Faccenda, "Handbook of investment casting". The lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture. London, 2003.
- [25].3D CAD PORTAL. "SolidScape y LSR Design Studio usan el proceso de moldes de silicón como método de fabricación de herramental rápidos". 3D CAD Portal [En línea]. Available: <http://www.3dcadportal.com/solid-landscape-y-lsr-design-studio-usan-el-proceso-de-moldes-de-silicon-como-metodo-de-fabricacion-de-moldes-rapidos.html>. [Última consulta: 29 Setiembre 2015].
- [26].MORENO, José. "Obtención de ceras para el proceso de fundición a la cera perdida". Bogotá.
- [27].ASM, handbook committee. "VOLUMEN15 casting". ASM Handbook.
- [28].R. Kohl, M. Alcoba, M. Bruno, P. Varela, N. Cotella, O. Radevich. "Materiales para modelos". Fundición a la cera perdida. 2003.
- [29].UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. "Materiales refractarios". [En línea]. Available:http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19_Apunte%20Refractarios.pdf. [Última consulta: 15 Agosto 2015].
- [30].NEXTBAR. "Bentonita fundición". [En línea]. Available: <http://nextbar.net/tecnica/HTE025%20BENTONITA%20FUNDICION.pdf>. [Última visita: 4 Setiembre 2015].
- [31].AUERKARE, Pertti. (1996). "Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics". [En línea]. Available: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1996/T1792.pdf>. [Última consulta: 4 Setiembre 2015].

- [32].KALPAKJIAN Serope and SCHMID Steven. “Manufactura, ingeniería y tecnología”. Cuarta edición. Pearson Educación. México, 2002.
- [33].SÁNCHEZ Claudia and CORTÉS Carlos. “Conceptos de diseño para manufactura (DFM) de piezas microfundidas” Revista ingeniería e investigación. Vol. 25 No. 3, Diciembre: 2005, pp. 49-60.
- [34].CAST METALS INSTITUTE, Inc., 10 Rules For Cost Effective Casting Design, Metal Casting Design, 2002.
- [35].HITCHINER MANUFACTURING Co. Inc., Designing for investment casting, Technical Updated 2D1.
- [36].BRALLA James, Handbook of Product Design for Manufacturing. A practical guide to low cost production, Cap. 5.3, Fundición en molde con revestimiento, R.J. Spinosa, Ed. McGraw-Hill, 1993.
- [37].BENSEDNJAK Alejandro. “Los moldes”. Universidad Politécnica de Cataluña. [En línea]. Avaliable: https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiP88Dim7fJAhVBpx4KHfuqBc0QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Focw.upc.edu%2Fdownload.php%3Ffile%3D15012220%2F22638-3142.pdf&usg=AFQjCNGECe-7jsl1q_MRoSIXpDfBS3qxFAQ. [Última consulta: 27 Octubre 2015].
- [38].TECNOLOGIA&INSUMOS. “Instrucciones de manejo”. [En línea]. Avaliable: http://www.tecnoinsumos.com/GUIA_CONSEJOS_TECNICOS_KERR.pdf. [Última consulta: 15 Setiembre 2015].
- [39].TECNOLOGIA&INSUMOS. “Ciclos de quemado”. [En línea]. Avaliable: http://www.tecnoinsumos.com/GUIA_PARA_CASTING_SRS.pdf. [Última consulta: 15 Setiembre 2015].