

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción.**

“Estudio de las Pinturas Refractarias en el Proceso de Fundición
por el Método de Espuma Perdida en Aleaciones No Ferrosas”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Mario Armando Freire Torres

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Ignacio Wiesner F. y a INTRAMET por la confianza y colaboración en la realización de este proyecto final de carrera.

A mis tíos Rosa Piedad, Manuel Horacio (+), Gloria Azucena y Carlos Antonio, a mis primos Tomás Julio y Luís Xavier, mis compañeros de INTRAMET, a todos ellos por su invaluable apoyo para la culminación de mi carrera.

DEDICATORIA

A Dios.

A mi madre María Concepción
Torres Parra y a mi padre
Mario Enrique Freire Lascano.

A mi hermana Mónica Paulina
Freire Torres y a mi hermano
político Jorge Fernando
Vargas Mayorga.

A mis sobrinos Andrea
Carolina, Carlos Fernando y
David Alejandro.

A todos ellos por su infinito
cariño y amor.....

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Dra. Cecilia Paredes V.
VOCAL

Ing. Andrés Rigail C.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Mario Armando Freire Torres

RESUMEN

Primeramente, se describió los principales aspectos que influyen el método de fundición por espuma perdida en aleaciones metálicas de tipo no ferrosos, mostrando también entre otras cosas las principales características del aditivo de estudio llamado agar, y la tecnología del acabado superficial en piezas metálicas.

Posteriormente, se llevó a cabo la experimentación, es decir, la fabricación de la pintura refractaria confeccionada con materiales fáciles de obtener dentro del mercado nacional con la respectiva adición de agar, luego se aplicó este compuesto refractario a un modelo de impulsor de bomba tipo Byron – Jackson® fabricado en espuma de poliestireno expandido, que luego se fundió en aleación de aluminio SAE 315.

Además, se evaluó la pintura refractaria fabricada durante el transcurso de esta tesis, en base a otro compuesto refractario de marca cuyo origen es extranjero de marca AREMCO®, principalmente se dio importancia a los costos y a las propiedades reológicas de pintado.

Finalmente se obtuvo que la adición de agar en un porcentaje de 0.2% a la pintura refractaria brindó un acabado superficial del impulsor de 12.7µm.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	2
1.1 Descripción del proceso de fundición por espuma perdida.	3
1.2 Descripción y características del Agar-Agar.....	19
1.3 Características tecnológicas de la pintura refractaria.....	24
1.4 Acabado superficial en la pieza fundida.....	32

CAPÍTULO 2

2. PROCESO EXPERIMENTAL.....	37
2.1. Objetivo y procedimiento.....	37
2.2. Materiales y equipos utilizados.....	40

2.3. Elaboración y ensayos en las pinturas refractarias con Agar-Agar....	41
2.4. Ensayos de aplicación de la pintura en modelos de poliestireno.....	51
2.5. Elaboración de los moldes en arena y colado en aluminio.....	59

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
3.1. Evaluación de lo resultados experimentales de la pintura.....	68
3.2. Evaluación del acabado de las piezas fundidas.....	69
3.3. Evaluación del costo de fabricación.....	70

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
--	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

A	Área
AA	Aluminum Association
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANSI	American National Standards Institute
BCC	Body – Centered Cubic Crystal Structure
BTU	British Thermal Unit
CAD	Computer Aided Design
cm	Centímetros
cps	Centipoises
EPS	Poliestireno expandido
FAO	Food and Agriculture Organization (United Nations)
FCC	Face – Centered Cubic Crystal Structure
Fig	Figura
ft	Pies
g	Gramos
h	Horas
HB	Hardness Brinell (Dureza Brinell)
HCP	Hexagonal Close – Packed Crystal Structure
in	Pulgadas
INTRAMET	Industria de Transformación Metalúrgica
IVA	Impuesto al Valor Agregado
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramos
kgf	Kilogramos fuerza
ksi	1000 psi
LFC	Lost Foam Casting
lbm	libras masa
lbf	libras fuerza
LWC	Lost Wax Casting
m	Metros

mil	1000 Micropulgadas
mm	Milímetros
MPa	Megapascales
N	Newtons
n	Grado de Polimerización
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
pH	Potencial de Hidrogeno
PM	Peso molecular
PS	Poliestireno
psi	Libras fuerza por pulgada cuadrada
PVC	Cloruro de polivinilo
RPM	Revoluciones por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers
UNS	Unified Numbering System for Metals and Alloys
V	Volumen
W	Watts
∫	Integral
∑	Sumatoria
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
μm	Micrómetros
μin	Micropulgadas
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
US\$	United States Dollar (Dólar estadounidense)
®	Marca registrada
°	Grados sexagesimales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Fórmula química del estireno.....	05
Figura 1.2	Química del estireno a partir del etilbenceno.....	06
Figura 1.3	Proceso químico de polimerización.....	06
Figura 1.4	Química del poliestireno (PS).....	08
Figura 1.5	Proceso de fabricación de la espuma de poliestireno.....	09
Figura 1.6	Estructura interna del poliestireno expandido.....	09
Figura 1.7	Diagrama de fase de sílice.....	12
Figura 1.8	Base de arena sílice en caja de moldeo.....	13
Figura 1.9	Confección del modelo y aspersion-secado de la pintura.....	13
Figura 1.10	Colocación del modelo sobre la base de arena.....	14
Figura 1.11	Vibración y homogenización de la arena en la caja.....	14
Figura 1.12	Esquematización del proceso de fundición o colado.....	15
Figura 1.13	Diagrama de flujo o de bloques del proceso de fundición por el método de espuma perdida.....	16
Figura 1.14	Algas rojas o rodofíceas coralinas.....	20
Figura 1.15	Fórmula química de la agarobiosa o agar.....	21
Figura 1.16	Aspecto del agar procesado en polvo.....	22
Figura 1.17	Comportamiento del agar frente a la temperatura.....	23
Figura 1.18	Comportamiento de la pintura al momento del colado.....	26
Figura 1.19	Conos Seger reblandecidos por la temperatura.....	28
Figura 1.20	Formas de la textura superficial.....	33
Figura 1.21	Desviaciones con respecto a la superficie.....	34
Figura 2.1	Modelo del Impulsor de bomba en 3D realizada en CAD.....	39
Figura 2.2	Área y volumen total del impulsor hallados mediante CAD....	39
Figura 2.3	Sílice con bolas de alumina en el contenedor.....	44
Figura 2.4	Molino de bolas de la FIMCP en funcionamiento.....	44
Figura 2.5	Pintura refractaria tipo E a base de agua.....	47
Figura 2.6	Agitador mecánico-eléctrico trabajando a 200 RPM.....	48
Figura 2.7	Viscosímetro de marca Brookfield® midiendo viscosidad dinámica o absoluta de la pintura refractaria.....	49
Figura 2.8	Patrón de espuma de poliestireno del impulsor.....	52

Figura 2.9	Mecanización del patrón de espuma de poliestireno.....	52
Figura 2.10	Diseño final de los alabes del impulsor hecho en EPS.....	53
Figura 2.11	Diagrama de cuerpo libre de la gota de pintura refractaria....	55
Figura 2.12	Probeta de vidrio no templado usado en la aplicación de la pintura refractaria para probar su tensión superficial.....	56
Figura 2.13	Probeta ortoédrica de EPS recubierta con pintura seca.....	57
Figura 2.14	Longitud de grietas sobre EPS versus concentración del agar (%)......	58
Figura 2.15	Momento de la aplicación de la pintura refractaria sobre el modelo de impulsor hecho en EPS (Inmersión).....	59
Figura 2.16	Horno para fundición de metales no ferrosos con gas licuado de petróleo (GLP) como combustible.....	62
Figura 2.17	Fundición en aleación de aluminio SAE 315 del modelo a base de espuma de poliestireno expandido (EPS).....	63
Figura 2.18	Pieza final fundida por LFC y realizado el mecanizado de limpieza para acabado final de presentación.....	64
Figura 2.19	Disco comparador de rugosidad superficial.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Grados de Polimerización n y Peso Molecular PM.....	08
Tabla 2	Diámetros de Perla de Poliestireno Expandido.....	11
Tabla 3	Contracción Volumétrica de Metales.....	11
Tabla 4	Composición en Porcentajes de la Pintura.....	26
Tabla 5	Principales Materiales Refractarios.....	29
Tabla 6	Principales Materiales de Suspensión.....	30
Tabla 7	Principales Materiales Dispersantes	31
Tabla 8	Diferentes Pinturas Refractarias para el Proceso de Fundición en Espuma Perdida (LFC).....	42
Tabla 9	Concentraciones de agar según Muestra de Pintura Refractaria Tipo E.....	50
Tabla 10	Composición Final de la Pintura Refractaria.....	50
Tabla 11	Designaciones de la Aleación de Aluminio.....	61
Tabla 12	Propiedades de la Aleación de Aluminio SAE 315.....	61
Tabla 13	Características del Disco Comparador.....	65
Tabla 14	Fórmula Final de la Pintura Refractaria Óptima.....	68
Tabla 15	Propiedades Físico – Químicas de la Pintura.....	69
Tabla 16	Costos de la Pintura Refractaria.....	75

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo general, el mejoramiento del acabado superficial de componentes metálicos fundidos mediante el método de modelo perdido, más específicamente por el método de espuma perdida en aleación de tipo no ferrosa, cuyos valores de rugosidad deben estar inscritos dentro del rango comprendido entre 1.5 a 12 μm .

Entre los principales objetivos específicos propuestos para el desarrollo de esta tesis, se tienen los siguientes:

- Formular un recubrimiento refractario fabricado con materiales disponibles en el mercado nacional con bajos costos, además de presentar óptimas propiedades al momento de su aplicación en espuma de poliestireno.
- Comprobar las bondades de la adición a la pintura refractaria formulada de un compuesto polimérico de origen orgánico de nombre agar o agar – agar, para concentraciones del orden del 0.1 al 1%.
- Evidenciar la disminución de los costos finales de manufactura y de materia prima de la pintura refractaria elaborada con respecto a los costos finales de un recubrimiento extranjero fabricado por la empresa AREMCO® de similares características, para de esta manera analizar la factibilidad de su posible comercialización dentro del país.

CAPITULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los procesos de fundición de metales se dividen en dos grandes grupos de acuerdo al tipo de molde:

- Fundición en moldes desechables.
- Fundición en moldes permanentes.

Dentro del conjunto de procesos de fundición en moldes desechables encontramos al proceso de fundición por espuma perdida, conocido en inglés como Lost Foam Casting (LFC), el mismo que será descrito con detalle en este capítulo. Además se señalarán los aspectos fundamentales que intervienen en este proceso de fundición por molde perdido.

1.1 Descripción del proceso de fundición por espuma perdida.

Los procesos de fundición de metales en moldes desechables o no permanentes forman un grupo de enorme importancia dentro de la investigación y desarrollo de la producción de componentes mecánicos alrededor del mundo durante el siglo XX.

Dichos procesos son principalmente usados para la construcción de componentes con geometría compleja y buen acabado superficial, los mismos que son casi imposibles de fabricar por medio de los métodos convencionales de manufactura. Los dos métodos principales que constituyen este grupo son en orden de importancia los siguientes:

- Fundición por el método de cera perdida o también denominado en inglés Lost Wax Casting (LWC).
- Fundición por el método de espuma perdida o también denominado en inglés Lost Foam Casting (LFC).

El presente proyecto se centrará en detallar las bondades presentadas por el segundo proceso, el cual consiste en la fundición de metales por espuma perdida, y aún más específicamente se detallará la intervención de la pintura refractaria o llamada en inglés "Refractory Coating".

Para comenzar debemos tener en cuenta varios factores además de la secuencia que forma parte del proceso de fundición por espuma perdida según detalla la referencia “ASM Handbook Volume 15 Casting”, debido a lo cual se mencionará los más importantes que intervienen en la misma.

- Características del material del modelo en espuma
- Características del moldeo en arena refractaria
- Características de los metales no ferrosos fundibles
- Características de la pintura refractaria y aditivos
- Características de acabado superficial final

Características del material del modelo de espuma.

Generalmente, el material más empleado en la confección de los modelos, es la espuma de poliestireno, llamado por su denominación en inglés Expanded Polystyrene (EPS) o por su denominación en el medio ecuatoriano como Espuma Flex®; una fabricación adecuada del modelo influirá de sobremanera en la calidad de la pieza metálica final, es por eso que es importante mencionar las principales características y métodos de manufactura de este material polimérico, los cuales se detalla a continuación.

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico fabricado a partir del monómero estireno que químicamente es un hidrocarburo

aromático insaturado que presenta la fórmula siguiente mostrada en la figura 1.1.

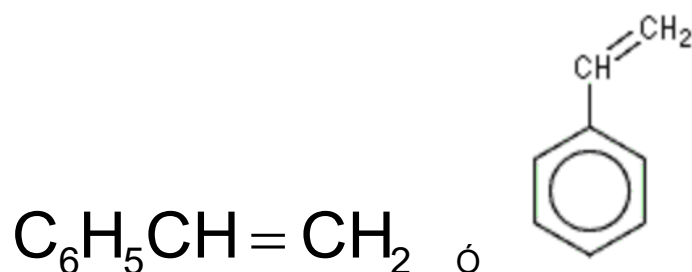


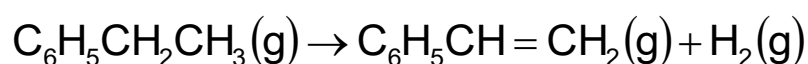
FIGURA 1.1 FÓRMULA QUÍMICA DEL ESTIRENO

El estireno o feniletano es un líquido con punto de ebullición 145°C y punto de solidificación -30.6°C. Si se encuentra puro, su olor es agradable y suavizado, por el contrario, cuando comúnmente entra en contacto con el aire y este reacciona con los aldehídos presentes en el mismo, su olor es irritante.

El estireno puede ser obtenido industrialmente mediante varios métodos, entre los cuales, el más utilizado en la actualidad es el de deshidrogenación del etilbenceno.

El etilbenceno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_3$) es obtenido a partir del etileno ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$) y del benceno (C_6H_6) por extracción del alquitrán de hulla.

La deshidrogenación del etilbenceno promovido por la acción del calor y en presencia de óxidos metálicos, generalmente, óxido de zinc (ZnO) a una temperatura del orden de los 600 °C a 800 °C, genera una reacción química endotérmica y presencia de presión baja, la misma que se encuentra descrita en la siguiente ecuación.



ó

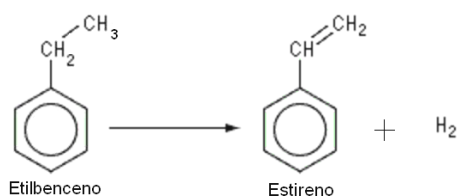


FIGURA 1.2 QUIMICA DEL ESTIRENO A PARTIR DEL ETILBENCENO

La polimerización es el proceso químico mediante el cual varias moléculas (generalmente hidrocarburos) o también llamados monómeros (A) se repiten y unen entre sí en un número específico de unidades (n) dando lugar a la formación de una cadena larga denominado polímero, este reacción se detalla en la ecuación siguiente.

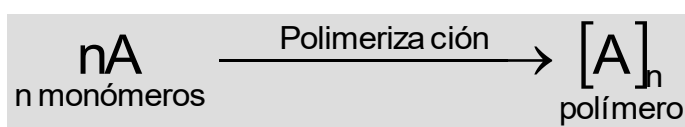


FIGURA 1.3 PROCESO QUÍMICO DE POLIMERIZACIÓN

Por el proceso de polimerización, los polímeros se pueden clasificar en polímeros de condensación y polímeros de adición.

Las reacciones de condensación producen diferentes longitudes de polímeros, mientras que las reacciones de adición producen longitudes específicas.

Por otro lado, las polimerizaciones por condensación generan pequeñas cantidades de subproductos, como agua, amoníaco y etilenglicol, mientras las reacciones de adición no producen ningún subproducto.

Algunos polímeros típicos de condensación son el nylon, los poliuretanos y los poliésteres.

Entre los polímeros de adición se encuentran el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo y el poliestireno.

Los polímeros del poliestireno tienen importancia comercial con grado de polimerización o número de monómeros n entre 1000 y 3000.

Los valores típicos de grado de polimerización n y peso de molecular PM para polímeros termoplásticos se hallan tabulados en la tabla 1.

TABLA 1
GRADOS DE POLIMERIZACIÓN n Y PESO MOLECULAR PM

Polímero	Grado de polimerización	Peso molecular
Poliétileno (PE)	10000	300000
Poliestireno (PS)	3000	300000
Cloruro de polivinilo (PVC)	1500	100000
Nylon	120	15000
Policarbonato (PC)	200	40000

El poliestireno es sostenido a través de calor o catalizadores, tales como peróxidos. La reacción es exotérmica, por lo tanto el calor es dado solamente para comenzar la reacción.

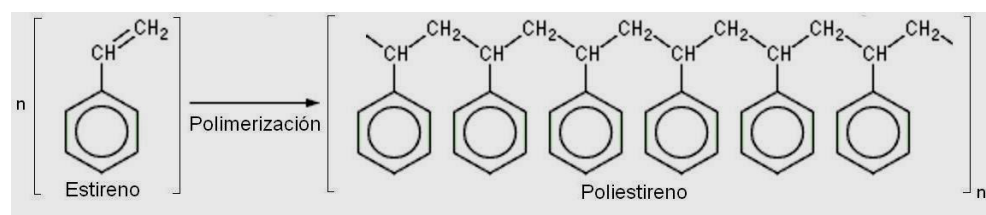


FIGURA 1.4 QUÍMICA DEL POLIESTIRENO (PS)

Las espumas de poliestireno se conforman por extrusión y moldeo; en la extrusión se alimenta un agente de soplado químico o físico (comúnmente gas pentano C_5H_{12}) en la fusión del polímero al final del cilindro de extrusión del dado.

La figura 1.5 muestra el proceso de fabricación del poliestireno expandido.

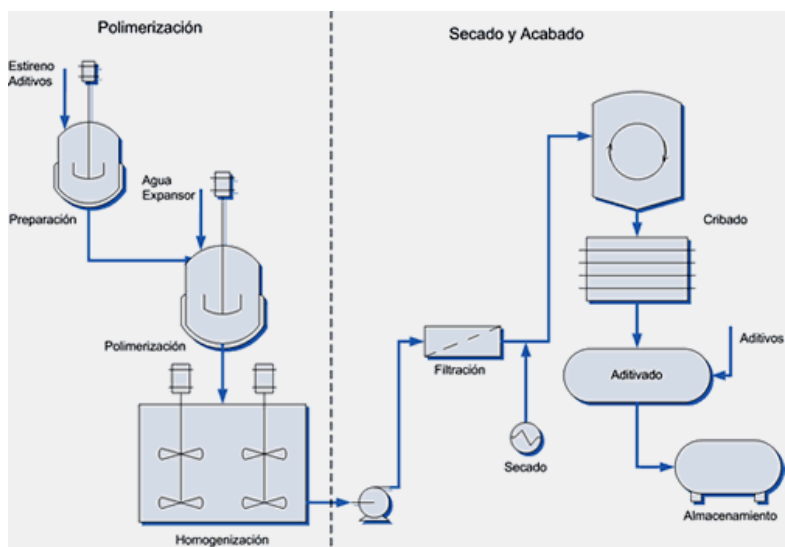


FIGURA 1.5 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA ESPUMA DE POLIESTIRENO

Por tanto la extrusión produce polímero expandido, de esta forma se fabrican láminas y tableros, los cuales son cortados para formar paneles para paquetería o embalaje en la mayor parte de su producción, secciones de aislante térmico y para la industria metalúrgica.

La estructura de las perlas del poliestireno expandido se presenta en la figura 1.6.

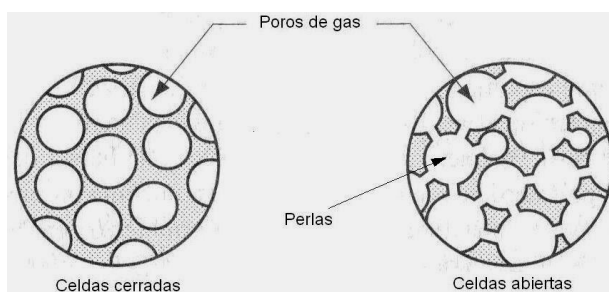


FIGURA 1.6 ESTRUCTURA INTERNA DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO

Una vez obtenida la lámina de poliestireno expandido, se tiene que prepararla para que tome la forma del modelo a fundir, es decir, confeccionarlo en una sola parte (monopieza) si es posible o en otros casos confeccionarlos por partes (multipiezas) y luego ensamblarlos con pegamento caliente o cemento de contacto, para este propósito, en el caso de gran número de unidades es decir producción en serie, la planta metalúrgica debe poseer una sección especializada en confección de modelos.

Las variables presentes que se deben tener en cuenta al momento de la manufactura de los patrones como son:

- Contracción del metal a fundir
- Diseño del modelo (Multipiezas ensambladas o monopieza)
- Diseño de bebedero
- Diseño de mazarotas y enfriadores

Para seleccionar la espuma óptima para el proceso de fundición, el grado del poliestireno expandido juega un papel preponderante en el mismo, este depende del diámetro de la perla del mismo.

Para la fabricación de modelos se escoge el grado T o X según la descripción de la tabla 2, esto se lo realiza a fin de obtener un mejor acabado final de la pieza fundida, para esto se lo clasifica según su uso y rango de diámetros de perla.

TABLA 2

DIÁMETROS DE PERLA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

Grados	Rango de diámetros de perla		Uso
	mm	in	
A	0,83 - 2,0	0,033 - 0,078	Aislamiento
B	0,58 - 1,2	0,023 - 0,047	Empaques
C	0,33 - 0,71	0,013 - 0,028	Copas
T	0,25 - 0,51	0,010 - 0,020	Espuma perdida
X	0,20 - 0,33	0,008 - 0,013	Espuma perdida

Teniendo en cuenta que la confección de los modelos de poliestireno depende de la contracción de los metales a fundir, se presenta la tabla 3 donde se evidencian los valores característicos de contracción volumétrica de metales y aleaciones no ferrosos y ferrosos.

TABLA 3

CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE METALES

Metal o aleación	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación (%)	Contracción térmica del sólido (%)
Aluminio	7,0	5,6
Aleación de aluminio	7,0	5,0
Fundición de hierro gris	1,8	3,0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3,0
Fundición de acero al bajo carbono	3,0	7,2
Cobre	4,5	7,5
Bronce al estaño (Cu - Sn)	5,5	6,0

Características de moldeo en arena refractaria

Para el proceso de moldeo, se utiliza comúnmente arena sílice (SiO_2) con un grado de criba ASTM 70 obtenida de los yacimientos de la provincia de Zamora Chinchipe cuya pureza es de aproximadamente el 98%, la misma que es adquirida por la industria metalúrgica INTRAMET – WIESNER INOX® como constituyente principal de la arena de moldeo para fundición por gravedad tanto en aleaciones ferrosas como no ferrosas. La composición química de la arena y la temperatura de trabajo del metal fundido determina la transición de la arena sílice, este presentó dos fases en el proceso de la fundición (cuarzo α a cuarzo β). El comportamiento de sílice se detalla en la figura 1.7

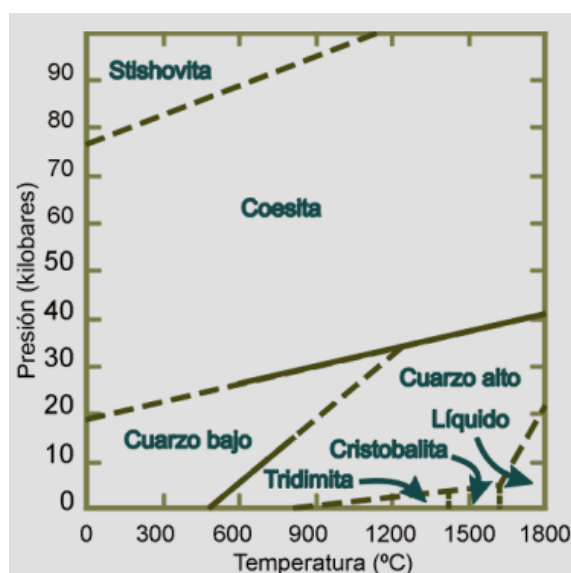


FIGURA 1.7. DIAGRAMA DE FASE DE SÍLICE

En la descripción del proceso de moldeo propiamente dicho; se debe colocar sílice en la caja de moldeo a un espesor de 40 a 50 mm, para generar una base adecuada en la cual se va a colocar el modelo a fundir hecho de espuma de poliestireno expandido como se detalla en la figura 1.8.

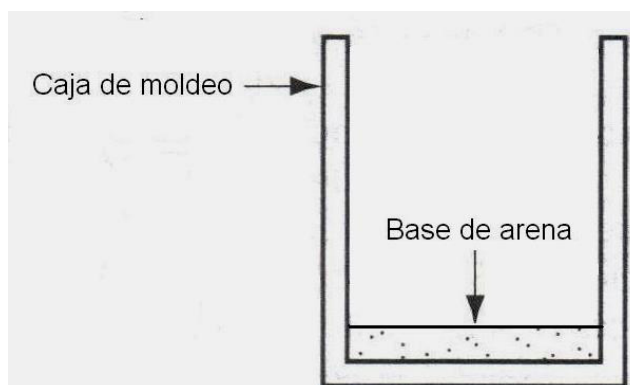


FIGURA 1.8. BASE DE ARENA SÍLICE EN CAJA DE MOLDEO

Seguido a esto el modelo de espuma fabricado se recubre con pintura refractaria; una vez seco al ambiente o en un horno preparado, se procede a colocar el modelo de espuma sobre la base de arena como lo detallan las figuras 1.9 y 1.10.

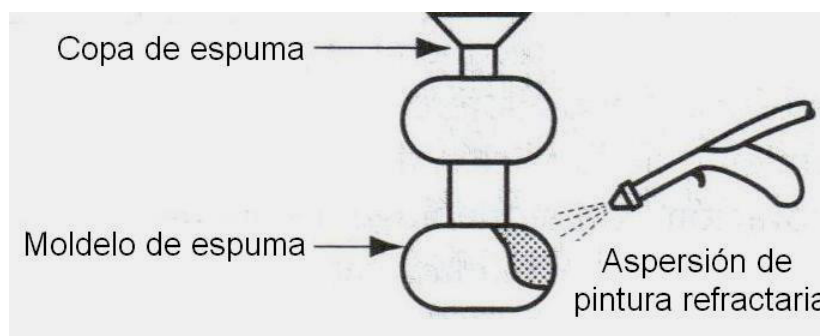


FIGURA 1.9. CONFECCIÓN DEL MODELO Y ASPERSIÓN-SECADO DE LA PINTURA

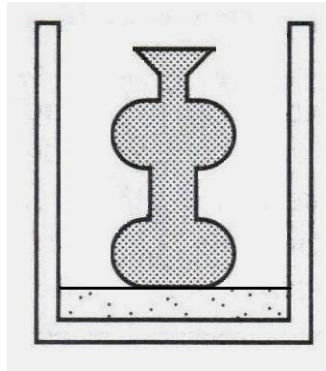


FIGURA 1.10. COLOCACIÓN DEL MODELO SOBRE LA BASE DE ARENA

Para el llenado de la caja de moldeo, la arena sílice tiene que ser colocado en un tamizador - vibrador para homogenizar su interior, figura 1.11.

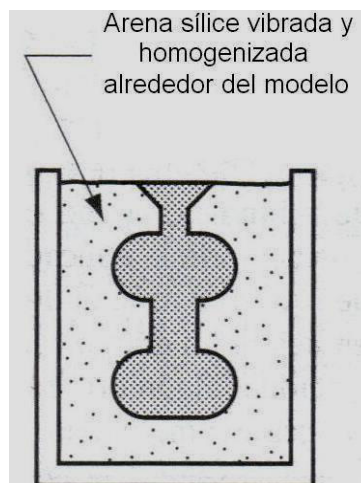


FIGURA 1.11. VIBRACIÓN Y HOMOGENIZACIÓN DE LA ARENA EN LA CAJA

Se pueden usar varios métodos para hacer los patrones, dependiendo del volumen de producción. Para fundiciones únicas, la espuma de poliestireno se corta manualmente en tiras largas y se ensamblan para formar el modelo.

En producción a mayor escala, se necesitaría diseñar e implementar una zona especializada dentro de la planta de producción destinada para la fabricación en serie de los modelos hechos en espuma.

La principal ventaja significativa de este método es que el modelo no necesita removerse del molde, este aspecto de trascendental importancia simplifica el proceso de fundición enormemente.

La principal desventaja que presenta este procedimiento es que siempre se necesita un nuevo modelo para cada colado de metal.

La esquematización del proceso de colado por el método de espuma perdida se evidencia en la figura 1.12.

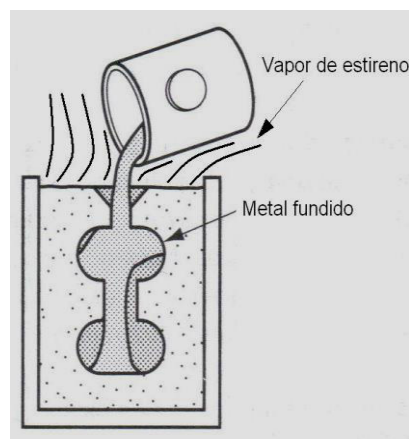


FIGURA 1.12. ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN O COLADO

Los detalles de la secuencia del proceso de fundición por medio de modelo de espuma perdida o también llamado modelo vaporizable

se encuentra esquematizado en diagrama de flujo o diagrama de bloques el mismo que se ilustra y describe en la figura 1.13.

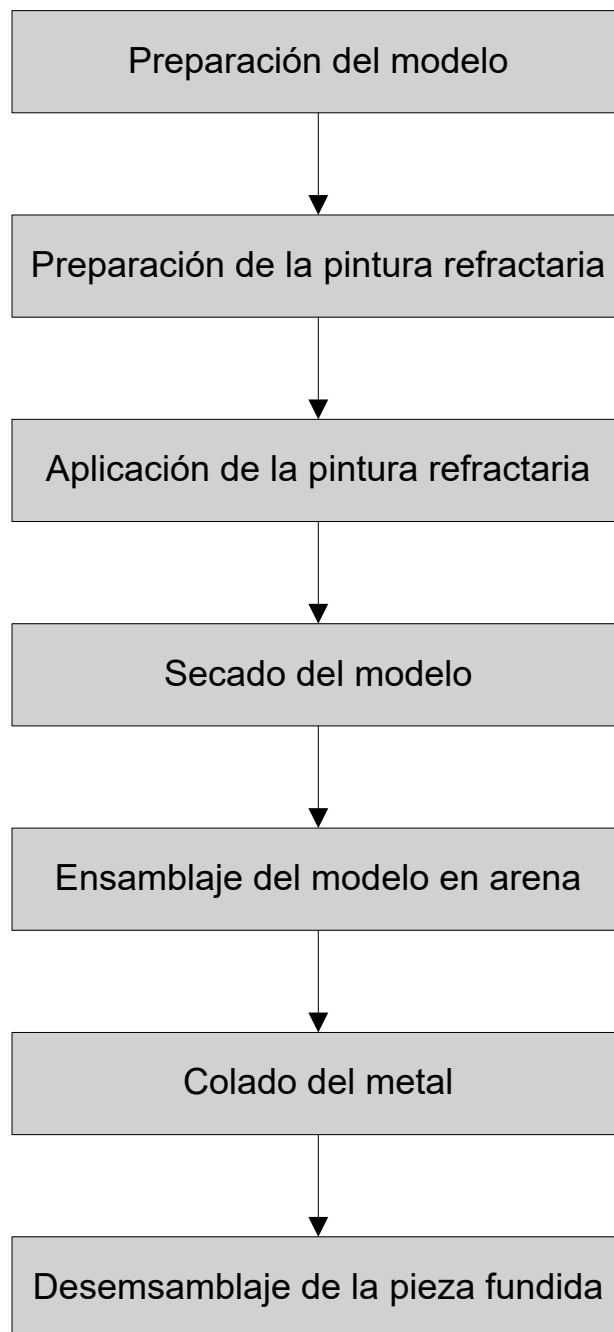


FIGURA 1.13. DIAGRAMA DE FLUJO O DE BLOQUES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN POR EL MÉTODO DE ESPUMA PERDIDA

Características de los metales no ferrosos fundibles

Los metales para fundición no ferrosos incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, plomo, zinc, níquel y titanio.

Las principales propiedades físico – químicas de los metales no ferrosos se los detalla en el apéndice A.

Aluminio (Al)

Las aleaciones de aluminio son las más manejables, ya que las temperaturas de fusión y vaciado son más bajas en comparación con las fundiciones de hierro y acero.

Las propiedades atractivas de estas aleaciones son: su peso ligero, su amplio rango de propiedades de resistencia que se pueden obtener mediante tratamientos térmicos y procesos de conformado, además de su relativa facilidad para el maquinado.

Magnesio (Mg)

Las aleaciones de magnesio son las más ligeras de todos los metales de fundición, sus propiedades principales incluyen la resistencia a la corrosión, altas relaciones de resistencia y tenacidad.

Cobre (Cu)

Las aleaciones de cobre incluyen a cuatro de las más importantes aleaciones de la metalurgia: el bronce, el latón, el bronce al

aluminio y el bronce al estaño, sus propiedades incluyen entre otras la resistencia a la corrosión, su apariencia atractiva, su elevada conductividad térmica y eléctrica.

Estaño (Sn)

Las aleaciones de estaño son generalmente fáciles de fundir en comparación con las demás, tiene buena resistencia a la corrosión, aunque en contraste poseen baja resistencia mecánica lo cual limita sus aplicaciones en dispositivos que no requieran gran resistencia para su funcionamiento.

Plomo (Pb)

Las aleaciones de plomo presentan propiedades de baja resistencia mecánica, baja dureza, alta ductilidad y buena resistencia a la corrosión. Además se emplea en soldadura blanda junto con el estaño, en plomería, cojinetes, municiones, metales tipográficos, pantallas contra rayos X, acumuladores y amortiguación de vibraciones. Sus principales elementos de aleación son el estaño y el antimonio.

Zinc (Zn)

Las aleaciones de zinc tienen un punto de fusión bajo y buena fluidez, las mencionadas propiedades lo hacen altamente fundible, su principal desventaja se presenta en su baja resistencia mecánica a la termofluencia.

Níquel (Ni)

Las aleaciones de níquel tienen buena resistencia en caliente y resistencia a la corrosión, propiedades que son óptimas para aplicaciones a altas temperaturas, tales como motores de propulsión a chorro, componentes de cohetes, escudos con el calor, entre otras.

Titanio (Ti)

Las aleaciones de titanio son aleaciones resistentes a la corrosión con una elevada relación de resistencia-peso. Sin embargo, el titanio tiene un alto punto de fusión, baja fluidez y es muy propenso a oxidarse a elevadas temperaturas, estas dificultades hacen del titanio y sus aleaciones difíciles de fundir.

1.2 Descripción y características del agar – agar.

El agar o agar – agar es el agregado principal de estudio de este proyecto, es decir, la adición de este componente de origen orgánico a la pintura refractaria utilizado en el método de espuma perdida se estudiará con detalle en los siguientes capítulos y subcapítulos, por este motivo, se detalla las características físicas y químicas, formas de obtención y utilización en el proceso de fundición por espuma perdida. El agar se encuentra enunciado en normas tales como ASTM D 5590 y ASTM D 5589.

El agar o agar – agar es una sustancia de color blanco en forma de polvo que se obtiene de la pared celular de las algas rodofíceas o rojas del género *Gelidium*, *Euchema* y *Gracilaria* que se encuentran principalmente en el continente asiático sobretodo en Japón, China y Malasia, las algas rojas o rodofíceas se muestran en la figura 1.14.

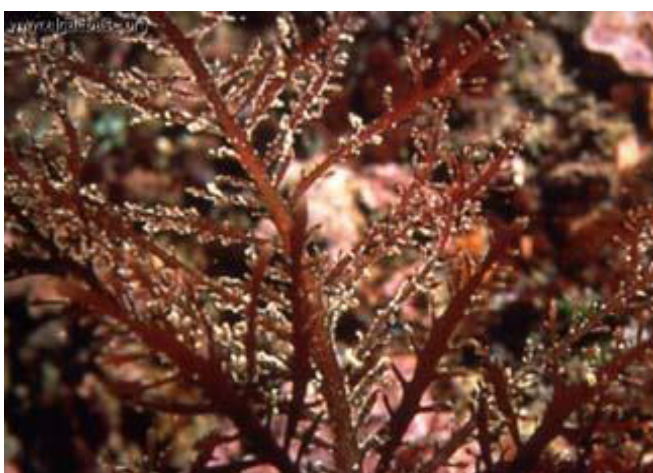


FIGURA 1.14. ALGAS ROJAS O RODOFÍCEAS CORALINAS

Etimológicamente la palabra agar proviene del malayo agar - agar que significa gelatina. Los componentes del agar han sido analizados desde los años 1859 a 1938 por científicos en varios países del mundo, comprobando finalmente que está constituido principalmente por β -D-galactosa-3,6-anhidro- α -L-galactosa y sulfatos.

Desde los años 40s y 50s, los sustitutos de galactosa, tales como galactosas metilatadas, sulfatadas y piruvatadas fueron probados

El agar se extrae de las algas marinas haciéndolas hervir en agua. Posteriormente, el producto resultante se deja enfriar y secar, y al final se solidifica en pastillas o en escamas para luego ser molido.

En un principio este producto se llamó agar - agar, un término que se utiliza en Malasia para denominar a un alga local. Hoy en día no sólo se produce en Oriente, sino también en regiones costeras del Pacífico, como California y Australia. En la figura 1.16 se detalla el polvo obtenido de agar.



FIGURA 1.16. ASPECTO DEL AGAR PROCESADO EN POLVO

El agar tiene la habilidad de gelificarse haciendo enfriar una solución del mismo en agua caliente a un rango de temperatura entre los 30 – 40°C y, a su vez, el agar puede disolverse en un rango de calentamiento entre 90 – 95°C.

El mecanismo de comportamiento del agar frente a un gradiente de temperatura se presenta en la figura 1.17.

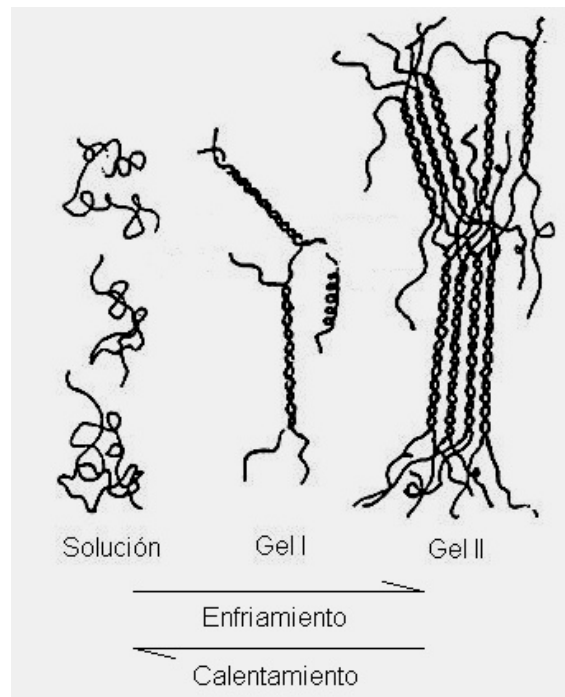


FIGURA 1.17. COMPORTAMIENTO DEL AGAR FRENTE A LA TEMPERATURA

Debido a las propiedades presentadas por el agar frente a gradientes de temperatura, se analizó añadirlo como aditivo a la mezcla primaria de pintura refractaria dentro del proceso de fundición de metales no ferrosos, el mismo que trabajará durante y después del momento de verter el metal líquido en el bebedero, las principales ventajas hipotéticas que prestará el agar constituyen la base de estudio de este proyecto, las cuales son:

- Poder de humectación y adherencia al momento de aplicar la pintura refractaria sobre el modelo espuma de poliestireno previamente confeccionado.
- Brindar una adecuada permeabilidad para permitir el escape al aire de los gases presentes en el proceso de fundición provocados por la reacción entre el metal líquido, la espuma del modelo, la arena sílice y el aire (medio ambiente), todo esto gracias a que el agar se solubiliza en un cierto grado con el aumento de temperatura.
- A medida que el metal se va solidificando dentro de la caja de moldeo, la temperatura del mismo va disminuyendo en función del tiempo (velocidad de enfriamiento), esto convertiría el agar disuelto en la pintura en gel de agar tipo I y tipo II, lo cual proporcionaría mayor cohesión entre las partículas de material refractario que protege el modelo de espuma del contacto con la tierra de moldeo en este caso la arena sílice, logrando de esta manera un óptimo acabado superficial y por ende en la rugosidad de la pieza fundida.

1.3 Características tecnológicas de la pintura refractaria.

La definición de pintura refractaria se define como: mezcla líquida o semilíquida utilizada sobre la superficie de espuma de poliestireno expandido, constituida por los siguientes elementos o agentes:

- Agente Refractario.
- Agente de Suspensión.
- Agente Dispersante.
- Agente Solvente.
- Aditivos.

Las funciones principales que desempeña la pintura refractaria dentro del proceso experimentado son:

- Servir de interfase entre el modelo de poliestireno expandido y la arena de moldeo, este aspecto tiene como finalidad brindar un óptimo acabado superficial de la pieza fundida mediante esta tecnología.
- Permitir cierta permeabilidad al escape de los gases presentes en el proceso de fundición para de esta manera no generar poros internos y externos que influirían en la calidad final del componente fundido.

El comportamiento de la pintura refractaria frente al colado del metal fundido y del modelo de espuma de poliestireno expandido, se detalla en la figura 1.18.

Los componentes principales y su porcentaje dentro de la pintura refractaria se presentan en la tabla 4.

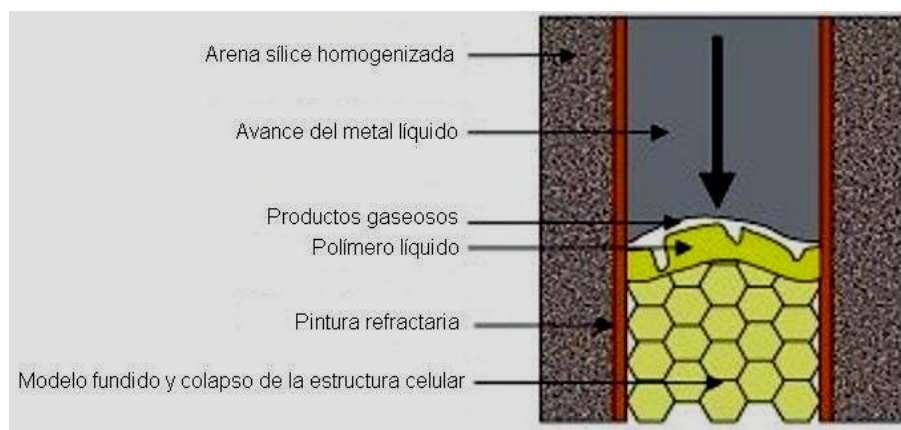


FIGURA 1.18. COMPORTAMIENTO DE LA PINTURA AL MOMENTO DEL COLADO

TABLA 4

COMPOSICIÓN EN PORCENTAJES DE LA PINTURA

Agente	Composición en porcentajes (%)	
	Máximo	Mínimo
Refractario	40	30
Suspensión	14	12
Dispersante	10	5
Solvente	55	35
Aditivos	2	1

Agente refractario

Se define como agente o material refractario a cualquier compuesto o mezcla capaz de soportar el rango de temperaturas comprendido entre los 1500 a 4000°C sin llegar a fundirse. Comprende el material base e imprescindible de la pintura

refractaria, cuya finalidad es la de proteger a la pieza fundida de la temperatura y los gases generados por la combustión del modelo de espuma de poliestireno por acción del metal fundido. Estos gases conllevarían al deterioro de la superficie generando porosidad en la superficie de la pieza metálica final.

La refractoriedad está caracterizada por la determinación óptica del equivalente del cono pirométrico o Seger, es decir: temperatura en la que la punta de un cono fabricado con una composición de punto de fusión definido, se ablanda hasta el punto de tocar la base de la placa. Los conos de referencia con equivalentes de conos pirométricos bien establecidos a intervalos de temperatura de 10°C y superiores se calientan en el mismo horno con los conos de prueba fabricados con el material de la muestra, de manera que es posible realizar una determinación de temperatura comparativa precisa del punto de reblandecimiento del material refractario dentro de 20°C aproximadamente.

El cono pirométrico es un cuerpo piramidal triangular de 6 cm de altura, moldeado y prehornado con materiales de primera calidad para asegurar su correcto desempeño acorde a su rango térmico.

Los conos se deben colocar en un ángulo inclinado sobre la vertical de aproximadamente 8° , para tal fin la base viene con su corte a desnivel. Se debe asegurar con pasta refractaria para una correcta estabilidad o disponer de un soporte refractario adecuado.

En el apéndice B se detalla la tabla de equivalencias de conos pirométricos con relación a su respectiva temperatura. En la figura 1.19 se detalla el reblandecimiento de los conos Seger afectados por el incremento de temperatura.



FIGURA 1.19. CONOS SEGER REBLANDECIDOS POR LA TEMPERATURA

El tamaño de partícula de refractario constituye una variable de inconmensurable valor dentro del proceso para lo cual se establece como patrón de medición la criba o malla ASTM 200 (apéndice C),

establecido como estándar para la mayoría de recubrimientos refractarios.

En la tabla 5 presento los principales compuestos cerámicos refractarios utilizados en la fabricación de la pintura refractaria.

TABLA 5
PRINCIPALES MATERIALES REFRACTARIOS

Material	Notación química	Punto de fusión (°C)
Grafito	C	3650
Magnesia	MgO	2830
Zirconia	ZrO ₂	2677
Calcia	CaO	2600
Zircón	ZrO ₂ ·SiO ₂	2420
Itria	Y ₂ O ₃	2410
Zirconato cálcico	CaO·ZrO ₂	2345
Espinela	MgO·Al ₂ O ₃	2135
Alumina	Al ₂ O ₃	2015
Mullita	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1830
Sílice (Cuarzo)	SiO ₂	1723

Agente de suspensión

El principal propósito del agente de suspensión es la de suspender y retardar la sedimentación de las partículas de refractario para

que exista una mayor homogeneidad de la pintura, comúnmente son materiales cerámicos arcillosos, los materiales utilizados como agente de suspensión se muestran en la tabla 6.

TABLA 6
PRINCIPALES MATERIALES DE SUSPENSIÓN

Material	Fórmula química
Bentonita cálcica	$\text{CaAl}_4\text{Mg}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_6$
Bentonita sódica	$\text{NaAl}_5\text{MgSi}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_6$
Mica de calcio	$\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Mica de potasio	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$

Agente dispersante

El principal propósito de este agente es el de dispersar a las partículas de refractario que se encuentran presentes en la pintura, y además en algunos casos lograr con la adición de este tipo de componentes la desfloculación de las partículas para lograr de esta manera un estado de homogeneidad idóneo para nuestro compuesto refractario.

Los principales materiales dispersantes se detallan en el tabla 7.

TABLA 7
PRINCIPALES MATERIALES DISPERSANTES

Material	Fórmula química
Silicato de calcio	CaSiO_3
Silicato de etilo	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$
Silicato de potasio	K_2SiO_3
Silicato de sodio	Na_2SiO_3
Sílice coloidal	SiO_2

Agente solvente

Es el componente de mayor proporción de la pintura refractaria, es en el medio en el cual los demás componentes se van a combinar y disolver para dar paso a una solución homogénea. Los principales solventes en orden de importancia son: el agua (H_2O), el metanol (CH_3OH) y el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Aditivos

Los aditivos pueden mejorar algunas de las propiedades presentes en la pintura refractaria y su utilización dependerá en gran medida de las propiedades de los metales a fundir y del proceso de moldeo.

1.4 Acabado superficial en la pieza fundida.

La superficie es un aspecto de importancia dentro del aspecto comercial y tecnológico por numerosos motivos entre las cuales se pueden citar:

- Estética
- Seguridad
- Fricción y desgaste
- Propiedades físicas y mecánicas
- Ensamble de partes
- Propiedades eléctricas

La textura de la superficie que consiste en desviaciones repetitivas y aleatorias con respecto a la superficie nominal de un objeto, se define por cuatro elementos principales: rugosidad, ondulación, orientación y fallas.

La *rugosidad* se refiere a desviaciones pequeñas con respecto a la superficie nominal finamente espaciadas que vienen determinadas que vienen determinadas por las características del material y los procesos que formaron la superficie.

La *ondulación* se define como una desviación mucho más espaciada que ocurre debido a la deflexión del material de trabajo, vibración, tratamiento térmico y factores similares.

La *orientación* es la dirección predominante o patrón de la textura superficial y está determinada por los métodos de manufactura usados para crear la superficie, generalmente debida a la acción de las herramientas de corte.

Finalmente las *fallas* son irregularidades que ocurren ocasionalmente en la superficie y comprenden a las grietas, rayas, inclusiones y defectos similares en la superficie. Aunque algunas grietas afectan a la textura de la superficie, afectan también su integridad. La figura 1.20 muestra las diversas formas de textura superficial.

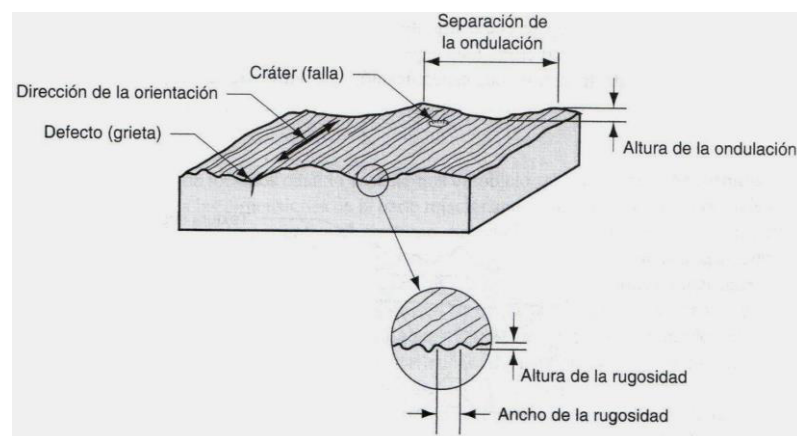


FIGURA 1.20 FORMAS DE LA TEXTURA SUPERFICIAL

La medida más usada de textura superficial es la rugosidad superficial. La rugosidad superficial puede definirse como el promedio de las desviaciones verticales con respecto a la superficie nominal, sobre una longitud especificada de superficie.

Para su obtención se usa la media aritmética basada en los valores absolutos de la desviación, y a este valor de la rugosidad se le denomina rugosidad promedio. En forma de ecuación se muestra lo siguiente.

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx$$

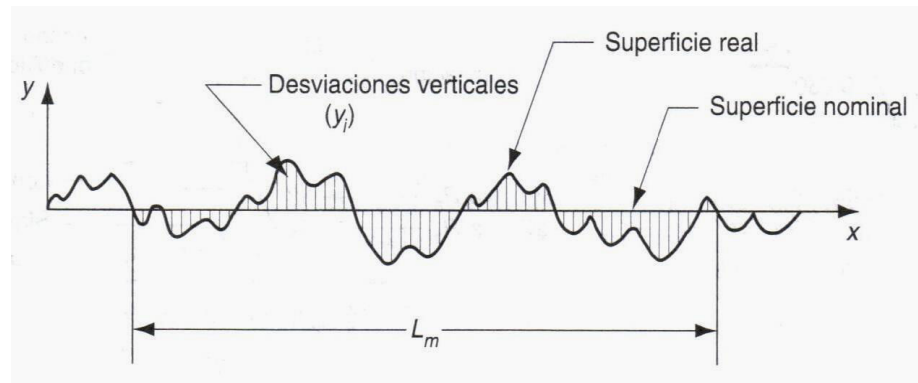


FIGURA 1.21 DESVIACIONES CON RESPECTO A LA SUPERFICIE

Donde, cabe recalcar que todas las variables son medidas de longitud (mm. ó in), así tenemos:

R_a : Valor de la media aritmética de rugosidad

y : Desviación vertical con respecto a la superficie nominal

L_m : Distancia sobre la cual se miden las mediciones

Pero en la realidad esta integral es difícil de resolver, debido a la desconocida dependencia funcional integrable de la variable y en función de x , es decir $y = f(x)$; por eso, tenemos que discretizar la expresión anterior en n partes, por lo que se tiene finalmente:

$$R_a = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n}$$

Donde, nuevamente R_a y L_m tienen el mismo significado que antes pero:

y_i : Desviación vertical (convertida a un valor absoluto) identificada por el subíndice i en (mm)

n : El número de desviaciones en L_m

La capacidad de lograr una cierta tolerancia o superficie es una función de los procesos de manufactura, para lo cual se tiene pensado la categorización de los procesos en términos de tolerancia; y rugosidad superficial e integridad superficial.

Tolerancias y los procesos de manufactura

Algunos procesos de manufactura son intrínsecamente más precisos que otros. El maquinado presenta bastante precisión y es

capaz de lograr tolerancias de ± 0.002 in (± 0.05 mm) o mejores. Por el contrario la fundición en arena es generalmente imprecisa y deben especificarse tolerancias 10 o 20 veces mayores que las usadas para el maquinado. Para el efecto en el apéndice D se presenta con mayor detalle las tolerancias típicas de los principales procesos de manufactura presentes en la actualidad.

Las superficies y los procesos de manufactura

Los procesos de manufactura determinan el acabado de la superficie y la integridad superficial.

En general, el costo del procesamiento se incrementa con la mejoras en el acabado de la superficie. Esto se debe a las operaciones adicionales y al mayor tiempo requerido usualmente para obtener cada vez mejores y más óptimas superficies. Los procesos más notables para suministrar acabados superiores son: rectificado, abrillantado, pulido y súper acabado. Para mayor información sobre los rangos de rugosidad de los procesos de manufactura consultar el apéndice E.

CAPITULO 2

2. PROCESO EXPERIMENTAL

2.1 Objetivo y procedimiento.

El objetivo general de este proyecto consiste en el mejoramiento del acabado superficial de componentes metálicos fundidos mediante el método de espuma perdida dentro del campo de estudio de las aleaciones no ferrosas. El procedimiento a seguir tiene que tener en cuenta varios aspectos importantes que son imprescindibles al momento de la ejecución de este proyecto.

- Selección del componente mecánico a fundir
- Diseño del componente mecánico en 2D y 3D mediante programa CAD (Diseño Asistido por Computadora)

- Obtención y preparación de los componentes principales para la fabricación de la pintura refractaria
- Construcción del modelo del componente en espuma de poliestireno
- Aplicación y secado de la pintura refractaria fabricada al patrón del impulsor hecho en espuma de poliestireno
- Moldeo del patrón con arena refractaria en la caja de moldeo y colado del componente mecánico
- Limpieza y maquinado de la pieza fundida

Selección del componente mecánico a fundir

El problema principal presentado en los impulsores fundidos es el bajo acabado superficial sobre todo en el interior de sus alabes cuya mecanización resulta casi imposible con los métodos convencionales, para eso se tuvo pensado seleccionar el impulsor de bomba tipo Byron – Jackson® como objeto de estudio.

Diseño del componente en 2D y 3D mediante programa CAD

El programa utilizado para este propósito es el AUTOCAD® 2008 propiedad de AUTODESK®, por esa razón los planos del impulsor de bomba en 2D se situarán en el apéndice F, y el formato de diseño en 3D lo presento a continuación en la figura 2.1.

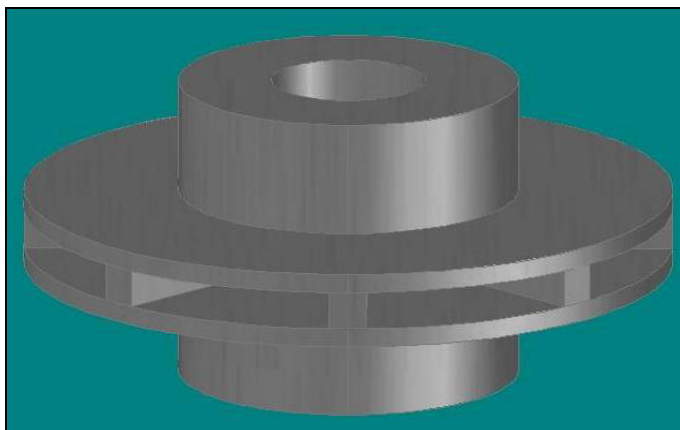


FIGURA 2.1. MODELO DEL IMPULSOR DE BOMBA EN 3D REALIZADA EN CAD

Gracias al estudio en 3D se pudo determinar los valores del área total $A = 44079\text{mm}^2$ y volumen $V = 105303\text{mm}^3$ del impulsor mediante el software computacional anteriormente mencionado, de esta manera se presentan los valores en las figuras 2.2.

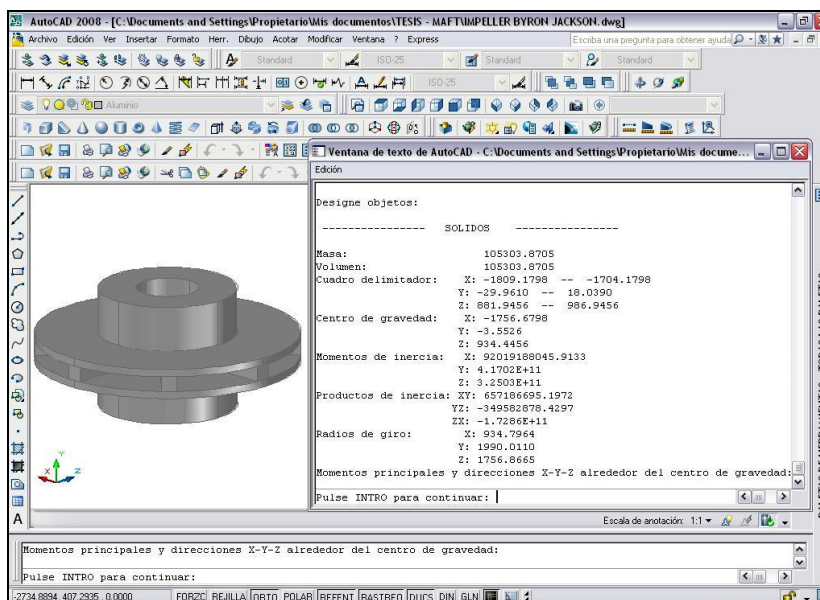


FIGURA 2.2. ÁREA Y VOLUMEN TOTAL DEL IMPULSOR HALLADOS MEDIANTE CAD

2.2 Materiales y equipos utilizados.

Los materiales utilizados en este proyecto son los siguientes:

- Una plancha de espuma de poliestireno expandido de grado T de 300x300x40mm
- Un frasco de pegamento blanco de 250g
- Arena sílice (SiO_2) al 98% malla ASTM 70 y ASTM 200
- Yeso $\left(\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}\right)$ malla ASTM 200
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3)
- Polvo de agar o agarobiosa
- Agua (H_2O)
- Aleación de aluminio SAE 315

Los equipos utilizados en este proyecto son los siguientes:

- Cortador de espuma de poliestireno expandido
- Calibrador Vernier
- Flexómetro
- Máquina amoladora portátil marca JEPSON®
- Torno revolver marca TURRI®
- Fresadora de torreta marca HOLKE®
- Molino de bolas
- Bolas de alumina (Al_2O_3)
- Mallas o cribas ASTM 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200

- Multímetro digital
- Termocupla ANSI Tipo K
- Hornilla eléctrica portátil marca ALTON®
- Probeta de vidrio templado
- Graduador 180°
- Agitador mecánico-eléctrico
- Viscosímetro de marca Brookfield®
- Picnómetro
- Medidor universal de pH
- Recipiente de aluminio fundido
- Recipiente de polietileno (PE)
- Caja de moldeo
- Máquina vibradora o zaranda
- Horno a gas licuado de petróleo marca INTRAMET®
- Caldero doble manejado
- Crisol de grafito
- Tenazas, guantes, gafas y cascos
- Disco comparador de rugosidad marca KTA - TATOR, INC

2.3 Elaboración y ensayos en las pinturas refractarias con agar.

Obtención y preparación de los componentes principales para la fabricación de la pintura refractaria.

Las principales y más importantes formulaciones de pinturas refractarias descritas en numerosas referencias bibliográficas, son presentadas en la tabla 8.

TABLA 8
DIFERENTES PINTURAS REFRACTARIAS PARA EL PROCESO DE FUNDICIÓN EN ESPUMA PERDIDA (LFC)

Tipo	Fase	Agente	Material	Cantidad (%)	Calidad	
A	Sólida	Refractario	Grafito	35	Buena	
			Sílice	5		
	Líquida	Suspensión	Bentonita cálcica	10		
			Dispersante	Silicato de sodio		3
				Solvente		Agua
B	Sólida	Refractario	Grafito	40	Regular	
			Suspensión	Bentonita cálcica		7
	Líquida	Dispersante	Silicato de sodio	6		
			Solvente	Agua		47
C	Sólida	Refractario	Grafito	40	Regular	
			Suspensión	Bentonita cálcica		10
	Líquida	Dispersante	Látex	10		
			Solvente	Agua		40
D	Sólida	Refractario	Grafito	30	Buena	
			Suspensión	Bentonita cálcica		12
	Líquida	Dispersante	Látex	6		
			Solvente	Agua		52
E	Sólida	Refractario	Sílice	35	Óptima	
			Suspensión	Yeso		15
	Líquida	Dispersante	Silicato de sodio	5		
			Solvente	Agua		45

Luego de analizada la viabilidad de la obtención de los diferentes materiales que constituyen cada una de las pinturas anteriormente expuestas en la tabla 8, además del costo de las mismos, se

seleccionó a la pintura refractaria tipo E, debido que esta presenta constituyentes fáciles de obtener dentro del mercado nacional, además presenta las siguientes características.

- Buena mojabilidad o humectación.
- Buenas propiedades de tensión superficial.
- Buena adherencia.
- Buen factor de no-agrietamiento al secado.
- Regular estabilidad de la suspensión.

Pintura refractaria tipo E

Agente Refractario: Sílice (SiO₂)

El óxido de silicio o dióxido de silicio (SiO₂) es un compuesto de silicio y oxígeno, Este material refractario cuyo cono pirométrico o Seger, supera los 1500°C (según apéndice B) demostrando su aplicabilidad como material refractario para utilizarlo en el proceso de fundición por espuma perdida, su obtención es relativamente difícil, debido a que el sílice encontrado comúnmente dentro del mercado local no satisface la medición de la malla ASTM 200.

Debido al problema anteriormente señalado con la sílice, se tuvo que emplear el molino de bolas de alumina disponible en el Laboratorio de Cerámicos de la FIMCP, para obtener finalmente el

tamaño de grano requerido para dicho propósito, procedimiento que lo expongo a continuación en las figura 2.3 y figura 2.4.

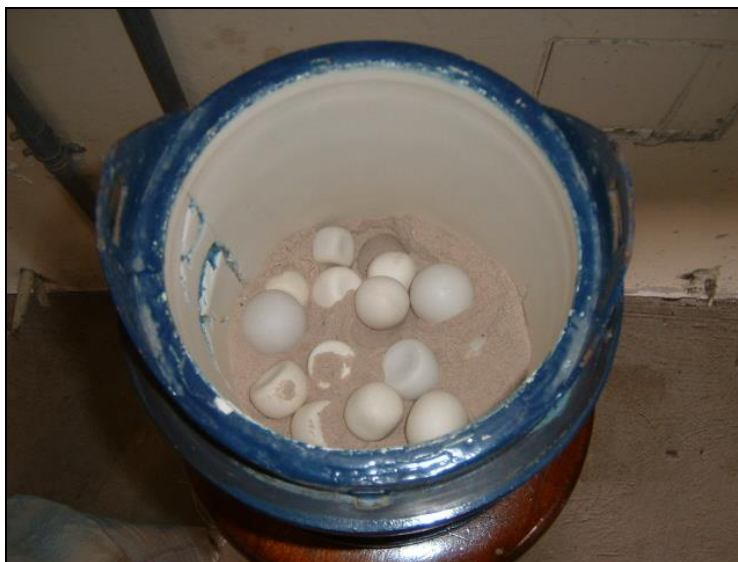


FIGURA 2.3. SÍLICE CON BOLAS DE ALUMINA EN EL CONTENEDOR



FIGURA 2.4. MOLINO DE BOLAS DE LA FIMCP EN FUNCIONAMIENTO

Un detalle importante por mencionar es el hecho de que las pinturas refractarias que contienen grafito no son recomendables para la fundición en espuma perdida en aleaciones ferrosas; debido a que el carbono (C), que posee gran afinidad con el hierro (Fe) puede llegar a disolverse en la aleación, pudiendo de esta manera afectar la composición final de la fundición, obteniéndose resultados indeseables.

Agente de Suspensión: Yeso $\left(\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \right)$

El yeso es un producto preparado básicamente a partir de una piedra natural denominado aljez, mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinadas adiciones para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente.

El yeso como material industrial es sulfato de calcio hemihidrato también llamado vulgarmente "yeso cocido", y se lo comercializa molido, en forma de polvo.

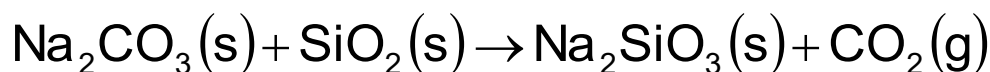
Su obtención fue sencilla dentro del mercado local, recalcando que este presentó en su constitución algunos grumos e impurezas

indeseables, todos estos inconvenientes fueron resueltos al tamizar el material en una criba seca de grado también ASTM 200.

Agente Dispersante: Silicato de sodio (Na_2SiO_3)

Para la continuación de la elaboración de la pintura refractaria tipo E, se tuvo que colocar los componentes en proporciones adecuadas según la tabla 8; el siguiente agregado es el silicato de sodio que actuará como agente aglutinante y dispersante, este debe ser medido en proporciones adecuadas y deber ser agregado según el comportamiento de la mezcla. El silicato de sodio es una sustancia química sólida, blanca y cristalina, de fórmula Na_2SiO_3 .

El silicato de sodio se forma cuando el carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el dióxido de silicio o sílice (SiO_2) se funden juntos en un horno.



Se puede extraer de la mezcla con agua. La disolución de silicato de sodio (llamada "vidrio soluble") se utiliza para hacer incombustibles la madera y los tejidos, como relleno en detergentes y jabones, y para conservar huevos.

Aditivo: Agar

El agar trabajará como aditivo de estudio, la presencia del mismo podrá variar las propiedades reológicas de la pintura refractaria.

Según especificaciones internacionales de un artículo publicado por la “FAO Corporate Document Repository” cuyo título en inglés es “Training manual on Gracilaria culture and seaweed processing in China”, enuncia entre sus párrafos que la temperatura óptima de activación para el gel de agar es de 50°C. Por lo enunciado anteriormente, la temperatura de manufactura y de empleo de la pintura refractaria será de aproximadamente 50°C, para lo cual nos valimos del empleo de una termocupla ANSI Tipo K adaptada a un multímetro genérico, con rango de medición entre -270°C a 1372°C, por lo que el control será muy fiable. Una vez obtenido todos los constituyentes de la pintura en proyecto, procedimos a mezclarlos en un recipiente previamente preparado. Como se muestra en la figura 2.5.



FIGURA 2.5. PINTURA REFRACTARIA TIPO E A BASE DE AGUA

Para lograr una homogenización adecuada de todos los componentes presentes en la pintura, se empleó un agitador mecánico-eléctrico a una velocidad de rotación de $N = 200\text{RPM}$, esto en consideración de la presencia de sílice que podría en un cierto momento decantarse y perjudicar al revestimiento al aplicarlo en los modelos.

El agitador mecánico-eléctrico usado en esta experiencia se presenta en la figura 2.6.



FIGURA 2.6. AGITADOR MECÁNICO-ELÉCTRICO TRABAJANDO A 200 RPM

La viscosidad de la pintura como función de la adición del aditivo agar fue controlada mediante el viscosímetro de marca Brookfield® disponible en el Laboratorio de Cerámicos de la FIMCP, como se evidencia en la figura 2.7.



**FIGURA 2.7. VISCOSÍMETRO DE MARCA BROOKFIELD®
MIDIENDO VISCOSIDAD DINÁMICA O ABSOLUTA DE LA
PINTURA REFRACTARIA**

Al finalizar conseguimos una cantidad pintura de masa igual a 2000g siendo estimado según el volumen total del modelo del impulsor a recubrir, todos estos fabricados a partir de EPS. La variabilidad de concentraciones de agar en la pintura refractaria se detalla en la tabla 9 y tabla 10.

TABLA 9

**CONCENTRACIONES DE AGAR SEGÚN MUESTRA DE
PINTURA REFRACTARIA TIPO E.**

Muestras	Concentración de agar (%)
1	0,0
2	0,1
3	0,2
4	0,3
6	0,4
7	0,5
8	0,6
9	0,7
10	0,8
11	0,9
12	1,0

TABLA 10

COMPOSICIÓN FINAL DE LA PINTURA REFRACTARIA.

Muestras	Sílice (g)	Yeso (g)	Silicato de sodio (g)	Agua (g)	Agar (g)
1	700	300	100	900	0,0
2	700	300	100	900	2,0
3	700	300	100	900	4,0
4	700	300	100	900	6,0
6	700	300	100	900	8,0
7	700	300	100	900	10,0
8	700	300	100	900	12,0
9	700	300	100	900	14,0
10	700	300	100	900	16,0
11	700	300	100	900	18,0
12	700	300	100	900	20,0

2.4 Ensayos de aplicación de la pintura en modelos de poliestireno.

Construcción del modelo del impulsor en espuma de poliestireno (EPS).

De una lámina comercial de poliestireno expandido de grado T se cortó una parte de la misma de dimensiones aproximadas 300x300x40mm, el cual, sirvió como material base para la mecanización de las partes del modelo de impulsor.

Después de lo anterior y una vez obtenido el plano del impulsor mediante el programa CAD se procedió a copiar el dibujo patrón del mismo para la construcción de los alabes, para este propósito se utilizó el torno que se dispone en la empresa metalúrgica INTRAMET – WIESNER INOX® de marca TURRI® de procedencia argentina a una velocidad de rotación $N = 250\text{RPM}$.

Además dentro de este proceso, hay que mencionar un detalle importante, para las operaciones de cilindrado y refrentado del disco de espuma de poliestireno se utilizó una máquina amoladora portátil de marca JEPSON® con velocidad de rotación $N = 10000\text{RPM}$ como herramienta de corte como se verifica en la figura 2.8.



FIGURA 2.8. PATRÓN DE ESPUMA DE POLIESTIRENO DEL IMPULSOR

Luego de finalizado el proceso de cilindrado y refrentado del disco de espuma de poliestireno, se llevo a cabo la mecanización de los alabes, para los cuales se empleo como útil de mecanizado, la fresadora de marca HOLKE® de origen español, igualmente cabe recalcar que se utilizó como herramienta de corte la misma máquina esmeril adaptada como se verifica en la figura 2.9.



FIGURA 2.9. MECANIZACIÓN DEL PATRÓN DE ESPUMA DE POLIESTIRENO

Al finalizar los procesos de cilindrado, refrentado y construcción de los alabes, se procedió a la limpieza de la primera pieza del modelo del impulsor fabricado en espuma de poliestireno expandido como se muestra en la figura 2.10.

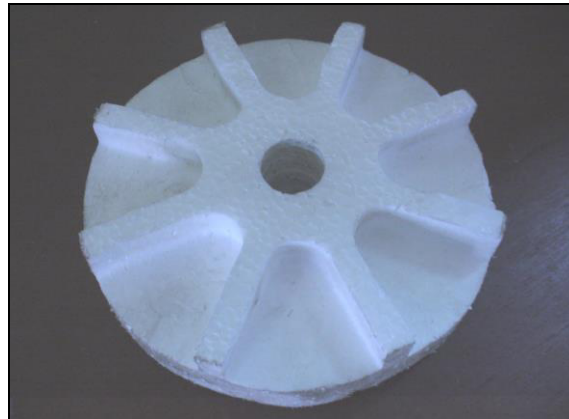


FIGURA 2.10. DISEÑO FINAL DE LOS ALABES DEL IMPULSOR HECHO EN EPS

Para la manufactura de la segunda pieza del modelo del impulsor, es decir el disco de EPS se necesita mecanizar de igual manera a partir de la lámina comercial de grado T de dimensiones 300x300x40mm. Al momento de unir las dos piezas mecanizadas del impulsor hecha en espuma de poliestireno, se necesito de un pegante especial que no reaccionara con el material polimérico y peor aún lo deteriorara durante su aplicación, por esa razón se efectuó un ensayo especial de los principales pegantes utilizados en la industria, llegando finalmente a la conclusión que el mejor fue la goma blanca.

Aplicación y secado de la pintura refractaria fabricada al patrón del impulsor hecho en EPS.

Al concluir con la elaboración de la pintura refractaria tipo E según la tabla 8, proseguimos con el siguiente paso, el de la puesta a punto de la aplicación en el modelo de espuma de poliestireno, pero antes, se tenía la necesidad de comprobar el comportamiento de este revestimiento líquido aplicado en una superficie sólida de elevada calidad superficial, para lo cual se utilizó un pedazo de vidrio común no templado de dimensiones 5x100x250mm, el mismo que se sumergió en la pintura refractaria con la adición de agar, presentándose una buena adherencia a la superficie, venciendo de esta manera la tensión superficial de la interfaz sólido-líquido para finalmente obtener un mojado adecuado que debe ir acorde con nuestro objetivo específico anteriormente citado.

La adherencia de la pintura esta íntimamente vinculada con la “Característica de Mojabilidad o Humectación”, es decir como la gota de pintura refractaria humecta o moja la superficie del vidrio como se modela en la figura 2.11, en la cual se presenta el diagrama de cuerpo libre de la gota de pintura refractaria que se encuentra sobre la superficie del vidrio.

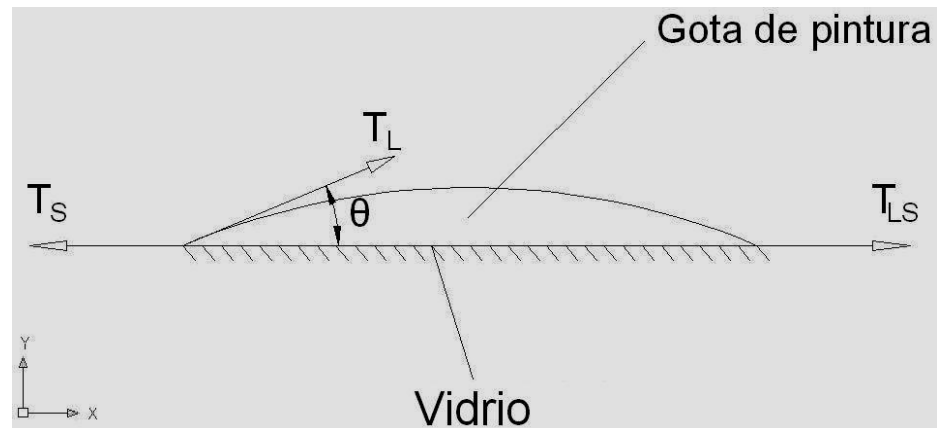


FIGURA 2.11. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA GOTA DE PINTURA REFRACTARIA

$$\xrightarrow{+} \sum F_x = 0$$

$$T_{LS} - T_S + T_L \cos \theta = 0$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{T_S - T_{LS}}{T_L} \right)$$

Donde:

T_S : Tensión superficial del sólido

T_L : Tensión superficial del líquido (Pintura refractaria)

T_{LS} : Tensión superficial de la interfase sólido - líquido

θ : Ángulo de mojabilidad

Para obtener resultados deseados se tiene que cumplir las siguientes condiciones:

$\theta < 90^\circ \Rightarrow$ Buena mojabilidad o humectación

$\theta \geq 90^\circ \Rightarrow$ Pobre mojabilidad o humectación

La formación de una gota de pintura refractaria se la obtuvo mediante el uso de un gotero, esta formación presentó en su geometría un ángulo de mojado aproximadamente igual a $\theta = 30^\circ$ observable a simple inspección visual con el empleo de un graduador, por lo que se obtiene que las propiedades de mojabilidad de la pintura son relativamente buenas y que el agar influye favorablemente en este aspecto reológico. La probeta de vidrio no templado usada en la prueba de aplicación se muestra en la figura 2.12.



FIGURA 2.12. PROBETA DE VIDRIO NO TEMPLADO USADO EN LA APLICACIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA PARA PROBAR SU TENSIÓN SUPERFICIAL

Luego de la prueba de aplicación en vidrio, se tuvo la necesidad apremiante de aplicar las diversas muestras de pintura refractaria

en la superficie de poliestireno expandido, para eso, se empleó el uso de una probeta ortoédrica de diseño aleatorio de dimensiones 50x40x20mm detalle que se lo evidencia en la figura 2.13.



FIGURA 2.13. PROBETA ORTOÉDRICA DE EPS RECUBIERTA CON PINTURA SECA

El tiempo de secado de la pintura refractaria depende casi enteramente de las dimensiones del modelo de poliestireno expandido y de las propiedades de los constituyentes de la pintura refractaria. Para el caso de la pintura de tipo E, el tiempo de secado será el límite superior que es el de 24 horas para no tener complicaciones posteriores. Las concentraciones en porcentajes de agar óptimas durante la aplicación de la pintura refractaria sobre la superficie de las probetas de espuma de poliestireno son del orden de 0.2 – 0.3%; en este intervalo de concentraciones se pudieron observar mejores propiedades de adherencia,

humectación y homogeneidad del refractario sobre la superficie del modelo de impulsor, además de no presentarse grietas en el revestimiento una vez secado el mismo por un lapso de tiempo de 24 horas, presencia de grietas en función de la concentración del agar en la pintura refractaria se detallan en la figura 2.14.

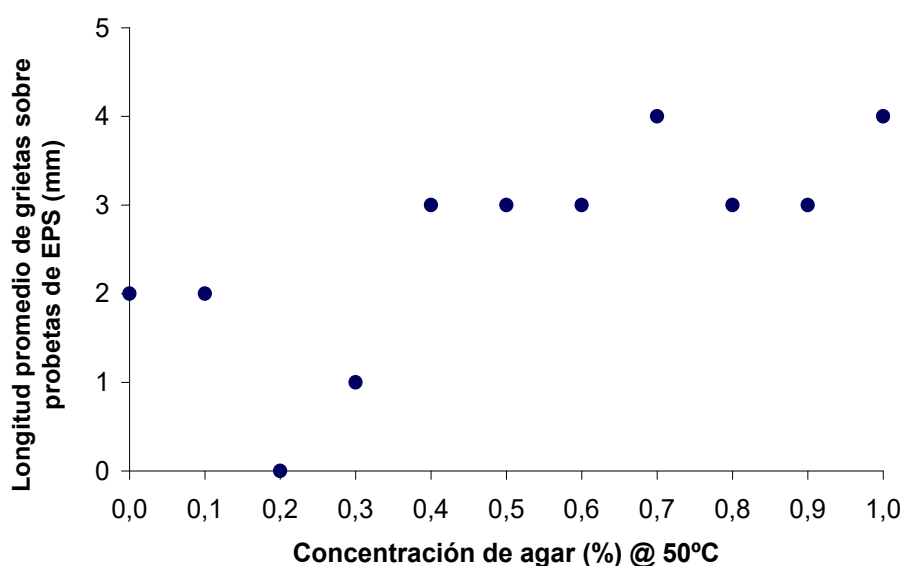


FIGURA 2.14. LONGITUD DE GRIETAS SOBRE EPS VERSUS CONCENTRACIÓN DEL AGAR (%)

Verificando finalmente la aplicabilidad de la pintura refractaria sobre la espuma de poliestireno, se procedió finalmente a su aplicación en modo de inmersión sobre el modelo del impulsor teniendo cuidado en que el refractario llegue de una manera uniforme sobre toda la superficie de la pieza de espuma, en especial entre los alabes del mismo, debido a que este sitio no se podría lograr mecanizar con métodos convencionales de arranque

de viruta, por lo anterior expuesto muestro el momento en el que se aplicó la pintura refractaria en el modelo impulsor de espuma de poliestireno en la figura 2.15.



FIGURA 2.15. MOMENTO DE LA APLICACIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA SOBRE EL MODELO DE IMPULSOR HECHO EN EPS (INMERSIÓN)

2.5 Elaboración de los moldes en arena y colado en aluminio.

Moldeo del patrón con arena refractaria en la caja de moldeo y colado del componente mecánico

El moldeo del modelo de impulsor en espuma de poliestireno se lo llevará a cabo con arena sílice de pasante grado de malla ASTM

70, como ya se ha descrito con anterioridad en el capítulo anterior, la arena de moldeo tiene que ser tamizada vibrada y no compactada para que homogenice al modelo de espuma previamente confeccionado.

Para eso adaptamos en la máquina vibradora de arenas o también llamada zaranda disponible en el Laboratorio de Cerámicos de la FIMCP la caja de moldeo de camisa de acero en el cual se encuentra en su interior la arena sílice refractaria y el modelo del impulsor de espuma de poliestireno, para que de esta manera compacte de una forma óptima al impulsor una vez fundido.

La aleación de aluminio de designación SAE 315 fue la escogida para ser fundida en esta experiencia, debido a sus buenas propiedades de resistencia mecánica y maquinabilidad, además de presentar una adecuada resistencia a la corrosión y propiedades de envejecimiento natural a temperatura del medio, todas estos detalles son importantes al momento de la selección de material para la fabricación del impulsor.

Las designaciones según normas internacionales de esta aleación y sus principales características de esta aleación se encuentran tabuladas en la tabla 11 y tabla 12.

TABLA 11
DESIGNACIONES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO

Instituciones	Designación
SAE	315
ASTM	B26 - ZC81A
ASM - AA	713.0
UNS	A07130
Comercial	Tenzaloy

TABLA 12
PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO SAE 315

Composición química	91.45Al – 7.5Zn – 0.7Cu – 0.35Mg
Esfuerzo de tensión	205 MPa (30 ksi)
Esfuerzo de fluencia para tensión	150 MPa (22 ksi)
Esfuerzo cortante	180 MPa (26 ksi)
Esfuerzo de fluencia para compresión	170 MPa (25 ksi)
Elongación	4% en 50mm (2in)
Energía de impacto (Charpy)	Con muesca en V: 3.4 J (2.5 ft · lbf)
	Sin muesca: 16.3 J (12 ft · lbf)
Conductividad térmica	$140 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ($80 \frac{\text{BTU}}{\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}$) a 25°C (77°F)
Coefficiente de expansión lineal	$24.1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ($13.4 \frac{\mu\text{in}}{\text{in} \cdot ^\circ\text{F}}$) a 20°C (68°F)
Densidad	$2.81 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ($0.102 \frac{\text{lbm}}{\text{in}^3}$)
Temperatura de fundición	595 a 640°C (1100 a 1185°F)
Dureza	40 a 75 HB

Para el proceso de fundición de la aleación de aluminio SAE 315 propiamente dicho, se necesito la ayuda del horno para fundición a base de gas licuado de petróleo propiedad de INTRAMET – WIESNER INOX[®], el mismo que se aprecia en la figura 2.16.



FIGURA 2.16. HORNO PARA FUNDICIÓN DE METALES NO FERROSOS CON GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) COMO COMBUSTIBLE

Para el control de la temperatura de fundición de la aleación, se utilizó una termocupla ANSI Tipo K adaptada a un multímetro genérico, con rango de medición entre -270°C a 1372°C , por lo que el control de la temperatura de fundición será el óptimo.

Apenas la temperatura del metal fundido llegó a la media de 600°C (valor asumido como ideal) medida con la termocupla, se procedió

al proceso del vertido del contenido del crisol sobre el molde de arena sílice vibrada y tamizada previamente preparado como se presenta con detalle en la figura 2.17.

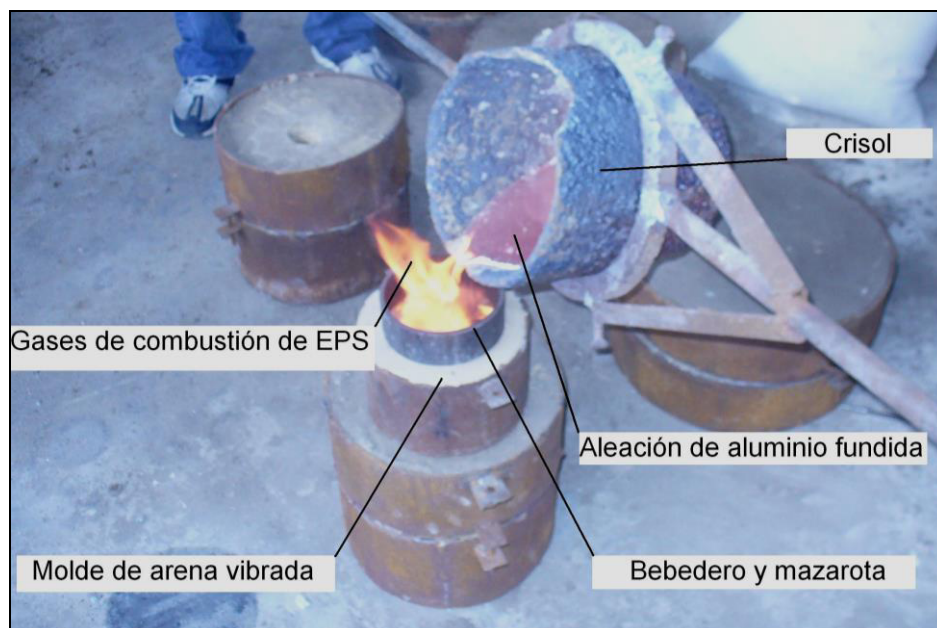


FIGURA 2.17. FUNDICIÓN EN ALEACIÓN DE ALUMINIO SAE 315 DEL MODELO A BASE DE ESPUMA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Al terminar con la fundición del impulsor se observó como era de esperarse el escape de los gases de combustión del poliestireno al entrar en contacto con el metal fundido.

En el momento del desmoldeo, una vez que se ha enfriado el impulsor obteniéndose un acabado superficial de buenas características que se analizarán posteriormente en el siguiente

capítulo y su respectiva medición con el comparador universal de rugosidad disponible en el Laboratorio de Materiales de la FIMCP.

Limpieza y maquinado de la pieza fundida

Para efectuar los detalles finales del impulsor fundido, damos paso a la mecanización de limpieza del mismo en el torno de marca TURRI® con las medidas especificadas según el plano y al posterior control de calidad, los detalles finales del impulsor fundido en aluminio SAE 315 se evidencian en la figura 2.18.

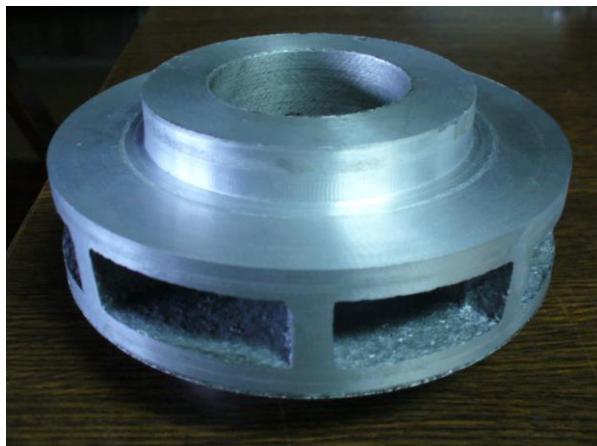


FIGURA 2.18. PIEZA FINAL FUNDIDA POR LFC Y REALIZADO EL MECANIZADO DE LIMPIEZA PARA ACABADO FINAL DE PRESENTACIÓN

Medición de Rugosidad Superficial

Se usan diversos métodos para valorar la rugosidad superficial, siendo estos los siguientes:

- Comparación subjetiva con superficies de prueba estándar.
- Instrumentos electrónicos de aguja.

- Técnicas ópticas.

Por la no disponibilidad de los dos últimos métodos en nuestros laboratorios, se tuvo que recurrir al primer método que se encuentra disponible en el Laboratorio de Materiales de la FIMCP; es decir, son discos estándar de acabado de superficies de marca KTA – TATOR® producidos para valores de rugosidad especificados según código previsto en la información técnica que se encuentra en el apéndice G. Para estimar la rugosidad de un espécimen de prueba determinado, en este caso el impulsor de bomba, la superficie se compara con el estándar tanto en forma visual como mediante la “prueba de la uña”. La prueba de la uña consiste en raspar suavemente las superficies del espécimen y el estándar, y determina qué estándar se acerca más al espécimen.

TABLA 13

CARACTERÍSTICAS DEL DISCO COMPARADOR

Fabricante	KTA - TATOR, INC	
Marca	Keane - Tator Surface Profile Comparator®	
Material	Níquel 100%	
Superficie	Fundiciones	
Segmentos	Código	Rugosidad superficial (mils)
	0,5S70	0,5
	1S70	1,0
	2S70	2,0
	3S70	3,0
	4S70	4,0
Tolerancia	±0,01 mils	

Una vez fabricada la pintura refractaria tipo E, se dio paso a la aplicación de la pintura sobre el modelo de espuma de poliestireno en modo de inmersión y al posterior colado en fundición en aleación de aluminio SAE 315.

Se procedió a la medición de grado de rugosidad con el disco de comparación que se muestra en la figura 2.19.

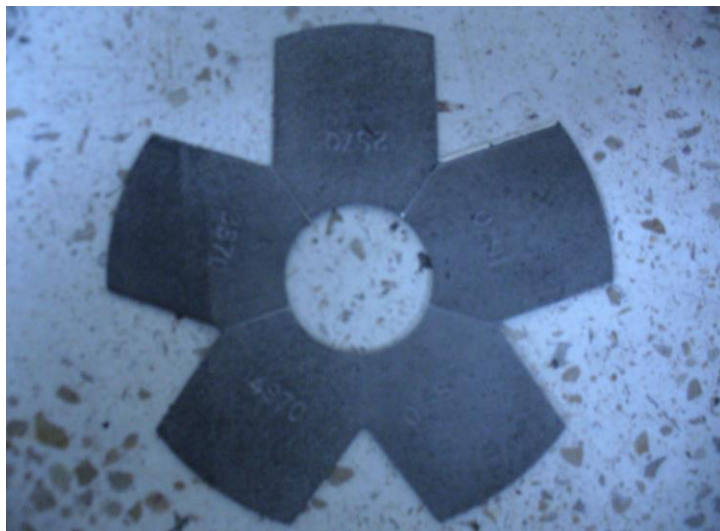


FIGURA 2.19. DISCO COMPARADOR DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL.

Comparando la superficie del impulsor fundido con el disco comparador, se pudo comprobar visualmente que el valor de la rugosidad superficial de la pieza fundida coincidía con el segmento de código 0.5S70 del disco comparador por lo tanto se tiene una media de rugosidad aproximadamente igual a 0.5 mil, es decir.

$$R_a = 0.5\text{mil} = 500\mu\text{in} = 12.7\ \mu\text{m}$$

CAPITULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Evaluación de los resultados experimentales de la pintura.

Uno de los objetivos específicos de este proyecto final de carrera, fue el de investigar y desarrollar una pintura de tipo refractaria usada en el método de fundición por espuma perdida para componentes mecánicos fabricados en aleaciones no ferrosas, elaborada a partir materiales y mano de obra nacionales, cuyas propiedades físico – químicas presenten óptimos resultados, especialmente en su aplicación sobre la superficie del modelo de poliestireno expandido vaporizable y en la protección prestada antes, durante y después del colado con metal líquido no ferroso; esta premisa fue finalmente obtenida luego de realizada la parte

experimental, siendo esta la fórmula final de la pintura refractaria cuyo detalle se encuentra en la tabla 14.

TABLA 14

FÓRMULA FINAL DE LA PINTURA REFRACTARIA ÓPTIMA

Material	Composición (%)
Sílice	35,0
Yeso	15,0
Silicato de sodio	5,0
Agua	44,8
Agar	0,2

Después de analizadas las probetas ortoédricas fabricadas en espuma de poliestireno expandido (EPS) cubiertas con diferentes muestras de compuesto refractaria de concentraciones de agar según la tabla 9 y secadas en un lapso de 24 horas, se determinó que la pintura que presentaba las mejores propiedades de adherencia y humectación sobre la superficie de espuma de poliestireno expandido fue aquella que contenía el 0.2% de agar.

Las principales condiciones físico – químicas de la pintura refractaria tipo E se detalla en la tabla 15.

TABLA 15
PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DE LA PINTURA

<i>Propiedades</i>	<i>Pintura refractaria con 0.2 % agar</i>
Color	Blanco
Viscosidad @ 20rpm , 5s (cps)	2900
Densidad (g/cm³)	1.60
pH	8
Número de componentes	1
Temperatura de aplicación (°C)	50

3.2 Evaluación del acabado de las piezas fundidas.

El acabado superficial del impulsor de bomba fundido en aleación de aluminio SAE 315 será variable principal de estudio de esta tesis.

Con el empleo del disco patrón de comparación de rugosidad o acabado superficial se pudo realizar la medición visual siendo este de 12.7 μm , este valor de rugosidad superficial se considera aceptable debido a la subjetividad de la medición visual comparativa, siendo despreciable la tolerancia de $\pm 0.7\mu\text{m}$ con relación a los límites inferior y superior establecidos como aceptables para piezas fundidas por el método de la espuma perdida según normas internacionales.

$$R_a = [1.5 - 12] \mu\text{m}$$

3.3 Evaluación del costo de fabricación.

Para evaluar el costo de fabricación del impulsor debemos tener en cuenta varios rubros o ítems que serán desglosados de la siguiente manera:

- Costos de la manufactura del modelo en EPS.
- Costos involucrados con la pintura refractaria.
- Costos por fundición en aleación de aluminio.
- Costos de mecanizado de limpieza del impulsor.

Costos de la manufactura del modelo en EPS.

Los costos involucrados en la confección del modelo del impulsor en espuma de poliestireno se detallan a continuación

Plancha de espuma de poliestireno expandido

La plancha de espuma de poliestireno expandido de grado T comercialmente se los encuentra en $10.00 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$ y se lo vende comercialmente de las siguientes dimensiones: 2m x 1m x 0.4m por lo que se tiene lo siguiente:

$$V_1 = a \cdot b \cdot c = 2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.4\text{m} = 0.8\text{m}^3$$

$$C_1 = V_1 c_1 = \left(0.8 \text{m}^3\right) \left(10.00 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}\right) = \text{US\$}8.00$$

Donde

V_1 : Volumen total de la espuma de poliestireno (m^3)

a,b,c : Dimensiones de la plancha de poliestireno (m)

C_1 : Costo final de la plancha de poliestireno (US\$)

c_1 : Costo por volumen de la espuma de poliestireno ($\text{US\$/m}^3$)

Por otro lado se tienen los gastos de manufactura propiamente dichos del modelo de poliestireno expandido, para lo cual detallo los siguientes rubros.

Energía eléctrica

El costo de energía eléctrica se calcula se la siguiente manera aproximadamente sin contar con las pérdidas de energía (asumo eficiencia mecánica y eléctrica al 100%):

$$C_2 = (P_E \cdot t_{M-EPS} + P_T \cdot t_{M-EPS-T} + P_F \cdot t_{M-EPS-F}) \cdot c_2$$

$$C_2 = [(0.37 \text{ kW})(2 \text{ h}) + (5.97 \text{ kW})(1 \text{ h}) + (7.46 \text{ kW})(1 \text{ h})] \left(0.08 \frac{\text{US\$}}{\text{kW-h}}\right)$$

$$C_2 = \text{US\$}1.13$$

Donde

C_2 : Costo de energía eléctrica total (US\$)

P_E : Potencia de la esmeriladora portátil (kW)

P_T : Potencia del torno (kW)

P_F : Potencia de la fresadora de torreta (kW)

t_{M-EPS} : Tiempo empleado en la mecanización del modelo (h)

$t_{M-EPS-T}$: Tiempo de mecanización utilizando el torno (h)

$t_{M-EPS-F}$: Tiempo de mecanización utilizando la fresadora (h)

C_2 : Costo de la energía eléctrica (US\$/kW-h)

Mano de obra (Torneros y Fresadores)

El costo de la mano de obra empleada en el proceso se detalla a continuación

$$C_3 = n_F \lambda_F \cdot t_{M-EPS-F} + n_T \lambda_T \cdot t_{M-EPS-T}$$

Pero como

$$n_F = n_T = n_3 = 1;$$

$$\lambda_F = \lambda_T = \lambda_3 = 2.50 \frac{\text{US\$}}{\text{h}};$$

$$t_{M-EPS-F} = t_{M-EPS-T} = t_3 = 1 \text{ h}$$

Entonces, se tiene

$$C_3 = 2 \cdot n_3 \cdot \lambda_3 \cdot t_3$$

$$C_3 = 2 \cdot (1) \cdot \left(2.50 \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right) \cdot (1\text{h}) = \text{US\$}5.00$$

Donde

C_3 : Costo total de mano de obra directa (US\$)

n_T : Número de operadores del torno

n_F : Número de operadores de la fresadora de torreta

$t_{M-EPS-T}$: Tiempo de mecanización utilizando el torno (h)

$t_{M-EPS-F}$: Tiempo de mecanización utilizando la fresadora (h)

λ_T : Costo por tiempo del tornero (US\$/h)

λ_F : Costo por tiempo del fresador (US\$/h)

Máquinas herramientas (Torno y Fresadora)

El costo por el uso de las máquinas herramientas usadas en este caso torno y fresadora propiedad de la empresa INTRAMET – WIESNER INOX[®] también cuentan y se calculan de la siguiente forma.

$$C_4 = \chi_F \cdot t_{M-EPS-F} + \chi_T \cdot t_{M-EPS-T}$$

$$C_4 = \left(8.00 \frac{\text{US\$}}{\text{h}}\right)(1\text{h}) + \left(6.00 \frac{\text{US\$}}{\text{h}}\right)(1\text{h}) = \text{US\$}14.00$$

Donde

C_4 : Costo total debido al uso de las máquinas herramientas

χ_F : Costo por el uso de la fresadora de torreta (US\$/h)

χ_T : Costo por el uso del torno (US\$/h)

$t_{M-EPS-F}$: Tiempo de mecanización utilizando la fresadora (h)

$t_{M-EPS-T}$: Tiempo de mecanización utilizando el torno (h)

Ya sea también la fórmula del tiempo de mecanización del EPS.

$$t_{M-EPS} = t_{M-EPS-F} + t_{M-EPS-T}$$

Insumos varios

El costo total de otros insumos utilizados en la elaboración del modelo de espuma de poliestireno no asciende más allá del siguiente valor.

$$C_5 = \text{US\$}2.00$$

Donde

C_5 : Costo total de insumos utilizados (US\$)

Finalmente se suman todos los costos secundarios anteriormente citados para de esta manera lograr obtener el costo total de manufactura del modelo del impulsor en EPS.

$$C_{M-EPS} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5$$

$$C_{M-EPS} = \text{US\$}30.13$$

Costos involucrados con la pintura refractaria.

Las cantidades y concentraciones de los distintos constituyentes de la pintura refractaria No 5 se detallan a continuación en la tabla 16.

TABLA 16
COSTOS DE LA PINTURA REFRACTARIA

Pintura No 5	Costo por peso (US\$/kg)	Peso (kg)	Costo (US\$)
Agar	100,00	0,004	0,40
Sílice	1,32	0,700	0,93
Yeso	0,88	0,300	0,26
Silicato de sodio	0,60	0,100	0,06
Agua	2,00	0,900	1,80
		Subtotal (US\$)	3,45
		IVA (12%)	0,41
		Total (US\$) (C_p)	3,86

Costos por fundición en aleación de aluminio.

Para obtener los costos de fundición de la aleación de aluminio SAE 315 se tuvo que recurrir a los siguientes cálculos.

$$m = \rho V$$

$$m = \left(2.7 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right) (105303 \text{mm}^3)$$

$$m = 0.28 \text{kg} = 0.616 \text{lbm}$$

Donde

ρ : Densidad del aluminio SAE 315 $\left(\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right)$

V : Volumen total del impulsor (mm^3)

m : Masa total del impulsor (kg)

Partiendo de chatarra de aluminio de perfil extruido ASM 6063 se tiene que principalmente calcular el costo del aluminio y zinc, el costo de los demás elementos aleantes son despreciables y están incluidos en la composición del perfil de aluminio extruido, de esta manera se tiene lo siguiente.

Aluminio ($\approx 100\%$)

$$C_{\text{Al}} = c_{\text{Al}} \cdot m \cdot \delta_{\text{Al}}$$

$$C_{Al} = (1)(0.616\text{lbm})\left(1.20\frac{\text{US\$}}{\text{lbm}}\right) = \text{US\$}0.74$$

Donde

C_{Al} : Costo total del aluminio (US\$)

δ_{Al} : Costo del aluminio por peso (US\$/lbm)

c_{Al} : Tanto por uno de aluminio en aleación

Zinc (7.5%)

$$C_{Zn} = c_{Zn} \cdot m \cdot \delta_{Zn}$$

$$C_{Zn} = (0.075)(0.616\text{lbm})\left(3.30\frac{\text{US\$}}{\text{lbm}}\right) = \text{US\$}0.15$$

Donde

C_{Zn} : Costo total del zinc (US\$)

δ_{Zn} : Costo del zinc por peso (US\$/lbm)

c_{Zn} : Tanto por uno de zinc en aleación

Cobre (0.7%)

El costo de elemento cobre a la aleación es prácticamente despreciable debido a su poca cantidad presente en la aleación, por lo que.

$$C_{\text{Cu}} \approx \text{US\$}0.00$$

Donde

C_{Cu} : Costo total del cobre (US\$)

Magnesio (0.35%)

El costo del magnesio se encuentra incluido en el costo del aluminio debido a que se partió de una aleación ASM 6063 que en su composición primaria ya contenía este elemento.

Combustible

Se considera que el equivalente del costo del combustible, es decir el costo total del flujo de los tanques de GLP para uso industrial se estima en lo siguiente.

$$C_{\text{GLP}} = \text{US\$}2.00$$

Uso del crisol

Debido que el desgaste del crisol es dependiente del número de coladas de los diferentes materiales no ferrosos que se funden en el horno, se calcula lo siguiente

$$C_{\text{G-C-Al}} = n_{\text{C}} \cdot \psi_{\text{G-C-Al}}$$

$$C_{G-C-Al} = (1\text{colado}) \left(0.50 \frac{\text{US\$}}{\text{colado}} \right) = \text{US\$}0.50$$

Donde

C_{G-C-Al} : Costo total por el uso del crisol para aluminio (US\$)

n_C : Número de colados

Ψ_{G-C-Al} : Costo del aluminio por colado (US\$/colado)

Mano de obra (fundidores)

Para calcular el costo de la mano de obra que interviene en el proceso de fundición se deben realizar los cálculos mostrados.

$$C_{M-O} = n_{M-O} \cdot t_{M-O} \cdot v_{M-O}$$

$$C_{M-O} = (2)(2h) \left(2.00 \frac{\text{US\$}}{h} \right) = \text{US\$}8.00$$

Donde

C_{M-O} : Costo total por mano de obra (US\$)

n_{M-O} : Número de trabajadores que intervienen

t_{M-O} : Tiempo empleado en la fundición (h)

v_{M-O} : Costo de trabajador por tiempo (US\$/h)

Arena de moldeo

Se considera que el costo de la arena de moldeo sílice vibrada en la que se colocará el modelo del impulsor de bomba, a continuación se detalla este costo aproximado.

$$C_A = \text{US\$}3.00$$

Finalmente, sumando todos los valores hallados que influyen en el costo por fundición se obtienen el valor.

$$C_F = (C_{Al} + C_{Zn} + C_{Cu}) + C_{GLP} + C_{G-C-Al} + C_{M-O} + C_A$$

$$C_F = \text{US\$}14.39$$

Costos de mecanizado de limpieza del impulsor.

El mecanizado de limpieza se lo realizó en el torno de marca TURRI® propiedad de INTRAMET – WIESNER INOX® para lo cual presentó la siguiente fórmula de cálculo de costos, asumiendo de la máquinas un 100% de eficiencia mecánica y eléctrica se obtiene.

$$C_{M-AI} = (\chi_T + P_T \cdot c_2) \cdot t_{M-AI} + n_T \cdot \lambda_T$$

$$C_{M-AI} = \left[\left(6.00 \frac{\text{US\$}}{\text{h}} + (5.97 \text{ kW}) \left(0.08 \frac{\text{US\$}}{\text{kW-h}} \right) \right) \right] (2\text{h}) + (1) \left(2.50 \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right)$$

$$C_{M-AI} = \text{US\$}15.46$$

Donde

C_{M-AI} : Costo final de mecanizado del impulsor (US\$)

χ_T : Costo por el uso del torno (US\$/h)

P_T : Potencia del torno (kW)

C_2 : Costo de la energía eléctrica (US\$/kW-h)

n_T : Número de operadores del torno

λ_T : Costo por tiempo del tornero (US\$/h)

t_{M-AI} : Tiempo de mecanizado del aluminio (h)

COSTO FINAL DE FABRICACIÓN

Antes de finalizar el subcapítulo 3.3, se tiene que contabilizar todos los valores que han intervenido en la fabricación del impulsor por medio del método de LFC, para eso se tiene.

$$C_{LFC} = C_{M-EPS} + C_P + C_F + C_{M-AI}$$

$$C_{LFC} = (30.13 + 3.86 + 14.39 + 15.46)\text{US\$}$$

$$C_{LFC} = \text{US\$}63.84$$

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE COSTOS

Para efectuar el estudio de comparación de costos, se tuvo la necesidad de consultar el costo de la pintura refractaria de marca Pyro-Paint® 634-AS/634-AS1 fabricada por AREMCO INC., finalmente se tienen los siguientes cálculos.

$$V_{P\text{-TESIS}} = \frac{m_{P\text{-TESIS}}}{\rho_{P\text{-TESIS}}} = \frac{2000\text{g}}{1.60 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1250\text{cm}^3 = 0.00125\text{m}^3$$

$$\Theta_{P\text{-TESIS}} = \frac{\text{US\$}3.86}{0.00125\text{m}^3} = 3088 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$$

$$\Theta_{P\text{-AREMCO}} = \frac{\text{US\$}80.00}{\text{gal(US)}} \cdot \frac{264.17\text{gal(US)}}{1\text{m}^3} = 21133.60 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$$

$$\Omega = \frac{\Theta_{P\text{-AREMCO}} - \Theta_{P\text{-TESIS}}}{\Theta_{P\text{-AREMCO}}} * 100$$

$$\Omega = \frac{21133.60 - 3088}{21133.60} * 100 = 85\%$$

Donde

$m_{P\text{-TESIS}}$:

Masa de la pintura refractaria desarrollada en la tesis (g)

$V_{P\text{-TESIS}}$:

Volumen de la pintura refractaria desarrollada en la tesis (cm^3)

$\rho_{P-TESIS}$:

Densidad de la pintura refractaria desarrollada en la tesis (g/cm^3)

$\Theta_{P-AREMCO}$:

Costo de la pintura Pyro-Paint® por volumen ($\text{US\$/m}^3$)

$\Theta_{P-TESIS}$:

Costo de la pintura desarrollada en la tesis por volumen ($\text{US\$/m}^3$)

Ω :

Reducción de costos (%)

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.

Con relación al objetivo general y los objetivos específicos establecidos en la introducción de esta tesis, comparándolos con los resultados encontrados durante la experimentación realizada tenemos las siguientes conclusiones:

- Con relación a la rugosidad superficial del impulsor tipo Byron – Jackson® fundido en aleación de aluminio SAE 315, se establece su valor promedio siendo este de 12.7 μm , presentando una tolerancia de $\pm 0.7 \mu\text{m}$ con respecto al límite máximo de rugosidad superficial establecido como norma de aceptación dentro del proceso de fundición por el método de espuma perdida.

- Con relación a la adición del aditivo de origen orgánico llamado agar, se concluye que la concentración del 0.2% de agar agregada a la pintura refractaria tipo E presenta las mejores propiedades de adherencia y humectación en el momento del pintado del compuesto sobre la superficie del modelo del impulsor hecho en espuma de poliestireno expandido.
- Con relación a la obtención de la pintura refractaria fabricada a partir de materia prima y mano de obra nacional, cuyas características - propiedades en aplicación y protección son de óptima calidad dentro del proceso de fundición por espuma se establece que la composición porcentual de la misma es la siguiente: Sílice (35%), Yeso (15%), Silicato de Sodio (5%), Agua (44.8%) y Agar (0.2%), con una pureza de materiales de 95%.
- Con relación a la reducción de costos de la pintura refractaria nacional con respecto a un compuesto de fabricación extranjero, se concluye que el porcentaje de reducción de costos de la pintura refractaria fabricada durante el desarrollo de esta tesis fue del 85% con respecto a la pintura refractaria de elaborada por la empresa estadounidense AREMCO INC.

4.2 Recomendaciones.

- Incentivar y financiar con recursos del Estado Ecuatoriano a través de sus entidades gubernamentales en ámbito científico SENACYT, proyectos de investigación y desarrollo dentro del campo de los recubrimientos refractarios nacionales para desarrollar de sobre manera la industria metalúrgica del país.
- Para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los recubrimientos refractarios, se recomienda experimentar con materiales refractarios tales como la zirconia, itria, magnesia o calcia cuyas temperaturas de trabajo son más elevadas que sílice o alumina, y conseguir de esta manera, la fabricación de un compuesto refractario capaz de ser usado en la fundición de espuma perdida para aleaciones de tipo ferrosos.

APÉNDICES

APÉNDICE A

METALES NO FERROSOS UTILIZADOS EN FUNDICIÓN POR ESPUMA PERDIDA

METALES NO FERROSOS UTILIZADOS EN FUNDICIÓN POR ESPUMA PERDIDA [1]

Metal	Símbolo	No. atómico	Gravedad específica	Estructura cristalina	Temperatura de fusión (°C)	Modulo de elasticidad (MPa)	Mineral principal
Aluminio	Al	13	2,7	FCC	660	69x10 ³	Bauxita (Al ₂ O ₃ · Al(OH) ₃)
Cobalto	Co	27	8,9	HCP	1495	210x10 ³	Cobaltina (CoAsS)
Cobre	Cu	29	8,96	FCC	1083	110x10 ³	Calcopirita (CuFeS ₂)
Estaño	Sn	50	7,3	HCP	232	42x10 ³	Casiterita (SnO ₂)
Magnesio	Mg	12	1,74	HCP	650	48	Cloruro de Magnesio (MgCl ₂)
Níquel	Ni	28	8,9	FCC	1453	209x10 ³	Pentlandita (Fe,Ni) ₉ S ₈
Plomo	Pb	82	11,35	FCC	327	21x10 ³	Galena (PbS)
Titanio	Ti	22	4,51	HCP	1668	117x10 ³	Rutilo (TiO ₂)
Zinc	Zn	30	7,13	HCP	419	90x10 ³	Esfalerita (ZnS)

[1] MIKELL P. GROOVER, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, PRENTICE HALL LATINOAMÉRICA, MÉXICO, 19

APÉNDICE B
CONOS SEGER O CONOS PIROMÉTRICOS

**CONOS SEGER O CONOS PIROMÉTRICOS EN FUNCIÓN DE SU
RESPECTIVA TEMPERATURA [2]**

Temperatura (°C)	Temperatura (°F)	Cono Seger
600	1112	022
650	1202	021
670	1238	020
690	1274	019
710	1310	018
730	1346	017
750	1382	016
790	1454	015a
815	1499	014a
835	1535	013a
855	1571	012a
880	1616	011a
900	1652	010a
920	1688	09a
940	1724	08a
960	1760	07a
980	1796	06a
1000	1832	05a
1020	1868	04a
1040	1904	03a
1060	1940	02a
1080	1976	01a
1100	2012	1a
1120	2048	2a
1140	2084	3a
1160	2120	4a
1180	2156	5a
1200	2192	6a
1230	2246	7
1250	2282	8
1280	2336	9
1300	2372	10
1320	2408	11
1350	2462	12
1380	2516	13

1410	2570	14
1435	2615	15
1460	2660	16
1480	2696	17
1500	2732	18
1520	2768	19
1530	2786	20
1580	2876	26
1610	2930	27
1630	2966	28
1650	3002	29
1670	3038	30
1690	3074	31
1710	3110	32
1730	3146	33
1750	3182	34
1770	3218	35
1790	3254	36
1825	3317	37
1850	3362	38
1880	3416	39
1920	3488	40
1960	3560	41
2000	3632	42

[2] http://ceramica.wikia.com/wiki/tabla_de_conos_de_Seger

APÉNDICE C
CRIBAS O MALLAS ESTÁNDAR SEGÚN ASTM

TABLA DE MALLAS ASTM Y SU EQUIVALENTE EN MALLAS TYLER [3]

ASTM malla (U.S. Standard Series)	Tyler Standard Series	Abertura de malla
0,265 in	3	6,7 mm
4	4	4,75 mm
6	6	3,35 mm
8	8	2,36 mm
12	10	1,70 mm
16	14	1,18 mm
20	20	850 µm
30	28	600 µm
40	35	425 µm
50	48	300 µm
70	65	212 µm
100	100	150 µm
140	150	106 µm
200	200	75 µm

**[3] ASTM C-92 STANDARD TEST METHODS FOR SIEVE ANALYSIS AND WATER
CONTENT OF REFRACTORY MATERIALS, UNITED STATES OF AMERICA, 1999**

APÉNDICE D

TOLERANCIAS DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

TOLERANCIAS DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA [4]

Procesos	Límites típicos de tolerancias	
	in	mm
Fundición		
Fundición en arena:		
Hierro fundido	±0,050	±1,3
Acero	±0,060	±1,5
Aluminio	±0,020	±0,5
Fundición en dados	±0,005	±0,12
Moldeado de plásticos		
Polietileno	±0,010	±0,3
Poliestireno	±0,006	±0,15
Maquinado		
Taladrado, diámetro:		
0,250 in (6 mm)	+0.003, -0.001	+0.08, -0.03
1,000 in (25 mm)	+0.006, -0.002	+0.13, -0.05
Fresado	±0,003	±0,08
Torneado	±0,002	±0,05
Abrasivo		
Esmerilado	±0,0003	±0,008
Abrillantado	±0,0002	±0,005
Rectificado	±0,0002	±0,005
No tradicionales		
Maquinado químico	±0,003	±0,08
Descargas eléctricas	±0,001	±0,025
Esmerilado electroquímico	±0,001	±0,025
Maquinado electroquímico	±0,002	±0,05
Corte con haz de electrones	±0,003	±0,08
Corte con rayo láser	±0,003	±0,08
Arco de plasma	±0,050	±1,3

[4] MIKELL P. GROOVER, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, PRENTICE HALL LATINOAMÉRICA, MÉXICO, 1997

APÉNDICE E

RUGOSIDAD DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

RUGOSIDAD DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA [5]

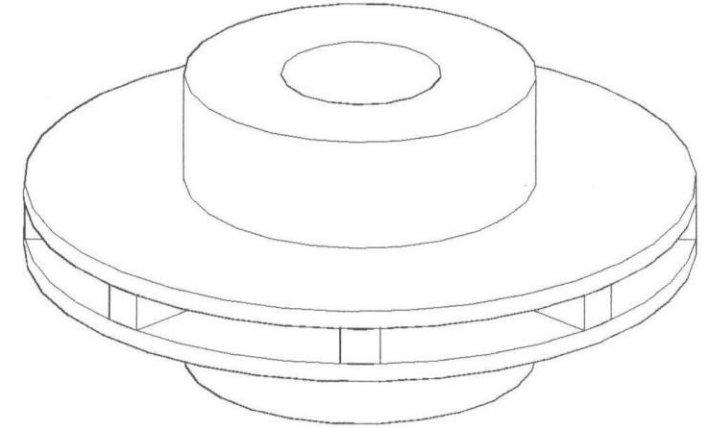
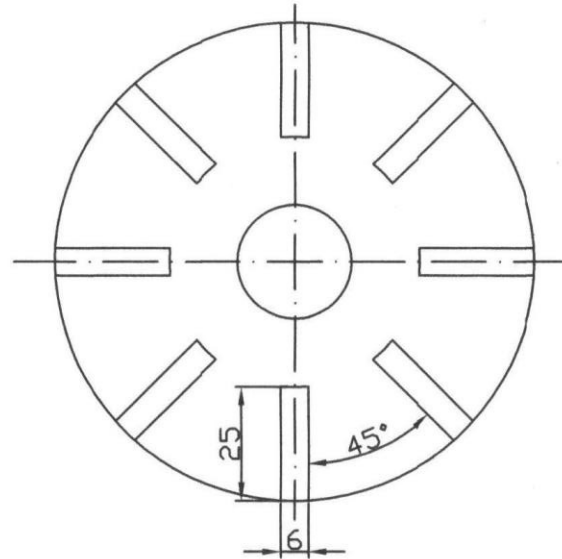
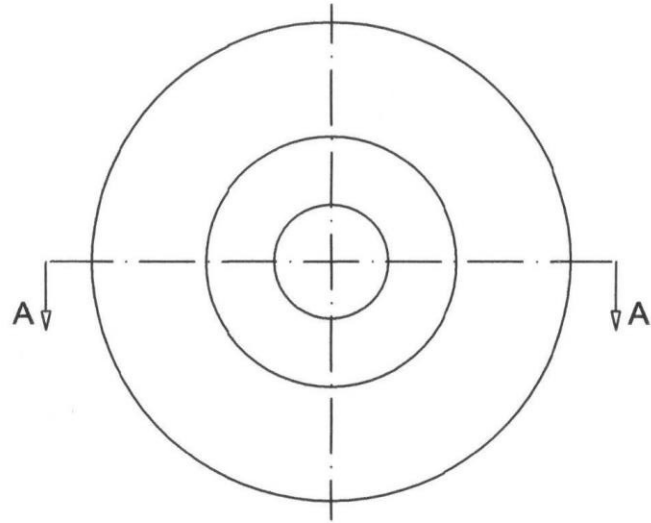
Proceso	Calidad	Rango de rugosidad		Integridad superficial
		μin	μm	
Fundición				
Fundición en dados	Bueno	30 - 65	1 - 2	Térmica
Revestimiento	Bueno	50 - 500	1,5 - 12	Térmica
Fundición en arena	Pobre	500 - 1000	12 - 25	Térmica
Conformado				
Laminado en frío	Bueno	25 - 125	1 - 3	Mecánica
Embutido	Bueno	25 - 125	1 - 3	Mecánica
Extrusión en frío	Bueno	30 - 150	1 - 4	Mecánica
Laminado en caliente	Pobre	500 - 1000	12 - 25	Mecánica significativa
Maquinado				
Perforado	Bueno	15 - 250	0,5 - 6	Mecánica
Taladrado	Mediano	60 - 250	1,5 - 6	Mecánica
Fresado	Bueno	30 - 250	1 - 6	Mecánica
Cepillado	Mediano	60 - 500	1,5 - 12	Mecánica
Abocardado	Bueno	30 - 125	1 - 3	Mecánica
Formado	Mediano	60 - 500	1,5 - 12	Mecánica
Aserrado	Pobre	100 - 1000	3 - 25	Mecánica significativa
Torneado	Bueno	15 - 250	0,5 - 6	Mecánica
Abrasivo				
Cilindrado	Muy bueno	5 - 75	0,1 - 2	Mecánica - Térmica
Rectificado	Muy bueno	4 - 30	0,1 - 1	Mecánica
Abrillantado	Excelente	2 - 15	0,05 - 0,5	Efecto mínimo
Pulido	Excelente	5 - 15	0,1 - 0,5	Efecto mínimo
Súper acabado	Excelente	1 - 10	0,02 - 0,3	Efecto mínimo
No tradicional				
Fresado químico	Mediano	50 - 200	1,5 - 5	Química mínimo
Electroquímico	Bueno	10 - 100	0,2 - 2	Eléctrica mínimo
Descarga eléctrica	Mediano	50 - 500	1,5 - 15	Térmica significativa
Haz de electrones	Mediano	50 - 500	1,5 - 15	Térmica
Rayo láser	Mediano	50 - 500	1,5 - 15	Térmica
Térmico				
Soldadura de arco	Pobre	250 - 1000	5 - 25	Térmica significativa
Corte con flama	Pobre	500 - 1000	12 - 25	Térmica significativa
Corte con plasma	Pobre	500 - 1000	12 - 25	Térmica significativa

[5] MIKELL P. GROOVER, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, PRENTICE HALL LATINOAMÉRICA, MÉXICO, 1997

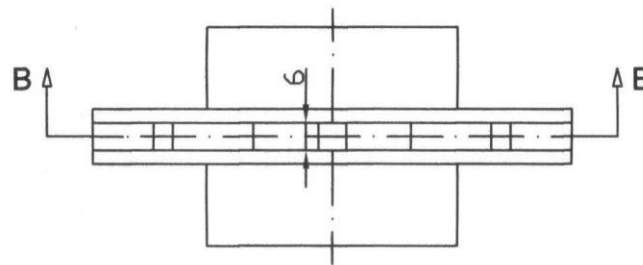
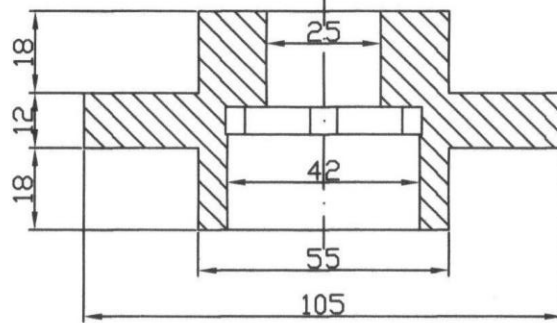
APÉNDICE F

PLANO DEL IMPULSOR DE BOMBA TIPO BYRON - JACKSON®

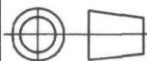
Sección B - B



Sección A - A



FIMCP-ESPOL		FECHA	NOMBRE
		DIBUJÓ	FREIRE M.
PROYECTO: FUNDICIÓN POR MÉTODO DE ESPUMA PERDIDA		REVISÓ	Ing. WIESNER
ESCALA:		PLANO No:	
CONTIENE: IMPULSOR DE BOMBA		01	
MATERIAL: ALEACIÓN DE ALUMINIO SAE 315			



APÉNDICE G

DISCO COMPARADOR DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Keane-Tator Surface Profile Comparator

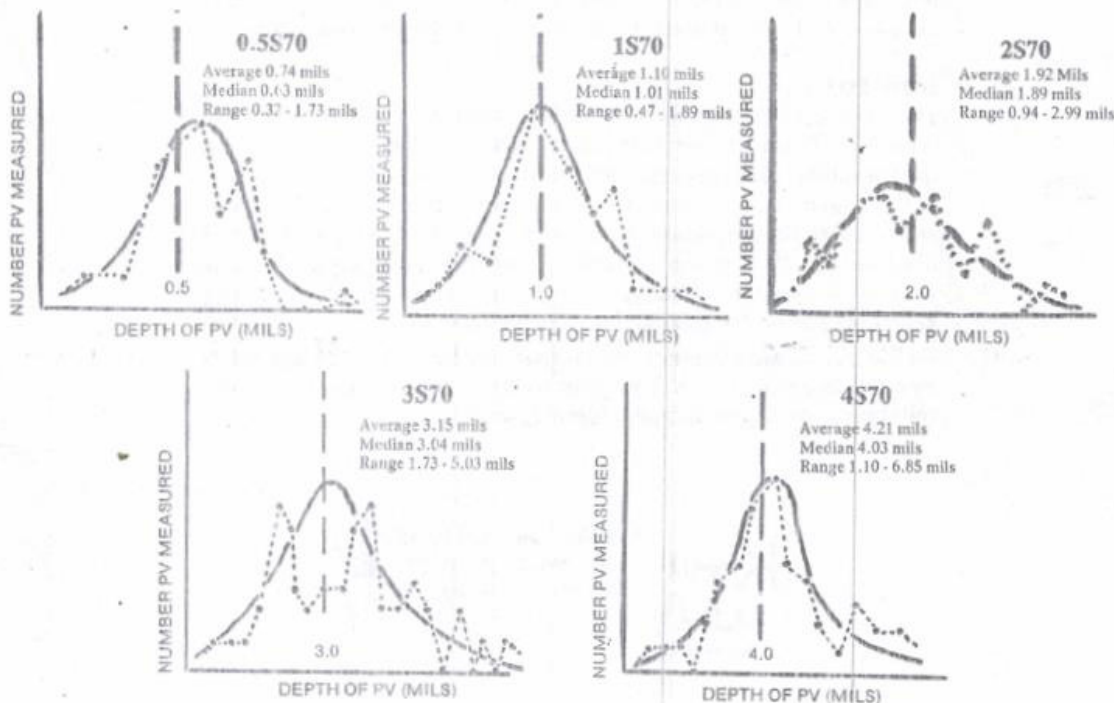


TECHNICAL INFORMATION

REFERENCE DISC — The Keane-Tator Surface Profile Comparator has as its basic component a reference disc exactly duplicating the master disc. The reference disc is an electroform copy of a master disc, duplicated to a maximum tolerance of plus or minus 50 micro inches (1,000 micro inches equal 1 mil). The disc is made of high purity nickel, and contains five segments with nominal anchor pattern depths of 0.5, 1, 2, 3, and 4 mils.

ANCHOR PATTERN MEASUREMENT — 50 peak-valley (PV) combinations were measured on 1 x 1-1/4" segments of sand blasted panels. Measurements were made by the Steel Structures Painting Council at the Mellon Institute of the Carnegie-Mellon University in Pittsburgh, Pa., using a 250 power microscope with a vernier focusing attachment. The microscope was first focused on the top of a peak, and then at the bottom of an adjacent valley. Readings were converted to mils (accurate to plus or minus 0.01 mils) and segments with average and median measurements most closely corresponding to the desired nominal anchor pattern depths were selected for the master disc.

MEASUREMENT RESULTS — The following graphs provide peak-valley depth distributional information for each of the five reference segments.



BIBLIOGRAFÍA

1. ASM Handbook Volume 02 “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials” – PDF, United States of America.
2. ASM Handbook Volume 15 “Casting” – PDF, United States of America.
3. ASTM Standard Specification for Aluminum – Alloy Sand Castings (ASTM B26 / B26M) - PDF, United States of America.
4. ASTM Standard Practice for Codification of Certain Nonferrous Metals and Alloys, Cast and Wrought (ASTM B275) – PDF, United States of America.
5. ASTM Standard Test Methods for Sieve Analysis and Water Content of Refractory Materials (ASTM C92) – PDF, United States of America.
6. ASTM Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Algal Defacement (ASTM D5589) – PDF, United States of America.

7. ASTM Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay (ASTM D5590) – PDF, United States of America.
8. GARCIA R. EMILIA / SUAREZ B. MERCEDES, “Las Arcillas: Propiedades y Usos - PDF”, Universidad Complutense de Madrid / Universidad de Salamanca, España.
9. GERLING HEINRICH, “Moldeo y Conformación”, Editorial Reverté S.A., Barcelona – España, 1979.
10. GROOVER P. MIKELL, “Fundamentos de Manufactura Moderna – Materiales, Procesos y Manufactura”, Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana S.A., México, 1997.
11. NORTON F. H., “Cerámica Fina – Tecnología y Aplicaciones”, Ediciones Omega S.A., Barcelona – España, 1988.