



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“FABRICACIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS DE ALUMINIO A PARTIR DE MODELOS COLAPSABLES DE ESPUMA DE POLIESTIRENO Y ESPUMA DE POLIURETANO”**

**HERAS HERAS MARÍA ORFELINA  
MANTUANO PÁRRAGA JEFFERSON STALIN**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2016**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2015-09-28

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**HERAS HERAS MARÍA ORFELINA**  
**MANTUANO PÁRRAGA JEFFERSON STALIN**

Titulado:

**“FABRICACIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS DE ALUMINIO A PARTIR DE**  
**MODELOS COLAPSABLES DE ESPUMA DE POLIESTIRENO Y ESPUMA DE**  
**POLIURETANO”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Luis Fernando Tierra  
**DIRECTOR**

---

Ing. Julio Carrasco Santillán  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** HERAS HERAS MARÍA ORFELINA

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “FABRICACIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS DE ALUMINIO A PARTIR DE MODELOS COLAPSABLES DE ESPUMA DE POLIESTIRENO Y ESPUMA DE POLIURETANO”

**Fecha de Examinación:** 2016-05-19

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>PRESIDENTE TRIB.DEFENSA</b>			
Ing. Luis Fernando Tierra <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Julio Carrasco Santillán <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Edwin Viteri Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## **EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** MANTUANO PÁRRAGA JEFFERSON STALIN

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** **“FABRICACIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS DE ALUMINIO A PARTIR DE MODELOS COLAPSABLES DE ESPUMA DE POLIESTIRENO Y ESPUMA DE POLIURETANO”**

**Fecha de Examinación:** 2016-05-19

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>PRESIDENTE TRIB.DEFENSA</b>			
Ing. Luis Fernando Tierra <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Julio Carrasco Santillán <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Edwin Viteri Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Heras Heras María Orfelina**

---

**Mantuano Párraga Jefferson Stalin**

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Heras Heras María Orfelina y Mantuano Párraga Jefferson Stalin, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

---

**María Orfelina Heras Heras**

Cédula de Identidad: 160062769-7

---

**Mantuano Párraga Jefferson Stalin**

Cédula de Identidad: 060487279-6

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico principalmente a Dios por regalarme la sabiduría y fuerza para culminar esta meta. A mi esposo y mi hijo Emilio Noé quienes son el pilar fundamental en el desarrollo de mi existencia.

A mis padres, quienes gracias a sus consejos y apoyo incondicional; me han permitido desarrollar una vida satisfactoria llena de bendiciones. A mis hermanos que en todo momento me apoyaron y me orientan por el camino correcto. A mi familia y amigos quienes creyeron en mí y nunca permitieron que me rindiera.

**Maria Orfelina Heras Heras**

Este trabajo de titulación se lo dedico a Dios, a mi madre Annabel Párraga y a mi Padre Líder Mantuano por haber depositado en mí la confianza necesaria para culminar esta etapa de mi vida siendo el pilar principal a lo largo de mi etapa universitaria alentándome a seguir adelante con sus consejos y regaños teniéndome mucha, pero mucha paciencia; a mis hermanos quienes de alguna manera han sabido sobrellevar conmigo la carga de la vida universitaria.

A mis amigos y compañeros de Riobamba con los cuales se han compartido tantas anécdotas e historias. Mis amigos de Cumandá quienes a lo largo de todo este tiempo han sabido estar ahí con sus consejos alentándome a seguir adelante para cumplir este sueño que es culminar la carrera de Ing. Mecánica; a cada uno de los ingenieros que compartieron sus conocimientos en las aulas de clases. ¡Muchas gracias!

**Jefferson Stalin Mantuano Párraga**

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento muy profundo a Dios por brindarnos la oportunidad de vivir y ser mejores cada día, también a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a su personal docente y administrativo quienes de alguna manera contribuyeron a cumplir con la meta profesional, para así actuar en el desarrollo de la sociedad de nuestro país y el mundo.

Agradecemos también a nuestra familia y amigos por brindarnos su apoyo incondicional.

A los miembros del tribunal del Trabajo de Titulación que fueron el pilar del conocimiento fundamental en el desarrollo y culminación del presente proyecto.

**María Orfelina Heras Heras**  
**Jefferson Stalin Mantuano Párraga**



## CONTENIDO

Pág.

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Justificación .....	2
1.2.1	<i>Justificación metodológica.</i> .....	2
1.2.2	<i>Justificación ecológica.</i> .....	2
1.2.3	<i>Justificación económica.</i> .....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.3.1	<i>Objetivo general.</i> .....	3
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i> .....	3
<b>2.</b>	<b>PROCESO DE FUNDICIÓN POR ESPUMA PÉRDIDA</b>	
2.1	Fundamentos del proceso de fundición a la espuma pérdida.....	4
2.1.1	<i>Breve historia y desarrollo del proceso de fundición a la espuma pérdida.</i> ...	4
2.1.2	<i>Proceso de fundición por espuma perdida. (FEP).</i> .....	5
2.1.3	<i>Elaboración del modelo de EPS.</i> .....	7
2.1.3.1	<i>Mecanizado</i> .....	7
2.1.3.2	<i>Ensamble del patrón.</i> .....	8
2.1.3.3	<i>Expansión de modelos.</i> .....	8
2.1.3.4	<i>Corte por hilo caliente.</i> .....	8
2.2	Poliestireno expandido.....	10
2.2.1	<i>Obtención del poliestireno expandido.</i> .....	10
2.2.2	<i>Propiedades del poliestireno expandido.</i> .....	11
2.2.2.1	<i>Densidad.</i> .....	11
2.2.2.2	<i>Resistencia mecánica.</i> .....	11
2.2.2.3	<i>Aislamiento térmico.</i> .....	12
2.2.2.4	<i>Propiedades químicas del poliestireno expandido.</i> .....	12
2.2.2.5	<i>Propiedades biológicas.</i> .....	13
2.2.3	<i>Características poliestireno expandido</i> .....	13
2.2.3.1	<i>Comportamiento frente al agua y vapor de agua.</i> .....	13
2.2.3.2	<i>Estabilidad dimensional.</i> .....	13
2.2.3.3	<i>Estabilidad frente a la temperatura.</i> .....	14
2.2.3.4	<i>Comportamiento frente a factores atmosféricos.</i> .....	14
2.2.3.5	<i>Comportamiento frente al fuego.</i> .....	14
2.2.3.6	<i>Toxicidad.</i> .....	15
2.3	Poliuretano .....	16
2.3.1	<i>Origen y obtención.</i> .....	17
2.3.1.1	<i>Origen...</i> .....	17
2.3.1.2	<i>Obtención.</i> .....	17
2.3.2	<i>Aplicaciones industriales.</i> .....	17
2.3.3	<i>Propiedades del poliuretano expandido</i> .....	18
2.3.3.1	<i>Propiedades físicas.</i> .....	18
2.3.3.2	<i>Propiedades mecánicas.:</i> .....	18
2.3.4	<i>Características del poliuretano expandido.</i> .....	19
2.3.4.1	<i>Resistencia a los productos químicos.</i> .....	19
2.3.4.2	<i>Comportamiento refractario.</i> .....	19

2.3.4.3	<i>Poder adhesivo..</i>	19
2.3.4.4	<i>Capacidad de laminación.</i>	20
2.3.4.5	<i>Versatilidad y posibilidades de diseño.</i>	20
2.3.4.6	<i>Estabilidad dimensional.</i>	20
2.3.5	<i>Inconvenientes</i>	20
2.3.5.1	<i>Exposición.</i>	20
2.3.5.2	<i>Reciclaje.</i>	21
2.3.5.3	<i>Toxicidad..</i>	21
2.4	<i>Aluminio</i>	22
2.4.1	<i>Usos</i>	22
2.4.2	<i>Propiedades físicas.</i>	22
2.4.3	<i>Propiedades químicas.</i>	22
2.5	<i>Arenas</i>	22
2.5.1	<i>Clasificación de las arenas.</i>	23
2.5.2	<i>Propiedades de las arenas</i>	23
2.5.2.1	<i>Humedad.</i>	23
2.5.2.2	<i>Permeabilidad.</i>	23
2.5.2.3	<i>Refractabilidad</i>	23
2.5.2.4	<i>Cohesión</i>	23
2.5.2.5	<i>Plasticidad..</i>	23
2.5.2.6	<i>Fluencia</i>	23
2.5.2.7	<i>Durabilidad o vida</i>	24
2.5.2.8	<i>Granulometría</i>	24
2.5.2.9	<i>Forma del grano</i>	24
2.5.2.10	<i>Distribución granulométrica</i>	24
2.6	<i>Recubrimientos refractarios</i>	25
2.6.1	<i>Divisiones de las pinturas.</i>	26
2.6.2	<i>Características y funciones de una pintura refractaria.</i>	26
2.6.3	<i>Forma de aplicación.</i>	26
2.6.4	<i>Elementos de la pintura refractaria.</i>	27
2.6.4.1	<i>Agente refractario.</i>	27
2.6.4.2	<i>Agente de suspensión.</i>	28
2.6.4.3	<i>Agente dispersante.</i>	29
2.6.4.4	<i>Agente solvente..</i>	29
2.6.4.5	<i>Aditivos.</i>	29
2.7	<i>Procedimiento de fabricación de piezas fundidas de aluminio con modelos evaporativos.</i>	30
2.8	<i>Conclusiones del capítulo</i>	31
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN POR EL METODO DE ESPUMA PERDIDA</b>	
3.1	<i>Diseño de la pieza a fundir</i>	32
3.2	<i>Fabricación de los modelos colapsables</i>	32
3.2.1	<i>Espuma de poliestireno.</i>	32
3.2.2	<i>Espuma de poliuretano</i>	33
3.2.2.1	<i>Procedimiento I.</i>	33
3.2.2.2	<i>Procedimiento II</i>	34
3.3	<i>Determinación del tamaño de la muestra</i>	35
3.4	<i>Recubrimiento refractario de modelos</i>	36
3.4.1	<i>Materiales de fabricación para el recubrimiento refractario.</i>	36

3.4.1.1	<i>Mezcla 1</i> .....	37
3.4.1.2	<i>Mezcla 2</i> .....	38
3.4.1.3	<i>Mezcla 3</i> .....	40
3.4.1.4	<i>Mezcla 4</i> .....	41
3.5	Aplicación del recubrimiento refractario .....	42
3.5.1	<i>Mezcla N°1</i> .....	42
3.5.2	<i>Mezcla N°2</i> .....	44
3.5.3	<i>Mezcla N°3</i> .....	45
3.5.4	<i>Mezcla N°4</i> .....	46
3.6	Espesor del recubrimiento refractario .....	48
3.7	Ensayo de arenas .....	48
3.7.1	<i>Ensayos realizados a las arenas de moldeo</i> .....	49
3.7.1.1	<i>Granulometría</i> .....	49
3.7.1.2	<i>Contenido de humedad</i> .....	53
3.7.1.3	<i>Ensayo de permeabilidad</i> .....	53
3.7.1.4	<i>Ensayos mecánicos</i> .....	55
3.8	Sistema de alimentación .....	57
3.8.1	<i>Embudo de colada</i> .....	58
3.8.2	<i>Canal vertical</i> .....	58
3.8.3	<i>Talón de caída</i> .....	58
3.8.4	<i>Canal de distribución</i> .....	58
3.8.5	<i>Canales de alimentación</i> .....	59
3.8.6	<i>Temperatura de colado</i> .....	59
3.8.7	<i>Velocidad de colado</i> .....	59
3.8.8	<i>Diseño de secciones de alimentación de las piezas</i> .....	59
3.9	Análisis CAE .....	65
3.9.1	<i>Procedimiento para análisis de piezas a fundir en el software Click2Cast</i> ..	65
3.10	Fundición de piezas .....	69
3.10.1	<i>Procedimiento de fundición</i> .....	69
3.10.2	<i>Piezas fundidas</i> .....	70
3.10.2.1	<i>Piezas a partir de modelos de poliestireno</i> .....	70
3.10.2.2	<i>Piezas a partir de modelos de poliuretano</i> .....	71
3.11	Evaluación de defectos por fundición .....	72
3.11.1	<i>Poliestireno</i> .....	72
3.11.2	<i>Poliuretano</i> .....	73
3.12	Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas .....	75
3.13	Caracterización del material .....	77
3.13.1	<i>Análisis metalográfico</i> .....	77
3.13.2	<i>Comparación visual</i> .....	77
3.13.3	<i>Análisis de espectrometría</i> .....	78
3.13.4	<i>Comparación visual de microestructura entre piezas obtenidas de poliestireno, poliuretano y fundición en arena convencional</i> ..	80
3.13.5	<i>Ensayo de dureza</i> .....	82
3.14	Cantidad de energía utilizada para fundir modelos de poliestireno y modelos de poliuretano .....	84
3.14.1	<i>Energía para fundir modelos de poliestireno</i> .....	84
3.14.2	<i>Energía para el poliuretano</i> ..	87
3.15	Deducciones parciales .....	88
3.15.1	<i>Poliestireno</i> .....	88
3.15.2	<i>Poliuretano</i> .....	89

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PIEZAS FUNDIDAS</b>	
4.1	Evaluación de la calidad de las piezas .....	90
4.2	Microestructura .....	91
4.3	Dureza .....	92
4.4	Evaluación de la rugosidad de la superficie.....	93
4.4.1	<i>Rugosidad de piezas a partir de modelos de poliestireno</i> .....	93
4.4.2	<i>Rugosidad de piezas a partir de modelos de poliuretano</i> .....	94
4.4.3	<i>Comparación de la rugosidad de las piezas de modelos colapsables vs una pieza fundida por fundición en arena.</i> .....	94
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b> .....	96
5.1	Costos directos.....	96
5.2	Costos indirectos.....	98
5.3	Costos totales. ....	98
5.4	Diferencia costos de producción con modelos de poliuretano y poliestireno	98
5.4.1	<i>Costos de fabricación modelos de poliestireno</i> .....	99
5.4.2	<i>Costos de fabricación modelos de poliuretano</i> .....	99
5.5	Costo por elevar la temperatura en la fundición modelos de poliuretano. ..	100
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones .....	101
6.2	Recomendaciones .....	102

## **BIBLIOGRAFIA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1	Estabilidad química del poliestireno expandido ..... 12
2	Toxicidad de humos del EPS..... 16
3	Propiedades físicas del poliuretano ..... 18
4	Distribución granulométrica ..... 25
5	Porcentajes y componentes de una pintura refractaria. .... 27
6	Principales elementos refractarios ..... 28
7	Sustancias utilizadas como agentes de suspensión..... 28
8	Materiales dispersantes ..... 29
9	Solventes en pinturas refractarias ..... 29
10	Componentes de la mezcla 1. .... 37
11	Componentes de la mezcla 2 ..... 38
12	Componentes de la mezcla 3 ..... 40
13	Componentes de la mezcla 4 ..... 41
14	Características de la mezcla N°1 sobre los modelos ..... 43
15	Características de la mezcla N°2 sobre los modelos ..... 45
16	Características de la mezcla N°3 sobre los modelos. .... 46
17	Características de la mezcla N°4 sobre los modelos. .... 47
18	Espesor de los diferentes tipos de recubrimientos refractarios..... 48
19	Resultados de granulometría de la muestra de arena..... 51
20	Clasificación del grado AFS..... 52
21	Variación de la seccion del sistema de alimentación. .... 63
22	Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliestireno ..... 76
23	Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliuretano..... 76
24	Dureza Brinell piezas obtenidas de modelos de poliestireno. .... 83
25	Dureza Brinell piezas obtenidas de modelos de poliuretano. .... 83
26	Cálculo de rugosidad de la pieza final fundida de poliestireno ..... 93
27	Cálculo de rugosidad de la pieza final fundida de poliuretano..... 94
28	Rugosidad de la superficie de la pieza por fundición tradicional ..... 95
29	Costos de materiales ..... 96
30	Costos por mano de obra ..... 97
31	Costos por uso de máquinas y herramientas..... 97
32	Costos por transporte ..... 97
33	Total de costos directos ..... 97
34	Total de costos indirectos ..... 98
35	Costos totales ..... 98
36	Costos de fabricación modelos de poliestireno ..... 99
37	Costos de fabricación modelos de poliuretano ..... 99

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1	Proceso de fundición con molde desechable ..... 6
2	Proceso de fundición por espuma perdida ..... 6
3	Expansión del modelo de EPS..... 8
4	Estructura química del poliuretano ..... 17
5	Vista microscópica de las celdas cerradas de la espuma de poliuretano ..... 17
6	Arenas con granos de formas diversas. .... 24
7	Modelado de la pieza a fundir ..... 32
8	Máquina de corte por hilo caliente ..... 33
9	Piezas de poliestireno expandido..... 33
10	Matriz para la expansión de poliuretano..... 34
11	Plancha de poliuretano después del corte laser..... 35
12	Piezas de poliuretano ..... 35
13	Reacciones durante el proceso de fundición por espuma perdida. .... 36
14	Componentes de la mezcla 1. .... 37
15	Componentes de la mezcla 2. .... 39
16	Componentes de la mezcla 3. .... 40
17	Componentes de la mezcla 4. .... 42
18	Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N°1 ..... 43
19	Modelos recubiertos de la mezcla N°1 ..... 44
20	Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N°2..... 44
21	Modelos recubiertos de la mezcla N°2 ..... 45
22	Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N° 3..... 46
23	Modelos recubiertos de la mezcla N°3 ..... 46
24	Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N° 4..... 47
25	Modelos de recubiertos de la mezcla N°4 ..... 48
26	Arena vista desde el microscopio a 25x. .... 50
27	Tamiz para el ensayo de granulometría. .... 51
28	Gráfica porcentaje de peso vs tamaño del tamiz. .... 52
29	Higrómetro utilizado para el ensayo de humedad. .... 53
30	Máquina para ensayo de permeabilidad ..... 54
31	Ensayo de compresión ..... 56
32	Máquina para el ensayo de corte en arenas. .... 57
33	Partes de un sistema de alimentación ..... 58
34	Pieza patrón a fundir dibujada en SolidWorks. .... 60
35	Tiempo de colado en función del peso de la pieza. .... 61
36	Geometría de los canales de distribución y alimentación..... 63
37	Sistema de distribución completo..... 65
38	Sección geometry del software Click2cast..... 66
39	Sección mesh del software Click2cast..... 66

40	Sección mesh del software Click2cast.....	67
41	Sección calculate del software Click2cast.....	67
42	Resultados obtenidos mediante el software Click2cast.....	68
43	Resultados del software CLick2Cast.....	68
44	Modelos de poliuretano y poliestireno dentro del molde de arena.....	70
45	Colado de metal fundido.....	70
46	Piezas fundidas de modelos de poliestireno con diferentes recubrimientos....	71
47	Piezas fundidas de modelos de poliuretano con diferentes recubrimientos. ...	71
48	Superficie defectuosa del poliestireno,.....	72
49	Porosidades en la pieza fundida a partir de molde poliestireno. ....	72
50	Pequeñas puntas de alfiler en la pieza fundida. ....	73
51	Grietas en la pieza proveniente de poliuretano.....	73
52	Porosidades superficiales.....	74
53	Sección izquierda incompleta.....	74
54	Sopladuras evidentes de pieza fundida.....	75
55	Método de la rugosidad media aritmética.....	75
56	Comparación de microestructura de las piezas fundidas de aluminio a 100x ..	78
57	Comparación de microestructura de las piezas fundidas de aluminio a 500x ..	78
58	Resultados de espectrometría para la pieza C de modelos de poliestireno. ....	79
59	Resultados de espectrometría para la pieza C de modelos de poliuretano. ....	79
60	Diferentes microestructuras a partir de los modelos de poliestireno.....	80
61	Diferentes microestructuras a partir de los modelos de poliuretano. ....	81
62	Microestructura de aluminio fundida por modelo de EPS a 100x.....	81
63	Microestructura de aluminio fundida de modelo de poliuretano a 500x.....	82
64	Piezas finales aplicando sus respectivas correcciones.....	90
65	Pieza final obtenida a partir de espuma de poliestireno .....	91
66	Microestructura piezas finales a partir de EPS y poliuretano.....	92
67	Morfología fundición de aluminio de modelos colapsables .....	92
68	Medición de Ra en la pieza obtenida de poliestireno. ....	93
69	Medición de Ra en la pieza obtenida de poliuretano.....	94
70	Medición de Ra en la pieza por fundición tradicional.....	95

## LISTA DE ABREVIACIONES

CAD	Computer Aided Desing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ASME	American Society Mechanical Engineers
ASM	American Society of Materials
HB	Dureza Brinell
FEP	Fundición en Espuma Perdida
LFC	Lost Foam Casting
EPS	Espuma de poliestireno expandido
UV	Ultravioleta
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
PU	Poliuretano
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización



## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Diagrama de flujo del procedimiento de fabricación de piezas fundidas
- B** Resultados del software Click2Cast.
- C** Resultado Espectrometría Piezas fundidas de aluminio.
- D** Factor K para el ensayo de dureza en función del material
- E** Figuras de las diferentes piezas utilizadas para el cálculo de la rugosidad

## RESUMEN

El método de fundición por espuma perdida tradicionalmente usa la espuma de poliestireno como material base para la fabricación de los modelos colapsables, en esta investigación se busca la utilización de nuevos materiales para este proceso, encontrando una opción viable en la espuma de poliuretano.

Inicia con la fabricación de los modelos de espuma en ambos materiales, que serán recubiertos por cuatro tipos de pinturas refractarias con la finalidad de encontrar un recubrimiento óptimo que otorgue el mejor acabado superficial a las piezas fundidas. Se estudian las variables que intervienen en el proceso de fundición entre ellas: Características de las arenas de moldeo, temperatura de colada e interacción modelo-pintura refractaria. Con la utilización del Software Click2Cast se diseñó y analizó el sistema de alimentación a emplearse en la fundición de las piezas de aluminio.

Técnicas de metalografía óptica, espectrometría y ensayo de Dureza Brinell fueron empleadas para caracterizar y cuantificar las variaciones de microestructura y dureza en el metal base además se valoraron también las fallas por fundición o por el empleo de modelos colapsables.

A partir de estos resultados se tomaron medidas de corrección, obteniendo mejoras considerables para las piezas fundidas provenientes de modelos de espuma de poliuretano y poliestireno, el acabado superficial de las piezas de poliestireno es ligeramente mejor sin embargo no existe diferencia entre las propiedades físicas y la estructura química con la pieza obtenida de poliuretano, por tanto la espuma de poliuretano es una alternativa factible en el método de fundición por espuma perdida.

## **ABSTRACT**

The lost foam casting method uses the polystyrene foam traditionally as a base material for the manufacturing of collapsible models; this research seeks the use of new materials for this process, finding a viable option in the polyurethane foam.

It starts with the manufacturing of the models of foam in both materials, which will be covered by four types of refractory paintings in order to find an optimal coating that gives the best surface finish to the melted casting. The variables involved in the casting process were studied, these include: characteristics of the molding sands, pouring temperature and interaction model-refractory paint. With the use of the Click2Cast Software was designed and analyzed the power system to be used in the smelting of aluminum parts.

Optical metallography techniques, spectrometry and Brinell hardness test were used to characterize and quantify variations in microstructure and hardness in the base metal failure were also valued by casting or by the use of collapsible models.

Based on these results, remedial measures were taken, obtaining significant improvements to the casted parts coming from polyurethane and polystyrene foam models, the surface finish of the polystyrene parts is slightly better however there is no difference between physical properties and chemical structure with the piece obtained of polyurethane therefore the polyurethane foam is a feasible alternative in the lost foam casting method.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Según la revista "Foundry Management and Technology" el proceso de fundición por espuma perdida es el proceso de fundición más eficiente disponible hasta el momento; reportando ahorros de 27% en energía, una mejora del 46% en la productividad del trabajo y 7% menos en la utilización de materiales en comparación con otros procesos de moldeo. El proceso de fundición de espuma perdida produce piezas de alto valor mediante la combinación de componentes de fundición en piezas fundidas individuales, reduce el consumo de materiales por eliminación de mazarotas y corazones, a la vez mejora las tolerancias dimensionales de las piezas.

En el mundo solo alrededor de 32 plantas aplican el método de fundición por espuma perdida de manera eficiente en países como Francia, Japón, Canadá y Estados Unidos. (ALVAREZ, y otros, 2013). Uno de los atractivos que presenta este proceso es la reducción del consumo de energía durante la fabricación. Por ejemplo, un ahorro de energía de  $7.7 \times 10^{12}$  BTU / año se lograría si las fundiciones de hierro, hierro dúctil y aluminio las cuales son producidas por arena de moldeo en cáscara y procesos verdes, se produjeran por el método de espuma perdida. (GRIFFIN, y otros, 2005). En Cali Colombia la empresa Cobral Ltda. es una de las plantas de Fundición en Espuma Perdida (FEP) en Latinoamérica, la cual dio una mayor relevancia a la necesidad de optimizar su proceso, aplicando este procedimiento (ALVAREZ, y otros, 2013)

En el Ecuador no existe ninguna Empresa que utilice este método de fundición, pero existen ciertas investigaciones, las cuales analizan los diferentes componentes de la fundición por espuma perdida de manera aislada, tales investigaciones son: Estudio de las pinturas refractarias realizada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral proceso de fundición por el método de espuma perdida en aleaciones no ferrosas (FREIRE, 2008) y obtención de piezas de aluminio mediante el proceso de colado con modelos de poliestireno expandido (ALVAREZ, y otros, 2013), trabajos de investigación realizados en la Escuela Politécnica Nacional.

## **1.2 Justificación**

**1.2.1** *Justificación metodológica.* Actualmente nuestro país atraviesa un cambio de matriz productiva prestando gran interés al sector metalmecánico, por tanto, es necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan mejorar la industria de la fundición de aleaciones metálicas.

Un proceso muy importante en la industria mecánica es el de la fundición, sin embargo las mejoras e innovaciones en este proceso han sido minúsculas, es por esto que se pretende estudiar y a la vez implementar un proceso relativamente nuevo en nuestro país, como es la fundición mediante modelos colapsables, puesto que en piezas que presentan complejidad para ser fundidas, este proceso es utilizado mundialmente con gran versatilidad; obteniéndose mediante esta técnica, piezas con requerimientos dimensionales y geométricos especiales que no serían factibles con otras técnicas de fundición. Adicionalmente, las piezas fundidas mediante esta técnica presentan un buen acabado superficial y tolerancias dimensionales más precisas (FERNÁNDEZ , y otros, 2006)

**1.2.2** *Justificación ecológica.* En las fundiciones que presenta modelos permanentes la colada de fundición interacciona directamente con la arena de los moldes, adhiriéndose ciertas partículas, las cuales desembocan en residuos presentes en las arenas. Estos residuos generan consecuencias como menor tasa de reutilización de las arenas. Este problema no se presentará en la fundición utilizando modelos colapsables, ya que estos al ser recubiertos con una pintura refractaria crean una capa la cual permite una interacción menor o casi nula entre la colada y las arenas de moldeo

**1.2.3** *Justificación económica.* La fundición por el método de espuma perdida presenta varias ventajas económicas como son: ahorro de energía, una menor cantidad de material empleado en las piezas fundidas, y un grado de reutilización mayor de las arenas, además de un menor tiempo en el proceso de fundición debido a que el tiempo en la realización del molde se elimina y hay una mayor productividad. El empleo de este método se justifica en la fundición de piezas a gran escala puesto que al fabricar los modelos en masa no representan un rubro importante, a diferencia de que, si se fabricara una sola pieza o en menor cantidad, este monto sería considerable.

### **1.3      Objetivos**

**1.3.1**      *Objetivo general.* Estudiar la tecnología para la fabricación de piezas fundidas de aluminio mediante modelos colapsables de espuma de poliestireno y espuma de poliuretano para analizar las variables involucradas en el proceso de fundición y validar la calidad de las piezas fundidas.

**1.3.2**      *Objetivos específicos:*

- Examinar el estado del arte de la tecnología de fundición por modelos colapsables, específicamente el método de espuma perdida.
- Fabricar la matriz y los modelos de espuma aplicando la tecnología adecuada para cada material.
- Estudiar las variables que intervienen en el proceso de fundición con espuma de poliestireno y espuma de poliuretano.
- Validar la calidad de las piezas fundidas y comparar que material resulta más funcional entre la espuma de poliestireno o la espuma de poliuretano en la fabricación de modelos colapsables.

## CAPÍTULO II

### 2. PROCESO DE FUNDICIÓN POR ESPUMA PÉRDIDA

En este capítulo se revisó detenidamente en que consiste el proceso de fundición por espuma perdida además se estudiaron las propiedades de la espuma de poliestireno y su comportamiento en este proceso, con el objetivo de encontrar un material de características y propiedades afines del cual se puedan obtener resultados similares o incluso mejores al aplicar el método de fundición por espuma perdida.

Al mismo tiempo se estudian los métodos para la elaboración de los modelos tanto de poliestireno como de poliuretano, con la finalidad de determinar cuál es el método más apropiado en cada caso, considerando varios aspectos como la accesibilidad a la tecnología, tiempo y el factor económico.

Dentro del marco referencial se analizó también la literatura sobre recubrimientos refractarios, con el propósito de conocer los componentes básicos de este tipo de pintura y principalmente cuales, de estos materiales, se pueden adquirir dentro del mercado nacional, otro parámetro importante dentro de este capítulo es el estudio del aluminio, pues de este metal se fabricarán las piezas y es necesario conocer propiedades importantes como su densidad y punto de fusión.

#### 2.1 Fundamentos del proceso de fundición a la espuma pérdida

**2.1.1** *Breve historia y desarrollo del proceso de fundición a la espuma pérdida.* La primera patente para un proceso de fundición por modelos evaporativos fue presentada en abril de 1956 por H. F. Shroyer. Su patente se basó en el uso de modelos de espuma de poliestireno sumergidos en arenas verdes utilizadas en procesos tradicionales de fundición. En esta se describe el proceso a partir de un bloque de espuma de poliestireno que es moldeado de acuerdo a la pieza que se desea fundir. Este proceso se conoce en la actualidad como proceso de molde completo. En 1964, M. C. Flemming utiliza arena suelta para este proceso. Esto se conoce hoy como la fundición por espuma perdida (LFC). Con LFC, el patrón de espuma se moldea a partir de perlas de poliestireno. LFC se diferencia de molde completo con el uso de arena sin aglutinantes (LFC) a diferencia

de arena aglomerada (proceso de molde completo). En América del Norte la primera vez que se fundió a partir de modelos evaporativos fue realizada por la fundidora Robinson en la Ciudad de Alexander en el estado de Alabama. General Motors fue el primero en involucrar estos procesos a su línea de producción en la fabricación de la cabeza de pistón de 4.3 L, de su motor V-6 en el año de 1981 en la Ciudad de Massena, New York.

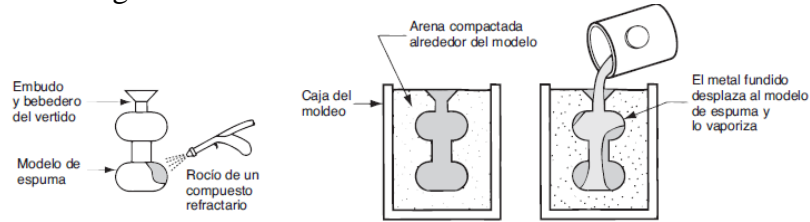
Posteriormente en el año de 1982 Ford también adopto esta tecnología para la fabricación de los pistones de sus motores. En 1984 Fiat también comenzó a fabricar piezas pequeñas en escala reducida. Estas aplicaciones se llevaron a cabo principalmente mediante la adopción de método de moldeo a partir de máquinas vibratorias de moldeo esto debido a que se utilizan arenas sin aglutinante. Esta tecnología se denomina comúnmente como espuma perdida. (KIMURA). Un estudio realizado en 1997 presento que las fundiciones realizadas por modelos colapsables representan aproximadamente 140 000 toneladas de aluminio fundido en los Estados Unidos; este mismo trabajo prevé que en un futuro las fundiciones por modelos colapsables representaran el 29 % del total de fundiciones de aluminio y el 14% de los mercados de fundiciones no ferrosas (MACHINE JAYSHREE & TOOLS, 2013).

**2.1.2** *Proceso de fundición por espuma perdida. (FEP).* El proceso FEP consiste en la generación de una pieza metálica a partir de un modelo de espuma de poliestireno expandido (EPS) que se evapora al contacto con el metal fundido, a fin de formar una cavidad para la fundición. En piezas que presentan complejidad para ser fundidas, el proceso fundición por espuma perdida es utilizado mundialmente; obteniéndose mediante esta técnica piezas con requerimientos dimensionales y geométricos especiales que no podrían ser fundidas con otras técnicas. Además, las piezas fundidas por la técnica de fundición por espuma perdida presentan un buen acabado superficial y tolerancias dimensionales muy estrechas logrando una calidad insuperable por otras técnicas de fundición. (REVELO GUERRERO, 2011).

La etapa inicial tiene como objetivo la obtención de los modelos de las piezas a fabricar en espuma de poliestireno expandido, los cuales serán ensamblados posteriormente a un árbol de modelos. Para la fabricación de modelos existen diversos métodos de fabricación que pueden ser aplicados de acuerdo la necesidad o las exigencias de la pieza a fundir, estos métodos se describirán detenidamente a continuación.



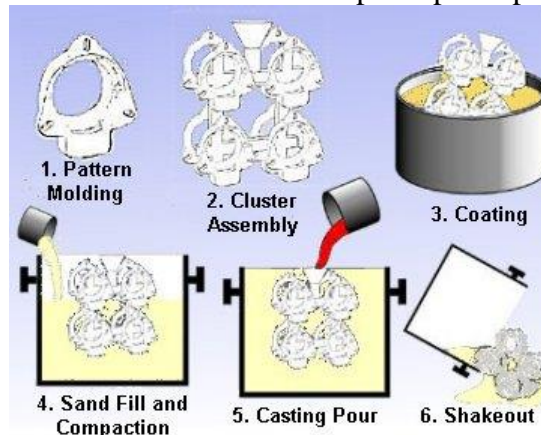
Figura 1. Proceso de fundición con molde desechable



Fuente: (GROOVER, 2007)

El modelo se recubre con una pintura refractaria, se seca y se coloca en una caja de moldeo. Después ésta se llena con arena fina suelta, que rodea y soporta al modelo. La arena se compacta periódicamente sin retirar el modelo de poliestireno; luego se vacía el metal fundido dentro del molde y vaporiza de inmediato el modelo. Al llenarse la cavidad, se reemplaza por completo el espacio que ocupaba antes el poliestireno. Este último es degradado por el calor y los productos de la degradación se ventilan hacia la arena circundante. La velocidad del flujo de metal fundido dentro del molde depende del nivel de degradación del polímero. En la figura 1, se puede observar la secuencia de este proceso.

Figura 2. Proceso de fundición por espuma perdida



Fuente: (LOSTFOAM.COM, 2015)

Antes de experimentar con este método de fundición es necesario estudiar varios factores que intervienen en el proceso, además de la secuencia que forma parte del proceso de fundición por espuma perdida según se detalla en “ASM Handbook Volume 15 Casting”, se determina que los elementos más influyentes son los siguientes:

- 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 y propiedades finales (FREIRE, 2008)

**2.1.3** *Elaboración del modelo de EPS.* Existen varios métodos de fabricación de modelos de acuerdo a la complejidad o a las exigencias que requiere la pieza fundida, la elección de un método de creación de modelos para producir piezas fundidas en espuma perdida depende de los objetivos del proyecto.

Entre los métodos usados para la fabricación de modelos destacan los siguientes:

**2.1.3.1** *Mecanizado.* Los modelos en poliestireno expandido se pueden manufacturar mediante los procesos de mecanizado con máquinas herramientas, como el torno y la fresadora.

- *Métodos de corte CNC.* La maquinaria utilizada para producir modelos de espuma son una adaptación del equipo CNC disponible en el mercado, mejorados con ciertas características para mejorar la precisión y la velocidad de corte. Incluso se han añadido accesorios de eliminación de residuos para mantener superficies de corte limpias y poder reciclar material. Obviamente para reproducir los modelos antes es necesario realizar el diseño mediante un software especializado. (LOSTFOAM.COM, 2015)
- *Proceso de fresado.* El fresado consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos, que se llaman dientes, labios o plaquitas de metal duro, se ejecutan movimientos de avance programados de la mesa de trabajo en casi cualquier dirección de los tres ejes posibles en los que se puede desplazar la mesa donde va fijada la pieza que se mecaniza. Con el uso creciente de las fresadoras de control numérico están aumentando las operaciones de fresado que se pueden realizar con este tipo de máquinas, siendo así que el fresado se ha convertido en un método polivalente de mecanizado. El desarrollo de las herramientas ha contribuido también a crear nuevas posibilidades de fresado además de incrementar de forma considerable la productividad, la calidad y exactitud de las operaciones realizadas. (CNC-MULTITOOL, 2015).

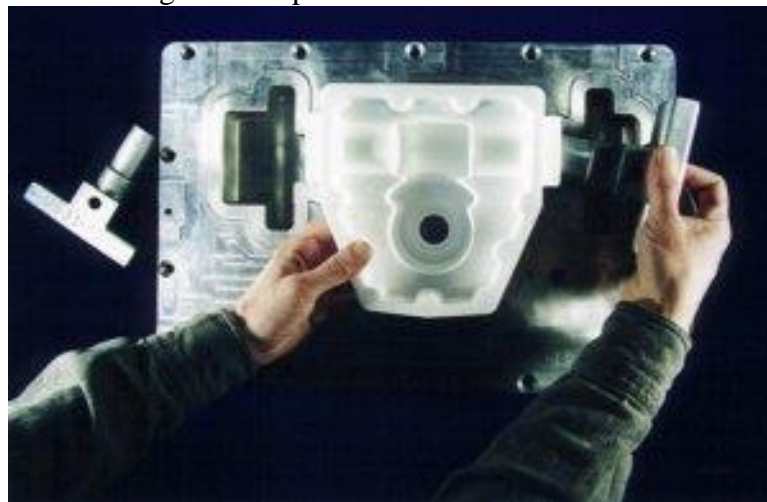
**2.1.3.2** *Ensamble del patrón.* A menudo, debido a las características que se requieren, un patrón debe ser separado en piezas que se pueden cortar directamente y después se ensamblan para crear el patrón final.

Las piezas de patrón individuales se ensamblan usando AirSet pegamento desarrollado específicamente para usarse con EPS. El adhesivo tiene características que proporcionan relleno, no degrada el material y no afecta adversamente el proceso de fundición. (LOSTFOAM.COM, 2015)

**2.1.3.3** *Expansión de modelos.* En este proceso se colocan perlas de poliestireno desechable (EPS) sin tratamiento, que contienen de 5% a 8% de pentano (un hidrocarburo volátil) en una matriz precalentada que, por lo general está hecha de aluminio. El poliestireno se expande y adquiere la forma de la cavidad de la matriz. Se aplica calor adicional para fundir y unir las perlas. Después se enfría la matriz, se abre y se retira el modelo de poliestireno. (KALPAJIAN.S, y otros, 2008)

Esta información se estudia con más profundidad en el ítem obtención del poliestireno.

Figura 3. Expansión del modelo de EPS.



Fuente: (LOSTFOAM.COM, 2015)

**2.1.3.4** *Corte por hilo caliente.* Un cortador de espuma de alambre caliente es una herramienta utilizada para cortar poliestireno de espuma y otros materiales de características similares. El aparato consiste en un alambre delgado y tenso de metal, a menudo de acero inoxidable, o un alambre más grueso preformado en la forma deseada, que se calienta a través de una resistencia eléctrica hasta aproximadamente 200 ° C. A

medida que el cable pasa a través del material a cortar, el calor del alambre vaporiza el material justo antes de ponerse en contacto. La profundidad del corte sólo está limitada por la longitud del cable. Los tipos de cable que se utiliza con mayor frecuencia son:

- Trabajados, manualmente o con pinzas.
- Tensionados: Sujetos por un marco o muelles, existe preferencia por una sola hebra de alambre de acero inoxidable sobre el alambre de nicromo, en diámetros que van de 0,008 pulgadas (0.2032mm) a 0.020 pulgadas (0.508mm).

Equipo de corte comercial a menudo utiliza el cable de aleación de níquel René 41, una aleación de níquel desarrollada por General Electric, que conserva una alta resistencia a la temperatura en el 1200/1800 ° F (649 / 982 ° C). (WIKIPEDIA, 2015)

**2.1.4** *Ventajas y desventajas del proceso de fundición por EPS.* Una de las ventajas más significativas de este proceso es que el modelo no necesita retirarse del molde por esto la fundición se simplifica y se agiliza el proceso. En un molde convencional de arena verde, se requiere de dos mitades con líneas de separación apropiadas, se debe proveer de tolerancias en el diseño del molde, los núcleos deben insertarse y debe agregarse el sistema de paso y mazarota, pero con el proceso de poliestireno expandido, estas etapas se incluyen en el modelo mismo y además se garantiza un mejor acabado superficial de la pieza por lo que el proceso de mecanización es eliminado en gran parte e incluso en su totalidad. Otra de las ventajas, es que la arena puede ser reutilizada debido a la ausencia de aglutinantes, pues se utiliza arena seca, de esta forma el proceso es también amigable con el ambiente, ya que incluso se puede llegar a montar un sistema de recirculación, y a pesar de que es necesario retirar restos de arena que han sido contaminados por los productos de combustión, siempre es menor la cantidad de arena usada en relación a cualquier otro proceso de fundición. Todos estos factores influyen a una reducción de costos de producción e incluso el costo del material de los modelos no representa un rubro importante, pues los dos polímeros usado pueden ser adquiridos con facilidad y a costos accesibles en nuestro medio. Es necesario considerar también que el proceso es más rápido; se reduce significativamente el tiempo correspondiente a la mano de obra y los costos que esto genera, inclusive el proceso se puede llegar a automatizar en gran parte optimizando la producción y la calidad de las piezas fundidas.

Entre las desventajas del proceso se identifican las siguientes: la necesidad de un modelo nuevo para cada fundición, se requiere ser muy minucioso en el proceso y en la preparación del modelo, son muchas las variables que se deben controlar para obtener una pieza de calidad. Un factor muy importante es el factor económico, puesto que este proceso se justifica en grandes producciones o producción en masa ya que el costo de producción de los modelos puede llegar a ser significativo dentro del proceso mas no así el material

## **2.2 Poliestireno Expandido**

El Poliestireno Expandido (EPS) se define técnicamente como:

"Material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros, que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire".

La abreviatura EPS deriva del inglés Expanded PolyStyrene. Este material es conocido también como Telgopor, Corcho Blanco y específicamente en nuestro país se conoce como Espuma Flex. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

**2.2.1 Obtención del poliestireno expandido.** El Poliestireno Expandible es transformado en artículos acabados de Poliestireno Expandido mediante un proceso que consta de tres etapas: una etapa de Expansión, seguida de una etapa de Estabilizado, finalizando con una última Expansión y el Moldeo.

1ª etapa: Pre-expansión. El Poliestireno Expandible, en forma de granos, se calienta en preexpansores con vapor de agua a temperaturas situadas entre 80 y 110°C aproximadamente, haciendo que el volumen se incremente en hasta 50 veces el volumen original. Durante esta etapa los granos son agitados continuamente. En esta etapa es donde la densidad final del EPS es determinada. En función de la temperatura y del tiempo de exposición la densidad aparente del material disminuye de unos 630 kg/m<sup>3</sup> a densidades que oscilan entre los 10 - 30 kg/m<sup>3</sup>.

Luego de la Pre-expansión, los granos expandidos son enfriados y secados antes de que sean transportados a los silos donde se almacenan para un periodo de reposo.

2ª etapa: Reposo intermedio y estabilización. Durante la segunda etapa del proceso, los granos pre-expandidos, conteniendo 90% de aire, son estabilizados durante 24 horas. Al enfriarse las partículas recién expandidas, en la primera etapa, se crea un vacío interior que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión. De este modo las perlas alcanzan una mayor estabilidad mecánica y mejoran su capacidad de expansión, lo que resulta ventajoso para la siguiente etapa de transformación. Este proceso se desarrolla durante el reposo intermedio del material pre expandido en silos ventilados. Al mismo tiempo se secan las perlas.

3ª etapa: Expansión y moldeo final. En esta etapa las perlas pre expandidas y estabilizadas se transportan a unos moldes donde nuevamente se les comunica vapor de agua y las perlas se sueldan entre sí. En esta operación, las perlas pre expandidas se cargan en un molde agujereado en el fondo, la parte superior y los laterales, con el fin de que pueda circular el vapor. Las perlas se ablandan, el Pentano se volatiliza y el vapor entra de nuevo en las cavidades. En consecuencia, las perlas se expanden y, como están comprimidas en el interior del volumen fijo del molde, se empaquetan formando un bloque sólido, cuya densidad viene determinada en gran parte por el alcance de la expansión en la etapa inicial de pre expansión. Durante la operación se aplican ciclos de calentamiento y enfriamiento, cuidadosamente seleccionados para el mejor equilibrio económico de la operación y para conseguir una densidad homogénea a través del bloque, así como una buena consolidación de los gránulos, buena apariencia externa del bloque y ausencia de combaduras. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

## **2.2.2** *Propiedades del poliestireno expandido*

**2.2.2.1** *Densidad.* Los productos y artículos terminados en poliestireno expandido se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros, aunque resistentes. En función de la aplicación las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10 kg/m<sup>3</sup> hasta los 35kg/m<sup>3</sup>. Para que el EPS sea útil en la fabricación de modelos de espuma perdida, su densidad debe permanecer en un rango de 0.016 y 0.027 g/cm<sup>3</sup> una vez terminado el proceso de expansión final.

**2.2.2.2** *Resistencia mecánica.* La resistencia mecánica está estrechamente relacionada con la densidad del material su valor promedio es de 1 kg/cm<sup>2</sup>

**2.2.2.3 Aislamiento térmico.** Los productos y materiales de poliestireno expandido presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico. De hecho, muchas de sus aplicaciones están directamente relacionadas con esta propiedad: por ejemplo, cuando se utiliza como material aislante de los diferentes cerramientos de los edificios o en el campo del envase y embalaje de alimentos fresco. La capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que básicamente consiste en aire cerrado dentro de una estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% materia sólida (poliestireno), siendo el aire en reposo un excelente aislante térmico. Esta propiedad está definida por su coeficiente de conductividad térmica que varía, al igual que las propiedades mecánicas, con la densidad aparente. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

**2.2.2.4 Propiedades químicas del poliestireno expandido.** El poliestireno expandido es estable frente a muchos productos químicos. Si se utilizan adhesivos, pinturas disolventes y vapores concentrados de estos productos, hay que esperar un ataque de estas sustancias. En la siguiente tabla se detalla más información acerca de la estabilidad química del poliestireno expandido. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

Tabla 1. Estabilidad química del poliestireno expandido

Sustancia activa	Estabilidad
Solución salina/ Agua de mar	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácido clorhídrico (al 35%), ácido nítrico (al 50%)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos concentrados (sin agua) al 100%	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Disolventes orgánicos (acetona, éteres,)	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Aceites de parafina, vaselina	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie
Aceite de diésel	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Carburantes	No estable: El EPS se contrae o se disuelve
Alcoholes (metanol, etanol)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada, el EPS puede contraerse o ser atacada su superficie

Fuente: (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

**2.2.2.5** *Propiedades biológicas.* El poliestireno expandido no constituye sustrato nutritivo alguno para los microorganismos. Es imputrescible, no enmohece y no se descompone. No obstante, en presencia de mucha suciedad el EPS puede hacer de portador de microorganismos, sin participar en el proceso biológico. Tampoco se ve atacado por las bacterias del suelo. Los productos de EPS cumplen con las exigencias sanitarias, con lo que pueden utilizarse con seguridad en la fabricación de artículos de embalaje de alimentos.

El EPS no tiene ninguna influencia medioambiental perjudicial, no es peligroso para las aguas. Se pueden adjuntar a los residuos domésticos o bien ser incinerados. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

### **2.2.3** *Características poliestireno expandido*

**2.2.3.1** *Comportamiento frente al agua y vapor de agua.* El poliestireno expandido no es higroscópico, a diferencia de lo que sucede con otros materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores que varían entre el 1% y el 3% en volumen (ensayo por inmersión después de 28 días). (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido, el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular de la espuma de poliestireno cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas de esta manera el vapor ingresa en las perlas de poliestireno.

**2.2.3.2** *Estabilidad dimensional.* Los productos de EPS, como todos los materiales, están sometidos a variaciones dimensionales debidas a la influencia térmica.

Estas variaciones se evalúan a través del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de EPS, es independiente de la densidad y se sitúa en valores que oscilan en el intervalo de 0,05 y 0,07 mm, por metro de longitud y grado Kelvin.

Como por ejemplo una plancha de aislamiento térmico de poliestireno expandido de 2 m de longitud y sometida a un salto térmico de 20 °C experimentará una variación en su longitud de 2 a 2,8 mm.



**2.2.3.3** *Estabilidad frente a la temperatura.* Además de los fenómenos de cambios dimensionales por efecto de la variación de temperatura descritos anteriormente el poliestireno expandido puede sufrir variaciones o alteraciones por efecto de la acción térmica.

El rango de temperaturas en el que este material puede utilizarse con total seguridad sin que sus propiedades se vean afectadas no tiene limitación alguna por el extremo inferior (excepto las variaciones dimensionales por contracción). Con respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100°C para acciones de corta duración, y alrededor de los 80°C para acciones continuadas y con el material sometido a una carga de 20 kPa

**2.2.3.4** *Comportamiento frente a factores atmosféricos.* La radiación ultravioleta es prácticamente el único factor que reviste importancia. Bajo la acción prolongada de la luz UV, la superficie del EPS se torna amarillenta y se vuelve frágil, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. (TEXTOS CIENTIFICOS, 2005)

**2.2.3.5** *Comportamiento frente al fuego.* Las materias primas del poliestireno expandido son polímeros de estireno que contienen una mezcla de hidrocarburos de bajo punto de ebullición como agente de expansión. Todos ellos son materiales combustibles.

El agente de expansión se volatiliza progresivamente en el proceso de transformación. El 10 % residual requiere de una fase de almacenamiento durante un tiempo función de las especificaciones del producto: dimensiones, densidad, etc. En caso de manipulación de productos sin esta fase de almacenamiento se tomarán medidas de prevención contra incendios.

En ausencia de un foco de ignición los productos de descomposición térmica no se inflaman hasta alcanzar temperaturas del orden de los 400 - 500 °C.

Como la mayoría de los materiales de construcción orgánicos, la espuma de poliestireno es combustible. Sin embargo, en la práctica su comportamiento al fuego depende de las condiciones en las que se usa, además de las propiedades inherentes al material. Estas propiedades inherentes difieren en función de que el material celular sea EPS con o sin

aditivos retardante de llama. La adhesión de otros materiales al poliestireno celular también afecta considerablemente a su comportamiento al fuego. Por ejemplo, los productos con recubrimientos laminares mejoran en su comportamiento de propagación superficial de la llama. Cuando se quema, el Poliestireno Expandido se comporta como otros hidrocarburos como la madera, el papel, etc. Los productos de combustión son básicamente monóxido de carbono y estireno: durante un incendio el estireno puede descomponerse aún más, despidiendo óxidos de carbono, agua y una cierta cantidad de hollín (humo).

Si el EPS se expone a temperaturas superiores a los 100°C, empieza a ablandarse, a contraerse y finalmente se funde. A temperaturas más altas se forman productos combustibles gaseosos por descomposición de la masa fundida. La posibilidad de que estos gases se quemen por acción de una llama o chispa depende enormemente de la temperatura, la duración de la exposición al calor y la cantidad de aire que fluya alrededor del material o básicamente la disponibilidad de oxígeno).

El EPS fundido no arderá normalmente debido a chispas de soldadura o cigarrillos encendidos, sin embargo, pequeñas llamas harán arder fácilmente al EPS a no ser que contenga aditivos retardantes de llama (grado SE). La temperatura umbral de ignición del EPS standard es 360°C, en el caso del EPS autoextinguible es 370°C. Estos valores indican que, si el EPS fundido se desintegra, los gases combustibles se formarán únicamente alrededor de los 350°C. En ausencia de una fuente de energía (una llama) la temperatura de auto ignición del EPS fundido en su clase standard es 450°C. Después de la ignición del EPS de clase standard, se propagará el fuego por la superficie expuesta de EPS y continuará hasta que se haya consumido todo el EPS. Mientras la baja densidad de la espuma contribuye a la facilidad de arder debido a una mayor cantidad de aire (98%) frente a la cantidad de poliestireno (2%), la masa del material presente es baja y por lo tanto la cantidad de calor desprendida es también menor. (GRUPO ISOTEX, 2015)

**2.2.3.6 Toxicidad.** A pesar de que es difícil predecir el comportamiento real con ensayos a pequeña escala se han realizado varias investigaciones entre estas una profunda investigación realizada de acuerdo al método DIN 53436, o estudios realizados por Centro de seguridad frente a incendios del TNO Delf, Centrum voor Brandveiligheid de Alemania en donde se concluyó que aunque la combustión del EPS produce humo negro,

la toxicidad de los humos liberados es considerablemente menor que aquellos liberados por otros materiales de uso común como la madera, lana, seda o algodón.

En estos ensayos las probetas se calientan a 300, 400, 500 y 600 °C. Además de diversos tipos de EPS, productos naturales como la madera de pino, aglomerado, corcho expandido y ‘triplex’, caucho, fieltro y cuero también fueron estudiados. Los resultados se encuentran resumidos en la siguiente tabla. (AAPE, 2015)

Tabla 2. Toxicidad de humos del EPS

<b>Toxicidad de Humos Del EPS</b>					
<b>Tipo de Muestra</b>		<b>Composición del gas de combustión en ppm a distintas temperaturas.</b>			
	<b>Gases Desprendidos</b>	<b>300°C</b>	<b>400°C</b>	<b>500°C</b>	<b>600°C</b>
EPS tipo F (con retardante de llama)	Monóxido de Carbono	10*	50*	500*	1000*
	Estireno Monómero	50	100	500	50
	Otros componentes aromáticos	trazas	20	20	10
	Bromuro de hidrogeno	10	15	13	
EPS tipo P (estándar)	Monóxido de Carbono	50*	200*	400*	1000*
	Estireno Monómero	200	300	500	50
	Otros componentes aromáticos	trazas	10	30	10
	Bromuro de hidrogeno	0	0	0	0
*Ardiendo sin llama					

Fuente: (AAPE, 2015)

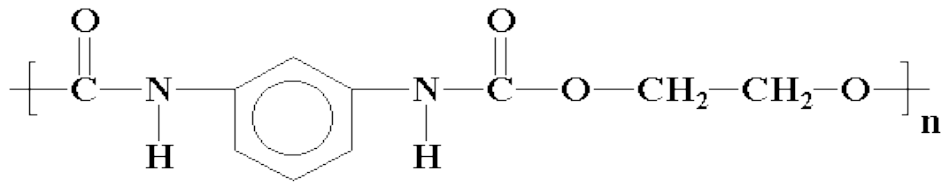
### 2.3 Poliuretano

El poliuretano (PU) es un polímero que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con diisocianatos. (PRENSAS DE TOMELLOSO S.A, 2014)

Los poliuretanos forman parte de los llamados polímeros termoestables, estos se caracterizan por tener cadenas poliméricas entrecruzadas, formando una red tridimensional que no funde; estos, los diferencian de los polímeros termoplásticos.

Además, los poliuretanos polimerizan irreversiblemente con calor o presión formando una masa rígida y dura. Los poliuretanos son los polímeros mejor conocidos para hacer espumas y el gas liberado en la reacción es dióxido de carbono. (MARIANO, 2011).

Figura 4. Estructura química del poliuretano



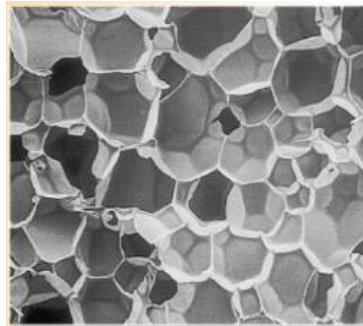
Fuente: (ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES-UVA, 2015)

### 2.3.1 Origen y obtención

**2.3.1.1 Origen.** En los años de 1937, se trataba de formular polímeros con propiedades similares a las del pegamento es aquí donde se descubre el poliuretano patente atribuida al alemán Otto Bayer director del laboratorio central científico de Bayer AG en Leverkusen, Alemania. Pero debido a la crisis económica producida por la segunda guerra mundial su producción en masa no comenzó hasta los años 50. (ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES-UVA, 2015).

**2.3.1.2 Obtención.** Se obtiene a partir de la mezcla de dos componentes que son el polioliol e isocianato, los cuales a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido. Mezclados estos componentes producen una reacción exotérmica formando enlaces entre el polioliol y el isocianato consiguiendo una estructura sólida, uniforme y muy resistente. La espuma de poliuretano es un material duroplástico altamente reticulado con una densidad de 35 kg/m<sup>3</sup> en el cual solo el 3% del volumen es materia sólida. (INTEREMPRESAS, 2014)

Figura 5. Vista microscópica de las celdas cerradas de la espuma de poliuretano



Fuente: (INTEREMPRESAS, 2014)

**2.3.2 Aplicaciones industriales.** En la actualidad debido a la versatilidad que presenta el poliuretano permite una gama amplia de aplicaciones que van desde:

- Industria Automovilística (volantes, spoilers, alerones, asientos, salpicaderos, como amortiguación de vibraciones y ruidos, etc.)
- Fabricación de muebles (Colchones, sofás en forma de relleno)
- Pinturas y barnices
- Ingeniería médica (fabricación de piezas para trasplantes y ortopedias, hemofiltros, etc.)
- Industria del frío (tuberías, cámaras frigoríficas, neveras, criogenia, etc.)
- Y, por supuesto, en la edificación, como aislamiento térmico, acústico e impermeabilizante. (INTEREMPRESAS, 2014)

### 2.3.3 Propiedades del poliuretano expandido

**2.3.3.1 Propiedades físicas.** Las propiedades físicas dependen mucho del proceso de fabricación y del porcentaje de los componentes que se utilice en la mezcla.

Tabla 3. Propiedades físicas del poliuretano

Densidad	D-1622	Kg./m <sup>3</sup>	32	40	48
Resistencia Compresión	D-1621	Kg./cm <sup>2</sup>	1.7	3.0	3.5
Módulo compresión	D-1621	Kg./cm <sup>2</sup>	50	65	100
Resistencia Tracción	D-1623	Kg./cm <sup>2</sup>	2.5	4.5	6
Resistencia Cizallamiento	C-273	Kg./cm <sup>2</sup>	1.5	2.5	3
Coefficiente Conductividad	C-177	Kcal/m.h°C	0.015	0.017	0.02
Celdas cerradas	D-1940	%	90/95	90/95	90/95
Absorción de agua	D-2842	g/m <sup>2</sup>	520	490	450

Fuente: (ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES-UVA, 2015)

**2.3.3.2 Propiedades mecánicas.** Las propiedades mecánicas son función directa de su peso volumétrico; a medida que este aumenta, su propiedad de resistencia también aumenta. Estos valores están dados por las normas ASTM D-792 y su equivalente DIN 53479. Los pesos volumétricos más usuales se hallan comprendidos entre 30 y 100 kg/m<sup>3</sup>, dentro de estos límites se obtienen los siguientes valores:

- Resistencia a la tracción entre 3 y 10 Kp/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión entre 1,5 y 9 Kp/cm<sup>2</sup>
- Resistencia al cizallamiento entre 1 y 5 Kp/cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad entre 40 y 200 Kp/cm<sup>2</sup>

#### **2.3.4** *Características del poliuretano expandido*

**2.3.4.1** *Resistencia a los productos químicos.* El poliuretano es resistente al agua potable, al agua de lluvia y al agua de mar, las soluciones alcalinas diluidas, los ácidos diluidos, los hidrocarburos alifáticos como por ejemplo la gasolina normal, el carburante diésel, el propano, el aceite mineral, así como los gases de escape y el aire industrial (SO<sub>2</sub>). Es condicionalmente resistente (hinchamiento o encogimiento) a los siguientes productos: los hidrocarburos clorados, las acetonas y los éteres, no es resistente a los ácidos concentrados. (MARIANO, 2011)

**2.3.4.2** *Comportamiento refractario.* En el sector de la construcción se emplean exclusivamente materias primas que dan lugar a una espuma sintética auto extingible. Mediante la combinación de una capa cubriente incombustible se alcanza el predicado (difícilmente inflamable), según DIN 4102.

**2.3.4.3** *Poder adhesivo.* Una propiedad interesante del poliuretano empleado como material de construcción es su adhesión a diferentes materiales. Durante la fabricación la mezcla experimenta su estado intermedio pegajoso y en virtud de la fuerza adhesiva propia, automática y excelentemente se adhiere al papel, al cartón y al cartón asfaltado para techos, así como a las maderas, a las planchas de fibras duras y de virutas prensadas, a la piedra, al hormigón, al fibrocemento, a las superficies metálicas y a un gran aumento de materias plásticas.

Los poliuretanos tienen en general las siguientes características:

- Excelente tenacidad.
- Flexibilidad, alta capacidad de alargamiento.
- Excelente relleno de holgura.
- Puede pintarse una vez curado.

- Excelente resistencia química.

**2.3.4.4** *Capacidad de laminación.* Las propiedades que presenta como son la resistencia y durabilidad de la espuma de poliuretano lo convierte en un material ideal para laminación sobre diferentes tipos de tejidos, tal combinación se utiliza en una gran variedad de implementos deportivos. Dependiendo de la necesidad se aplican en varios espesores proporcionando resistencia a la tensión y abrasión a la vez que crea una capa impermeable, a la vez que sirve como, adhesivo para pegar varios materiales. También se utiliza en instrumentos de camping, ya que presenta varias ventajas a la vez que son impermeables no dejando pasar el agua pero permitiendo el paso del aire dando protección, durabilidad e impermeabilidad. (MARIANO, 2011)

**2.3.4.5** *Versatilidad y posibilidades de diseño.* El poliuretano es un material polifacético presentando una gran versatilidad y gama de opciones a la hora de diseñar piezas. Su facilidad de fabricación, su durabilidad, su resistencia a la tensión y a la flexión y demás propiedades de alto rendimiento explican que sean ideales para las duras exigencias del deporte y de los productos de recreación.

Los poliuretanos son perfectos para situaciones rigurosas y usos exigentes dependiendo de sus propiedades físicas, químicas y valores de densidad se puede obtener composiciones con un alto valor de resistencia y durabilidad. Se pueden fabricar en películas o láminas en espesores desde 0,025 mm a 3,2 mm y a anchuras de hasta 203 cm. Este material está disponible con durezas de 75 a 95 Shore A, en muy diversos colores y en varios grados de opacidad y de texturas de superficie. (MARIANO, 2011)

**2.3.4.6** *Estabilidad dimensional.* Muy buena estabilidad dimensional pues no muestra variación en su geometría entre rangos de temperatura desde  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES-UVA, 2015)

### **2.3.5** *Inconvenientes*

**2.3.5.1** *Exposición.* El principal inconveniente que presenta las espumas de poliuretanos, es que están se degradan en presencia de los rayos ultravioletas, de ahí que no pueden quedar expuestas a la radiación ultravioleta. Además, para que la reacción se

produzca es necesario que el sustrato a aplicar tenga una temperatura mínima de 10 °C (MARIANO, 2011)

**2.3.5.2** *Reciclaje.* El poliuretano en general es muy difícil de reciclar o el proceso es muy poco rentable

Con respecto al reciclaje mecánico el poliuretano puede ser triturado y una vez convertidos en polvo pueden reutilizarse en la producción de nuevas espumas.

Los gránulos de espuma flexible finamente triturados pueden ser enlazados entre ellos dando lugar a una variedad de productos que se usan en las prendas deportivas. Estos productos enlazados se pueden enlazar otra vez dando lugar a un ciclo de aprovechamiento que puede llegar a ser bastante largo.

A elevada presión los gránulos de poliuretano se envuelven con un material que se adhiere a ellos, en ese momento se curan en condiciones de calor y presión óptima obteniéndose un material aprovechable como por ejemplo el piso de un coche.

Si se modelan por compresión se producen espumas rígidas de poliuretano de los gránulos triturados, dando lugar a un material tridimensional que se usa para alojar el motor de los coches. (MARIANO, 2011)

**2.3.5.3** *Toxicidad.* El producto puede ser tóxico al hombre y al medio ambiente si no es utilizado en conformidad con las recomendaciones.

El producto puede producir varios efectos adversos sobre la salud pues el producto contiene compuestos que causan irritación y quemaduras en la piel, ojos y mucosas.

La inhalación del producto puede causar tos y garganta seca y en casos de ingestión, pueden ocurrir dolores abdominales, sensación de quemazón, vómitos, choques y colapsos.

La dispersión en el ambiente puede contaminar el área. Evitar la entrada en los cursos de agua ya que es peligroso para los organismos acuáticos, pudiendo causar la mortandad. (WURTH, 2002)



## 2.4 Aluminio

El aluminio es un material de considerable importancia en la actualidad y a la vez de uso múltiple. Indudablemente es el metal, después del acero que se utiliza con mayor frecuencia. A causa de la abundancia con que aparece el elemento en la corteza terrestre, en forma de óxidos y silicatos en sus minerales, se dispone de un potencial de materia prima casi inagotable. Actualmente la materia prima exclusiva es la bauxita, un material producto de la erosión y muy rico en aluminio.

**2.4.1 Usos.** El aluminio se emplea en un sin fin de industrias, pues la propiedad que posee de ser casi inalterable hace que tenga muchas aplicaciones. Su poco peso indica como el metal por excelencia para utensilios de cocina, aparatos de cirugía, instrumentos de precisión, aeronáutica, motores de explosión, armas de lujo, monedas, cascos militares, etc.

**2.4.2 Propiedades físicas.** El aluminio es un metal blanco ligeramente azulado que funde a aproximadamente 700°C. Su densidad es 2.55, por consiguiente, en igualdad de volumen pesa cuatro veces menos que la plata. Es muy maleable y muy dúctil, pudiéndosele obtener en hilos finos y en hojas muy delgadas, lo mismo que el oro y la plata. Es buen conductor del calor y de la electricidad.

**2.4.3 Propiedades químicas.** El aluminio es inalterable al aire, incluso a temperaturas muy elevadas. Al rojo cuando es puro, no descompone el agua. Los ácidos sulfúrico y nítrico no lo atacan a la temperatura ordinaria, pero sí en caliente. El ácido clorhídrico y las disoluciones alcalinas lo disuelven en frío. Para estas propiedades puede considerarse como metal intermedio entre los metales ordinarios y los metales nobles. (DUPONCHELE, 1932)

## 2.5 Arenas

En la mayoría de las operaciones de fundición en arena se utiliza arena sílice (SiO<sub>2</sub>) como material para el molde, porque es barata y resulta adecuada debido a sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. Existen dos tipos generales de arena: aglutinada naturalmente (banco de arena) y sintética (arena de lago). La mayoría de los

talleres de fundición prefiere esta última porque puede controlar su composición con mayor facilidad. Para una fundición apropiada, la arena debe estar limpia y de preferencia ser nueva. (KALPAJIAN.S, 2008)

### **2.5.1** *Clasificación de las arenas.* Por el contenido de arcilla:

- Tierras grasas, cuyo contenido de arcilla es superior al 18 %.
- Tierras semigrasas, cuyo contenido de arcilla va del 8 al 18%.
- Tierras magras, cuyo contenido de arcilla va del 5 al 8 %.
- Arenas síliceas, cuyo contenido de arcilla es inferior al 5 %.

### **2.5.2** *Propiedades de las arenas*

**2.5.2.1** *Humedad.* Esta propiedad depende del contenido de agua que tenga la arena, el agua se encarga de hidratar la alúmina y así mantener juntas las partículas de la arena, esta propiedad se pierde definitivamente cuando la arena pasa de los 3000 °C.

**2.5.2.2** *Permeabilidad.* Es la capacidad para dejar pasar los gases presentes durante la colada y el aire por su masa, es importante para evitar la formación de burbujas producto de los gases que se queden atrapados dentro de la fundición.

**2.5.2.3** *Refractabilidad.* Es la propiedad de las arenas de mantener sus propiedades a altas temperaturas, la sílice es el material que aporta la refractariedad a la mezcla gracias a su elevado punto de fusión que para este material es de 1600 °C.

**2.5.2.4** *Cohesión.* Característica que provee de resistencia mecánica a la arena para soportar los esfuerzos producidos por la colada, también se puede decir que es la fuerza que mantiene unidas a las partículas de la arena.

**2.5.2.5** *Plasticidad.* Capacidad para reproducir los detalles del molde, depende de deformabilidad y fluencia.

**2.5.2.6** *Fluencia.* Disposición a la transmisión a través de su masa, las presiones aplicadas en la superficie hacia el resto del cuerpo marcando la transición de la zona elástica y el inicio de la deformación plástica.

**2.5.2.7 Durabilidad o vida.** El número de ciclos que se puede ocupar la arena sin que pierda las propiedades descritas anteriormente.

Las propiedades de una arena de moldeo dependen de las características y porcentajes de sus componentes. Existe una variedad de pruebas de laboratorio para controlar la calidad de la arena, eliminando así, problemas asociados con vaciado y moldeo.

Los resultados de las pruebas cuantifican estas propiedades en la arena. Estas pruebas consisten en determinar características fisicoquímicas y técnicas de la arena.

**2.5.2.8 Granulometría.** Es la propiedad que se encarga de la forma y tamaño del grano, existen distintas normas para regular el tamaño del grano, entre ellas la AFS.

**2.5.2.9 Forma del grano**

Figura 6. Arenas con granos de formas diversas.



Fuente: (CAPELLO, 1987)

- Arena de grano esferoidal
- Arena de grano angulado
- Arena de grano Compuesto

**2.5.2.10 Distribución granulométrica.** Se las puede clasificar de acuerdo a su tamaño, para lo cual se lo mide según la AFS.

El tamaño de las clases de granos predominantes nos proporciona el índice de grosor o de finura de los mismos. Indicando con  $p_1, p_2, p_3, \dots$  los porcentajes de contenido en cada tamiz, con  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  los factores correspondientes de la tabla y con  $P$  el porcentaje total. (CAPELLO, 1987)

Tabla 4. Distribución Granulométrica

APERTURA DE MALLA		GRADO SEGUN	
PULGADAS	MILIMETROS	AFS	ALEMANIA (KLEES)
0,1320	3,360	6	--
0,0661	1,680	12	1
0,0331	0,840	20	4
0,0232	0,590	30	5
0,0165	0,420	40	8
0,0117	0,297	50	9
0,0083	0,210	70	11
0,0059	0,149	100	12
0,0041	0,105	140	14
0,0029	0,074	200	16
0,0021	0,053	270	17
0,0011	0,025	----	-----

Fuente: (PASTOR, 2004)

El índice de grosor  $i$  será:

$$i = \frac{\sum_i^n p_i \cdot \alpha_i}{P} \quad (1)$$

Dónde:

$i$  = Índice de finura

$\alpha$  = Factor del tamiz

$p$  = Peso parcial de cada tamiz [g]

$P$  = Peso total [g]

## 2.6 Recubrimientos refractarios

Las pinturas refractarias para modelos, en general son sustancias de naturaleza diversa, las cuales se utilizan para recubrir las superficies de los modelos de espuma, estos a su vez van a estar en contacto íntimo con el metal fundido y cuyas funciones dependen de los materiales a fundir sean estas fundiciones de aceros, fundiciones ligeras o latones.

Su utilización se extiende a toda la gama de moldes de arena o metálicos, para fundición de colada por gravedad o inyección a presión, así como también para hacer piezas con corazones. Los recubrimientos refractarios contienen muchas veces dos capas la capa exterior es más porosa para incrementar las propiedades de aislamientos

**2.6.1** *Divisiones de las pinturas.* En general las pinturas utilizadas en fundición se pueden dividir, según el papel que desempeñen, en dos distintas agrupaciones:

- Las que sirven para controlar el Régimen Térmico y la interacción con el metal líquido.
- Las que se utilizan para modificar las estructuras de solidificación mediante acciones fisicoquímicas o de aleación superficial.

En el presente trabajo nos centramos en la función que tiene la pintura como regulador térmico, en el cual se busca que la pieza no salga con imperfecciones una vez colada en el molde de arena.

**2.6.2** *Características y funciones de una pintura refractaria.* La misión principal de las pinturas refractarias es evitar la penetración de los líquidos a través de los granos creando una barrera entre la superficie lisa de la estructura y la superficie rugosa de la arena. A la vez que inhibe el proceso de vitrificación superficial y mejora el acabado superficial de las piezas y facilita la limpieza de las mismas. (MORALES, 1983)

A partir de la capa de pintura se tiene un ambiente con permeabilidad controlada con lo cual los productos gaseosos creados por el patrón al contacto con la colada pueden escapar. (ALVAREZ, y otros, 2012). El metal líquido tiende a penetrar en los espacios vacíos de la arena a partir del fenómeno de capilaridad, la presión metalostática y la tensión superficial del metal que también depende del tamaño de grano de la arena.

Una pintura refractaria debe controlar de alguna manera la solidificación al actuar sobre el régimen de extracción calórica, evitar zonas de solidificación prematura y también debe eliminar el efecto de temple en las aleaciones susceptibles a este fenómeno como son ciertas fundiciones grises de pequeño espesor. (MORALES, 1983)

**2.6.3** *Forma de Aplicación.* Los procesos de aplicación de las pinturas refractarias son por proyección con pistola, pintados con brochas o por baño. Estos vienen en forma cremosa para evitar al máximo la decantación es decir la separación de las sustancias constituyentes a partir del principio de densidades, a la vez que estas deben diluirse al

momento de ser aplicadas en aguas blandas ya que las aguas duras afectan a su buen rendimiento y desempeño.

**2.6.4** *Elementos de la pintura refractaria.* Como ya se ha mencionada una pintura refractaria es una sustancia solida o semisólida utilizada para recubrir la superficie de los modelos cuya función es evitar el contacto del modelo con la arena; está constituida principalmente de los siguientes componentes.

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

En la siguiente tabla se detallan los porcentajes y componentes que debe tener una pintura refractaria (FREIRE, 2008)

Tabla 5. Porcentajes y componentes de una pintura refractaria.

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

Fuente: (FREIRE, 2008)

**2.6.4.1** *Agente refractario.* La norma ASTM C-71 define como refractario a “materiales no metálicos con ciertas propiedades químicas y físicas que los tornan aplicables a estructuras, o como componentes de sistemas, que están expuestas a ambientes por encima de 1000 °F (583 °C).” En otras palabras, se considera como material refractario a todo aquel compuesto o elemento que es capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevada temperatura. 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 de los modelos colapsables por acción del metal fundido. Estos gases conllevarían al deterioro de la

superficie generando porosidad en la superficie de la pieza metálica final. (FREIRE, 2008). El tamaño de partícula de refractario constituye una variable de incommensurable valor dentro del proceso para lo cual se establece como patrón de medición la criba o malla ASTM 200, establecido como estándar para la mayoría de recubrimientos refractarios. (ALVAREZ, y otros, 2012). En la tabla 6 se detallan los principales elementos refractarios empleados en la fabricación de estas pinturas.

Tabla 6. Principales elementos refractarios

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

Fuente: (FREIRE, 2008)

**2.6.4.2 Agente de suspensión.** La norma ecuatoriana “NTE INEN 0997 (1983) (Spanish): Pinturas y productos afines. Definiciones” define al agente de suspensión como Agente anti - sedimentación (agente de suspensión) como una sustancia incorporada a la pintura para retardar la formación de sedimentos o para mantener una consistencia uniforme durante el almacenaje o, como en la pintura de inmersión, durante la operación de pintar y por lo general son cerámicos arcillosos. (FREIRE, 2008)

Tabla 7. Sustancias utilizadas como agentes de suspensión

Material	Fórmula química
Bentonita cálcica	CaAl <sub>4</sub> Mg <sub>2</sub> Si <sub>12</sub> O <sub>30</sub> (OH) <sub>6</sub>
Bentonita sódica	NaAl <sub>5</sub> MgSi <sub>12</sub> O <sub>30</sub> (OH) <sub>6</sub>
Mica de calcio	CaAl <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Mica de potasio	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Yeso	CaSO <sub>4</sub> $\frac{1}{2}$ H <sub>2</sub> O

Fuente: (FREIRE, 2008)

**2.6.4.3** *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. (FREIRE, 2008)

Los materiales dispersantes más utilizados se enlistan en la tabla 8.

Tabla 8. Materiales dispersantes

<b>Material</b>	<b>Fórmula química</b>
Silicato de calcio	$\text{CaSO}_3$
Silicato de etilo	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$
Silicato de potasio	$\text{K}_2\text{SiO}_3$
Silicato de sodio	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Sílice coloidal	$\text{SiO}_2$

Fuente: (FREIRE, 2008)

**2.6.4.4** *Agente solvente.* En la pintura refractaria es el componente de mayor proporción. La norma “NTE INEN 0997 (1983) (Spanish): Pinturas y productos afines. Definiciones” lo define como un líquido generalmente volátil, que se usa en la fabricación de la pintura para disolver o dispersar los constituyentes formadores de la película; se evapora durante el secado, de modo que no vienen a ser parte de la película seca. Los solventes se usan para controlar la consistencia y carácter del acabado, y para regular las propiedades de aplicación.

En la fabricación de pinturas refractarias Los principales solventes en orden de importancia se detallan en la tabla 9.

Tabla 9. Solventes en pinturas refractarias

<b>Compuesto</b>	<b>Notación química</b>
Agua	$\text{H}_2\text{O}$
Metanol	$\text{CH}_3\text{OH}$
Etanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Fuente: (FREIRE, 2008)

**2.6.4.5** *Aditivos.* Son sustancias que mejoran las propiedades de alguno de los componentes de la pintura refractaria, principalmente del agente refractario su utilización



dependerá en gran medida de las propiedades de los metales a fundir y del proceso de moldeo. (FREIRE, 2008)

## **2.7 Procedimiento de fabricación de piezas fundidas de aluminio con modelos evaporativos.**

Al comenzar un proyecto surgen varias incógnitas respecto a la metodología o sistemática de pasos a seguir. Partiendo de esta premisa, se ha diseñado en este epígrafe una metodología para la fabricación de piezas fundidas a partir de modelos colapsables, dividida en fases o etapas que comprenden desde el diseño de los modelos evaporativos, (materiales y tecnología de fabricación), fabricación de pinturas (materiales y aplicación) y finalmente la fundición de las piezas.

En el anexo A se muestra un diagrama de flujo con la metodología propuesta.

El primer paso es diseñar la pieza que se va a fundir, a continuación, se fabrica los modelos experimentando las diferentes tecnologías de fabricación estudiadas, para esto se consideran varios factores tales como costos de fabricación, tamaño de la población y tecnología existente en la localidad. Las pinturas refractarias son fundamentales en este proceso de fundición ya que forman una capa entre el modelo y la arena mejorando la calidad superficial de las piezas fundidas. Las pinturas refractarias están constituidas de 5 elementos principales, elementos que pueden ser adquirido en el mercado nacional. Una vez obtenidos estos materiales se procede a fabricar la pintura, mezclando los componentes de acuerdo a las proporciones recomendadas. Después de este proceso se inicia con el pintado los modelos, aplicando la mejor técnica en función de la viscosidad de cada pintura.

Dado que las características de las arenas influyen en las propiedades de las piezas fundidas, es recomendable ensayar y obtener los valores de ciertas propiedades tales como humedad, permeabilidad, tamaño de grano, valores de esfuerzos de compresión y corte. A continuación, se realiza el diseño y fabricación del sistema de alimentación.

Con las piezas previamente fabricadas y pintadas se procede a colocar el sistema y los modelos en las cajas de moldeo para luego fundir las piezas que se fabrican de aluminio.

Finalmente, revisar las piezas fundidas, en búsqueda de fallas e irregularidades tales como: piezas incompletas, porosidades, rebabadas y rechupes, partes quemadas y fusión incompleta de los modelos evaporativos, a partir de ensayos no destructivos y metalográficos.

## **2.8 Conclusiones del capítulo**

El método de fundición por espuma perdida es una técnica de fundición relativamente sencilla que ofrece grandes ventajas no solo en el aspecto económico sino también en la calidad y precisión de las piezas fundidas, sin embargo, son muchos los factores que se deben considerar para poner en práctica este método entre estos destacan: Características del material del modelo en espuma y las características de la pintura refractaria y aditivos

Al estudiar estos dos polímeros utilizados en técnicas de fundición se determina que la espuma de poliuretano es un material que posee propiedades químicas, mecánicas y físicas muy semejantes a las del poliestireno expandido, razón por la cual se considera apropiado este material para la fabricación de modelos que serán experimentados en el método de fundición por espuma perdida. Existen varios métodos para el modelado de los modelos de espuma, considerando el aspecto económico, limitación en la tecnología de expansión y accesibilidad al producto, se determinó realizar los modelos de espuma de poliestireno mediante la máquina de corte por hilo caliente, mientras que para los modelos de poliuretano expandido se experimentaran dos métodos de fabricación: la expansión en una matriz de metal y el método de corte con una máquina laser.

El recubrimiento refractario juega un papel muy importante en el acabado superficial de las piezas fundidas, es por esto que es indispensable su aplicación en los modelos de espuma, al estudiar la literatura se determinó que un recubrimiento refractario está formado de distintos elementos llamados agentes, en vista de la variedad de combinaciones que se pueden hacer con estos elementos se optó por fabricar cuatro tipos de pinturas. La técnica a ensayar es aplicable en cualquier material de fundición, sin embargo, por sus excelentes propiedades entre ellas su bajo punto de fusión además de la facilidad de adquisición en el medio, el aluminio es el metal que será utilizado como material base para la fundición de las piezas.

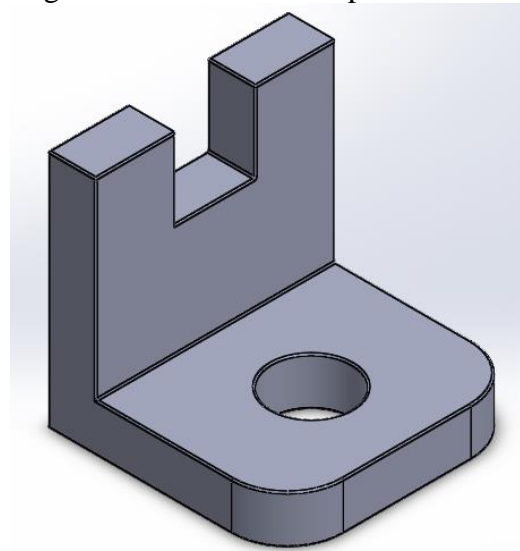
## CAPITULO III

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN POR EL METODO DE ESPUMA PERDIDA

#### 3.1 Diseño de la pieza a fundir

Para modelar la pieza a fundir se utilizó el software SolidWorks 2015, a través de esta herramienta se pueden obtener ciertas propiedades de la pieza tales como el área y volumen, condiciones que se usaran para el cálculo del sistema de alimentación y para la determinación de la cantidad de material necesario en cada prueba.

Figura 7. Modelado de la pieza a fundir



Fuente: Autores

En la pieza existen diversas geometrías: cuadradas, rectangulares y también circulares, pues esto ayudara a definir si existe o no diferencia entre la evaporación del poliestireno o poliuretano en relación con su geometría. Además, se espera observar la precisión de la pieza fundida respecto chaflanes o secciones rectas ya que son estas áreas las que presentan mayores dificultades en el método de fundición tradicional.

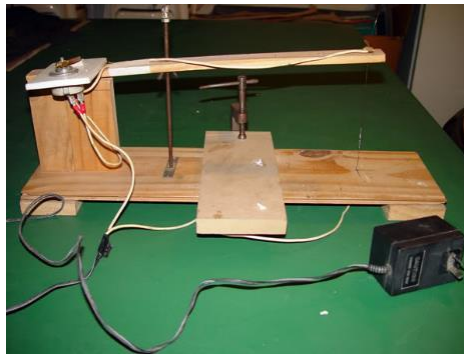
#### 3.2 Fabricación de los modelos colapsables

**3.2.1 Espuma de poliestireno.** En el mercado local se puede encontrar el poliestireno expandido en distintas presentaciones estas pueden ser planchas cuadradas de distintos

espesores, esferas en varios diámetros y bloques rectangulares, de acuerdo a la forma de la pieza se usaron planchas cuadradas de 50 cm, de espesor 1.5 cm.

Para conseguir la geometría de la pieza se optó por la técnica de corte por hilo caliente, debido a la disponibilidad de esta máquina en el mercado y también por ser la tecnología de fabricación más económica en relación a las demás.

Figura 8. Máquina de corte por hilo caliente



Fuente: Autores

Debido a la complejidad de la pieza esta se fabricó en dos partes, es decir se construye individualmente la parte inferior y superior del modelo para después ensamblarlas con pegamento y de esta forma obtener el modelo diseñado.

Figura 9. Piezas de poliestireno expandido



Fuente: Autores

### 3.2.2 *Espuma de poliuretano*

**3.2.2.1 Procedimiento I.** El primer método usado para fabricar los modelos de poliuretano fue el de expansión directa en una matriz, se inicia con el diseño de la matriz para a continuación construirla en acero inoxidable.

Figura 10. Matriz para la expansión de poliuretano.



Fuente: Autores

El primer paso es cubrir la matriz de aceite lubricante para evitar en lo posible la adherencia del material, a continuación, llenar la matriz de poliuretano, por facilidad preferiblemente se usa la presentación en spray, se espera aproximadamente 24 horas para un curado efectivo del modelo, y proceder a desmoldarlo con sumo cuidado.

El acabado superficial de la pieza es irregular e incluso tiende a romperse, pues existe una compatibilidad entre el metal y el poliuretano a pesar de haber lubricado el molde.

**3.2.2.2 Procedimiento II.** El poliuretano se puede encontrar fácilmente en el mercado en forma de spray, sin embargo, en este caso debido a costos, tiempo y cantidad resulta favorable obtener la espuma de poliuretano a través de la mezcla de dos componentes (isocianato y polioliol).

Después de la preparación de la mezcla, se obtuvo un bloque grande, el cual fue cortado en secciones transversales de 50x12 cm y 1.5 cm de espesor mediante una cortadora automática.

Una vez obtenidas las planchas de poliuretano, se procedió a realizar el corte de las piezas mediante una máquina de corte laser, previamente se realizó el diseño en SolidWorks para programar el corte automático en la máquina. Con este proceso de corte se obtienen piezas de acabado superficial bastante bueno pues el láser tiende a quemar el material logrando un corte regular, sin embargo, existen porosidades propias del material principalmente en la parte superior del bloque.

Figura 11. Plancha de poliuretano después del corte laser



Fuente: Autores

Considerando las ventajas y desventajas de ambos procedimientos, por cuestión de tiempo y costo se determina usar este método de fabricación para la elaboración de los modelos de poliuretano. Al igual que con el poliestireno la pieza se realizó en dos partes, las cuales fueron incorporadas posteriormente con silicona.

Figura 12. Piezas de poliuretano



Fuente: Autores

### 3.3 Determinación del tamaño de la muestra

En las metodologías de determinación del número mínimo de observaciones, se debe asignar la variación esperada entre los datos de los grupos de control y experimento. Este valor es tomado, usualmente, de observaciones de estudios análogos, de la literatura, o a partir de pruebas “cortas” preliminares; sin embargo, esto no siempre será posible, más aún en el caso en que el objeto de análisis sea una tecnología, metodología, proceso o procedimiento nuevo. Cuando se evalúa un método, tratamiento, técnica, tecnología y sistema nuevo de manera aislada, con el objeto de determinar su comportamiento y verificar si funciona de la manera esperada o, por el contrario, no surte efecto alguno, se está frente a un experimento con un solo factor; en este caso, no se está evaluando si el filtro del experimento es mejor que el que actúa como blanco o control, sino que se está poniendo a prueba el nivel de eficacia de un filtro nuevo.

La ecuación que se ajusta a estas condiciones será:

$$n = \frac{W - W^2 * Z_B * 1,4 * Z_\alpha}{W^2} \quad (2)$$

Donde:

n = Número mínimo de muestras.

Z $\alpha$  = Valor correspondiente al nivel de confianza asignado.

Z $\beta$  = Valor correspondiente al poder estadístico.

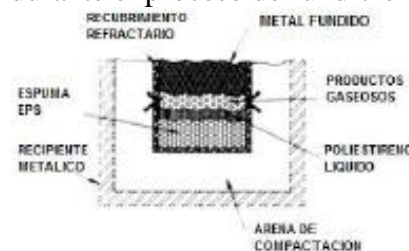
W = Rendimiento mínimo esperado.

$$n = \frac{0,30 - 0,30^2 \cdot (0,842) + 1,4 (2,240)^2}{(0,30^2)} = 24$$

### 3.4 Recubrimiento refractario de modelos

Las pinturas son fundamentales en el proceso de fundición por espuma perdida ya que crean una capa entre el modelo y la arena mejorando la calidad superficial de las piezas fundidas y además proporcionan permeabilidad controlada, que permite que los productos gaseosos, creados por el patrón de espuma en la vaporización puedan escapar a través del recubrimiento y de la arena, lejos de la fundición de metales.

Figura 13. Reacciones durante el proceso de fundición por espuma perdida.



Fuente: (ALVAREZ, y otros, 2013)

Las pinturas refractarias están constituidas de 5 elementos principales cada uno con una función en específico, como se estudió en el epígrafe 2.6.

**3.4.1** *Materiales de fabricación para el recubrimiento refractario.* En esta investigación se realizaron cuatro pinturas refractarias cada una con diferentes componentes tanto para el agente refractario, dispersante, anti sedimentación y solvente,

con esto se espera evaluar la eficacia de la pintura mediante la compatibilidad de los elementos, pero principalmente el efecto que se obtiene sobre la pieza fundida.

Cabe señalar que todos los materiales a utilizar fueron adquiridos en el mercado nacional.

#### 3.4.1.1 Mezcla 1.

Tabla 10. Componentes de la mezcla 1.

Agente	Composición en porcentajes	
	Porcentaje	Cantidad [g]
Sílice	30,00%	300
Bentonita sódica	12,00%	120
Silicato de calcio	8,00%	80
Agua	49,00%	490
Agar	1,00%	10

Fuente: Autores

Figura 14. Componentes de la mezcla 1.



Fuente: Autores

#### Procedimiento

- Pesar 300 gr de sílice previamente tamizada con tamaño de partícula ASTM 200.
- Pesar todos los componentes indicados en la tabla 10.



- Incorporar aproximadamente la mitad de agua en la mezcladora y adicionar la bentonita sódica, mezclar a velocidad moderada hasta que desaparezcan por completo los grumos.
- A continuación, se agrega de a poco el agente dispersante que en este caso es el silicato de calcio, se mezcla alrededor de 3 minutos.
- Agregar la sílice en pequeñas cantidades para evitar la formación de grumos y mezclar durante 15 minutos a velocidad moderada.
- Diluir el agar en el resto de agua y adicionar a la mezcla sin dejar de batir para así lograr fluidez en la pintura
- Esperar que la mezcla se estabilice para después colocarla en un recipiente cerrado y dejarlo reposar durante 24 horas.

Esto mejorara sus propiedades (adsorción, tixotropía (gelatinoso), plasticidad, permeabilidad, comportamiento al secado, resistencia en fresco).

#### 3.4.1.2 Mezcla 2.

Tabla 11. Componentes de la mezcla 2

Agente	Composición en porcentajes	
	Porcentaje	Cantidad [g]
Grafito	30%	300
Bentonita cálcica	14.4%	144
Silicato de sodio	7%	70
Agua	48%	480
Agar	0.6%	6

Fuente: Autores

#### Procedimiento

- Pesar todos los componentes indicados en la tabla 11.
- Agregar aproximadamente el 75% de agua y mezclarla con la bentonita cálcica.

- Agitar a velocidad moderada hasta que desaparezcan por completo los grumos y se tenga una mezcla homogénea.
- Agregar lentamente el silicato de sodio y mezclar durante aproximadamente 5 minutos.
- Incorporar el grafito de a poco para evitar la formación de grumos, mezclar constantemente durante 15 minutos a velocidad moderada para lograr que los componentes se incorporen por completo.
- Colocar el agua en un recipiente metálico para calentarlo y conseguir diluir el agar, adicionar esta mezcla sin dejar de batir para así lograr fluidez en la pintura.
- Dejar reposar la pintura hasta que se estabilice es decir tenga una apariencia uniforme.
- Proceder a pintar el modelo con la ayuda de una brocha, debido a la alta viscosidad de la pintura refractaria.

Figura 15. Componentes de la mezcla 2.



Fuente: Autores

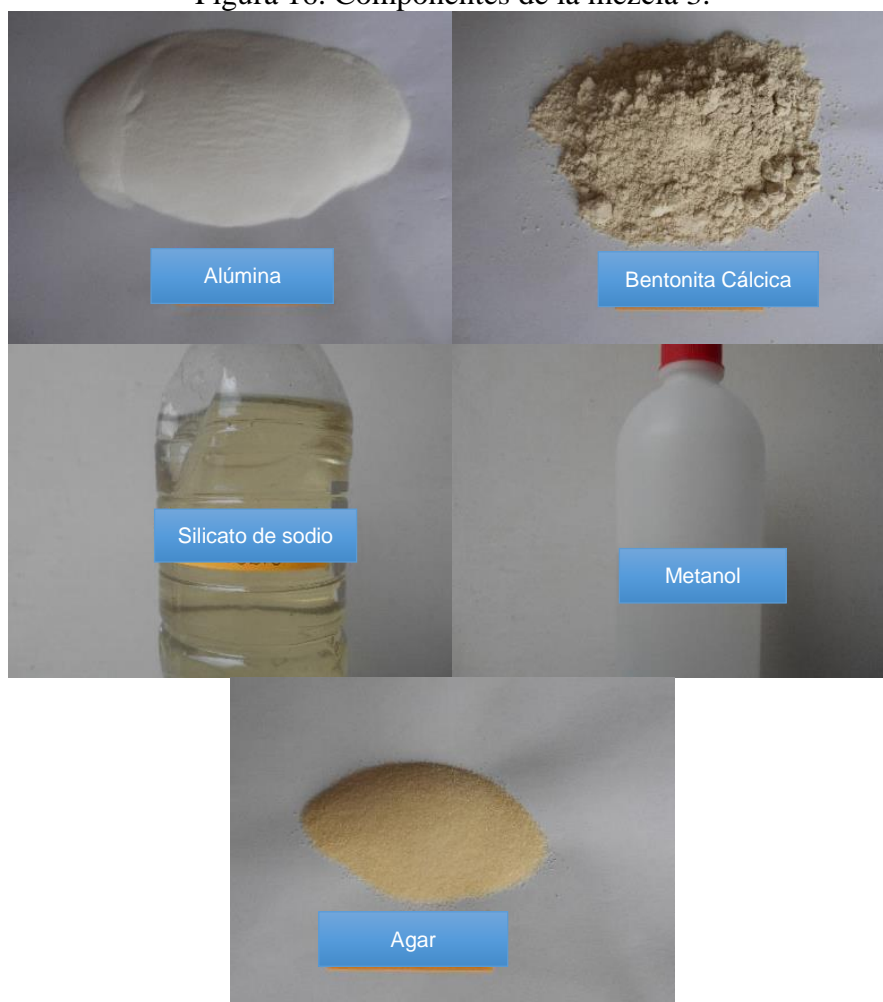
### 3.4.1.3 Mezcla 3.

Tabla 12. Componentes de la mezcla 3

Agente	Composición en porcentajes	
	Porcentaje	Cantidad [g]
Alúmina	32,26%	300
Bentonita cálcica	10,75%	100
Silicato de sodio	7,53%	70
Metanol	48,39%	450
Agar	1,08%	10

Fuente: Autores

Figura 16. Componentes de la mezcla 3.



Fuente: Autores

#### Procedimiento

- Pesar todos los componentes indicados en la tabla 12.

- Colocar 450 gr de alcohol en un recipiente, adicionar la bentonita cálcica y mezclar a velocidad moderada hasta que se incorporen por completo.
- Agregar el agente dispersante, silicato de sodio, y mezclar durante 2 minutos.
- Agregar aproximadamente 150 gr de alúmina, mezclar durante 8 minutos y agregar el sobrante volver a mezclar durante aproximadamente 10 minutos hasta que se hayan eliminado por completo los grumos.
- Diluir el agar en el resto de agua y adicionar a la mezcla sin dejar de batir para así lograr fluidez en la pintura
- Dejar reposar la pintura hasta que se estabilice y proceder a pintar los modelos mediante inmersión.

#### 3.4.1.4 Mezcla 4.

Tabla 13. Componentes de la mezcla 4

Agente	Composición en porcentajes	
	Porcentaje	Cantidad [g]
Sílice	35,00%	350
Bentonita sódica	11,00%	110
Silicato de calcio	8,00%	80
Etanol	45,00%	450
Agar	1,00%	10

Fuente: Autores

#### Procedimiento

- Pesar todos los componentes indicados en la tabla 13.
- Agregar el 75% de agua en un recipiente y mezclarla con la bentonita sódica, a velocidad moderada hasta que desaparezcan por completo los grumos.
- Agregar lentamente el silicato de calcio y mezclar aproximadamente 5 minutos hasta obtener una mezcla homogénea.

- Incorporar la sílice de a poco para evitar la formación de grumos, mezclar constantemente durante 15 minutos a velocidad moderada.
- Colocar el agua en un recipiente metálico para calentarlo junto con el agar y conseguir diluirlo por completo, adicionar esta mezcla sin dejar de batir.
- Dejar reposar la pintura hasta que se estabilice y proceder a colocarla en el modelo por inmersión.

Figura 17. Componentes de la mezcla 4.



Fuente: Autores

### 3.5 Aplicación del recubrimiento refractario

Se utilizaron diferentes métodos para recubrir los modelos tanto los de poliestireno como los de poliuretano, la técnica utilizada fue escogida en base a la consistencia y densidad de cada tipo de pintura

**3.5.1 Mezcla N°1.** La pintura número 1 tomo una apariencia con un color café, debido a que en la mezcla aún se encontraba en suspensión ciertas partículas de bentonita sódica, se procedió a recubrirla a partir dela utilización de una brocha tanto para el modelo de poliestireno como para el de poliuretano.

A esta mezcla tuvo un periodo de reposo de 24 horas ya que, de esta manera según la literatura, se mejoran sus características adhesivas, además existe una mejor interacción entre los elementos constitutivos de la pintura, dando un mejor acabado a la pieza y optimizando sus características refractarias como son la permeabilidad y la suspensión de los elementos constitutivos de la pintura.

En la figura 18 se puede visualizar la textura final que obtuvo esta pintura.

Figura 18. Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N°1



Fuente: Autores

Los modelos de poliestireno como los modelos de poliuretano recubiertos con la mezcla N°1 una vez secos presentaron diferentes morfologías y características las cuales se enlistan en la tabla 14.

Tabla 14. Características de la mezcla N°1 sobre los modelos

<b>Poliestireno</b>	<b>Poliuretano</b>
Zonas con espacios en blanco una vez secada la pintura	Distribución uniforme de la pintura
Buena adherencia al material	Buena adherencia al material
La geometría de la pieza no se altero	Mejora la apariencia del modelo
Presenta un color café claro	Presenta un color marrón oscuro

Fuente: Autores

Las piezas y características antes mencionadas con el recubrimiento de la mezcla N°1 se pueden apreciar en la figura 19.

Figura 19. Modelos recubiertos de la mezcla N°1



Fuente: Autores

**3.5.2 Mezcla N°2.** En la mezcla número 2 se usa el grafito como elemento refractario, inicialmente la pintura tomo un color negro oscuro propio del grafito; conforme se le agregaron los elementos dispersantes y de suspensión como son el silicato de sodio y la bentonita cálcica respectivamente, esta tomo una apariencia muy similar a la grasa como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N°2



Fuente: Autores

Esta pintura es muy viscosa por esto que la mejor técnica para cubrir a los modelos fue mediante una brocha. A partir de la brocha se logró cubrir toda la superficie de los modelos conforme los modelos se fueron secando, estos fueron pasando de un color negro intenso a un color cada vez más degradado llegando a un color gris al término del secado. Las características más relevantes de la interacción de los modelos y la pintura ya secan se enlistan en la tabla 15.

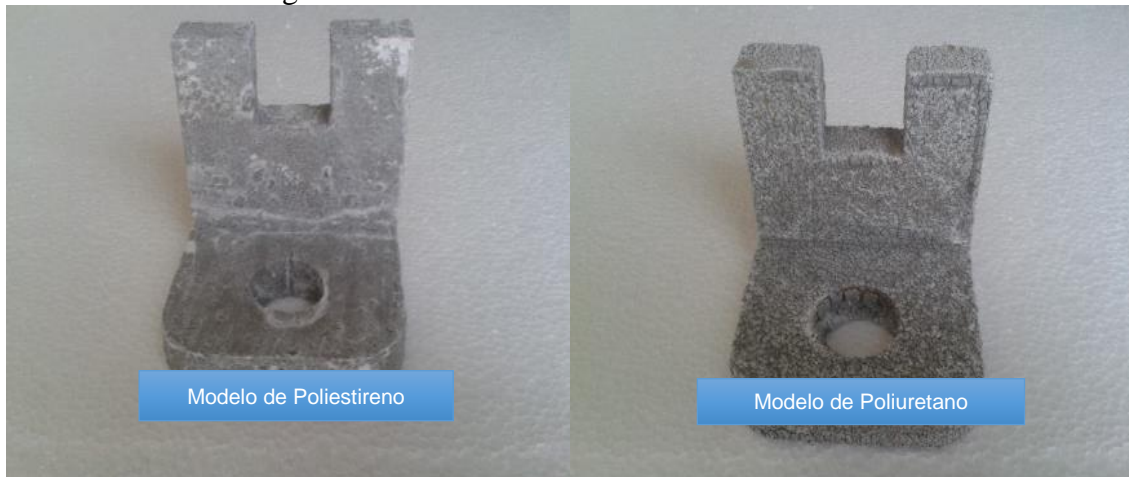
Además, las piezas y características antes mencionadas con el recubrimiento de la mezcla N°2 se pueden observar con mayor detalle en la figura 21.

Tabla 15. Características de la mezcla N°2 sobre los modelos

<b>Poliestireno</b>	<b>Poliuretano</b>
Presenta un color gris	Presenta un color gris
Se descascara en forma de hojuelas	Se descascara al estar en contacto con otra superficie.
Poca adherencia al modelo tiende a resquebrajarse	Mediana adherencia al modelo, se desprende en ciertas zonas como esquinas y aristas.
Presencia de micro grietas y fisuras en gran parte del modelo	Presenta micro grietas y fisuras en todo el modelo
No altera la geometría de la pieza	No altera la geometría de la pieza

Fuente: Autores

Figura 21. Modelos recubiertos de la mezcla N°2



Fuente: Autores

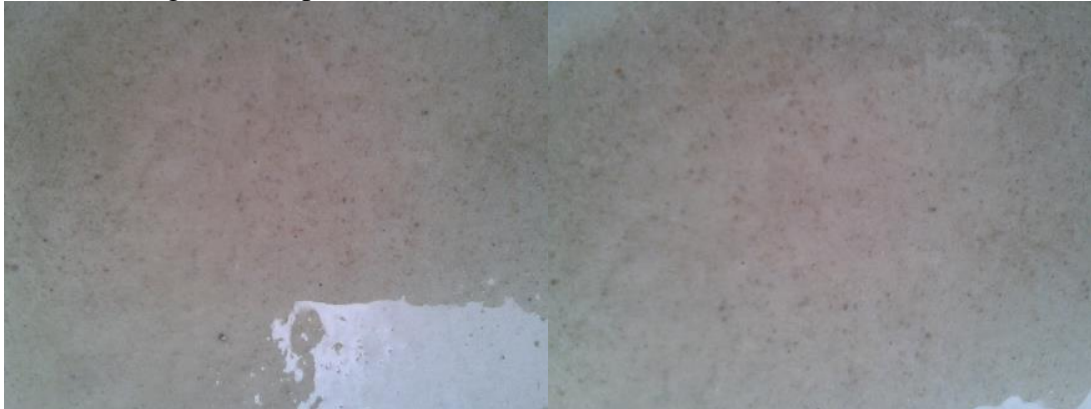
**3.5.3 Mezcla No. 3.** La mezcla No. 3 presenta la menor viscosidad vista entre las cuatro mezclas de pintura refractarias y posee una tonalidad clara, como se puede observar en la figura 22, los modelos pintados a partir de este recubrimiento se hicieron bajo inmersión precisamente por la fluidez de la pintura.

Este recubrimiento tomo un color blanco debido a la apariencia del componente refractario que es la alúmina; en esta pintura a diferencia de las anteriores se utilizó como elemento solvente alcohol metanol, este elemento consiguió que la pintura una vez seca deje una capa dura pero muy quebradiza.

Las principales características tanto de los modelos de poliuretano como poliestireno recubiertos se describen con exactitud en la tabla 16.



Figura 22. Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N° 3



Fuente: Autores

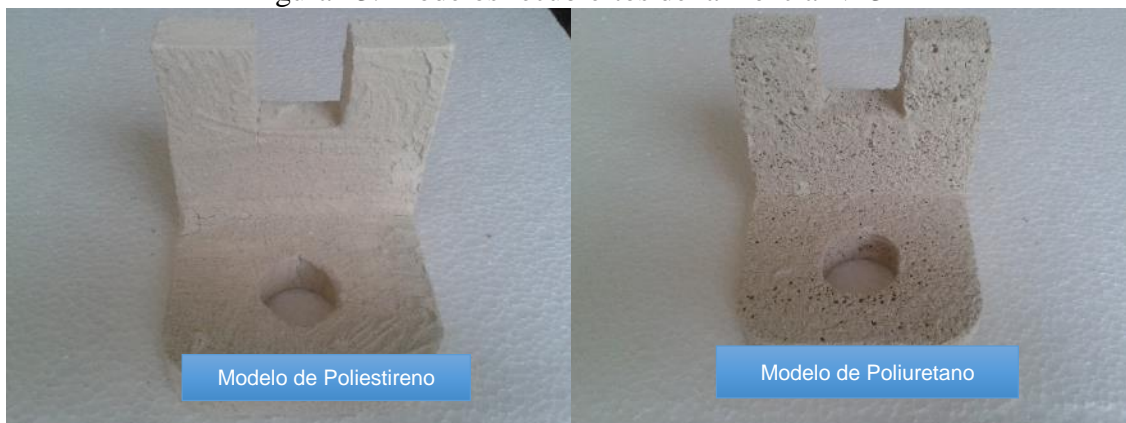
Tabla 16. Características de la mezcla N°3 sobre los modelos.

<b>Poliestireno</b>	<b>Poliuretano</b>
Despliega un color blanco	Despliega un color blanco
Presenta grietas y fisuras en los cambios de dirección del modelo	Presenta micro grietas y fisuras alrededor de todos los poros propios del modelo
Recubrimiento uniforme en toda la pieza	Recubrimiento uniforme en toda la pieza
No se alteró la geometría de la pieza	No se alteró la geometría de la pieza

Fuente: Autores

Las piezas y características antes mencionadas con el recubrimiento de la mezcla N°3 se pueden apreciar la figura 23.

Figura 23. Modelos recubiertos de la mezcla N° 3



Fuente: Autores

**3.5.4 Mezcla N°4.** En esta mezcla se utilizó como agente solvente etanol, esta pintura tomo una consistencia pastosa como se puede observar en la figura 24 además de

un color crema posiblemente debido a la mezcla de los agentes refractarios y de suspensión como lo son la sílice y la bentonita sódica., por su textura se optó por recubrir a los modelos tanto de poliestireno como de poliuretano por medio de una brocha. Al cabo de su secado, debido a que en la naturaleza de su composición contenía un tipo de alcohol este se evaporo parcialmente, dejando en su superficie una capa seca pero que en el interior aún permanecía húmeda.

Figura 24. Apariencia final del recubrimiento de la mezcla N° 4



Fuente: Autores

Las características de los modelos una vez pintados y secados se enlistan en la tabla 17.

Tabla 17. Características de la mezcla N°4 sobre los modelos.

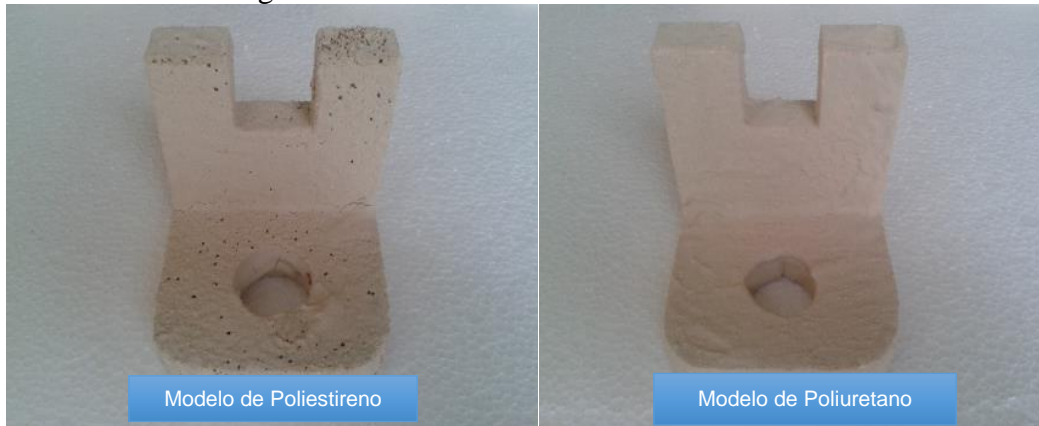
<b>Poliestireno</b>	<b>Poliuretano</b>
Su color final es crema	Su color final es crema
No presenta grietas ni fisuras	Presenta micro grietas y fisuras en los cambios de dirección del modelo
Presenta sobre montas en ciertas partes de la superficie	Recubrimiento uniforme en toda la pieza
No altera la apariencia de la pieza	Mejora la apariencia al tapar gran cantidad de poros del modelo

Fuente: Autores

En la mezcla N°4, donde el agente refractario es el mismo del de la mezcla N°1 pero se varia principalmente el agente solvente al usar Etanol, existen variaciones significativas principalmente en el tiempo de secado y la apariencia.

Las piezas y características de los modelos de poliestireno y poliuretano recubiertas se pueden apreciar en la figura 25.

Figura 25. Modelos de recubiertos de la mezcla N°4



Fuente: (Autores)

### 3.6 Espesor del recubrimiento refractario

Con la ayuda de un calibrador digital se midió el espesor de cada una de las diferentes pinturas aplicadas sobre los modelos de espuma de poliestireno y espuma de poliuretano; los valores encontrados se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Espesor de los diferentes tipos de recubrimientos refractarios

<b>Espesor del recubrimiento refractario</b>		
	<b>Espuma de poliestireno</b>	<b>Espuma de poliuretano</b>
<b>Pintura</b>	Espesor[mm]	Espesor[mm]
A	0, 23	0, 46
B	0, 60	0, 60
C	0, 13	0, 25
D	0, 225	0, 22

Fuente: Autores

Se observa que el espesor de la pintura en los modelos de poliuretano es mayor que el de poliestireno, esto se debe a que el modelo de poliuretano tiene una composición porosa lo que provoca que este absorba más pintura.

### 3.7 Ensayo de arenas

Las características de las arenas influyen en las propiedades de las piezas fundidas, es recomendable ensayar y obtener los valores de ciertas propiedades tales como humedad, permeabilidad, tamaño de grano, valores de esfuerzos de compresión y corte.

Para esto se ensayó la arena presente en el laboratorio de la facultad de mecánica. Para que la arena sea apta para el moldeo, debe reunir las siguientes características:

- Refractoriedad: Para resistir las altas temperaturas del metal fundido.
- Permeabilidad: En grado tal que permita la evacuación de los gases disueltos en el metal y del aire contenido en el molde.
- Fluidez: Suficiente para tomar y conservar la forma del modelo.
- Resistencia: Para resistir los esfuerzos mecánicos y el empuje del metal.

Estas tierras no deben contener impurezas tales como carbonatos, micas u óxidos, que dan lugar a la formación de silicatos fusibles y desprenden gases que pueden provocar sopladuras.

Las tierras de moldeo son un conjunto heterogéneo, compuesto esencialmente por una arena base sílice y un aglomerante mineral (arcillas como la bentonita), a su vez poseen orgánicos (como la arena de madera, mogul, etc para darle permeabilidad), carbón mineral molido (en el caso de colar fundiciones de hierro) y agua.

**3.7.1** *Ensayos realizados a las arenas de moldeo.* En base a las características y requerimientos anteriores, se hace necesario controlarla a través de ensayos. La AFS (Asociación Americana de Fundidores), ha estandarizado los siguientes ensayos los mismos que van a ser tratados en este documento:

- Granulometría
- Contenido de humedad
- Permeabilidad
- Ensayos mecánicos (resistencia a la compresión, resistencia al corte)

**3.7.1.1** *Granulometría.* La arena disponible en el laboratorio de fundición de la Facultad de Mecánica muestra características del tipo esferoidal como se muestra en la figura 26, siendo la ideal para este proceso de fundición ya que se adapta con facilidad a la forma y geometría del modelo.

Figura 26. Arena vista desde el microscopio a 25x.



Fuente: Autores

Respecto a la distribución granulométrica se las puede clasificar de acuerdo a su tamaño, para lo cual se lo mide según la AFS.

Procedimiento para determinar el índice de finura.

- Pesar 100 gramos de Arena (Sílice) o llamada también arena blanca en la balanza de precisión.
- Verificar que los tamices se encuentren en orden de finura de acuerdo al tamaño de la malla de los mismos.
- Colocar los 100 gramos de arena blanca en el tamiz superior de la tamizadora por el lapso de 5 a 10 minutos.
- Encender el tamizador
- Después de transcurrido el período de tiempo necesario, se procede a retirar de cada tamiz la arena que no haya sido secada, y se pesa la arena que haya quedado en cada tamiz con la ayuda de un papel y la balanza.

En la figura 27 se observa la máquina de vibración el cual es un instrumento empleado en la separación de la arena por tamaños, está formado por un marco metálico y alambres que se cruzan ortogonalmente formando aberturas cuadradas. Los tamices del ASTM son designados por medio de pulgadas y números. Por ejemplo, un tamiz 2" es aquel cuya

abertura mide dos pulgadas por lado. N° 4 es aquel que tiene cuatro alambres y cuatro aberturas por pulgada lineal.

Figura 27. Tamiz para el ensayo de granulometría.



Fuente: Autores

La cantidad de arena retenida en cada uno de los tamices se encuentra en la tabla N° 19.

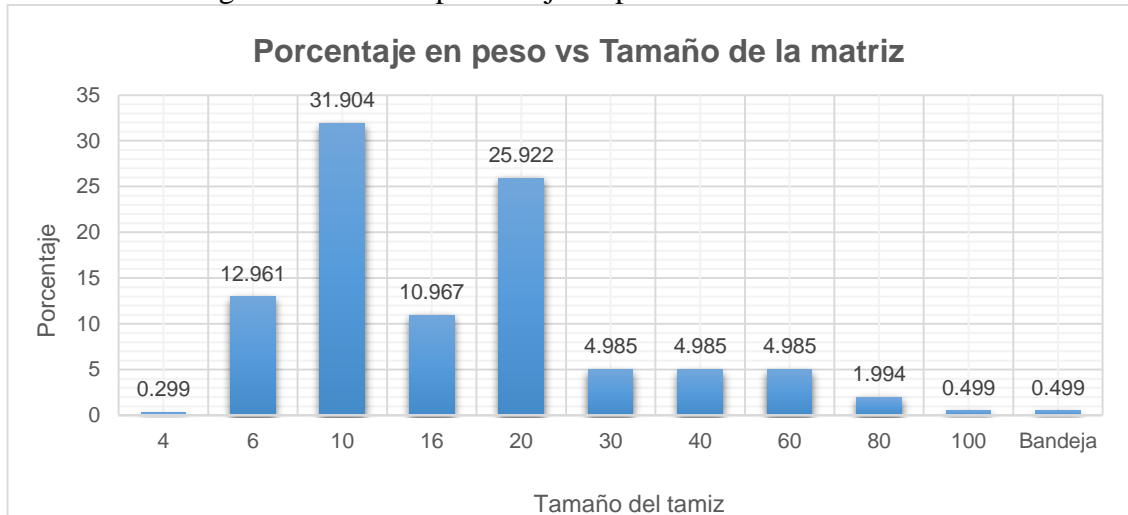
Tabla 19. Resultados de granulometría de la muestra de arena

<b>Tamiz</b>	<b>Apertura de la malla [mm]</b>	<b>Masa [g]</b>	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Factor K</b>	<b>Producto [Porcentaje *K]</b>
4	1,5	0,3	0,299	6	1,794
6	1	13	12,961	9	116,649
10	0,6	32	31,904	17	542,368
16	0,4	11	10,967	31	339,977
20	0,3	26	25,922	41	1062,802
30	0,25	5	4,985	52	259,220
40	0,15	5	4,985	71	353,9350
60	0,1	5	4,985	103	513,455
80	0,08	2	1,994	146	291,124
100	0,06	0,5	0,499	186	92,814
Bandeja		0,5	0,499		140,219
Sumatoria		100,3	100		3 714,357

Fuente: Autores

En la figura 28 se indica descriptivamente el porcentaje de arena estancado, en una gráfica de histogramas de los diferentes tipos de tamices.

Figura 28. Gráfica porcentaje de peso vs tamaño del tamiz.



Fuente: Autores

Porcentaje total de grano retenido: 100%

Producto total = 3 714,357

$$\text{Número de Finura de grano AFS} = \frac{\text{Producto total}}{\text{Porcentaje de grano retenido}} \quad (3)$$

$$\text{Número de Finura de grano AFS} = \frac{3714,357}{100}$$

$$\text{Número de Finura de grano AFS} = 37,14$$

El número de finura de grano AFS es 37,14 de acuerdo al procedimiento con este resultado se comparan los valores que se indican en la tabla 20 y se determina que la arena posee un grado AFS 7.

Tabla 20. Clasificación del grado AFS.

NÚMERO DE FINURA DEL GRANO	CLASIFICACIÓN	NÚMERO DE FINURA DEL GRANO	CLASIFICACIÓN
	GRADO		GRADO
200 a 300	1	40 a 50	6
140 a 200	2	30 a 40	7
100 a 140	3	20 a 30	8
70 a 100	4	15 a 20	9
50 a 70	5	10 a 15	10

Fuente: (PASTOR, 2004)

**3.7.1.2** *Contenido de humedad.* Para calcular el porcentaje de humedad se llevó a cabo el siguiente procedimiento

- Pesar 10 gramos de arena-arcilla.
- Colocar la arcilla dentro del higrómetro.
- Introducir en el higrómetro aproximadamente 8,5 gramos. de carburo de calcio
- Cerrar herméticamente el recipiente y agitarlo por un corto período de tiempo.

Mediante la reacción del carburo de calcio con el agua presente en la arena se forma gas acetilénico, lo cual produce un aumento de presión y a través del higrómetro se obtiene en forma directa el resultado en porcentaje de humedad dando un valor de 5,6% de humedad para la arena ensayada. (Véase figura 29)

Figura 29. Higrómetro utilizado para el ensayo de humedad.



Fuente: Autores

**3.7.1.3** *Ensayo de permeabilidad.* Para el ensayo de permeabilidad se ejecutan los siguientes pasos:

- Pesar 150 gramos de arena húmeda.
- Colocar la arena previamente pesada dentro de un molde cilíndrico.
- Compactar la arena dando tres golpes, con ayuda del martinete.
- Este bloque se lo lleva al permeámetro y colocarlo en la posición adecuada
- Abrir la válvula y permitir el paso de 2 litros de aire durante 30 s.
- Medir la variación de presión que se indica automáticamente en el manómetro del equipo.



Figura 30. Máquina para ensayo de permeabilidad



Fuente: Autores

Datos obtenidos en el laboratorio durante el ensayo

$$P = 72 \text{ mm } H_2O = 6,9 \left[ \frac{g}{cm^2} \right]$$

$$v = 2 \text{ lt aire} = 2000 \left[ cm^3 \right]$$

$$t = 30 \left[ s \right]$$

$$d = 50,3 \left[ mm \right]$$

$$h = 51,4 \left[ mm \right]$$

Al remplazar en la ecuación (4) se determina la permeabilidad

$$P = \frac{v \cdot h}{p \cdot a \cdot t} \quad (4)$$

Dónde:

P = Número de permeabilidad

v = Volumen de aire que atraviesa la muestra [ml]

h = Altura de la muestra [cm]

p = Presión de aire [cmH<sub>2</sub>O]

a = Área de sección de la muestra en [cm<sup>2</sup>]

t = Tiempo [s].

$$\text{Área} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (5)$$

$$\text{Área} = \frac{\pi * (5,03 \text{ cm})^2}{4}$$

$$\text{Área} = 19,87 \text{ cm}^2$$

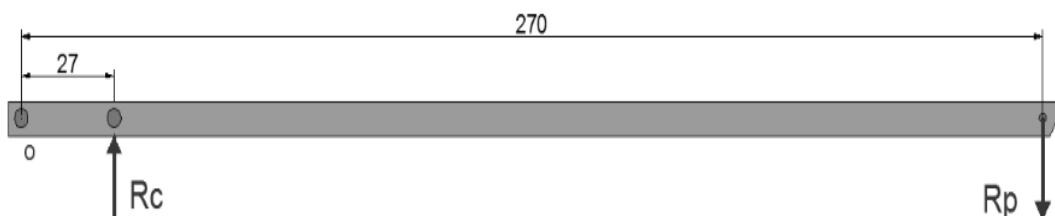
$$P = \frac{2000 \text{ cm}^3 * 5,14 \text{ cm}}{7 \text{ g/cm}^2 * 19,87 \text{ cm}^2 * 30 \text{ seg}}$$

$$P = 2,46 \frac{\text{cm}^4}{\text{g} \cdot \text{s}}$$

**3.7.1.4 Ensayos mecánicos.** Los ensayos a realizar en la arena son los ensayos a corte y compresión para esto se realiza el siguiente procedimiento:

- Pesar 145 gramos de arena húmeda.
- Colocar esta cantidad de arena dentro de un molde cilíndrico y se compacta.
- Llevar la probeta a la máquina aplacadora de carga donde se coloca debajo del pistón que la va a comprimir o cortar dependiendo del ensayo véase la figura 31 en donde se muestran los diferentes elementos para cada ensayo.
- Introducir peso en el equipo para que la probeta experimente un esfuerzo de compresión o corte dependiendo del ensayo y falle a un determinado peso, el cual posteriormente se cuantifica por medio de la balanza.

Resistencia a la compresión



*Carga aplicada = 1200 g*

$$F1 = 1200 * 0.001 * 9.8[N]$$

$$F1 = 11.76 N$$

$$r_{OA} = 2,7 cm$$

$$r_{OB} = 27 cm$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$F1 * r_{OB} = F2 * r_{OA}$$

$$F2 = \frac{r_{OB}}{r_{OA}} F1$$

$$F2 = \frac{270}{27} (11.76)$$

$$F2 = 117.6 N$$

$$\sigma = \frac{F2}{\text{Área}}$$

$$\sigma = \frac{117.6 N}{19.87 cm^2} * \frac{(100)^2 cm^2}{m^2}$$

$$\sigma = 59184.7 Pa = 59.1 KPa$$

Figura 31. Ensayo de compresión



Fuente: Autores

Resistencia al corte

$$r_{OA} = 2,7 cm$$

$$r_{0B} = 27 \text{ cm}$$

$$F1 = 0,457 * 9,8 \text{ [N]}$$

$$F1 = 4.478$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$F1 * r_{0B} = F2 * r_{0A}$$

$$F2 = \frac{r_{0B}}{r_{0A}} F1$$

$$F2 = \frac{270}{27} (4.478 \text{ N})$$

$$F2 = 44.78 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F2}{\text{Área}}$$

$$\tau = \frac{44.78 \text{ N}}{19.87 \text{ cm}^2} * \frac{(100)^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2}$$

$$\tau = 22539.51 \text{ Pa} = 22.53 \text{ KPa}$$

Figura 32. Máquina para el ensayo de corte en arenas.



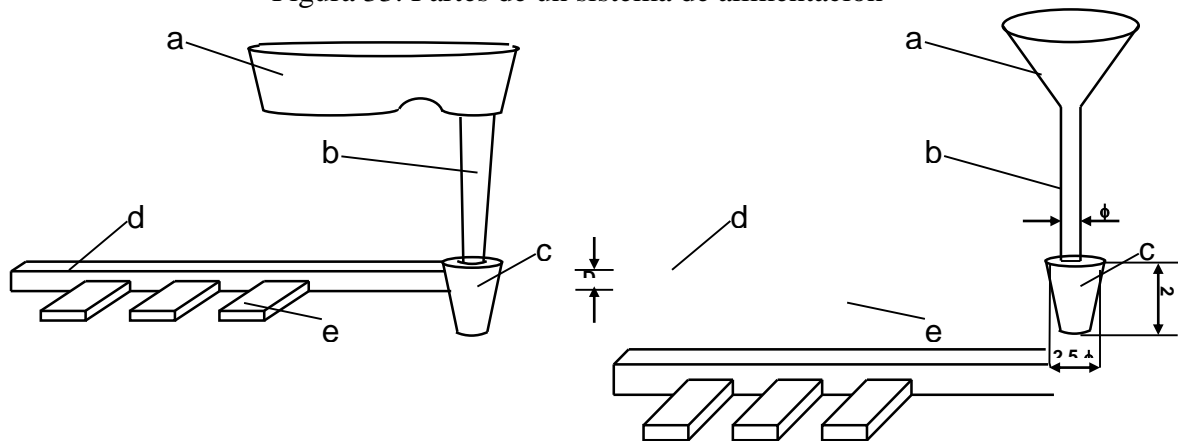
Fuente: Autores

### 3.8 Sistema de alimentación

Un sistema de alimentación, como el que se muestra en la figura 35, consta de las siguientes partes:

- Embudo o bacía de colada
- Canal vertical o bebedero
- Talón de caída
- Canal de distribución
- Canales de alimentación o entrada

Figura 33. Partes de un sistema de alimentación



Fuente: (PASTOR, 2004)

**3.8.1 Embudo de colada.** Su función principal es el de recibir el chorro de metal líquido y mantener constante el flujo en su interior, evitando el ingreso de escoria para evitar defectos en la pieza fundida.

Es necesario que el embudo de colado se encuentre lleno del metal líquido durante el colado para que el llenado de la pieza sea completo.

**3.8.2 Canal vertical.** Es por donde baja la corriente del metal líquido “este canal debe ser más angosto en su interior con el fin de crear la presión piezométrica positiva en el sistema de alimentación.

**3.8.3 Talón de caída.** Se encuentra ubicado bajo el bebedero o canal vertical, tiene como función principal la expulsión del aire que ingresa al inicio del colado y ayuda a proveer en forma continua el metal fundido al canal de distribución y alimentación.

**3.8.4 Canal de distribución.** Permite conducir el metal líquido a los distintos puntos donde se encuentra los canales de alimentación. tiene como función frenar al líquido y retener la espuma de óxido.

**3.8.5** *Canales de alimentación.* Distribuyen uniformemente el metal fundido a la cavidad del molde, dicho suministro debe ser de forma suave, se encuentran situados en los puntos de más profundidad y menos espesor de la pieza, además la selección de los alimentadores debe ayudar a que la temperatura del metal fundido no descienda demasiado en el trayecto del canal de distribución a la moldura.

**3.8.6** *Temperatura de colado.* Una buena temperatura de colado debe ser seleccionada de acuerdo con las condiciones de proceso de colado, las características del molde y propiedades del metal.

Si la temperatura es baja el metal líquido perderá fluidez y no puede llenar todas las regiones del molde, puede solidificarse en los bebederos y canal de alimentación.

Si la temperatura es elevada esta puede producir una gran disolución de gases que dan lugar a la formación de burbujas, las mismas que si no se pueden escapar del interior de la pieza de colado, producirá sopladuras y picaduras.

**3.8.7** *Velocidad de colado.* De la velocidad de colado depende que la pieza esté libre de rechupes y porosidades.

Si la velocidad es alta se produce un flujo turbulento, una velocidad baja ayuda a que el metal este más tiempo en contacto con el aire por lo que se producirá una reacción de oxidación.

**3.8.8** *Diseño de secciones de alimentación de las piezas.* Para el cálculo de la sección del canal de alimentación se utiliza la ecuación 6:

$$S_{alim} = \frac{m}{\rho * t \sqrt{\frac{2 * g * h}{k_t}}} \quad (6)$$

Dónde:

$S_{alim}$  = Sección transversal total de los canales de entrada [cm<sup>2</sup>]

$m$  = masa del metal que debe llenar la moldura [g]

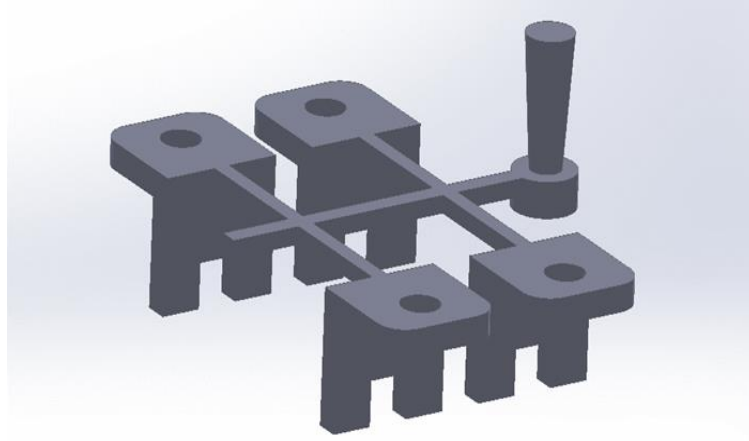
$\rho$  = densidad del aluminio [g/cm<sup>3</sup>]

$t$  = tiempo de colado [s]

$K_t$  = Factor de pérdidas totales

El volumen de cada modelo se obtuvo directamente a partir del software SolidWorks, se procura fundir cuatro piezas a partir de un mismo sistema de distribución como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Pieza patrón a fundir dibujada en SolidWorks.



Fuente: Autores

$$V_1 = 134,09 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{piezas}} = 4 * V_1$$

$$V_{\text{piezas}} = 4 * 134,09 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{piezas}} = 536,36 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{piezas}} = \delta * V_{\text{piezas}}$$

$$m_{\text{piezas}} = 2,385 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 536,36 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{piezas}} = 1279,2186 \text{ gr}$$

A partir de la ecuación de Bernoulli se deduce la velocidad de entrada del metal a la cavidad del molde, partiendo de una velocidad inicial de cero, esta ley se basa en la fórmula 7:

$$U = \sqrt{2 * g * H} \quad (7)$$

Dónde:

$U$  = velocidad del metal [m/s]

$g$  = aceleración de la gravedad [9,8 m/s<sup>2</sup>]

$H$  = altura de presión o altura estática de cálculo [m]

La velocidad no debe exceder los 150 cm/s

$$H = H' - \frac{c}{2} \quad (8)$$

Dónde:

$H'$  = altura del canal vertical desde el lugar de suministro de la masa del molde [cm]

$C$  = altura de la moldura [cm]

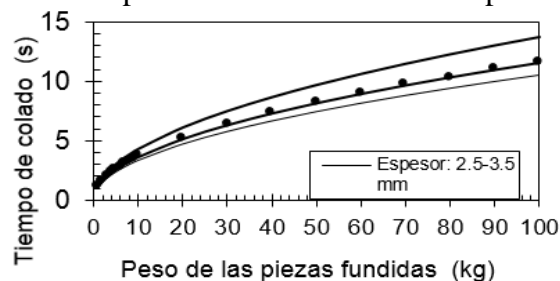
$$H = 7,5 - \frac{3}{2} = 6 \text{ cm}$$

$$U = \sqrt{2(980 \text{ cm/s}^2)(6 \text{ cm})}$$

$$U = 108,44 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

El tiempo de colado es posible conocerlo mediante la siguiente gráfica donde se muestra el diagrama para determinar el tiempo de colado en función del peso de la pieza para fundiciones de aluminio de hasta 450 kg.

Figura 35. Tiempo de colado en función del peso de la pieza.



Fuente: Autores

A partir de esta gráfica se define un tiempo de colado de aproximadamente 3 segundos. El tiempo de colado se afectará por un factor de corrección  $C_m$  el cual toma en cuenta la influencia que tiene la densidad y la viscosidad sobre el tiempo de colado de una aleación



$$C_m = \frac{\mu_{Al}\rho_{Fe}}{\mu_{Fe}\rho_{Al}} \quad (9)$$

$$C_m = \frac{\left(0,1492 \frac{mNs}{m^2}\right) (7,015 gr/cm^3)}{\left(0,3699 \frac{mNs}{m^2}\right) (2,385 gr/cm^3)}$$

$$C_m = 1,186$$

Por lo que el tiempo de colado será

$$t = t' C_m \quad (10)$$

$$t = (3s) 1,186$$

$$t = 3,558 s$$

Factor de pérdidas totales

$$K_t = K_1 + K_2 + K_3 \quad (11)$$

$K_1 \approx 0,04 \Rightarrow$  Coeficiente de pérdidas por las fuerzas de rozamiento del fluido con las paredes del bebedero, canales de distribución y entrada

$K_2 \approx 0,045 \Rightarrow$  Coeficiente de pérdidas por los cambios de sección, entradas y salidas.

$K_3 \approx 0,15 \Rightarrow$  Coeficiente de pérdidas por resistencia al flujo

$$K_t = K_1 + K_2 + K_3$$

$$K_t = 0,04 + 0,045 + 0,15 = 0,235$$

$$S_{alim} = \frac{m}{\rho * t \sqrt{\frac{2 * g * h}{k_t}}}$$

$$S_{alim} = \frac{1279,2186 gr}{2,385 \frac{gr}{cm^3} * 3,558 s * \sqrt{\frac{2(980 cm/s^2)(6 cm)}{0,235}}}$$

$$S_{alim} = 0,67 \text{ cm}^2$$

Asumiendo una geometría del canal rectangular, y al tomar 0,81 cm para el lado “a” se obtiene el valor b a partir del área véase la figura 36.

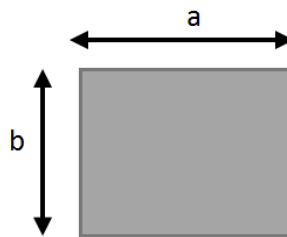
$$S_{alim} = a_1 * b_1 \tag{12}$$

$$b_1 = \frac{S_{alim}}{a_1}$$

$$b_1 = \frac{0,67 \text{ cm}^2}{0,81 \text{ cm}}$$

$$b_1 = 0,82 \text{ cm}$$

Figura 36. Geometría de los canales de distribución y alimentación



Fuente: Autores

La sección del paso del líquido debe las siguientes relaciones: siendo FA la sección total del o canales de alimentación, FD del canal de distribución y FB del bebedero, como se muestra:

Tabla 21. Variación de la seccion del sistema de alimentación.

<b>FA</b>	<b>FD</b>	<b>FB</b>
1	2	3
1	2	4
1	1	6
1	2	2
1	2.4	2.4
1	2.6	3.3
1	2.7	3.6

Fuente: (PASTOR, 2004)

- *Canal de distribución.* A partir de los factores presentados en la tabla 21 se obtiene un factor de 2 para el canal de distribución obteniéndose un área de:

$$S_{dist} = 2 * S_{alim} \quad (13)$$

$$S_{dist} = 2 * 0,67 \text{ cm}^2$$

$$S_{dist} = 1,34 \text{ cm}^2$$

La forma del canal de distribución es rectangular, nuevamente se asume un valor de un lado de la sección  $a = 1,34 \text{ cm}$  para obtener el desconocido a partir del área. Véase figura 38

$$S_{dist} = a_2 * b_2 \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{S_{dist}}{a_2}$$

$$b_2 = \frac{1,34 \text{ cm}^2}{1,34 \text{ cm}}$$

$$b_2 = 1 \text{ cm}$$

- *Bebedero.* Ahora para el cálculo de la sección del bebedero se tiene que es 3 veces más que la sección de distribución.

$$S_{beb} = 3 * S_{alim} \quad (15)$$

$$S_{beb} = 3 * 0,67 \text{ cm}^2 = 2,01 \text{ cm}^2$$

La forma del canal del bebedero es cilíndrica a partir del área se determina el valor del diámetro:

$$S_{beb} = \frac{\pi}{4} \emptyset^2 \quad (16)$$

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 * S_{beb}}{\pi}}$$

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 * 2,01 \text{ cm}^2}{\pi}} = 1,6 \text{ cm}$$

- *Talón de caída.* A partir de experiencias previas de fundición el cálculo de caída se dice que la altura es dos veces la del canal de distribución, y el diámetro es dos puntos cinco veces la del bebedero, por lo tanto.

$$H = 2 * b_2 \quad (17)$$

$$H = 2 * 1\text{ cm}$$

$$H = 2\text{ cm}$$

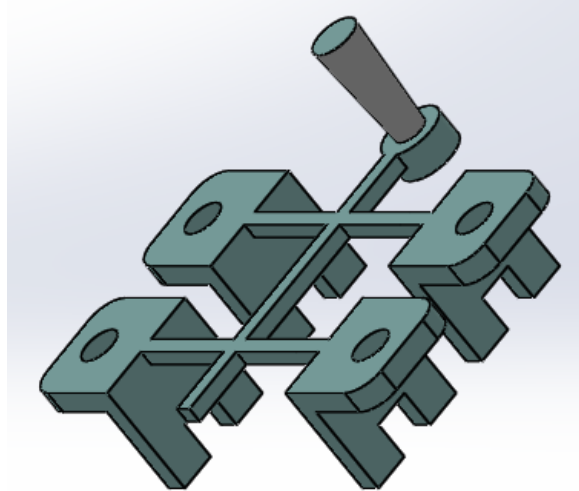
$$D = 2,5\phi$$

$$D = 2,5 * 1,6\text{ cm}$$

$$D = 4\text{ cm}$$

En la figura 37 se muestra el sistema de distribución el cual se fabricará de EPS.

Figura 37. Sistema de distribución completo.



Fuente: Autores

### 3.9 Análisis CAE

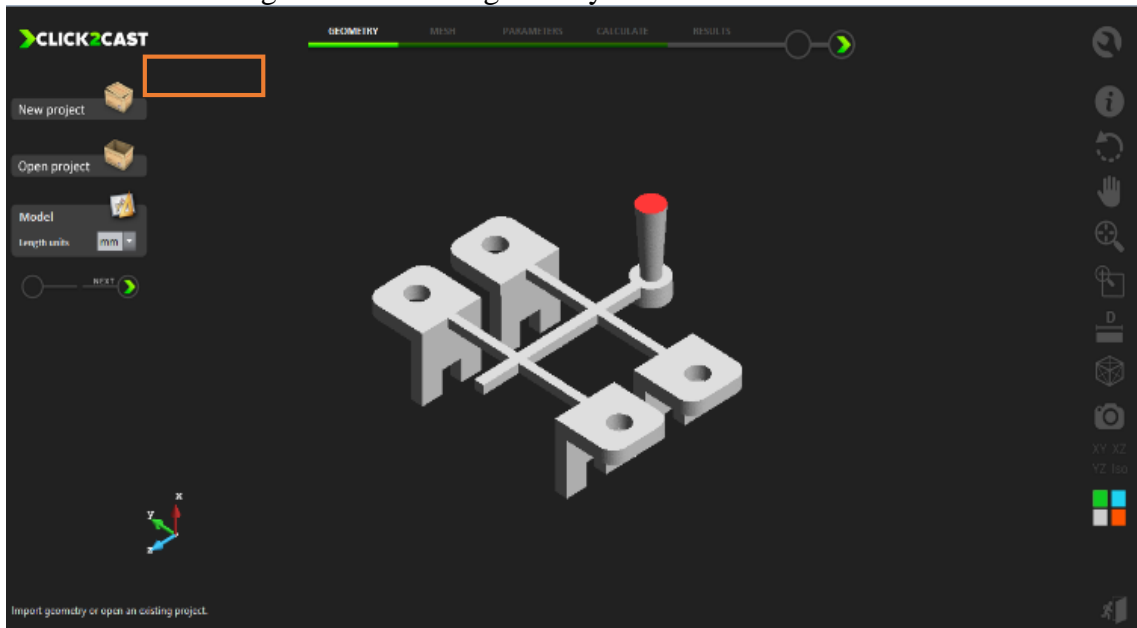
Mediante el software Click2cast se analiza la geometría de la pieza a fundir, incluido los canales de alimentación y las cuatro piezas. A partir de este análisis se puede predecir cierto comportamiento y características de la pieza a fundir.

#### 3.9.1 Procedimiento para análisis de piezas a fundir en el software Click2Cast.

El procedimiento inicia en la sección geometry, importando la pieza previamente diseñada, dar clic en new project y seleccionar la pieza a analizar. También en esta sección se definen las unidades que se manejarán a lo largo del análisis. (Figura 38)

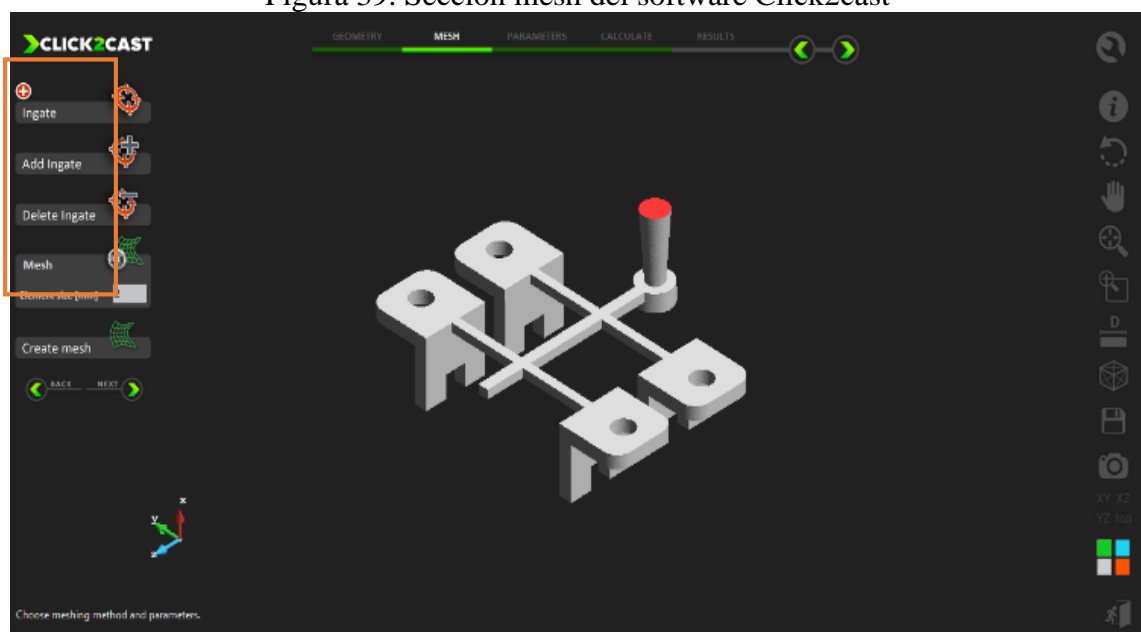
A continuación, en la sección mesh se indica por donde va a ingresar la colada, de la misma manera en esta sección se define el tamaño del mallado del análisis. (Figura 39)

Figura 38. Sección geometry del software Click2cast



Fuente: Autores

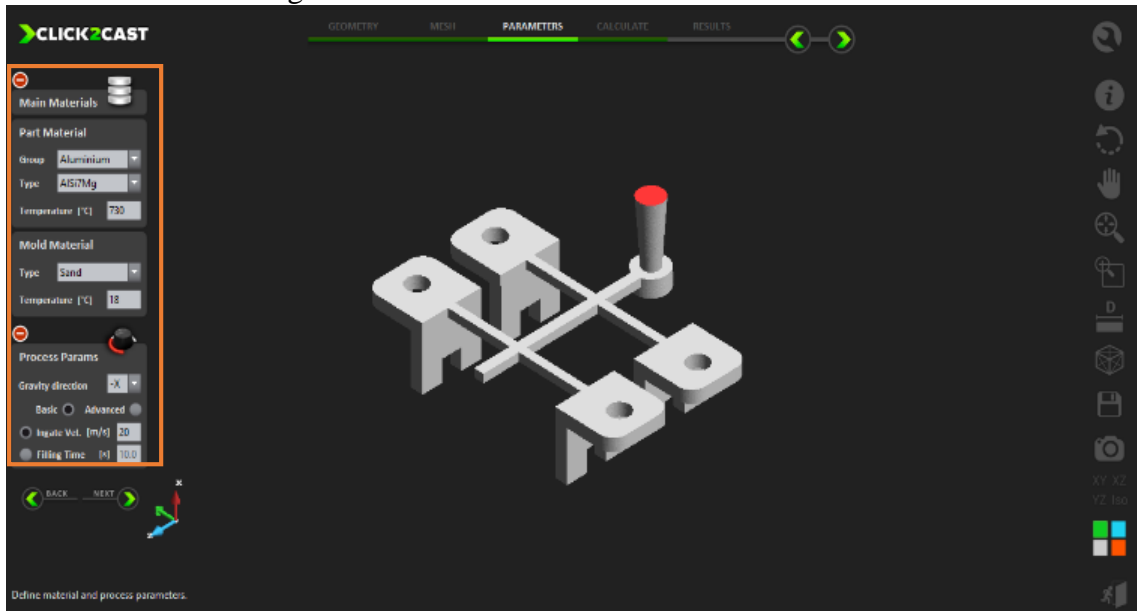
Figura 39. Sección mesh del software Click2cast



Fuente: Autores

En la sección parameters se ingresan los parámetros relacionados con la colada como son el tipo de material, la temperatura, el tipo de molde y la velocidad de ingreso.

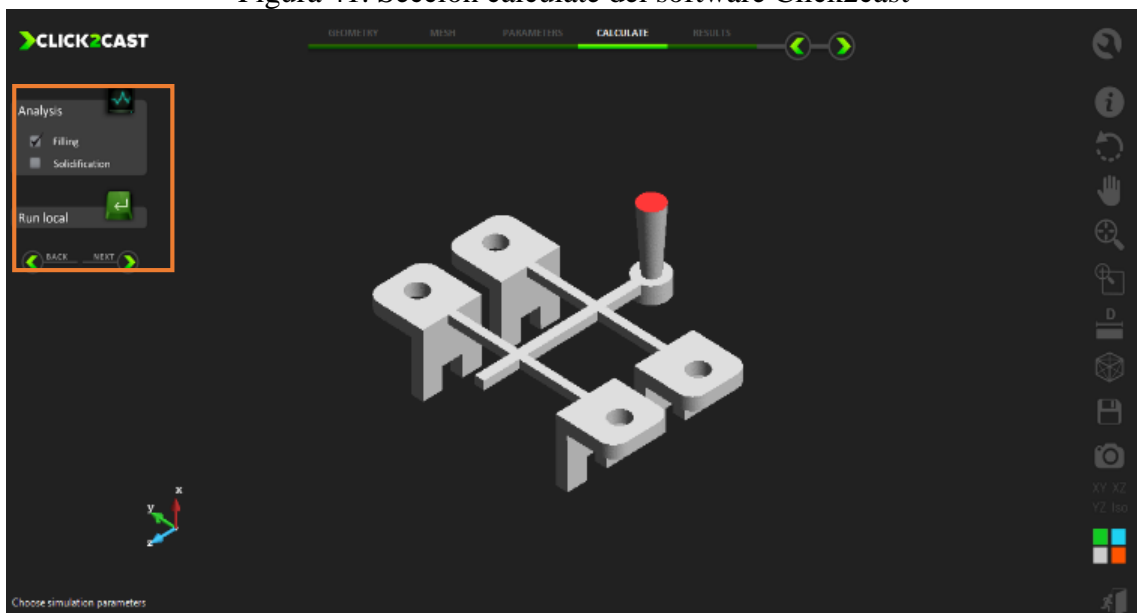
Figura 40. Sección mesh del software Click2cast



Fuente: Autores

El último paso es proceder a correr el programa en la sección calculate. (Figura 41)

Figura 41. Sección calculate del software Click2cast

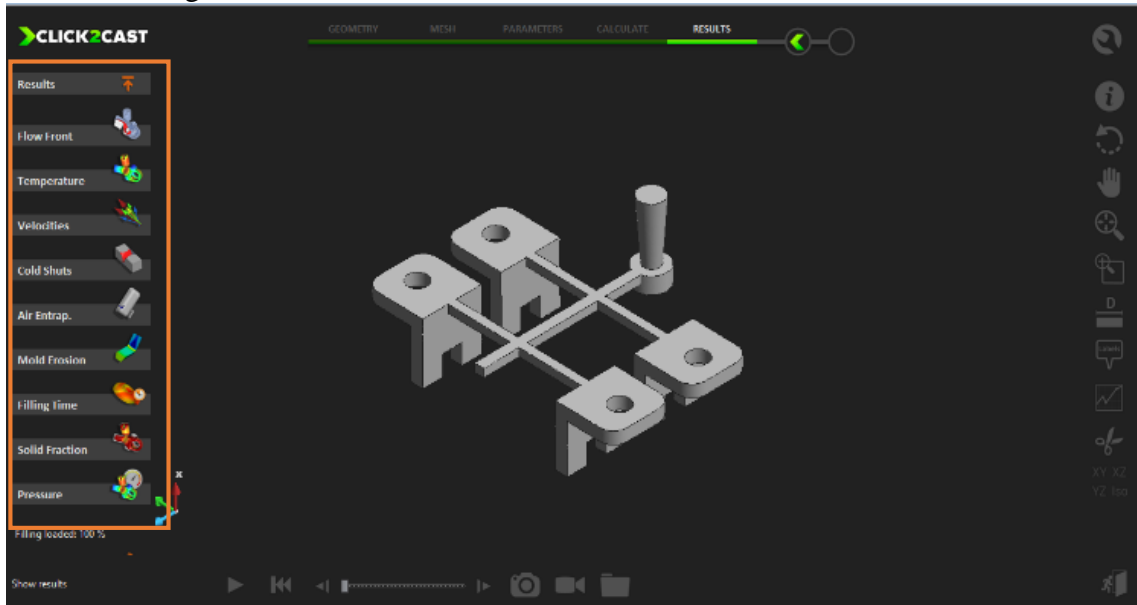


Fuente: Autores

En la sección de resultados se muestran todos los análisis realizados por el programa (aire atrapado en el modelo, enfriamiento en el modelo, gradiente de presión dentro del

sistema, velocidad de enfriamiento, vectores de velocidad en el sistema de alimentación, distribución de la colada en el modelo, gradiente de temperatura)

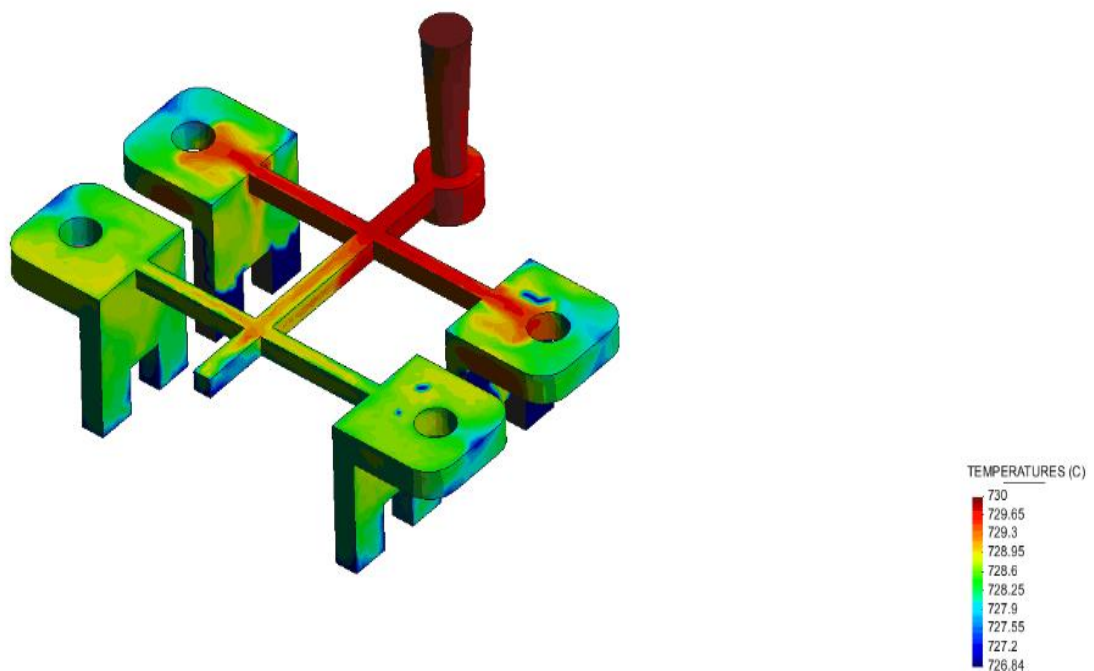
Figura 42. Resultados obtenidos mediante el software Click2cast



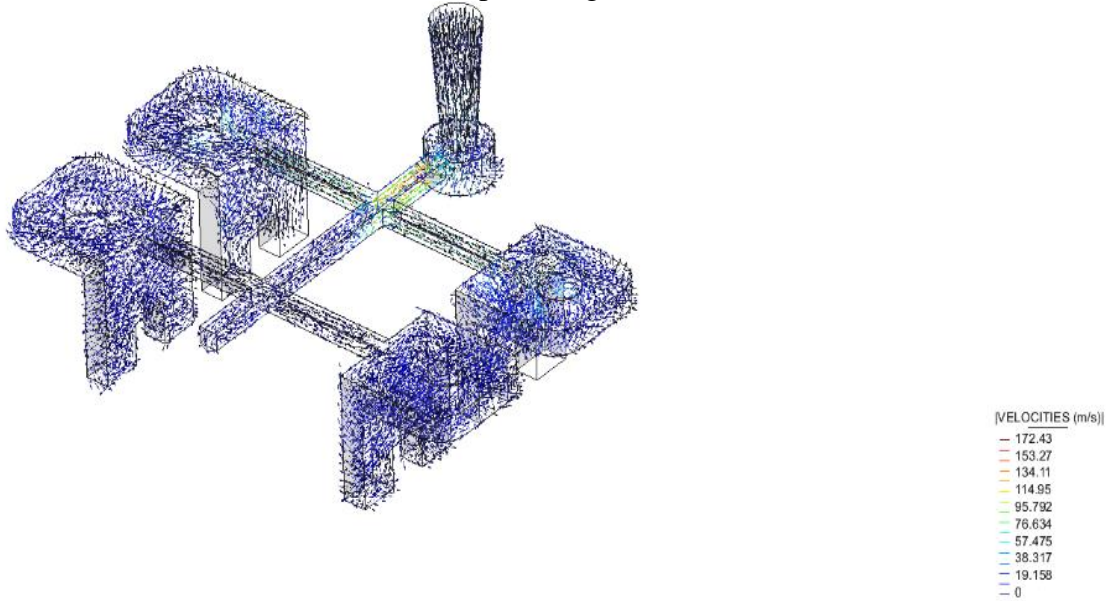
Fuente: Autores

A continuación, se indican los principales resultados obtenidos a partir del software Click2Cast como son la distribución de temperatura, velocidades y aire atrapado en la figura 43 (a), (b) y (c); los demás resultados se pueden encontrar en el anexo B.

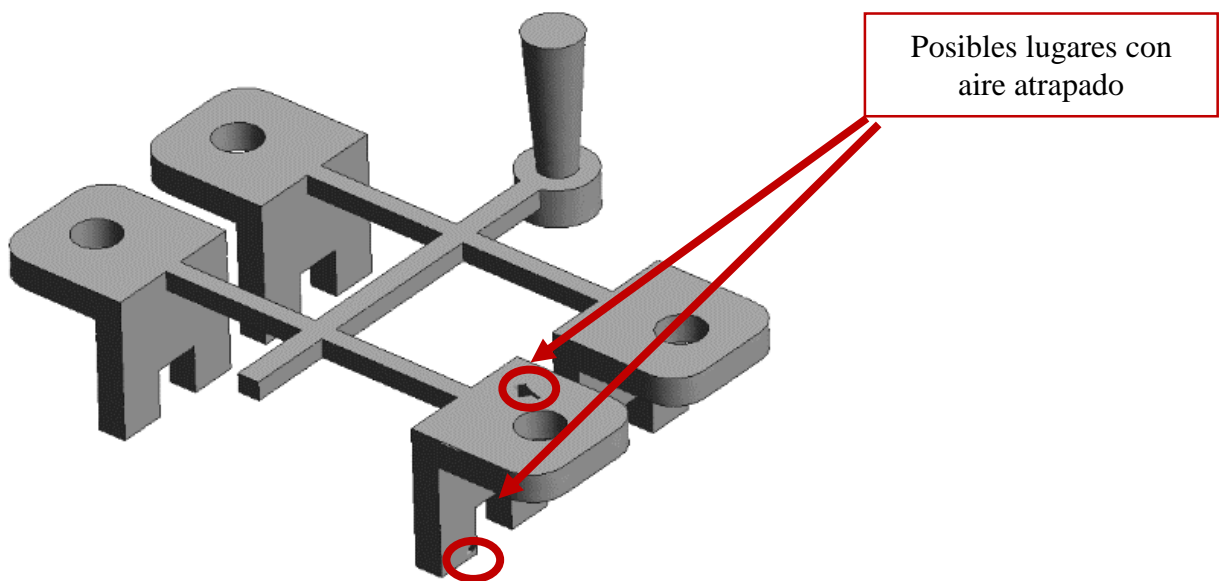
Figura 43. Resultados del software CLick2Cast.  
(a) Distribución de la temperatura por código de colores



(b) Distribución de velocidades por código de colores en el sistema a fundir.



(c) Lugares donde probablemente se encuentren porosidades o aire atrapado.



Fuente: Autores

### 3.10 Fundición de piezas

**3.10.1 Procedimiento de fundición.** Una vez elaborado el sistema de distribución y realizados los ensayos necesarios, se procedió a fundir las piezas. El primer paso es tamizar la arena, humedecerla muy poco para conservar la permeabilidad muy importante en este caso, para la evacuación de los gases producidos por la evaporación de los modelos. Al mismo tiempo se coloca el aluminio en el horno, para conseguir la temperatura adecuada y lograr una fundición eficaz. El siguiente paso es colocar los



modelos tanto de poliestireno y poliuretano en la caja de moldeo, para a continuación colocar la arena y apisonarla con extremo cuidado de no perjudicar las piezas.

Figura 44. Modelos de poliuretano y poliestireno dentro del molde de arena.



Fuente: Autores

A continuación, se coloca el sistema de alimentación, y se rellena de arena la otra caja de moldeo de igual forma correctamente apisonada.

Una vez que las cajas estén listas se procede a verter la colada, con sumo cuidado y lentamente para darles tiempo de evaporarse a los modelos y así evitar zonas incompletas.

Figura 45. Colado de metal fundido.



Fuente: Autores

### **3.10.2** *Piezas fundidas.*

#### **3.10.2.1** *Piezas a partir de modelos de poliestireno*

Figura 46. Piezas fundidas de modelos de poliestireno con diferentes recubrimientos.



Fuente: Autores

### 3.10.2.2 Piezas a partir de modelos de poliuretano

Figura 47. Piezas fundidas de modelos de poliuretano con diferentes recubrimientos.



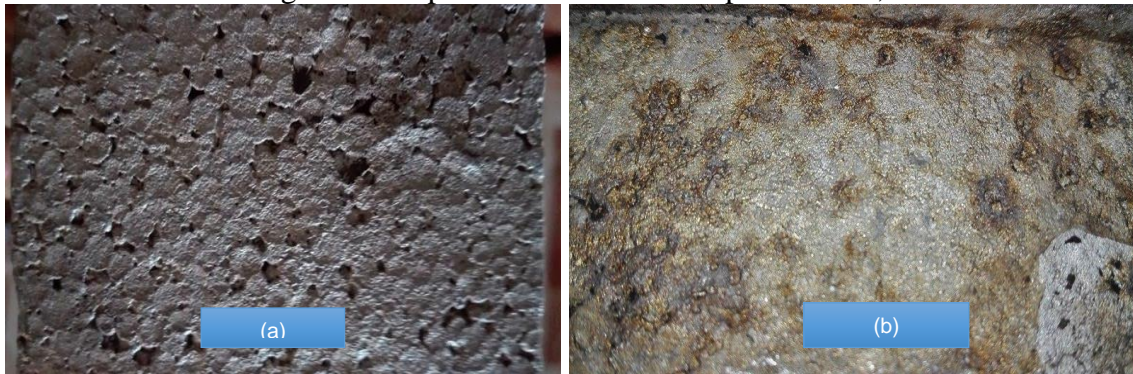
Fuente: Autores

### 3.11 Evaluación de defectos por fundición

#### 3.11.1 Poliestireno

- *Superficie defectuosa.* El acabado superficial presenta la forma de las perlas de poliestireno propias del molde, en la superficie aún se presentan escamas de pintura, también existen porosidades debido a la inclusión de inquemados, como se puede apreciar en la figura 48. a) Pieza adquiere la forma de las perlas de poliestireno b) Superficie presenta residuos de pintura

Figura 48. Superficie defectuosa del poliestireno,



Fuente: Autores

- *Porosidades.* Se encontraron pequeñas porosidades probablemente debido a la falta de permeabilidad tanto en la pintura como en la arena, pues la arena utilizada poseía un grado muy alto de humedad para esta aplicación, ya que en este método de fundición se deben evaporar también los gases provenientes de la vaporización de los modelos además de los gases que provienen de la fundición misma es decir producto de la fusión del metal.

Figura 49. Porosidades en la pieza fundida a partir de molde poliestireno.



Fuente: Autores

- *Puntos de alfiler.* Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella, este defecto se debe también a la falta de evacuación de los gases de evaporación de los modelos, así como los gases producidos por la arena.

Figura 50. Pequeñas puntas de alfiler en la pieza fundida.



Fuente: Autores

### 3.11.2 Poliuretano

- *Discontinuidades.* Como grietas venas y relieves, debido a que la colada se enfría con mayor velocidad al transmitir parte de la energía al material del modelo para evaporarlo, por tanto, no se permite que el metal se contraiga libremente al solidificarse.

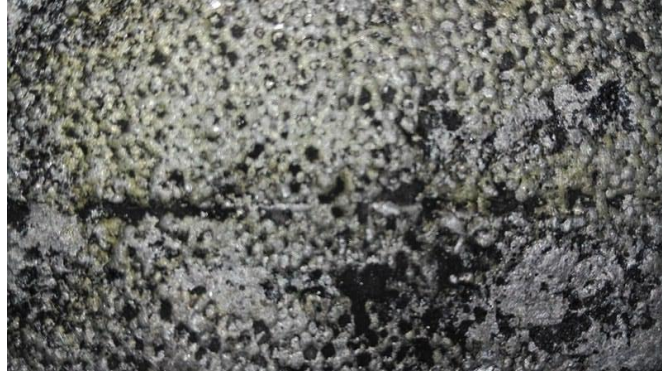
Figura 51. Grietas en la pieza proveniente de poliuretano.



Fuente: Autores

- *Superficie defectuosa.* El acabado superficial presenta porosidades debido a la característica porosa del modelo, el mismo que absorbe la pintura utilizada como recubrimiento, esto hace que se presenten fragmentos de pintura incrustados en la superficie de la pieza fundida.

Figura 52. Porosidades superficiales.



Fuente: Autores

- *Fundición incompleta.* Como fallas (debidas a solidificación prematura), probablemente también pueden provenir de una temperatura muy baja del metal fundido o de un vaciado muy lento del mismo.

En la figura 53 se puede apreciar con claridad este defecto.

Figura 53. Sección izquierda incompleta.



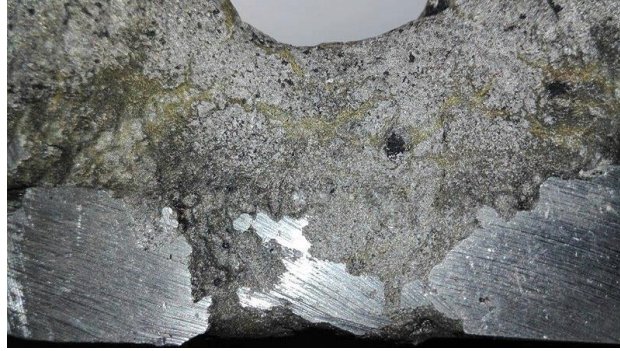
Fuente: Autores

- *Sopladuras.* En este tipo de defectos se agrupan todas aquellas porosidades provocadas por la generación más o menos masiva de un gas como consecuencia de la colada de los moldes.

Este defecto es una cavidad de gas de forma esférica que puede aparecer de forma individual o agrupadas, causada por falta de escape de gases del molde durante el vaciado.

La baja permeabilidad, pobre ventilación y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas generales

Figura 54. Sopladuras evidentes de pieza fundida.



Fuente: Autores

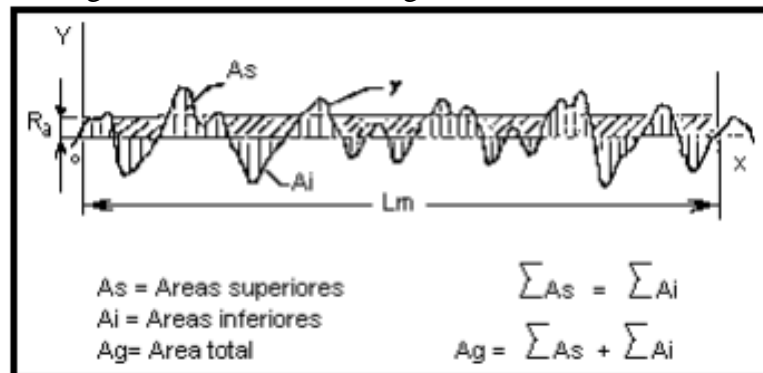
### 3.12 Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas

Para determinar la rugosidad de las piezas se tomará como referencia la norma ASME B46.1-2009, donde se sugieren varios métodos para la determinación de la rugosidad principalmente de piezas mecanizadas, debido a que por la irregularidad existente en las distintas áreas de una pieza fundida estos métodos no garantizan exactitud en los resultados de toda la superficie.

La rugosidad de las piezas se determinará mediante el método de la Rugosidad media aritmética. Está definido como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la línea media dentro de la longitud de medición  $L_m$ .

Esta medida puede ser definida también como: siendo (a) la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la línea media, siendo la longitud de medición  $L_m$ .

Figura 55. Método de la rugosidad media aritmética.



Fuente: (UNMdP)

$$Ra = \frac{1}{Lm} \int_0^{Lm} |y| dx \quad (18)$$

Por aproximación se puede determinar el valor de Ra por medio de un cierto número de ordenadas de puntos del perfil

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (19)$$

Donde:

y = ordenada

n = número de ordenadas consideradas

La medida del valor Ra puede ser expresada en  $\mu\text{m}$  o en  $\mu\text{in}$  (sistema métrico ó en pulgadas respectivamente). En los dos casos se obtiene menor rugosidad con el recubrimiento tipo C de base alúmina, como se detalla en la tabla; con este resultado se ha afirmado la deducción obtenida mediante inspección visual, por tanto, sigue siendo el recubrimiento tipo C el cual brinda mejores resultados en el acabado superficial de las piezas.

Tabla 22. Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliestireno

<b>Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliestireno</b>	
Pieza	Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
A	2, 840
B	3, 561
C	0, 390
D	1, 419

Fuente: Autores

Tabla 23. Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliuretano

<b>Rugosidad de la superficie de las piezas fundidas de poliuretano</b>	
Pieza	Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
A	3,610
B	3, 609
C	1, 911
D	2,345

Fuente: Autores

En el anexo E se presentan las microfotografías utilizadas para el cálculo de la rugosidad.

### 3.13 Caracterización del material

Las probetas a ser ensayadas se obtuvieron a partir de varias piezas fundidas de aluminio de forma aleatoria, las cuales se recubrieron de diferentes tipos de pintura refractaria, estas se obtuvieron en un taller de fundición de bronce y aluminio “Orozco” ubicado en la Parroquia Lican.

**3.13.1** *Análisis metalográfico.* Previo al análisis de la probeta esta debe ser preparada siguiendo las especificaciones dadas en la norma ASTM E3-95. A continuación se detallan los procedimientos a seguir para el análisis de las probetas de aluminio:

- Obtener una muestra del material.
- Escoger las superficies a analizar (corte longitudinal y corte transversal)
- Desbastar las muestras con el uso de las lijas 240, 320, 600, 1200 y 1500.
- Pulir la probeta utilizando alúmina de 0,3 $\mu$ m
- Limpiar impurezas con agua
- Atacar químicamente con Keller's y Weck
- Limpiar la probeta con alcohol
- Observar la microestructura en el microscopio.

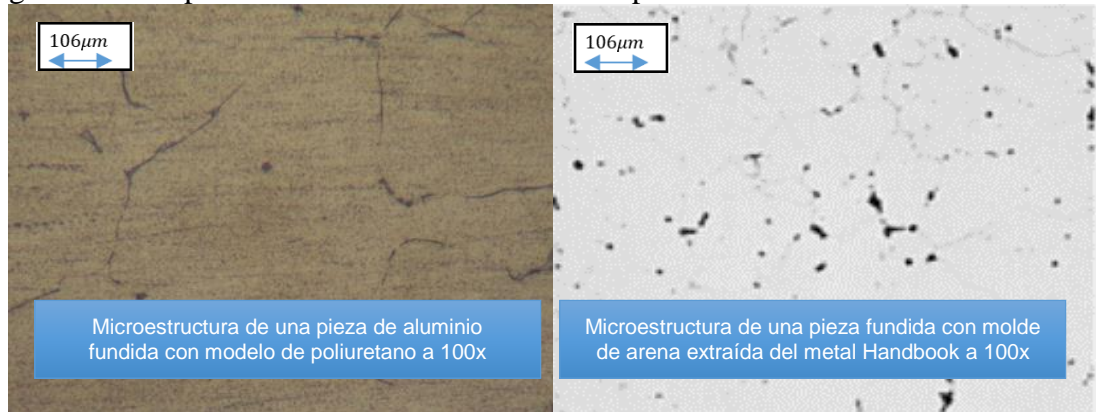
**3.13.2** *Comparación Visual.* Al observar en el microscopio óptico la forma y distribución del aluminio con sus elementos aleantes se procede a realizar una comparación de las microestructuras con las del Metal Handbook, la microfotografía indica una aleación de la serie 199x.

Las partículas negras son Mg<sub>2</sub>Si y las grises Fe<sub>2</sub>SiAl<sub>12</sub> en una matriz de solución sólida de aluminio además de presentarse ciertas segregaciones de partículas de cobre. Indican una aleación de Aluminio, magnesio, silicio, hierro y cobre.

En la figura 56 y 57 se muestra una microfotografía de la pieza fundida de aluminio a partir de modelos de poliuretano y poliestireno respectivamente, en comparación con la metalografía extraída del Metal Handbook (izquierda).

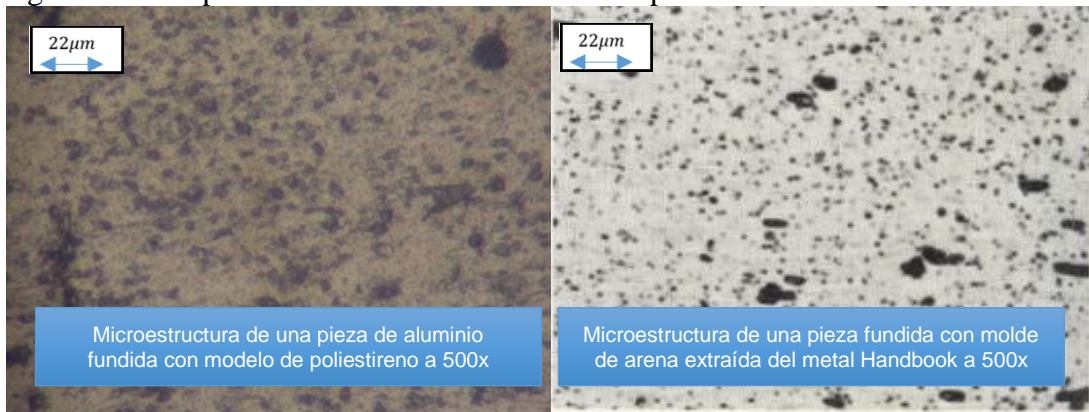


Figura 56. Comparación de microestructura de las piezas fundidas de aluminio a 100x



Fuente: Autores

Figura 57. Comparación de microestructura de las piezas fundidas de aluminio a 500x



Fuente: Autores

**3.13.3** *Análisis de espectrometría.* Para determinar la composición exacta de las muestras además de realizar los ensayos de metalografía, se ejecutó un ensayo de espectrometría de emisión óptica mediante excitación por arco/chispa. Para esta prueba se utilizó el equipo disponible en el laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica (Epoch)

El equipo disponible posee las siguientes características Marca: SPECTRO Modelo: SPECTROMAXx, este equipo permite la determinación de la composición química de metales, mediante la vaporización de la muestra y el análisis de las chispas formadas. Los átomos e iones que se desprenden durante este proceso, son excitados y emiten una luz que se conduce hacia sistemas ópticos. En éstos, la luz se mide mediante un detector electrónico fotosensible CCD, que convierte la luz en cargas eléctricas. Los resultados de las muestras ensayadas se muestran en las figuras a continuación, mientras que los reportes arrojados por el equipo se pueden observar en el Anexo C.

Figura 58. Resultados de espectrometría para la pieza C de modelos de poliestireno.

	<b>Si [%]</b>	<b>Fe [%]</b>	<b>Cu [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>Mg [%]</b>
∅	<b>1,077</b>	<b>0,389</b>	<b>0,278</b>	<b>0,024</b>	<b>0,457</b>
	<b>Cr [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Zn [%]</b>	<b>Ti [%]</b>	<b>Pb [%]</b>
∅	<b>0,0090</b>	<b>0,019</b>	<b>0,104</b>	<b>0,012</b>	<b>&lt;0,050</b>
	<b>Sn [%]</b>	<b>V [%]</b>	<b>Sr [%]</b>	<b>Zr [%]</b>	<b>Cd [%]</b>
∅	<b>&lt;0,0050</b>	<b>0,0082</b>	<b>&lt;0,0020</b>	<b>&lt;0,0020</b>	<b>&lt;0,0050</b>
	<b>Co [%]</b>	<b>B [%]</b>	<b>Ag [%]</b>	<b>Bi [%]</b>	<b>Ca [%]</b>
∅	<b>&lt;0,0030</b>	<b>0,0018</b>	<b>&lt;0,0010</b>	<b>&lt;0,0060</b>	<b>0,0032</b>
	<b>Al [%]</b>				
∅	<b>97,60</b>				

Fuente: Autores

Figura 59. Resultados de espectrometría para la pieza C de modelos de poliuretano.

	<b>Si [%]</b>	<b>Fe [%]</b>	<b>Cu [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>Mg [%]</b>
∅	<b>1,308</b>	<b>0,375</b>	<b>0,114</b>	<b>0,023</b>	<b>0,500</b>
	<b>Cr [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Zn [%]</b>	<b>Ti [%]</b>	<b>Pb [%]</b>
∅	<b>0,0053</b>	<b>0,015</b>	<b>0,113</b>	<b>0,011</b>	<b>&lt;0,050</b>
	<b>Sn [%]</b>	<b>V [%]</b>	<b>Sr [%]</b>	<b>Zr [%]</b>	<b>Cd [%]</b>
∅	<b>&lt;0,0050</b>	<b>0,0069</b>	<b>&lt;0,0020</b>	<b>&lt;0,0020</b>	<b>&lt;0,0050</b>
	<b>Co [%]</b>	<b>B [%]</b>	<b>Ag [%]</b>	<b>Bi [%]</b>	<b>Ca [%]</b>
∅	<b>&lt;0,0030</b>	<b>0,0017</b>	<b>&lt;0,0010</b>	<b>&lt;0,0060</b>	<b>0,0016</b>
	<b>Al [%]</b>				
∅	<b>97,52</b>				

Fuente: Autores

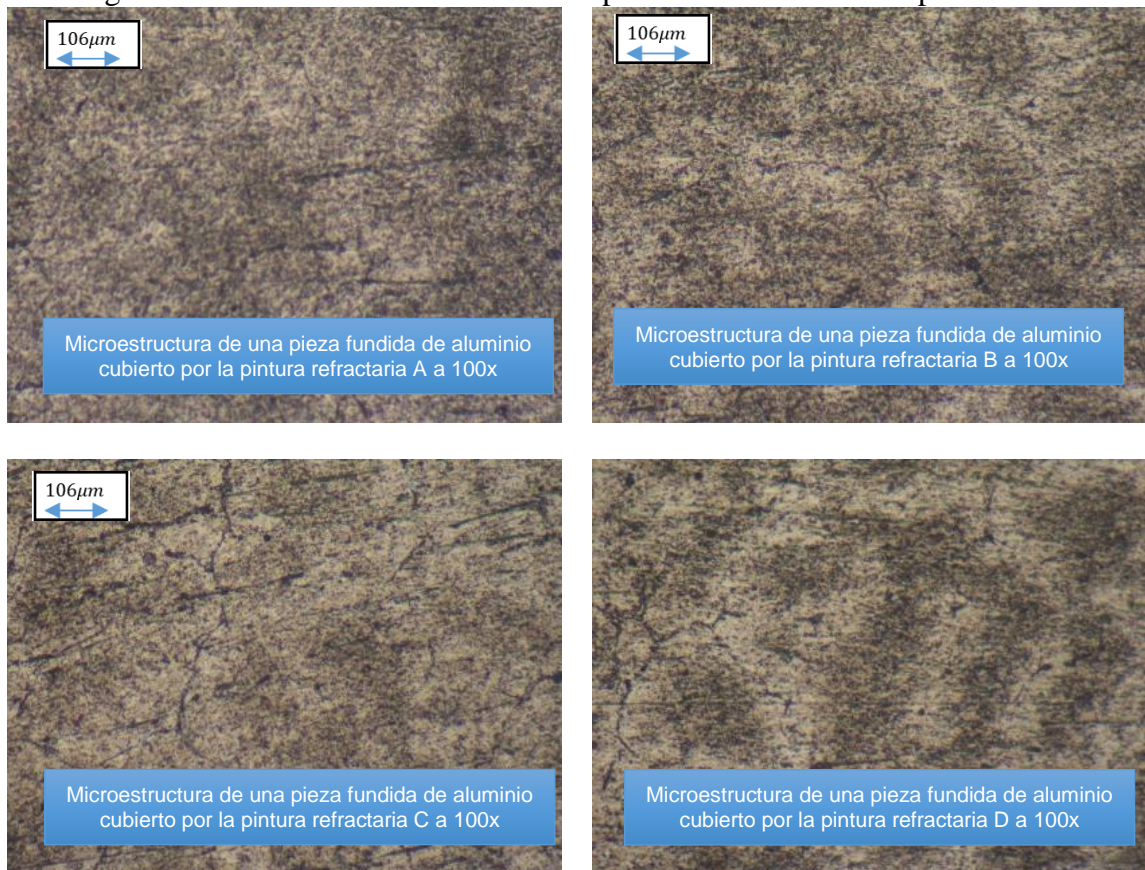
Considerando los resultados obtenidos a partir de los ensayos metalográficos y la espectrometría se comprobó que el aluminio usado para la fundición es un aluminio comercialmente puro perteneciente a la serie 1997, pues contiene un 97% de aluminio, los demás elementos no representan un porcentaje significativo, probablemente su presencia se deba al origen del material ya que proviene de tubos de aluminio los cuales son elaborados sin menor control del material usado teniendo una mezcla entre aluminio nuevo y aluminio reciclado en el cual se puede ver inmersa alguna impureza como otro metal aleante, es decir no existe garantía de la pureza del material.

**3.13.4 Comparación visual de microestructura entre piezas obtenidas de poliestireno, poliuretano y fundición en arena convencional.** Se tomaron varias microfotografías tanto a las piezas obtenidas a partir de los modelos de poliestireno como a las de poliuretano, encontrando ciertas diferencias y a la vez semejanzas entre ellas, como se indica en la figura 60 y la figura 61.

Las piezas fundidas a partir de modelos de poliuretano presentaron una matriz más clara en contraste a las piezas fundidas de modelos de poliestireno cuya matriz es más oscura, en ambos materiales se presentan segregaciones de silicio, magnesio, hierro y cobre.

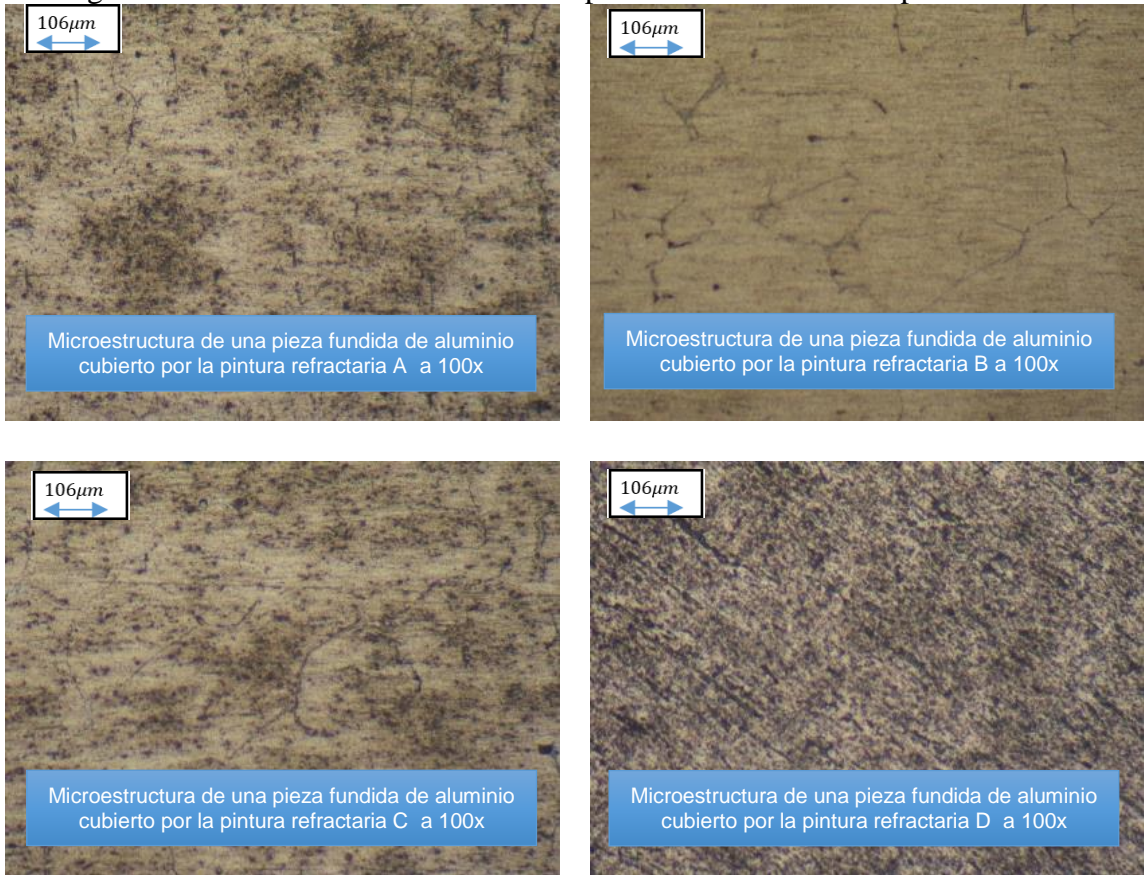
A partir de las microfotografías presentes en el Metal Handbook respecto a la microestructura de aluminio por fundición, se determina que no existe mayor diferencia entre las piezas provenientes del método de fundición tradicional y las piezas obtenidas a partir del método de fundición por espuma perdida, ya que las microestructuras son muy semejantes a excepción de ciertas particularidades como la presencia de silicio, magnesio, hierro y cobre,

Figura 60. Diferentes microestructuras a partir de los modelos de poliestireno.



Fuente: Autores

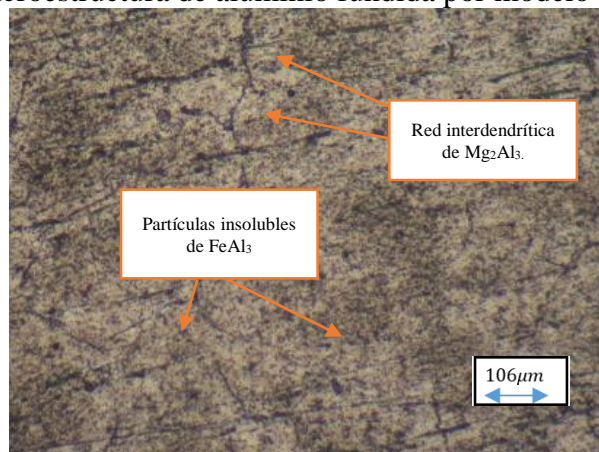
Figura 61. Diferentes microestructuras a partir de los modelos de poliuretano.



Fuente: Autores

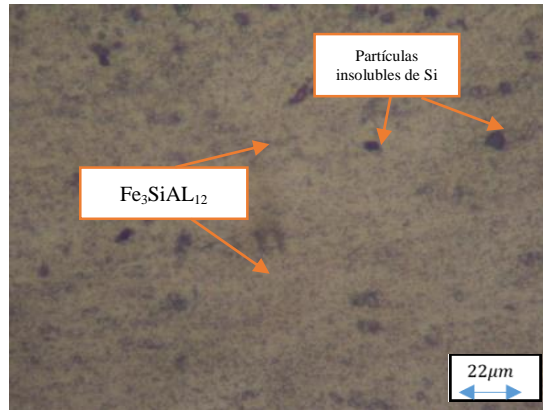
La microestructura de la matriz es la típica de una fundición de aluminio obtenida en condiciones de enfriamiento al ambiente. En la figura 62 se aprecia una microfotografía donde la estructura de la pieza fundida muestra partículas insolubles de  $\text{FeAl}_3$  de color negro y red interdendrítica de  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ . Mientras que en la figura 63 se puede observar segregaciones en la totalidad de la matriz de  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$  y partículas insolubles de Si.

Figura 62. Microestructura de aluminio fundida por modelo de EPS a 100x.



Fuente: Autores

Figura 63. Microestructura de aluminio fundida de modelo de poliuretano a 500x.



Fuente: Autores

**3.13.5 Ensayo de dureza.** A partir de la determinación del porcentaje de cada material, donde predomina el aluminio, se resuelve la utilización de la escala Brinell para determinar la dureza de las piezas, para lo cual se utiliza el durómetro del laboratorio de materiales de la Facultad de Mecánica (Espoch).

Para la medición de dureza se siguieron las especificaciones dadas en la norma ASTM-E10, en este caso se utilizó como indentador una bola de carburo de tungsteno de 2,5 mm de diámetro, el valor de carga se obtiene al aplicar la ecuación que se indica a continuación:

$$P = KD^2 \quad (20)$$

Donde:

$P$  = carga a utilizar medida en [kgf].

$K$  = constante para cada material, (10 por ser aleación de aluminio). (Anexo D)

$D$  = diámetro de la bola (indentador) [mm]

$$P = KD^2$$

$$P = (10)(2.5)^2$$

$$P = 62.5 \text{ kgf} = 613.2 \text{ N}$$

Durante el proceso de medición se inicia aplicando una precarga de 100N para evitar que el indentador se desvíe cuando se aplique la carga final, se deja actuar la carga durante 30 s aproximadamente y se retira, dejando una huella en el material la cual es el indicador

de la dureza. La dureza Brinell (HB) es la razón de la carga en kilogramos al área en milímetros cuadrados de la huella, y se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left( \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right) \quad (21)$$

Donde:

$HB$  = valor de dureza Brinell [HB]

$P$  = carga de aplicación [N]

$D$  = diámetro del indentador [mm]

$d$  = diámetro de la huella en superficie [mm]

Los resultados de la medición de dureza para las muestras de poliestireno se muestran en la tabla 24, obtenidos del catálogo del durómetro, resultando una dureza promedio de 44.39 HB.

Tabla 24. Dureza Brinell piezas obtenidas de modelos de poliestireno.

<b>Pieza</b>	<b>Diámetro de la impresión</b>	<b>Dureza HB</b>
A	1,30	43,655
B	1,34	40,867
C	1,27	45,919
D	1,25	47,519
Promedio	1,29	44,392

Fuente: Autores

Tabla 25. Dureza Brinell piezas obtenidas de modelos de poliuretano.

<b>Pieza</b>	<b>Diámetro de la impresión</b>	<b>Dureza HB</b>
A	1,32	42,229
B	1,37	38,932
C	1,35	40,208
D	1,36	39,563
Promedio	1,35	40,208

Fuente: Autores

También se obtuvieron los resultados de la medición de dureza para las muestras obtenidas de modelos de poliuretano, los resultados se muestran en la tabla 25, obteniendo una dureza promedio de 44.39 HB.

Los valores de dureza obtenidos se encuentran en un rango similar sin embargo existe una pequeña diferencia entre la pieza obtenida de poliestireno y poliuretano, la pieza fabricada de espuma de poliuretano es menor en 4 puntos en la escala Brinell con relación a la pieza obtenida de espuma de poliestireno, posiblemente esta diferencia se deba a que la pieza que se obtuvo de espuma de poliuretano presenta mayor porosidad, defecto que influye directamente en la dureza de la pieza.

### **3.14 Cantidad de energía utilizada para fundir modelos de poliestireno y modelos de poliuretano**

Al fundir un material este absorbe energía en forma de calor, por lo general de la quema de un combustible presentándose diferentes formas de transferencia de calor a continuación se analizan las diferentes tipos de energías presentes y sus respectivos valores

**3.14.1** *Energía para fundir modelos de poliestireno.* Para esto es necesario llevar al metal a fundir desde la temperatura ambiente 20°C hasta 690°C

$$Q_1 = m_{al} * C_{pal} * \Delta T \quad (22)$$

Donde:

$Q_1$  = calor sensible del aluminio

$m_{al}$  = Masa del aluminio

$C_{pal}$  = Calor específico del aluminio

$\Delta T$  = Incremento de temperatura

$$Q_1 = (4 \text{ kg}) \left( 0,897 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{K}} \right) (690 - 20) \text{C}$$

$$Q_1 = 2\,403,96 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = m_c * C_{pc} * \Delta T \quad (23)$$

Donde:

$Q_2$  = Calor sensible del crisol

$m$  = Masa del crisol

$c_p$  = Calor específico del crisol

$\Delta T$  = Incremento de temperatura

$$mQ_2 = 5 \text{ kg} * 1,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}} * (690 - 20) \text{C}$$

$$Q_2 = 5 \text{ 460, 5 kJ}$$

$$Q_3 = m_{al} * hfs \quad (24)$$

Donde:

$Q_3$  = Calor latente del aluminio

$Hfs$  = Calor por cambio de fase del aluminio

$$Q_3 = (4 \text{ kg}) * \left( 212 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_3 = 848 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$A_c = 2 * \pi * r_c * L_c \quad (25)$$

Donde:

$A_c$  = área de transferencia de calor del crisol

$r_c$  = radio del crisol

$L_c$  = altura del crisol

$$A_c = 2 * \pi (5 \text{ cm})(15 \text{ cm})$$

$$A_c = 471,24 \text{ cm}^2$$



$$A_c = 0,05 \text{ m}^2$$

$$Q_r = \sigma * A_c * \Delta T * t \quad (26)$$

Donde:

$Q_r$  = calor por radiación

$\sigma$  = coeficiente de Stefan-Boltzman

$t$  = tiempo empleado en fundir

$$\dot{Q}_r = \left( 5,672 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) * (0,05 \text{ m}^2) (963^4 - 293^4) (2400 \text{ s})$$

$$Q_r = 5\,803,43 \text{ kJ}$$

$$Q_{conv} = h * A_c * \Delta T * t \quad (27)$$

Donde:

$Q_{conv}$  = Calor por convección

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor convectivo

$$Q_{conv} = 28 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,05 \text{ m}^2 * (690 - 20) * 2400 \text{ s}$$

$$Q_{conv} = 2\,251,2 \text{ kJ}$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_r + Q_{conv}$$

$$Q_{total} = 2\,403,96 \text{ kJ} + 5\,460,5 \text{ kJ} + 848 \text{ kJ} + 5\,803,43 \text{ kJ} + 2\,251,2 \text{ kJ}$$

$$Q_{total} = 16\,767,09 \text{ kJ}$$

A partir del potencial calorífico del coque se puede determinar la masa necesaria de este combustible para elevar a la temperatura propuesta y de esta manera calcular el costo involucrado:

$$Q_{total} = m_{comb} * \eta * PC \quad (28)$$

Donde:

$m_{comb}$  = masa del combustible

$\eta$  = eficiencia de combustion

$PC$  = potencial calorifico del combustible

$$m_c = \frac{Q}{\eta * PC}$$

$$m_c = \frac{16\,767,09 \text{ kJ}}{(0,25)29300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,289 \text{ kg}$$

$$\text{costo} = \frac{12\$}{13 \text{ kg}} * 2,289 \text{ kg} = 2,11 \$$$

**3.14.2** *Energía para el poliuretano.* Para esto es necesario llevar al metal a fundir desde la temperatura ambiente 20°C hasta 720°C.

$$Q_1 = m_{al} * C_{pal} * \Delta T$$

$$Q_1 = (4 \text{ kg}) \left( 0,897 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}} \right) (720 - 20) \text{C}$$

$$Q_1 = 2\,511,6 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = m_c * C_{pc} * \Delta T$$

$$Q_2 = 5 \text{ kg} * 1,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}} * (720 - 20) \text{C}$$

$$Q_2 = 5\,705 \text{ kJ}$$

$$Q_3 = m_{al} * hfs$$

$$Q_3 = (4 \text{ kg}) * \left( 212 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_3 = 848 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_r = \sigma * A_c * \Delta T * t$$

$$\dot{Q}_r = \left( 5,672 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) * (0,05 m^2) (993^4 - 293^4) (2400 s)$$

$$Q_r = 6 567,65 kJ$$

$$Q_{conv} = h * A_c * \Delta T * t$$

$$Q_{conv} = 28 \frac{W}{m^2 \cdot K} * 0,05 m^2 * (720 - 20) * 2400s$$

$$Q_{conv} = 2 352 kJ$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_r + Q_{conv}$$

$$Q_{total} = 2 511,6 kJ + 5 705 kJ + 848 kJ + 6 567,65 kJ + 2 352 kJ$$

$$Q_{total} = 17 984,8 kJ$$

$$Q_{total} = m_{comb} * \eta * PC$$

$$m_c = \frac{Q}{\eta * PC}$$

$$m_c = \frac{17 984,8}{(0,25) 29300 \frac{kJ}{kg}} = 2,45 kg$$

### 3.15 Deducciones parciales

Las variables más influyentes en el proceso de fundición por espuma perdida son: temperatura de la colada, permeabilidad de la arena y del recubrimiento refractario, además de las características propias del modelo.

En base a estas propiedades se tomarán medidas de corrección para cada material, con la finalidad de mitigar los defectos encontrados en el proceso de experimentación.

**3.15.1 Poliestireno.** Al analizar todos los estudios realizados se determinó que el recubrimiento refractario N° 3 proporciona mejores resultados en la pieza fundida principalmente en el acabado superficial, sin embargo, es necesario corregir la

permeabilidad de la pintura por tanto se incrementará la cantidad de solvente con la finalidad de disminuir la viscosidad y por ende tener una capa de fina más fina que facilite la evacuación de los gases.

Otra de las acciones que se tomarán para el aumento de permeabilidad es usar arena que se encuentre casi por completo libre de humedad pues así los gases producidos por la evaporación del modelo podrán evacuar con rapidez y evitar el atrapamiento de los mismos, de esta forma se evitará la formación de porosidades y discontinuidades en las piezas fundidas.

Para mejorar el acabado superficial de la pieza, se utilizará poliestireno grado C con esto se logrará eliminar la apariencia de panal de abeja en las piezas fundidas, ya que el diámetro de las perlas en el poliestireno grado C varía entre 0,33 a 0,71 mm, consiguiendo que la unión de las perlas sea casi imperceptible a la vista, de este modo se espera superar el acabado superficial de las pieza fundidas.

**3.15.2 Poliuretano.** Debido a la característica porosa propia del material, se recomienda aumentar la viscosidad de la pintura para que así el modelo no tienda a absorber la pintura y no se genere una capa gruesa que impida la evacuación de los gases del modelo cuando este se evapora.

Debido a que cierta cantidad de energía se necesita para descomponer el modelo y evaporarlo es necesario elevar la temperatura de la colada hasta aproximadamente 720 °C, para que esta no se enfríe demasiado rápido al ceder energía al modelo para evaporarlo.

Además, se recomienda disminuir la humedad de la arena en aproximadamente 15% para de esta manera aumentar la permeabilidad de la misma y obtener una rápida salida de los gases producto de la evaporación de los modelos y de la arena al estar en contacto con la colada.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PIEZAS FUNDIDAS

Después de realizar las correcciones que se especifican en el epígrafe anterior, entre ellas el aumento de la permeabilidad en la pintura refractaria y la variación del grado de poliestireno se procedió a realizar nuevamente el proceso de fundición, de igual manera se tomaron acciones en los modelos de poliuretano como el aumento de la temperatura de la colada y la viscosidad en la pintura.

En los dos casos se obtuvieron piezas con mejores características tal como se muestra en la figura 64.

Figura 64. Piezas finales aplicando sus respectivas correcciones.



Fuente: Autores

#### 4.1 Evaluación de la calidad de las piezas

Las piezas presentan mejor acabado superficial pues no existen superficies incompletas ni porosidades a partir de inspección visual se pudo observar una considerable disminución de las fallas.

En el caso de la pieza proveniente de EPS el acabado superficial ha mejorado notablemente pues ahora tiene una apariencia uniforme y regular, se debe también a que

las porosidades por atrapamiento de gases han desaparecido en su totalidad, se distingue también la usencia de fallas como puntas de alfiler las cuales eran prominentes en las piezas anteriores.

Figura 65. Pieza final obtenida a partir de espuma de poliestireno



Fuente: Autores

Las piezas en poliuretano ya no presentan grietas y el modelo se ha evaporado por completo efectivamente ya no existe fundición incompleta, además se han eliminado varios defectos como las discontinuidades y sopladuras.

Sin embargo, el acabado superficial de las piezas aun presenta una especie de agujeros producto de la porosidad propia del material, incluso debido a esta causa existe una ligera diferencia entre las dimensiones del modelo y la pieza fundida.

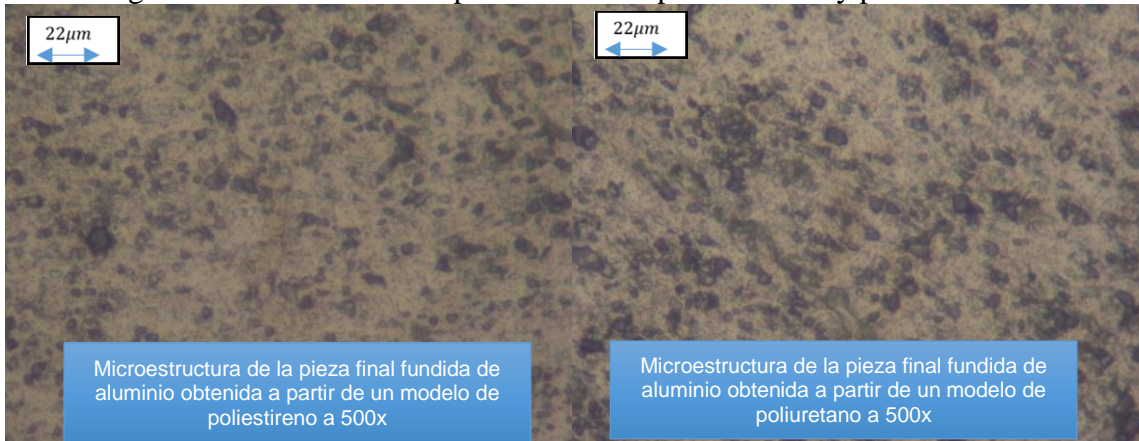
#### 4.2 Microestructura

Los ensayos metalograficos exponen que no existe una diferencia notable en la microestrucutra de las piezas obtenidas de poliestireno y las piezas obtenidas de espuma de poliuretano, conservando las propiedades de las piezas

Al igual que en las piezas anteriores se continúa observando partículas negras de  $Mg_2Si$  y grises de  $Fe_2SiAl_{12}$  en una matriz de solución sólida de Aluminio además se presentan ciertas segregaciones de partículas de cobre y partículas insalubres de silicio.

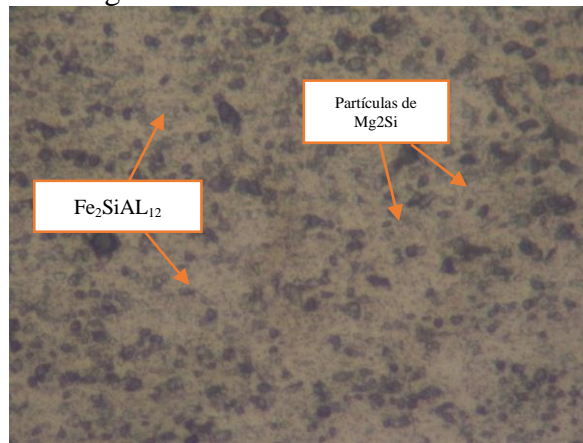
Estos se resultados se justifican puesto que el material utilizado tanto en la fase de experimentación como en la fabricación de las piezas finales es el mismo.

Figura 66. Microestructura piezas finales a partir de EPS y poliuretano.



Fuente: Autores

Figura 67. Morfología fundición de aluminio de modelos colapsables



Fuente: Autores

### 4.3 Dureza

El ensayo de dureza imprimió una marca de diámetro 1,30 mm y 1,32 mm en la pieza proveniente de poliestireno y poliuretano respectivamente. Por tanto, la dureza en cada caso resulta:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left( \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right)$$

$$HB_{(EPS)} = 43,655$$

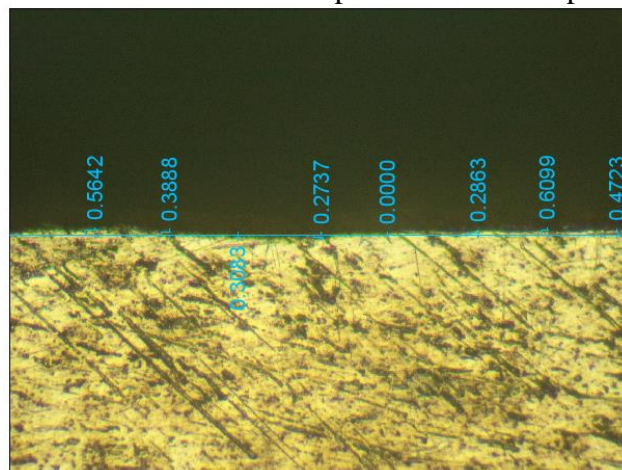
$$HB_{(Poliuretano)} = 42,229$$

Los valores de dureza se encuentran dentro del rango de las aleaciones 1xxx, comprobando que el material utilizado pertenece a esta serie y por tanto posee las propiedades de un aluminio de este tipo.

#### 4.4 Evaluación de la rugosidad de la superficie.

##### 4.4.1 Rugosidad de piezas a partir de modelos de poliestireno

Figura 68. Medición de Ra en la pieza obtenida de poliestireno.



Fuente: Autores

Tabla 26. Cálculo de rugosidad de la pieza final fundida de poliestireno

<b>Rugosidad de la superficie de la pieza fundida de poliestireno</b>	
Medición	Rugosidad [um]
1	0,564 2
2	0,388 8
3	0,303 8
4	0,273 7
5	0,000 0
6	0,286 3
7	0,609 9
8	0,472 3
Ra	0,362 3

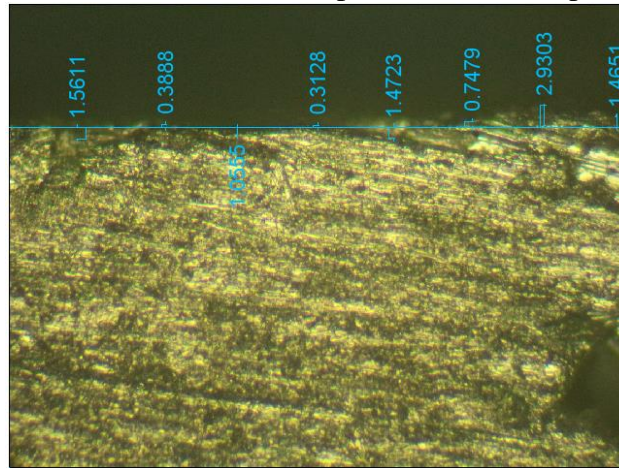
Fuente: Autores

En la pieza final obtenida de poliestireno, la rugosidad ha mejorado considerablemente en relación a los valores obtenidos antes de implementar las mejoras, se obtiene un valor de 0,362 3 um alcanzando un acabado superficial tipo N5, el cual es aceptable puesto que las marcas no son apreciables ni con el tacto ni la vista.



#### 4.4.2 *Rugosidad de piezas a partir de modelos de poliuretano*

Figura 69. Medición de Ra en la pieza obtenida de poliuretano.



Fuente: Autores

Tabla 27. Cálculo de rugosidad de la pieza final fundida de poliuretano.

<b>Rugosidad de la superficie de la pieza fundida de poliuretano</b>	
Medición	Rugosidad [um]
1	1,561 1
2	0,388 8
3	1,055 5
4	0,312 8
5	1,472 3
6	0,747 9
7	2,930 3
8	1,465 1
Ra	1,241 6

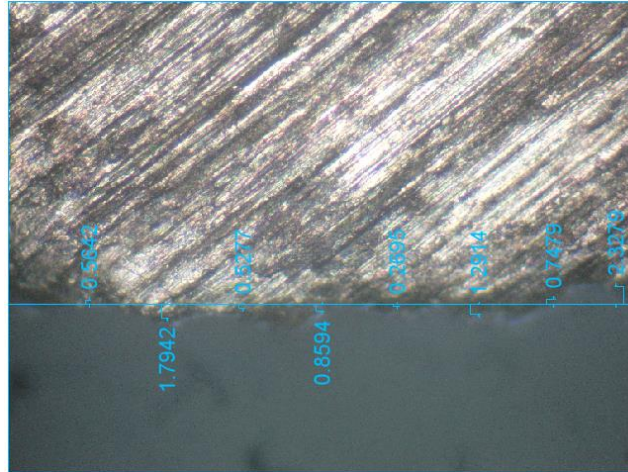
Fuente: Autores

En la pieza final obtenida de modelos de poliuretano el acabado superficial no es tan bueno como en la pieza obtenida de modelos de poliestireno, sin embargo la rugosidad tiene un valor de 1,2416 um con el cual adquiere un nivel de rugosidad tipo N7 donde las marcas son ligeramente perceptibles con el tacto, aunque visibles.

**4.4.3** *Comparación de la rugosidad de las piezas de modelos colapsables vs una pieza fundida por fundición en arena.* El valor de rugosidad en una pieza obtenida por el método de fundición tradicional es 1.0477 um de modo que el acabado de superficial de las piezas provenientes de poliestireno es significativamente mejor; a diferencia de las

piezas obtenidas de poliuretano donde el acabado superficial es inferior al de las piezas fundidas por el método convencional, sin embargo, los valores encontrados no representan una diferencia significativa.

Figura 70. Medición de Ra en la pieza por fundición tradicional.



Fuente: Autores

Tabla 28. Rugosidad de la superficie de la pieza por fundición tradicional.

<b>Rugosidad de la superficie de la pieza por fundición tradicional.</b>	
Medición	Rugosidad (um)
1	0,564 2
2	1,794 2
3	0,527 7
4	0,859 4
5	0,269 5
6	1,2914
7	0.747 9
8	2.327 9
Ra	1.047 7

Fuente: Autores

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE COSTOS

En esta sección se considerarán todos los gastos producidos en la obtención de las piezas fundidas, desde la elaboración de modelos, fabricación de los recubrimientos refractarios y finalmente el proceso de fundición como tal.

#### 5.1 Costos directos.

En la tabla 29, se presentan los costos fijos, generados en la elaboración de este proyecto:

- *Materiales*

Tabla 29. Costos de materiales

Item	Descripción	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
1	Planchas de poliestireno (e=1,5cm)	5	0,70	3,50
2	Bloque de poliestireno Grado C	3	1,10	3,30
3	Máquina de corte por hilo caliente	1	7,00	7,00
4	Pegamento UHU	1	2,50	2,50
5	Poliuretano (Isocianato y Polioli)	1	8,00	8,00
6	Bentonita Cálcica	1 kg	0,40	0,40
7	Bentonita Sódica	1 kg	0,30	0,30
8	Sílice	1 kg	0,25	0,25
9	Grafito	1 kg	3,50	3,50
10	Agar	50 gr	1,70	1,70
11	Alúmina	1 kg	5,00	5,00
12	Silicato de Calcio	1 kg	0,25	0,25
13	Silicato de Sodio	500 ml	9,52	9,52
14	Etanol	500 ml	4,70	4,70
15	Metanol	500 ml	5,20	5,20
16	Aluminio	25 kg	3,00	75,00
17	Combustible	10 gl	1,20	12,00
18	Consumibles	1	20	20
<b>Total</b>				162,12

Fuente: Autores

- *Mano de obra*

Tabla 30. Costos por mano de obra

Item	Descripción	Horas de trabajo	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
2	Técnico fundidor	20	3,75	75,00
<b>Total</b>				75,00

Fuente: Autores

- *Máquinas y herramientas*

Tabla 31. Costos por uso de máquinas y herramientas

Item	Descripción	Horas de trabajo	Costo [USD/H]	Costo total [USD]
1	Cortadora laser	1	3,75	3,75
2	Cortadora automática de planchas	1	5,00	5,00
3	Horno	3	12,00	36,00
4	Maquina mezcladora	3	3,50	10,50
<b>Total</b>				55,25

Fuente: Autores

- *Transporte*

Tabla 32. Costos por transporte

Item	Descripción	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
1	Transporte de materiales al taller	1	10	10
<b>Total</b>				10

Fuente: Autores

- *Total de costos directos*

Tabla 33. Total de costos directos

Item	Descripción	Costo [USD]
1	Materiales	162,12
2	Mano de obra	75,00
3	Máquinas y herramientas	55,25
4	Transporte	10
<b>Total</b>		302,37

Fuente: Autores

El total de costos directos asciende a USD 302,37

## 5.2 Costos indirectos.

Para la determinación de los costos indirectos, se aplican los parámetros porcentuales evaluados en función de porcentajes recomendados económicamente para la cuantificación de costos indirectos.

Tabla 34. Total de costos indirectos

Ítem	Denominación	Porcentaje	Costos [USD]
1	Imprevistos costos directos	6%	18,14
2	Diseño Ingenieril	12%	36,28
3	Otros	6%	18,14
<b>Total</b>		24%	72,56

Fuente: Autores

El total de costos indirectos es de USD 72,56

## 5.3 Costos totales.

Para la evaluación del total del costo de este proyecto, se suman los costos directos e indirectos.

Tabla 35. Costos totales

Ítem	Denominación	Costos [USD]
1	Total de costos directos (USD)	302,37
2	Total de costos indirectos (USD)	72,56
<b>Total</b>		374,93

Fuente: Autores

## 5.4 Diferencia de costos de producción con modelos de poliuretano y poliestireno.

Los costos de la producción de los modelos de cada material serán considerados para un total de 10 piezas.

#### 5.4.1 Costos de fabricación modelos de poliestireno

Tabla 36. Costos de fabricación modelos de poliestireno

Item	Descripción	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
1	Bloque de poliestireno	1	1,10	1,10
2	Máquina de corte por hilo caliente	1	7,00	7,00
3	Pegamento UHU	1	2,50	2,50
4	Bentonita Cálcica	1/2 kg	0,20	0,20
5	Agar	25 gr	0,85	0,85
6	Alúmina	1/2 kg	2,50	2,50
7	Silicato de Sodio	250 ml	4,76	4,76
8	Metanol	250 ml	2,60	5,20
9	Aluminio	3 kg	3,00	6,00
10	Combustible	6 kg	1,00	6,00
<b>Total</b>				36,11

Fuente: Autores

#### 5.4.2 Costos de fabricación modelos de poliuretano

Tabla 37. Costos de fabricación modelos de poliuretano

Item	Descripción	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
1	Poliuretano (Isocianato y Polioli)	1	0,70	0,70
2	Uso de cortadora laser	1	1,87	1,87
3	Pegamento UHU	1	2,50	2,50
4	Bentonita Cálcica	1/2 kg	0,20	0,20
5	Agar	25 gr	0,85	0,85
6	Alúmina	1/2 kg	2,50	2,50
7	Silicato de Sodio	250 ml	4,76	4,76
8	Metanol	250 ml	2,60	5,20
9	Aluminio	2 kg	3,00	6,00
10	Combustible	6,5 kg	1,00	6,50
<b>Total</b>				31,08

Fuente: Autores

## 5.5 Costo por elevar la temperatura en la fundición con modelos de poliuretano

A partir de los resultados obtenidos en el epígrafe 3.14 respecto a la cantidad de energía necesaria en el proceso de fundición se determina el costo del combustible necesario para alcanzar esta cantidad de energía.

$$\text{costo} = \frac{12\$}{13 \text{ kg}} * 2,45 \text{ kg} = 2,26 \$$$

Al aumentar la temperatura desde 740 °C a 780 °C, se afecta la cantidad de energía a utilizar para realizar una fundición satisfactoria. A continuación, se muestra el análisis de la cantidad de energía necesaria que representa este incremento, además de su correspondiente aumento de combustible:

$$\text{costo} = \frac{12\$}{13 \text{ kg}} * (2,45 - 2,289) \text{ kg} = 0,15\$$$

Debido a que el material es relativamente barato el costo por elevar la temperatura 30 °C representa aproximadamente 15 ctvs. Siendo este valor considerable en producción a gran escala.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Al finalizar el presente trabajo de titulación, se logró cumplir con todos los objetivos planteados en el proyecto.

El método de fundición por espuma perdida es una técnica de fundición relativamente sencilla que ofrece grandes ventajas no solo en el aspecto económico sino también en la calidad y precisión de las piezas fundidas, sin embargo, son muchos los factores que se ensayaron, para conseguir piezas de calidad tanto en el acabado superficial como en sus propiedades mecánicas.

Para fabricar los modelos se usaron distintas tecnologías de fabricación de acuerdo al material, en el caso del EPS se optó por la técnica de corte por hilo caliente, debido a la disponibilidad de esta máquina en el mercado y también por ser la tecnología de fabricación más económica en relación a las demás, para el poliuretano se experimentaron dos métodos de fabricación, observando mejores resultados en el método por corte laser debido a que el acabado superficial es bastante bueno y el tiempo de elaboración se reduce significativamente

Para seleccionar la pintura refractaria se procedió a fabricar 4 tipos de pinturas; los modelos fueron pintados, para a continuación fundir las piezas. A partir de las características de las piezas fundidas se determinó que con el recubrimiento N°3 (base alúmina) se obtuvieron mejores resultados tanto en el acabado superficial como para la evacuación de los gases

Los cálculos realizados del sistema de alimentación y distribución se verificaron mediante la utilización del Software “Click2cast”, comprobándose que el sistema fue correctamente diseñado, además se demostró que la colada llegará a cubrir y evaporar en su totalidad los modelos, también se evidenció que la velocidad y temperatura son los óptimos evitando así la presencia de rechupes o fundición incompleta.



Existe diferencia en el acabado superficial entre las piezas obtenidas a partir de EPS y las que provienen de modelos de poliuretano, sin embargo, en su microestructura y propiedades mecánicas las dos piezas son muy semejantes, en conclusión, el poliuretano es una buena opción en el método de fundición por espuma perdida.

Al usar como muestra una pieza fundida por el método tradicional, se comprobó que en el método de fundición por espuma perdida se obtienen piezas de mejores características superficiales, al menos con el uso de modelos de poliestireno, pues el acabado superficial de estas piezas es considerablemente mejor que el de las piezas por fundición convencional; por otro lado no sucede así con las piezas de poliuretano ya que la rugosidad encontrada es ligeramente mayor que el de las piezas por fundición en arena.

El acabado superficial de la pieza obtenida de modelos de poliuretano, podría ser mejorado con el empleo de un recubrimiento refractario de características distintas o la aplicación de una capa impermeable, pues es necesario evitar la absorción de la pintura en el modelo, debido a que una excesiva inserción del refractario en el modelo provoca el acabado superficial irregular.

La diferencia de costos de fabricación entre los modelos de poliestireno y poliuretano no es significativa, sin embargo, esta diferencia si puede representar ahorro en producción a gran escala.

## **6.2 Recomendaciones**

Se debe evitar sobrepasar la temperatura de fundición de la colada debido a que se genera una excesiva porosidad en la aleación.

Se recomienda una investigación futura sobre un recubrimiento refractario especial para los modelos de espuma de poliuretano, con el cual se obtenga un mejor acabado superficial de las piezas fundidas.

Los estudios e investigaciones sobre este tipo de métodos de fundición son limitados, por lo que se considera de gran importancia continuar con el estudio de los mismos principalmente en el área de los recubrimientos refractarios, y los modelos de poliuretano para lograr un mejor acabado superficial.

Para obtener una colada de excelente calidad se recomienda el uso de desgasificantes, los cuales ayudaran a obtener piezas fundidas con mejores propiedades.

Es necesario implementar nuevas máquinas y equipos actualizados en el laboratorio de Fundición de la Facultad de Mecánica con la finalidad de mejorar la precisión de los estudios realizados, y evitar los obstáculos que pudiesen presentarse en futuras investigaciones en el área metalúrgica.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International. 2012.** *Astm C71-12 Standard Terminology Relating to Refractories*. West Conshohocken : ASTM, 2012.
- AAPE.** [www.aape.com.ar](http://www.aape.com.ar). *Comportamiento al fuego del poliestireno expandido*. [En línea] [Citado el: 15 de Septiembre de 2015.] [http://www.aape.com.ar/biblioteca/Comportamiento\\_Fuego.pdf](http://www.aape.com.ar/biblioteca/Comportamiento_Fuego.pdf).
- ALVAREZ A, CAMPOS M, CARDENAS V, OVIEDO F y REVELO F. 2013.** *Obtención de Piezas de Aluminio Mediante el Proceso de Colado con Modelos de Poliestireno Expandido*. Quito : Escuela Politecnica Nacional, 2013.
- ALVAREZ ANDRES y CAMPOS MARCELO. 2012.** *Obtención de piezas de aluminio mediante el proceso de colado con modelos de poliestireno expandido*. Quito : EPN, 2012.
- CAPELLO, Eduardo. 1987.** *Tecnología de la fundicion*. Barcelona : Gustavo Gili.S.A, 1987.
- CNC-MULTITOOL. 2015.** Foam Coating. [En línea] 2015. [Citado el: 22 de Septiembre del 2015.] <http://www.cnc-multitool.com/>.
- DUPONCHELE, J. 1932.** *Manual de fundidor*. [ed.] Gustavo Gili. Barcelona : Guinart y Pujolart, 1932. págs. 12-14.
- ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES-UVA.** Escuela de Ingenierías Industriales - UVA. [En línea] [Citado el : 27 de Octubre del 2015.] <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/PU/poliuretano.htm>.
- FERNÁNDEZ , Patricia, MARTÍNEZ Bladimir y DUQUE André. 2006.** *Proceso de fundición en espuma perdida para la Fabricación de autopartes*. Colombia : Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.
- FREIRE, Armando. 2008.** *Estudio de las Pinturas Refractarias en el Proceso de Fundición por el Método de Espuma Perdida en Aleaciones No Ferrosas*. Guayaquil : ESPOL, 2008. págs. 17-18.
- GRIFFIN, J y LITTLETON, H. 2005.** *Manufacturing Advanced Engineered Components*. s.l. : No. DE-FC36-04GO14230.2011, 2005.
- GROOVER, Mikell.P. 2007.** *Fundamentos de la Manufactura Moderna*. [trad.] John Wiley. 3ra. Mexico : Mc Graw Hill Interamericana, 2007. págs. 222-223.
- GRUPO ISOTEX.** Comportamiento del EPS en caso de Incendio. [En línea] [Citado el: 15 de Septiembre de 2015.] <http://www.grupoisotex.com/wp-content/uploads/2015/04/COMPORTAMIENTO-CONTRA-EL-FUEGO2.pdf>.
- INTEREMPRESAS.** Interempresas. [En línea] [Citado el: 25 de Octubre de 2015.] [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/144844/PUR.PDF](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/144844/PUR.PDF).

- KALPAJIAN.S y SCHMID S.R. 2008.** *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* 5ta . Monterrey : Pearson Educacion, 2008. págs. 285-300.
- KIMURA, GROUP. KIMURA.** [En línea] [Citado el: 29 de Octubre de 2015.] <http://www.kimuragrp.co.jp/English/casting/index2.html>.
- LOSTFOAM.COM.** Advancements In Lost Foam Prototyping. [En línea] [Citado el: 17 de Septiembre de 2015.] [http://www.lostfoam.com/content/featured\\_articles/article3.php](http://www.lostfoam.com/content/featured_articles/article3.php).
- LOSTFOAM.COM. 2015.** Top Ten Lost Foam Casting Questions. [En línea] 2015. [Citado el: 19 de Septiembre de 2015.] [http://www.lostfoam.com/content/featured\\_articles/article1.php](http://www.lostfoam.com/content/featured_articles/article1.php).
- MACHINE JAYSHREE & TOOLS.** foam cast. [En línea] [Citado el: 14 de Octubre de 2015.] <http://www.foamcast.in/history-of-lost-foam-castings.html>.
- MARIANO.** Tecnología de los Plásticos. En línea] [[Citado el: 24 de Octubre de 2015.] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.de/2011/06/poliuretano.html>.
- MORALES, ALVARO. 1983.** Revision de las Investigaciones con base en el estudio de las pinturas para moldes en la industria de la Fundición. CALI, 1983, págs. 6-12.
- PASTOR, Mario. 2004.** *Apuntes de fundicion.* Riobamba : ESPOCH, 2004.
- PRENSAS DE TOMELLOSO S.A.** Prensas de Tomelloso S.A. [En línea] [Citado el: 29 de Octubre de 2015.] <http://www.pretom.com/en/poliuretano/>.
- REVELO GUERRERO, Francis Ruben. 2011.** *Selección de la mezcla de moldeo óptima para fundición de aluminio con el uso de modelos gasificables.* Quito : Escuela Plitecnica Nacional, 2011.
- TEXTOS CIENTIFICOS.** Poliestireno Expandido. [En línea] [Citado el: 10 de Septiembre de 2015.] <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno-expandido>.
- TEXTOS CIENTIFICOS.** Produccion del poliestireno expandido. [En línea] [Citado el: 22 de Septiembre de 2015.] <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietireno/produccion>.
- TEXTOS CIENTIFICOS..** Propiedades del poliestireno. [En línea] [Citado el: 10 de Septiembre de 2015.] <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno/propiedades>.
- Universitat Politècnica de Catalunya. UPC. UPC.** [En línea] [Citado el: 15 de Enero de 2016.] <http://www.upc.edu/sct/es/equip/509/espectrometro-analisis-metales.html>.
- UNMdP, Facultad de Ingeniería.** Facultad de Ingeniería UNMdP. *Facultad de Ingeniería UNMdP.* [En línea] [Citado el: 25 de Abril de 2016.] <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.

**WIKIPEDIA.** Hot wire foam cutter. [En línea] [Citado el: 24 de Septiembre de 2015.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hot-wire\\_foam\\_cutter](https://en.wikipedia.org/wiki/Hot-wire_foam_cutter).

**WURTH.** Ficha de datos de seguridad para producto químico. *WURTH*. [En línea] [Citado el: 12 de 02 de 2016.] <http://www.wurth.cl/pdf/fs/33890112493.pdf>.

