

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE MOLDEO ÓPTIMA PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO CON EL USO DE MODELOS GASIFICABLES.”**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**FRANCIS RUBÉN REVELO GUERRERO**

fraben-regue@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO**

fausto.oviedo@epn.edu.ec

**Quito, Noviembre 2011**

## DECLARACIÓN

Yo, Francis Rubén Revelo Guerrero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Francis Rubén Revelo Guerrero

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Francis Rubén Revelo Guerrero, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Fausto Oviedo**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

*Cada día tenemos una oportunidad de vivir y de hacerlo de la mejor manera y solamente una persona lo hace posible. Por eso mi agradecimiento en primer lugar es para él, **Dios**, por proveerme del tiempo para culminar con éxito esta etapa de mi vida.*

*Segundamente a mis padres y hermana, quienes con su constancia y perseverancia, supieron influenciar en mi, una permanente afán de superación.*

*Agradezco al Ing. Fausto Oviedo, Director de Tesis, por su tiempo y porque con sus conocimientos guiaron de mejor manera el desarrollo de la tesis.*

*A mis profesores de educación superior de la Facultad de Ingeniería mecánica, en cuyas aulas me supieron compartir sus conocimientos y vivencias para que en la vida fuera de ellas sea un profesional de categoría y de superación.*

*Y en general agradezco a todos aquellos amigos que ayudaron y colaboraron en la culminación de mi carrera brindándome su apoyo para todas las dificultades y alegrías vividas en el transcurso de mi vida universitaria.*

**Francis**

## DEDICATORIA

*En la vida hay sucesos que pasan alrededor de tu crecimiento de persona, estudiante y profesional, que gracias al creador que nos supo guiar y enviar a este mundo todos nuestros sueños y anhelos se hacen realidad.*

*Dedicatoria aparte a este ser que nos ayuda y vigila en todo el transcurso de mi vida (DIOS).*

*A mis padres que brindaron apoyo moral y dedicación alrededor de mis pasos iniciales en este mundo, en la escuela, en el colegio y en esta vida universitaria, que gracias a sus valores inculcados supieron hacer de mi una persona de bien y quienes durante toda mi vida se sacrifican por darme lo mejor de ellos y mucho mas.*

*A mi hermana, con ella compartimos momentos felices, travesuras y hasta a veces penas que superamos juntos en nuestra vida universitaria, brindándonos compañía mutua y dedicación alrededor de nuestras carreras.*

*A todos los amigos que hicimos alrededor de mi carrera universitaria, como olvidar a estos amigos, que nos brindan todo el apoyo en cada instante de su vida, que con ellos hemos superado momentos difíciles y alegres desarrollados en la universidad y fuera de ella.*

**Francis**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
RESUMEN.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
CAPÍTULO 1.....	1
EL POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	1
1.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1.1 HISTORIA.....	1
1.1.2 POLIESTIRENO .....	2
1.1.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	3
1.2 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	4
1.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	4
1.2.1.1 Densidad .....	4
1.2.1.2 Aislamiento térmico .....	5
1.2.1.3 Comportamiento frente al agua y vapor de agua .....	6
1.2.1.4 Estabilidad dimensional.....	7
1.2.1.5 Estabilidad frente a la temperatura.....	7
1.2.1.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos.....	8
1.2.1.7 Color .....	8
1.2.2 RESISTENCIA MECÁNICA .....	8
1.2.2.1 Tensión de compresión .....	8
1.2.3 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	10
1.3 COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO.....	12
1.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	14
1.4.1 OBTENCIÓN DEL POLIESTIRENO .....	15
1.4.2 ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIESTIRENO .....	16

1.5 APLICACIONES .....	17
1.5.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO COMO MATERIAL DE EMBALAJE Y EMPAQUE.....	18
1.5.2 EL POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA CONSTRUCCIÓN: .....	18
1.5.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA FUNDICIÓN:.....	19
1.6 MÉTODO DE MOLDEO .....	21
1.6.1 EL PROCESO LOST FOAM CON MODELOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	21
1.6.2 PROCEDIMIENTO.....	22
1.6.2.1 Laminado y corte del poliestireno .....	23
1.6.2.2 Construcción del modelo. ....	25
1.6.3 VENTAJAS DEL PROCESO LOST FOAM .....	26
1.6.4 DESVENTAJAS DEL PROCESO LOST FOAM.....	26
CAPÍTULO 2.....	27
MEZCLAS DE MOLDEO .....	27
2.1 MATERIALES PARA MOLDEAR. ....	27
2.1.1 BASE REFRACTARIA .....	27
2.1.2 TIPOS DE ARENA BASE .....	29
2.1.2.1 Arenas naturales .....	30
2.1.2.2 Arenas sintéticas .....	31
2.1.2.3 Arena de zirconio .....	31
2.1.2.4 Arena olivinítica .....	32
2.1.2.5 La cromita .....	32
2.1.2.6 La magnesita.....	32
2.1.2.7 La chamota .....	33
2.1.3 AGLUTINANTES.....	33
2.1.3.1 Bentonita sódica.....	34
2.1.3.2 Bentonita cálcica. ....	34
2.1.3.3 El caolín .....	35
2.1.3.4 El cemento portland.....	36
2.1.3.5 Dextrina.....	36
2.1.4 AGLOMERANTES.....	38
2.1.4.1 El yeso .....	38
2.1.4.2 Silicato de sodio .....	39
2.1.4.3 Aceites .....	39

2.1.4.4 Resinas .....	39
2.1.5 ADITIVOS ESPECIALES .....	40
2.1.5.1 Harina de maíz .....	41
2.1.5.2 Melazas.....	42
2.1.5.3 El polvo de carbón mineral .....	42
2.1.5.4 El mazut .....	43
2.1.5.5 El polvo de carbón de leña .....	43
2.1.5.6 El grafito plateado .....	43
2.1.5.7 El cuarzo en polvo.....	43
2.1.5.8 El zirconio desferrizado .....	43
2.1.5.9 Aserrín de madera.....	43
2.2 FUNDICIÓN EN ARENA .....	44
2.3 TIPOS DE MOLDEO .....	46
2.3.1 MOLDEO EN ARENA VERDE.....	46
2.3.2 MOLDEO EN SECO.....	46
2.3.3 MOLDE NO COCIDO .....	47
2.3.4 MOLDEO CON SILICATO DE SODIO.....	48
2.3.5 MOLDEO EN YESO .....	48
2.3.6 MOLDES DE CERÁMICA.....	49
2.4 PROPIEDADES DE LAS ARENAS .....	50
2.4.1 REFRACTARIEDAD .....	50
2.4.2 PERMEABILIDAD .....	51
2.4.3 RESISTENCIA .....	52
2.4.4 PLASTICIDAD .....	52
2.4.5 MOLDEABILIDAD .....	53
2.4.6 COLAPSIBILIDAD.....	53
2.4.7 COMPOSICIÓN QUÍMICA .....	53
2.5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLA.....	54
2.5.1 PORCENTAJE DE ARCILLA DE LAS ARENAS DEL LABORATORIO DE FUNDICION DE EPN.....	55
2.6 TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DEL GRANO.....	56
2.6.1 TAMAÑO DE GRANO DE LA ARENA .....	56
2.6.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO .....	56
2.6.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS GRANOS.....	57
2.6.4 ESTUDIO DE LAS ARENAS BASE DISPONIBLES EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA EPN .....	59
2.7 FORMAS DE GRANO.....	65

2.7.1 FORMA DE GRANO DE ARENA NEGRA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.....	66
2.7.2 FORMA DE GRANO DE ARENA MARRÓN VIEJA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.....	66
2.7.3 FORMA DE GRANO DE ARENA MARRÓN NUEVA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.....	67
2.8 ENSAYOS DE LAS ARENAS.....	67
2.8.1 PRUEBA DE HUMEDAD.....	67
2.8.2 DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD.....	69
2.8.3 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DE LA ARENA .....	70
2.8.3.1 Ensayo de compresión .....	70
2.8.3.2 Resistencia a la cizalladura o corte .....	72
2.8.3.3 Determinación de la dureza.....	72
2.9 TIPOS DE ARENA Y LA FORMA DE EMPLEO PARA CONSTRUIR MOLDES DE FUNDICIÓN, SEGÚN LA NATURALEZA DE CADA METAL.....	75
CAPÍTULO 3.....	77
SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE MOLDEO .....	77
3.1 SELECCIÓN DE LA ARENA BASE .....	77
3.2 COMPONENTES INICIALES.....	78
3.2.1 MEZCLA Nº 1: RESINAS FENOLICAS .....	78
3.2.1.1 Preparación.....	78
3.2.2 MEZCLA Nº 2 .....	79
3.2.2.1 Preparación.....	79
3.2.3 MEZCLA Nº 3 .....	80
3.2.3.1 Preparación.....	81
3.2.4 MEZCLA Nº 4.....	81
3.2.4.1 Preparación.....	82
3.2.5 MEZCLA Nº 5 .....	82
3.2.5.1 Preparación.....	83
3.3 CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS PREPARADAS.....	83
3.3.1 MEZCLA Nº 1 .....	83
3.3.2 MEZCLA Nº 2 .....	84

3.3.3 MEZCLA Nº 3 .....	84
3.3.4 MEZCLA Nº 4 .....	85
3.3.5 MEZCLA Nº 5 .....	85
3.4 ENSAYOS REALIZADOS EN LAS MEZCLAS PREPARADAS.....	86
3.4.1 DENSIDAD DE ATACADO .....	86
3.4.2 ENSAYOS REALIZADOS .....	87
3.5 PROCESO DE FUNDICIÓN DE LA ESPUMA PÉRDIDA RECUBIERTA CON PINTURA REFRACTARIA .....	88
3.6 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA PINTURA REFRACTARIA.....	88
3.6.1 AGENTE REFRACTARIO .....	90
3.6.2 AGENTE DE SUSPENSIÓN .....	91
3.6.3 AGENTE DISPERSANTE .....	91
3.6.4 AGENTE SOLVENTE .....	92
3.6.5 ADITIVOS .....	92
3.7 PINTURAS REFRACTARIAS .....	93
3.7.1 PINTURA Nº 1 .....	93
3.7.1.1 Preparación.....	93
3.7.1.2 Características de la pintura.....	94
3.7.2 PINTURA Nº 2.....	94
3.7.2.1 Preparación.....	95
3.7.2.2 Características de la pintura .....	95
3.7.3 PINTURA Nº 3.....	96
3.7.3.1 Preparación.....	97
3.7.3.2 Características de la pintura .....	97
3.7.4 PINTURA Nº 4.....	98
3.7.4.1 Preparación.....	98
3.7.4.2 Características de la pintura .....	99
3.7.5 PINTURA Nº 5.....	100
3.7.5.1 Preparación.....	101
3.7.5.2 Características de la pintura .....	102
3.8 PROCEDIMIENTO DE PINTADO .....	102
3.9 ENSAYOS DE PINTURAS.....	103
3.10 PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA.....	106
3.10.1 AGENTE REFRACTARIO: SÍLICE ( $\text{SiO}_2$ ).....	107
3.10.2 AGENTE DE SUSPENSIÓN: ARCILLA ROJA.....	107
3.10.3 AGENTE DISPERSANTE: SILICATO DE SODIO ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	108
3.10.4 AGENTE SOLVENTE: EL AGUA.....	109

3.10.5 ADITIVOS: MELAZA .....	109
3.11 PROCESO.....	109
3.11.1 APLICACIÓN Y SECADO DE LA PINTURA REFRACTARIA FABRICADA.....	110
3.11.2 ASPECTO DE LA CASCARA FORMADA POR LA PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA.....	111
3.11.3 CÁLCULO DE POROSIDADES EN LA PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA.....	113
CAPÍTULO 4.....	115
MÉTODO EXPERIMENTAL CON MODELOS GASIFICABLES.....	115
4.1 OBJETIVO Y PROCEDIMIENTO.....	115
4.2 PROCESO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	116
4.3 CONTRACCIÓN METÁLICA.....	118
4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	119
4.4.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	120
4.4.2 SISTEMAS DE BEBEDEROS .....	122
4.5 PARÁMETROS DEL COLADO .....	123
4.5.1 TEMPERATURA DE VACIADO DEL METAL .....	123
4.5.2 VACIADO.....	124
4.5.3 VELOCIDAD DE FLUJO.....	125
4.5.4 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO.....	127
4.5.4.1 Aleaciones con intervalo estrecho de Solidificación.....	128
4.6 IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS .....	129
4.6.1 DEFECTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MODELO DE ESPUMA.....	129
4.6.2 DEFECTOS DEBIDOS AL PROCESO DE FUNDICIÓN .....	130
4.6.3 DEFECTOS COMUNES.....	130
4.7 PRUEBAS EN LAS MEZCLAS DE MOLDEO PREPARADAS .....	133
4.7.1 MODELO .....	133
4.7.2 DIMENSIONES DEL MODELO GASIFICABLE .....	133
4.7.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	134
4.7.4 CAJA DE PRUEBAS .....	134
4.7.5 MODELOS FUNDIDOS.....	135
4.7.6 DEFECTOS EN LOS MODELOS ENSAYADOS CON LAS MEZCLAS DE MOLDEO RESPECTIVAS .....	137
4.8 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS .....	139

4.8.1 SELECCIÓN DE LA ARENA PARA EL MOLDEO .....	140
4.8.2 CONSTRUCCIÓN DE UN BACÍN METÁLICO.....	140
4.8.3 ENSAYO CON PINTURAS REFRACTARIAS.....	141
4.9 ACABADO SUPERFICIAL EN LA PIEZA FUNDIDA.....	143
4.9.1 MEDICIÓN DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL .....	144
CAPÍTULO 5.....	147
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	147
5.1 PARAMETROS INICIALES.....	147
5.1.1 SELECCIÓN DE LA ARENA .....	147
5.1.2 SELECCIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	148
5.1.3 SELECCIÓN DEL MODELO .....	148
5.1.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	149
5.1.5 CONSTRUCCIÓN DE UN BACÍN METÁLICO.....	149
5.1.6 SELECCIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA .....	150
5.1.7 PREPARACIÓN.....	150
5.1.8 CARACTERÍSTICAS DE LA PINTURA .....	151
5.1.9 PROCEDIMIENTO DE PINTADO.....	152
5.1.10 MOLDEO .....	153
5.1.11 COLADO.....	154
5.1.12 DESMOLDE.....	154
5.1.13 PIEZA FUNDIDA.....	155
CONCLUSIONES .....	158
RECOMENDACIONES.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	160
ANEXOS.....	163

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Propiedades del Físicas del Poliestireno.....	4
Tabla 1. 2 Conductividad térmica en función de la densidad.....	6
Tabla 1. 3 Relación tipo, tensión y resistencia del Poliestireno (EPS).....	9
Tabla 1. 4. Propiedades Químicas del Poliestireno.....	10
Tabla 1. 5. Resistencia a los agentes químicos. ....	11

Tabla 1. 6 Toxicidad de humos del EPS. ....	14
Tabla 2. 1 Composición química de una arena base óptima. ....	29
Tabla 2. 2 Análisis químico de la Bentonita sódica ....	34
Tabla 2. 3 Análisis químico de la Bentonita cálcica.....	35
Tabla 2. 4 Composiciones del cemento Portland. ....	36
Tabla 2. 5. Análisis químico de la dextrina. ....	37
Tabla 2. 6. Análisis químico de la harina de maíz ....	42
Tabla 2. 7. Resumen de las adiciones ....	44
Tabla 2. 8 Refractoriedad de la arena base ....	51
Tabla 2. 9 Clasificación y Composición de las arenas de moldeo. ....	54
Tabla 2. 10 Arena negra del laboratorio de fundición de EPN.....	55
Tabla 2. 11 Arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN. ....	55
Tabla 2. 12 Arena marrón nueva del laboratorio de fundición de EPN. ....	55
Tabla 2. 13 Clasificación de los tamaños de Grano ....	56
Tabla 2. 14 Factores de Valorización para cada tamiz.....	57
Tabla 2. 15 Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena negra del laboratorio de fundición EPN. ....	59
Tabla 2. 16 Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena negra del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla. ....	60
Tabla 2. 17 Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN. ....	61
Tabla 2. 18 Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla. ....	62
Tabla 2. 19 Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN. ....	64
Tabla 2. 20. Clasificación de los moldes por su dureza.....	73
Tabla 2. 21. Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN. ....	74
Tabla 2. 22. Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN. ....	74
Tabla 2. 23. Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena negra del laboratorio de fundición EPN.....	74
Tabla 2. 24. Características recomendadas de arenas de moldeo para conseguir resultados satisfactorios en la fundición de diferentes aleaciones.....	76
Tabla 3. 1. Cálculo del número de finura de grano AFS y distribución de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN. ....	77
Tabla 3. 2 Composición de la mezcla N° 1.....	78
Tabla 3. 3 Composición de la mezcla N° 2.....	79
Tabla 3. 4 Composición de la mezcla N° 3.....	80
Tabla 3. 5 Composición de la mezcla N° 4.....	81
Tabla 3. 6 Composición de la mezcla N° 5.....	82
Tabla 3. 7 Densidad de atacado de las mezclas. ....	86
Tabla 3. 8 Permeabilidad, dureza, compresión y corte de las mezclas en seco. ....	87
Tabla 3. 9 Permeabilidad, dureza, compresión y corte de las mezclas en verde.....	87
Tabla 3. 10 Composición en porcentajes de la pintura.....	90
Tabla 3. 11 Principales materiales refractarios.....	90

Tabla 3. 12 Principales materiales de suspensión .....	91
Tabla 3. 13 Principales materiales dispersantes. ....	92
Tabla 3. 14 Composición de la pintura refractaria N° 1. ....	93
Tabla 3. 15 Composición de la pintura refractaria N° 2. ....	94
Tabla 3. 16 Composición de la pintura refractaria N° 3. ....	96
Tabla 3. 17 Composición de la pintura refractaria N° 4. ....	98
Tabla 3. 18 Composición de la Barbotina.....	100
Tabla 3. 19 Composición de la pintura refractaria N° 5. ....	100
Tabla 3. 20 Contracción de la pintura refractaria N° 1.....	104
Tabla 3. 21 Contracción de la pintura refractaria N° 2.....	104
Tabla 3. 22 Contracción de la pintura refractaria N° 3.....	104
Tabla 3. 23. Contracción de la pintura refractaria N° 4.....	104
Tabla 3. 24 Contracción de la pintura refractaria N° 5.....	105
Tabla 3. 25 Resumen de la Contracción de las pinturas refractarias.....	105
Tabla 3. 26 Permeabilidad, dureza, compresión, corte y tracción de las pinturas refractarias.....	105
Tabla 3. 28 Composición final de la pintura refractaria.....	110
Tabla 4. 1 Diámetros de perla de poliestireno expandido.....	117
Tabla 4. 2 Contracción volumétrica de metales.....	119
Tabla 4. 3 Composición de la mezcla N° 2.....	139
Tabla 4. 4 Especificaciones técnicas del rugosímetro comparador .....	145
Tabla 5. 1. Grados de poliestireno expandido .....	148
Tabla 5. 2 Composición final de la pintura refractaria.....	150
Tabla 5. 3 Contracción de la pintura refractaria.....	152
Tabla 5. 4. Permeabilidad, dureza, compresión, corte y tracción de la pintura refractaria. ....	152

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Modelos actuales del poliestireno expandible. ....	1
Figura 1. 2 Estireno.....	2
Figura 1. 3 Fotografía de un fragmento de poliestireno expandido.....	3
Figura 1. 4 Conductividad Térmica $\lambda$ [W/m·K] vs Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]. ....	6
Figura 1. 5 Resistencia a compresión [kPa] en función de la densidad [kg/m <sup>3</sup> ]. ....	9
Figura 1. 6 Molécula del poliestireno expandible.....	12
Figura 1. 7 Esquema de la obtención del estireno. ....	15
Figura 1. 8 Diagrama de flujo de obtención del Poliestireno.....	16
Figura 1. 9. Aplicaciones varias del Poliestireno en la fundición. ....	20
Figura 1. 10 Esquema proceso de fundición. ....	22
Figura 1. 11 Instalación pequeña para corte de poliestireno. ....	23
Figura 1. 12 Modelo gasificable. ....	25
Figura 2. 1 Fundición en arena para el cuerpo de un compresor con un peso de 680 Kg (Cortesía de Elkhart Foundry, Foto por Paragon Inc. Elkhart Indiana). ....	44
Figura 2. 2 Pasos en la secuencia de producción de la fundición en arena. ....	45
Figura 2. 3 Variación de la permeabilidad respecto al tamaño de grano. ....	51

Figura 2. 4 Influencia de la arcilla en la plasticidad de la mezcla. ....	52
Figura 2. 5 Agitador eléctrico y sifón .....	55
Figura 2. 6 Aparato para determinar la composición granular de la arena .....	57
Figura 2. 7 Distribución del grano .....	58
Figura 2. 8 Gráfica de la distribución de grano de la arena negra del laboratorio de fundición EPN. ....	59
Figura 2. 9 Gráfica de la distribución de grano de la arena negra del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla .....	61
Figura 2. 10 Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN. ....	62
Figura 2. 11 Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla .....	63
Figura 2. 12 Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN. ....	64
Figura 2. 13 Formas de grano.....	65
Figura 2. 14 Fotografía de la forma de grano de arena negra del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla. ....	66
Figura 2. 15 Fotografía de la forma de grano de arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla. ....	66
Figura 2. 16 Fotografía de la forma de grano de arena marrón nueva del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla. ....	67
Figura 2. 17 Instrumento para determinar el contenido de humedad de arenas para fundición. ....	68
Figura 2. 18 Medidor de permeabilidad eléctrico y escala de colores .....	69
Figura 2. 19 Máquina universal para determinar la resistencia de las arenas y machos de moldeo .....	70
Figura 2. 20 Instrumento para apisonar la probeta de ensayos de norma AFS.....	72
Figura 2. 21 Instrumento para determinar la dureza en verde de moldes y machos (escala B). ....	73
Figura 3. 1 Elementos de la mezcla N° 1. ....	78
Figura 3. 2 Elementos de la mezcla N° 2 .....	79
Figura 3. 3. Elementos de la mezcla N° 3 .....	80
Figura 3. 4 Elementos de la mezcla N° 4. ....	81
Figura 3. 5 Elementos de la mezcla N° 5 .....	82
Figura 3. 6 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 1.....	83
Figura 3. 7 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 2.....	84
Figura 3. 8 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 3.....	84
Figura 3. 9 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 4.....	85
Figura 3. 10 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 5.....	85
Figura 3. 11 Probetas para ensayos de la mezclas.....	86
Figura 3. 12 Diagrama de flujo o de bloques del proceso de fundición por el método de espuma pérdida. ....	88
Figura 3. 13 Comportamiento del la pintura al momento del colado.....	89
Figura 3. 14 Elementos de la pintura refractaria N° 1.....	93
Figura 3. 15 Aspecto de la pintura refractaria N° 1 después del secado. ....	94
Figura 3. 16 Elementos de la pintura refractaria N° 2.....	95

Figura 3. 17 Aspecto de la pintura refractaria N° 2 después del secado. ....	96
Figura 3. 18 Elementos de la pintura refractaria N° 3. ....	96
Figura 3. 19 Aspecto de la pintura refractaria N° 3 después del secado. ....	98
Figura 3. 20. Elementos de la pintura refractaria N° 4. ....	98
Figura 3. 21 Aspecto de la pintura refractaria N° 4 después del secado. ....	99
Figura 3. 22 Elementos de la Barbotina. ....	100
Figura 3. 23 Elementos de la pintura refractaria N° 5. ....	100
Figura 3. 24 Aspecto de la pintura refractaria N° 5 después del secado. ....	102
Figura 3. 25 Forma de probetas para ensayos de pinturas refractarias. ....	103
Figura 3. 26 Molino de bolas de metalurgia extractiva en funcionamiento. ....	107
Figura 3. 27 Agitador mecánico-eléctrico. ....	110
Figura 3. 28 Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación. ....	111
Figura 3. 29 Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación. ....	112
Figura 3. 30 Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación. ....	112
Figura 3. 31 Cascara de pintura refractaria después del colado a 40X de ampliación. ....	113
Figura 3. 32 Sección digital de la cascara de pintura refractaria. ....	114
Figura 4. 1 Ejemplo de modelación de piezas. ....	118
Figura 4. 2 Moldura de fundición con sistema de alimentación: 1- embudo de colada; 2- canal vertical; 3- colector de escoria; 4- alimentador; 5- respiradero; 6- moldura. ....	119
Figura 4. 3 Bacías de colada para el llenado de molduras medianas (a) y grandes (b) ....	120
Figura 4. 4 Formas de canales verticales. ....	120
Figura 4. 5 Colectores de escoria según la moldura. ....	121
Figura 4. 6 Pozo. ....	121
Figura 4. 7 Alimentadores abajo y arriba del plano de partición. ....	122
Figura 4.8 Fotografías secuenciales de la posición del metal durante varios tiempos en el proceso de llenado del molde de espuma con metal a T 325 °C. ....	125
Figura 4. 9 Fotografías mostrando la morfología del metal frente a varias temperaturas de colado en modelos de EPS, (a) 275 °C, (b) 525 °C, (c) 750 °C, (d) 1150 °C. ....	125
Figura 4. 10 Llenado de un molde con modelo gasificable. ....	126
Figura 4. 11 Diagrama T vs t de la solidificación de un metal puro. ....	128
Figura 4. 12 Defectos típicos en los modelos de espuma de poliestireno; a) Rebabas, b) Superficie quemada, c) desnivel. ....	130
Figura 4. 13 Defectos debidos al proceso de fundición; a) Gases atrapados, b) Inclusiones de arena, c) superficie rugosa. ....	130
Figura 4. 14 Ejemplo de porosidad. ....	131
Figura 4. 15 Ejemplo de rechupe. ....	131
Figura 4. 16 Ejemplo de sopladura. ....	131
Figura 4. 17 Ejemplo de grietas. ....	132
Figura 4. 18 Ejemplo de llenado incompleto. ....	132
Figura 4. 19 Ejemplo de explosiones de arena. ....	132
Figura 4. 20 Fotografía y diseño del modelo de espuma a ensayarse. ....	133
Figura 4. 21 Dimensiones del modelo de espuma a ensayarse. ....	133
Figura 4. 22 Forma del sistema de alimentación y ubicación en el modelo de espuma. ....	134

Figura 4. 23 Fotografía de la caja de pruebas.....	134
Figura 4. 24 Moldeado del modelo.....	135
Figura 4. 25 Piezas fundidas con las mezclas de arena respectivamente y forma de la superficie a 5x ampliado.....	136
Figura 4. 26 Defectos en la piezas fundidas con la mezclas de arena fabricadas respectivas. ....	138
Figura 4. 27 Coloración y textura en verde de la mezcla N° 2.....	139
Figura 4. 28 Función del bacín metálico.....	141
Figura 4. 29 Piezas fundidas recubiertas con pintura refractarias en su orden respectivamente. ....	142
Figura 4. 30 Formas de la textura superficial .....	144
Figura 4. 31 Comparador de rugosidad superficial.....	145
Figura 4. 32 Comparación de superficies a simple vista .....	146
Figura 4. 33 Comparaciones de superficies entre placa comparadora y el elemento fundido a 10X de ampliación .....	146
Figura 5. 1. Fotografía y diseño del modelo de espuma a ensayarse. ....	148
Figura 5. 2. Dimensiones del modelo de espuma a ensayarse. ....	149
Figura 5. 3. Forma del sistema de alimentación y ubicación en el modelo de espuma.....	149
Figura 5. 4. Forma del bacín metálico construido.....	150
Figura 5. 5 Aspecto de la pintura refractaria después del secado. ....	152
Figura 5. 6. Proceso de moldeo del modelo recubierto con pintura refractaria.....	153
Figura 5. 7 Colado del metal en el modelo gasificable .....	154
Figura 5. 8 Desmolde del modelo fundido.....	155
Figura 5. 9 Pieza fundida terminada .....	155
Figura 5. 10 Superficie del modelo fundido de espumaflex antes de la investigación a 5X.....	156
Figura 5. 11 Superficie del modelo fundido de espumaflex después de la investigación a 5X.....	156
Figura 5. 12 Superficie del modelo fundido terminado ampliado a 40X.....	157

## RESUMEN

El propósito principal de este proyecto es establecer un procedimiento para la selección de la mezcla de moldeo óptima para fundición de aluminio con el uso de modelos gasificables para ser aplicada en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional y después ser transferidos los conocimientos a la industria nacional sobre esta y futuras investigaciones en esta rama de la siderúrgica.

Además el proceso de Fundición a la Espuma Perdida (LFC) o Lost foam Casting (LFC) ha sido utilizado en los últimos años a nivel mundial y no se puede quedar rezagados de la nueva técnica ya que permite la fabricación de un sin número de partes de diferentes complejidades y requerimientos, incluyendo piezas automotrices, aeronáuticas y de transporte de fluidos, para las cuales se requiere alta calidad y desempeño, y por lo tanto, con cero rechazos durante su manufactura.

El presente trabajo de investigación ayudara a tener un criterio para la selección de las mezclas de moldeo utilizadas en moldes gasificables tipo poliestireno expandido formando un precedente para la obtención de piezas de fabricación nacional con características mecánicas similares a las importadas y a un costo inferior ya que presenta facilidad de automatización lo que supone una disminución de costos de operación y defectos en modelos, moldes y piezas. Sencillez en sus etapas y posibilidad de reciclado brindando un ahorro en algunos de sus materiales, lo cual es bastante ventajoso dentro del gremio de la fundición y tan necesario en la actualidad.

Una de las causas importantes para que se lleve a cabo este proyecto es la proliferación de fundidoras en el país sin ningún desarrollo técnico ni conocimientos en este proceso no implementado a nivel nacional, que facilitaría la producción de piezas al gremio automotriz local y demás industrias que requieran de esta técnica para elaborar sus piezas o modelos.

## INTRODUCCIÓN.

El proceso de fundición de modelos gasificables, presenta un sinnúmero de variables que es preciso controlar y establecer para que el modelo ya fundido y solido no presente fallas dimensionales y superficiales, siendo necesario un estudio sobre el proceso y los defectos que se generan al implementar este método.

El capítulo I, contiene generalidades sobre poliestireno expandible, sus propiedades, características, su producción y obtención, el proceso en sí de fundición, una variante para su modelaje, las ventajas y desventajas de este proceso.

El capítulo II describe de una manera detallada el análisis de arenas bases disponibles en el laboratorio de fundición de la EPN, obteniendo sus propiedades y características, aplicado un proceso de ensayos y pruebas realizadas a las arenas bases, también presenta características y propiedades de aglutinantes, aglomerantes y aditivos más usados a nivel local.

El capítulo III se refiere a la selección de mezclas de moldeo, donde se describe su composición, su elaboración, sus características y propiedades, además contiene la elaboración de pinturas refractarias utilizadas en el proceso de modelos gasificables sometidas a ensayos y pruebas para establecer sus propiedades y características de cada pintura, terminando en la selección de la mezcla o pintura optima para el proceso experimentado.

El capítulo IV detalla el método experimental con modelos gasificables, iniciando con la selección del poliestireno expandible, el modelo, el sistema de alimentación, ensayos con mezclas de moldeo, defectos en los modelos después del colado en las mezclas, implementación de mejoras, la aplicación de la pintura refractaria, sus defectos encontrados después del colado y acabado superficial de la pieza seleccionada y pintada con la pintura refractaria optima.

El capítulo V detalla un análisis de resultados, las experiencias en conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

# CAPÍTULO 1

## EL POLIESTIRENO EXPANDIDO

### 1.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1.1 HISTORIA

En 1831 un líquido incoloro, el estireno, fue aislado por primera vez de una corteza de árbol. Hoy día se obtiene mayormente a partir del petróleo y se elaboran varios tipos de formas como se observa en la figura 1.1.

El poliestireno fue sintetizado por primera vez a nivel industrial en el año 1930. Hacia fines de la década del 50, la firma BASF (Alemania) por iniciativa del Dr. F. Stastny, desarrolla e inicia la producción de un nuevo producto: poliestireno expandible, bajo la marca Styropor. Ese mismo año fue utilizado como aislante en una construcción dentro de la misma planta de BASF donde se realizó el descubrimiento. Al cabo de 45 años frente a escribanos y técnicos de distintos institutos europeos, se levantó parte de ese material, y se lo sometió a todas las pruebas y verificaciones posibles. La conclusión fue que el material después de 45 años de utilizado mantenía todas y cada una de sus propiedades intactas.<sup>1</sup>



**Figura 1. 1** Modelos actuales del poliestireno expandible.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno>

<sup>2</sup> Fuente: <http://www.LostFoam.com>

### 1.1.2 POLIESTIRENO

El Poliestireno es un polímero que se obtiene a partir de un monómero llamado Estireno, (figura 1.2) el cual también se conoce con los nombres de vinilbenceno, feniletileno, estirol o estiroleno ( $C_6H_5 - CH = CH_2$ ).<sup>3</sup>

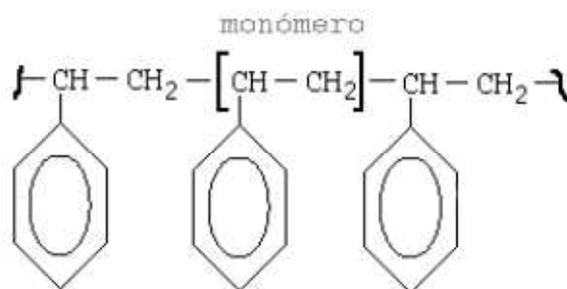


Figura 1. 2 Estireno.

Este material ha tenido gran desarrollo en los últimos años y ha formado un grupo de plásticos denominados: familia de Polimeros de Estireno, en los que se incluyen:

- Poliestireno Cristal o de Uso General (PS)
- Poliestireno Grado Impacto (PS-I)
- Poliestireno Expansible (EPS)
- Estireno/Acrilonitrilo (SAN)
- Copolímero en Bloque de Estireno/Butadieno/Estireno (SBS)
- Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)
- Aleaciones

<sup>3</sup> Fuente: "Enciclopedia del Plástico 2000"; Centro Empresarial del Plástico.

### 1.1.3 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".<sup>4</sup>

La abreviatura EPS deriva del inglés Expanded PolyStyrene. Este material es conocido también como Telgopor o Corcho Blanco se obtiene por un proceso denominado polimerización, que consiste en la unión de muchas moléculas pequeñas para lograr moléculas muy grandes (véase figura 1.3). La sustancia obtenida es un polímero y los compuestos sencillos de los que se obtienen se llaman monómeros.

Es un sólido vítreo por debajo de 100 °C; por encima de esta temperatura es procesable y puede dársele múltiples formas. Su cualidad más destacada es su higiene al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos.

Otras características reseñables del poliestireno expandido son su ligereza, resistencia a la humedad y capacidad de absorción de los impactos.



**Figura 1. 3** Fotografía de un fragmento de poliestireno expandido.

---

<sup>4</sup> Fuente: <http://centros5.pntic.mec.es/>

## 1.2 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO

### 1.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

#### 1.2.1.1 Densidad

Los productos y artículos acabados en poliestireno expandido - EPS se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros aunque resistentes. Según la norma UNE 92.110 las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10 kg/m<sup>3</sup> hasta los 50 kg/m<sup>3</sup>, en la tabla 1.1 muestra las propiedades físicas del poliestireno.

Tabla 1. 1 Propiedades del Físicas del Poliestireno.<sup>5</sup>

PROPIEDADES	NORMA UNE	UDS	TIPO EPS						
			TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V	TIPO VI	TIPO VII
Densidad Nominal	EN-1602	Kg/m <sup>3</sup>	10	12	15	20	25	30	35
Densidad Mínima		Kg/m <sup>3</sup>	9	11	13.5	18	22.5	27	31.5
Espesor Mínimo		mm	50	40	30	20	20	20	20
Conductividad térmica (10°C)	92201	mW/(mK)	46	43	39	36	35	34	33
Tensión por compresión con deformación del 10%	EN-826	KPa	30	40	65	100	150	200	250
Resistencia permanente a la compresión con una deformación del 2%		KPa	-	-	15-25	25-40	35-50	45-60	55-70
Resistencia a la Flexión	EN-12089	KPa	50	60	100	150	200	275	375
Resistencia al Cizallamiento	EN-12090	KPa	25	35	50	75	100	135	184

<sup>5</sup> Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno>

Resistencia a la Tracción	EN-1607-1608	KPa	-	<100	110-290	170-350	320-410	300-480	420-580
Modulo de Elasticidad		KPa	-	<1.5	1.6-5.2	3.4-7.0	5.9-7.2	7.7-9.5	9-10.8
Indeformabilidad al calor instantánea		°C	100	100	100	100	100	100	100
Indeformabilidad al calor duradera con 20 KN/m <sup>2</sup>		°C	75	75	75	80	80	80	80
Coeficiente de dilatación térmica lineal		1/°K (xE-5)	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7
Capacidad Térmica Específica		J/(kg°K)	1210	1210	1210	1210	1210	1210	1210
Clase de reacción al fuego			-	M1 ó M4					
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 7 días	EN-12087	% (vol.)	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-1.5
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 28 días	EN-12087	% (vol.)	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3
Índice de resistencia a la difusión de vapor de agua	92226	1	<20	<20	20-40	30-50	40-70	50-100	60-120

### 1.2.1.2 Aislamiento térmico

Los productos y materiales de poliestireno expandido - EPS presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico frente al calor y al frío.

Esta buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que esencialmente consiste en aire 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). Se conoce que el aire en reposo es un excelente aislante térmico.

La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica  $\lambda$  que en el caso de los productos de EPS

varía, al igual que las propiedades mecánicas, con la densidad. La figura 1.4 nos muestra esta influencia, la tabla 1.2 muestra los valores de Conductividad térmica en función de la densidad.

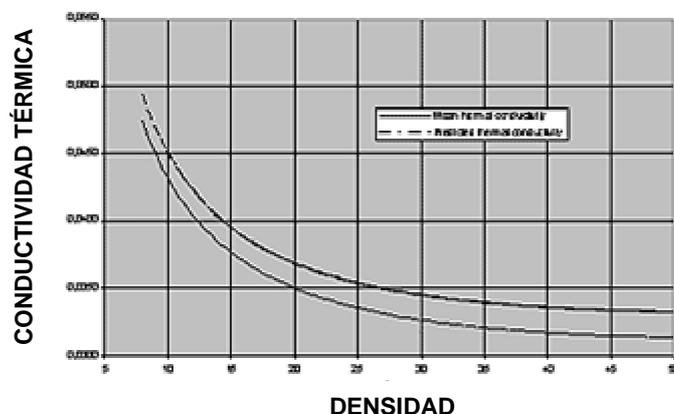


Figura 1. 4 Conductividad Térmica  $\lambda$  [W/m·K] vs Densidad [kg/m<sup>3</sup>].<sup>6</sup>

Tabla 1. 2 Conductividad térmica en función de la densidad.<sup>6</sup>

Conductividad térmica en función de la densidad(*)	
$\lambda$ (W/mk)	d(kg/m <sup>3</sup> )
0,0430	10
0,0413	15
0,0384	20
0,0373	25
0,0361	30

### 1.2.1.3 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 oscilando entre el 1% y el 3% en volumen (ensayo por inmersión después de 28 días). Nuevos desarrollos en las materias primas resultan en productos con niveles de absorción de agua aún más bajos.

<sup>6</sup> Fuente: ANAPE.COM

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 del EPS cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas.

Para determinar la resistencia a la difusión del vapor de agua se utiliza el factor adimensional  $\mu$  que indica cuantas veces es mayor la resistencia a la difusión del vapor de agua de un material con respecto a una capa de aire de igual espesor (para el aire  $\mu = 1$ ).

Para los productos de EPS el factor  $\mu$ , en función de la densidad, oscila entre el intervalo  $\mu = 20$  a  $\mu = 100$ . Como referencia, la fibra de vidrio tiene un valor  $\mu = 1$  y el poliestireno extruido  $\mu = 150$ .

#### **1.2.1.4 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, 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.

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

#### **1.2.1.5 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.

#### **1.2.1.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos.**

La radiación ultravioleta es prácticamente es 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. Dichos efectos pueden evitarse con medidas sencillas, en las aplicaciones de construcción con pinturas, revestimientos y recubrimientos.

#### **1.2.1.7 Color**

El color natural de poliestireno expandido es blanco, esto se debe a la refracción de la luz.

### **1.2.2 RESISTENCIA MECÁNICA**

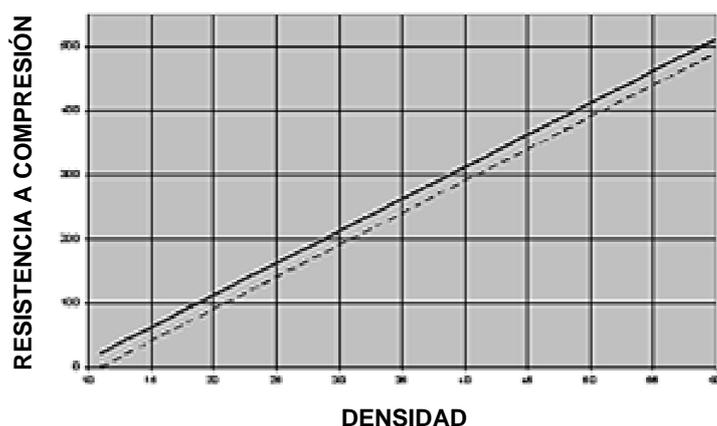
La resistencia a los esfuerzos mecánicos de los productos de EPS se evalúan generalmente a través de la resistencia a la compresión (para una deformación del 10%), flexión, tracción y al esfuerzo cortante o cizalladura.

#### **1.2.2.1 Tensión de compresión**

Es la capacidad que tienen los productos de EPS, de resistir una deformación inferior al 10 %, sometido a una carga permanente de compresión de 0.30 KPa.

Esta propiedad se requiere en los productos de EPS sometidos a carga, como suelos, cubiertas, aislamiento perimetral de muros, etc. Los productos de EPS tienen una deformación por fluencia de compresión del 2% o menos, después de 50 años, mientras estén sometidos a un esfuerzo permanente de compresión.

Para cada tipo de materia prima, la densidad del material guarda una estrecha correlación con las propiedades de resistencia mecánica. La figura 1.5 reflejada a continuación muestra los valores alcanzados por la resistencia a compresión en función de la densidad de los materiales de EPS.



**Figura 1. 5** Resistencia a compresión [kPa] en función de la densidad [kg/m<sup>3</sup>].<sup>7</sup>

La tabla 1.3 muestra la relación entre el tipo, resistencia mecánica y tensión a la compresión del poliestireno.

**Tabla 1. 3** Relación tipo, tensión y resistencia del Poliestireno (EPS).<sup>7</sup>

Tipo	Tensión de Compresión al 10% de deformación ( $\sigma_{10}$ ) kPa	Resistencia a Flexión ( $\sigma_B$ ) kPa
EPS S	-	50
EPS 30	30	50
EPS 50	50	75
EPS 60	60	100
EPS 70	70	115
EPS 80	80	125
EPS 90	90	135
EPS 100	100	150
EPS 120	120	170
EPS 150	150	200
EPS 200	200	250
EPS 250	250	350
EPS 300	300	450
EPS 350	350	525
EPS 400	400	600
EPS 500	500	750

<sup>7</sup> Fuente: ANAPE.com

### 1.2.3 PROPIEDADES QUÍMICAS

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 las siguientes tablas se detalla más información acerca de la estabilidad química del EPS.

**Tabla 1. 4.** Propiedades Químicas del Poliestireno.

<b>SUSTANCIA ACTIVA</b>	<b>ESTABILIDAD</b>
Solución salina (agua de mar)	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Jabones y soluciones de tensioactivos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Lejías	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con una acción prolongada
Acido 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, esteres,..)	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 diesel	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

## Resistencia de los diferentes tipos de poliestireno expandido a los agentes químicos

Tabla 1. 5. Resistencia a los agentes químicos.<sup>8</sup>

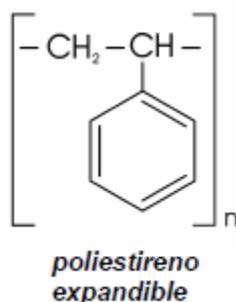
Agentes	EPS Tipo Standard	EPS Difícilmente Inflamable	EPS Resistente a los Aceites Diesel
Agua	+	+	+
Agua de mar	+	+	+
Acido Clorhídrico al 36%	+	+	-
Acido sulfúrico al 95%	+	+	-
Acido fosfórico al 90%	+	+	-
Acido nítrico al 68 %	+	+	-
Acido fórmico al 80 %	+	+	-
Acido acético al 70 %	+	+	-
Hidróxido sódico al 40 %	+	+	+
Hidróxido potásico al 50 %	+	+	+
Agua amoniacal al 25 %	+	+	+
Alcohol metílico	+	+	+
Alcohol etílico	+	+	+ -
Alcohol propílico	+	+	+ -
Bencina para barnices, aceite Diesel	+	+	+ -
Carburante que contiene benceno	-	-	+
Éter acético	-	-	-
Benceno	-	-	-
Tetracloruro de carbono	-	-	-
Éter y disolventes orgánicos	-	-	-

- + Estable  
 + - Limitadamente Estable  
 - Inestable

<sup>8</sup> Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno>

### 1.3 COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

La materia prima del Poliestireno Expandido EPS es un polímero que contiene un agente expansivo. Se obtiene mediante un procedimiento de polimerización del monómero de estireno [ $C_8H_8$ ] con adición de pentano [ $C_5H_{12}$ ].



**Figura 1. 6** Molécula del poliestireno expandible

Los EPS fabricados a base de este polímero poseen una estructura formada por millones de finas células cerradas, rellenas de aire y como puede verse en su molécula (figura 1.6), se trata de un hidrocarburo puro, no posee otros elementos químicos que Carbono [C] e Hidrógeno [H]. Todos ellos son materiales combustibles.

Ensayos realizados en un laboratorio de la industria muestran que las planchas de EPS se encogen rápidamente acercándolas a una fuente de calor, quedando una lámina de poliestireno fundido. No se observó ninguna generación de llama hasta superado un flujo de calor de 20 kW/m<sup>2</sup>.

El poder calorífico de los materiales de Poliestireno Expandido (40 MJ/kg) es aproximadamente dos veces el de la madera (18,4 MJ/kg), pero teniendo en cuenta las densidades de ambos productos, el volumen calorífico para el EPS está entre 400 y 1200 MJ/m<sup>3</sup> (para sus habituales densidades de comercialización que varían entre 10 kg/m<sup>3</sup> y 30 kg/m<sup>3</sup>).

El poliestireno expandido tiene solamente un 1,5 al 2,5 % de su volumen, de materia combustible, el resto es aire, por lo que facilita su rápida combustión y su aporte a la carga de fuego en caso de incendio, es de 145 a 240 kcal/dm<sup>3</sup>, frente a los 2.400 kcal/dm<sup>3</sup> que aportaría la madera (10 veces mayor).

Una espuma de densidad  $15 \text{ kg/m}^3$  requiere aproximadamente 150 veces su volumen en aire para completar su combustión.

El EPS se fabrica en dos clases de calidad: tipo estándar, identificado con la letra "P" y aditivado con retardantes de llama, designado: tipo "F". Este último es mucho más difícil de arder y con una tasa de propagación de llama considerablemente menor.

Cuando el EPS se calienta, se ablanda y se contrae progresivamente a partir de los  $100$  a  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $110$  a  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  para el tipo "F") y finalmente se funde. A temperaturas más altas, entre los  $230$  y los  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ , según se trate del EPS tipo "P" o tipo "F", se desprenden gases combustibles por descomposición de la masa fundida.

Estos gases no se inflaman hasta alcanzar, siempre con el aporte de calor externo, los  $450$  a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperaturas de autoignición del EPS fundido, tipos "P" y "F" respectivamente).

La posibilidad de que estos gases se quemen por acción de una llama o chispa depende enormemente de la temperatura, la duración de su exposición al calor y la cantidad de aire que fluya alrededor del material (la disponibilidad de oxígeno).

La temperatura umbral de ignición del EPS estándar es  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ , en el caso del EPS autoextinguible es  $370 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estos valores indican que si el EPS fundido se desintegra, los gases combustibles se formarán únicamente alrededor de los  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Después de la ignición del EPS de clase estándar, el fuego se propagará por la superficie expuesta y continuará hasta que se haya consumido todo el material.

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. La tabla 1.6 muestra la toxicidad de humos del EPS en comparación con otros materiales.

Tabla 1. 6 Toxicidad de humos del EPS.<sup>9</sup>

<b>TOXICIDAD DE HUMOS DEL EPS Y VARIOS MATERIALES "NATURALES"</b>					
<b>Tipo de Muestra</b>		<b>Composición del gas de combustión en ppm (partes por millón) a diferentes temperaturas de ensayo</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)	<b>Monóxido de carbono</b>	<b>10*</b>	<b>50*</b>	<b>500*</b>	<b>1000*</b>
	Estireno monómero	50	100	500	50
	Otros componentes aromáticos	trazas	20	20	10
	Bromuro de hidrógeno	10	15	13	11
EPS tipo "P" (estándar)	<b>Monóxido de carbono</b>	<b>50*</b>	<b>200*</b>	<b>400*</b>	<b>1000*</b>
	Estireno monómero	200	300	500	50
	Otros componentes aromáticos	trazas	10	30	10
	Bromuro de hidrógeno	0	0	0	0
Madera de pino	<b>Monóxido de carbono</b>	<b>400*</b>	<b>6000**</b>	<b>12000**</b>	<b>15000**</b>
	Componentes aromáticos	no detectado	no detectado	no detectado	300
Placas de corcho expandido	<b>Monóxido de carbono</b>	<b>1000*</b>	<b>3000**</b>	<b>15000**</b>	<b>29000**</b>
	Componentes aromáticos	trazas	200	1000	1000
Madera aglomerada	<b>Monóxido de carbono</b>	<b>14000**</b>	<b>24000**</b>	<b>59000**</b>	<b>69000**</b>
	Componentes aromáticos	trazas	300	300	1000

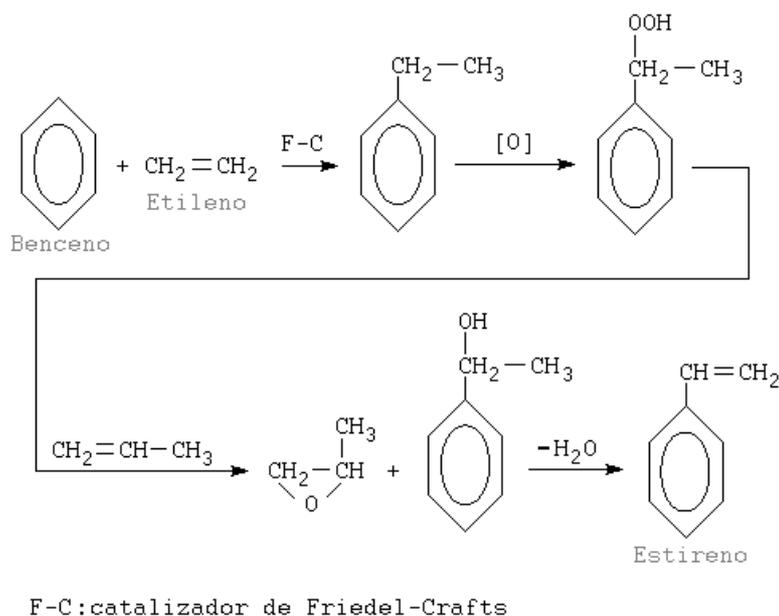
\*ardiendo sin llama      \*\*ardiendo con llama      Nota: Condiciones de ensayo según DIN 53436  
 Índice de flujo de aire: 100 l/h. Probetas de: 300x15x20 mm comparadas en condiciones normales de uso final

## 1.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN.

El poliestireno es un polímero que se obtiene por un proceso denominado polimerización, que consiste en la unión de muchas moléculas pequeñas para lograr moléculas muy grandes.

Se prepara calentando el etilbenceno (**C<sub>6</sub> H<sub>5</sub> – CH<sub>2</sub> - CH<sub>3</sub>**) en presencia de un catalizador para dar lugar al estireno (**C<sub>6</sub> H<sub>5</sub> – CH = CH<sub>2</sub>**). El esquema de la obtención del estireno se muestra en la figura 1.7. La polimerización del estireno requiere la presencia de una pequeña cantidad de un iniciador, entre los que se encuentran los peróxidos, que opera rompiéndose para generar un radical libre. Este se une a una molécula de monómero, formando así otro radical libre más grande, que a su vez se une a otra molécula de monómero y así sucesivamente. Finalmente se termina la cadena por reacciones tales como la unión de dos radicales, las cuales consumen pero no generan radicales. La sustancia obtenida es un polímero y los compuestos sencillos de los que se obtienen se llaman monómeros.

<sup>9</sup> Fuente: [www.aape.com.ar](http://www.aape.com.ar)

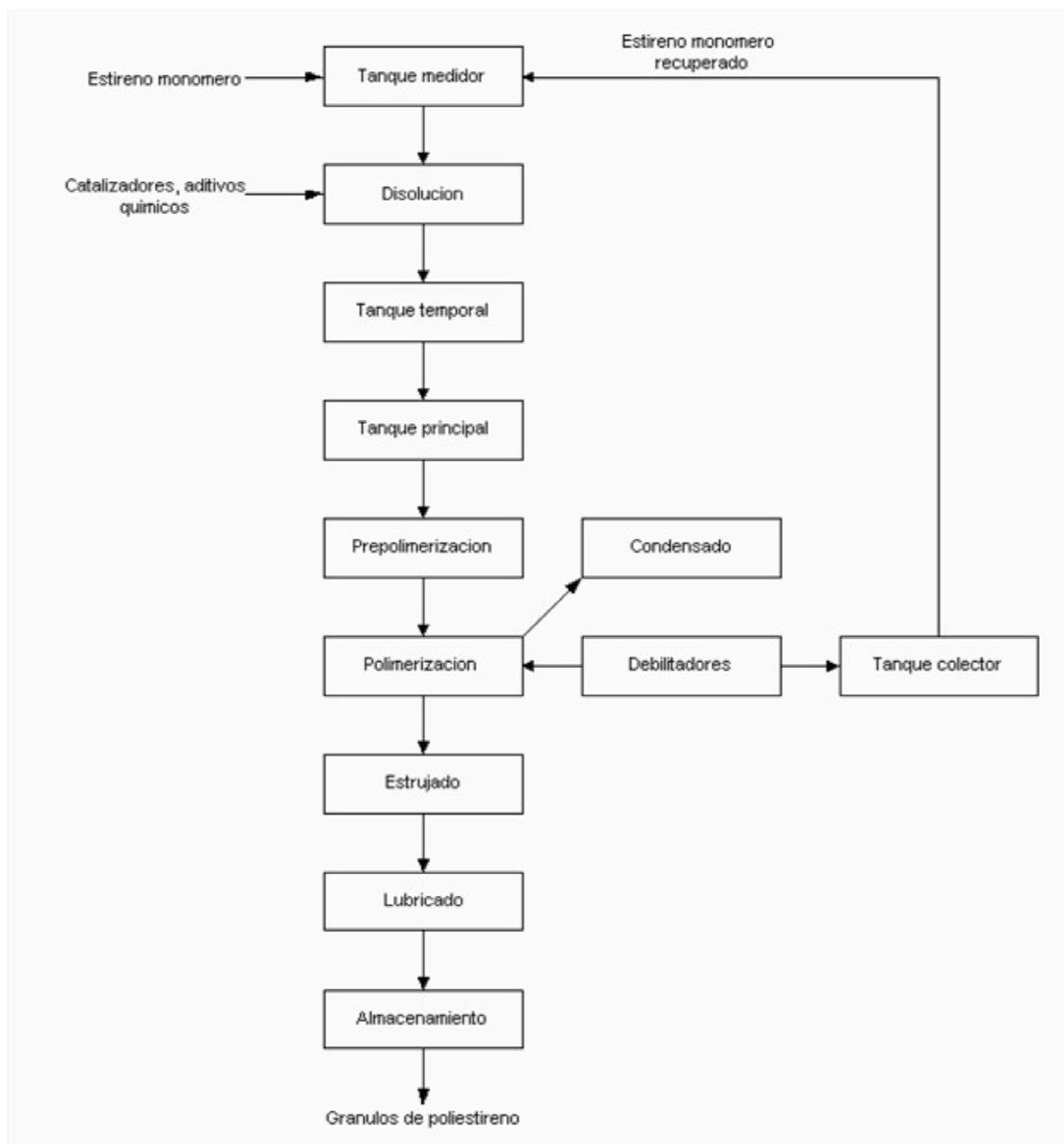


**Figura 1. 7** Esquema de la obtención del estireno.<sup>10</sup>

#### 1.4.1 OBTENCIÓN DEL POLIESTIRENO

El estireno monómero y los aditivos químicos son alimentados continuamente a un tanque de polimerización con un agitador donde los procesos de prepolimerización y la polimerización son iniciados, hasta que aproximadamente el 90% del compuesto es convertido en solución. La solución, conteniendo el polímero, es bombeada hacia un desvolatizador, donde los residuos del estireno monómero que no reaccionaron son vaporizados, condensados y reciclados continuamente tras la primera etapa de polimerización. El poliestireno fundido fluye del alimentador de base cónica del desvolatizador dentro de un moldeador que moldea, refrigera, seca y filtra el poliestireno en forma de píldoras o comprimidos. Luego, los comprimidos de poliestireno son transportados a los depósitos de almacenamiento, todo este proceso se representa en la figura 1.8.

<sup>10</sup> Fuente: <http://www.politekh.com/index.html>



**Figura 1. 8** Diagrama de flujo de obtención del Poliestireno.<sup>11</sup>

### 1.4.2 ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIESTIRENO

El proceso de transformación de la materia prima (poliestireno expandible) transcurre fundamentalmente en tres etapas:

#### 1ª Etapa: Pre expansión

La materia prima se calienta en unas máquinas especiales denominadas preexpandores, con vapor de agua a temperaturas situadas entre aprox. 80 y

<sup>11</sup> Fuente: UNAM

110°C. 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>. En el proceso de preexpansión, las perlas compactas de la materia prima se convierten en perlas de plástico celular con pequeñas celdillas cerradas que contienen aire en su interior.

### **2ª Etapa: Reposo intermedio estabilización**

Al enfriarse las partículas recién expandidas crean 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 preexpandido en sitios ventilados. Al mismo tiempo se secan las perlas.

### **3ª Etapa: Expansión y moldeo final**

En esta etapa las perlas preexpandidas y estabilizadas se transportan a unos moldes agujereados en el fondo, la parte superior y los laterales, con el fin de que pueda circular el vapor donde nuevamente se les comunica vapor de agua y las perlas se ablandan, el Pentano se volatiliza y el vapor entra de nuevo en las cavidades. En consecuencia, las perlas se expanden y se sueldan entre sí.

Durante la operación se aplican ciclos de calentamiento y enfriamiento, cuidadosamente seleccionados 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.

De esta forma se pueden obtener grandes bloques (que posteriormente se mecanizan en las formas deseadas como planchas, bovedillas, cilindros, etc.) o productos conformados con su acabado definitivo.

## **1.5 APLICACIONES**

El EPS es uno de los termoplásticos más versátiles por lo que tiene aplicación en varios sectores como los siguientes:

- Edificación
- Fundición
- Vivienda
- Especialidades Industriales
- Cuerpos Moldeados
- Envases

### **1.5.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO COMO MATERIAL DE EMBALAJE Y EMPAQUE:**

El poliestireno expandido es un material que por su bajo peso y gran resistencia, es ideal para la fabricación de empaques y embalajes para los diversos productos de la industria electrónica, farmacéutica, manufacturera, química, artesanal, etc. ya que sirve de colchón y amortiguador de golpes lo que facilita la transportación de los productos que lo requieren.

La posibilidad del EPS de emplearse para la protección, transporte y comercialización de alimentos se debe a que es un material que no favorece el crecimiento de hongos y bacterias que provocan la descomposición orgánica siendo además de olor y sabor neutros.

Además el EPS puede incorporar aditivos para evitar la excesiva carga electrostática favoreciendo su uso en la industria electrónica.

### **1.5.2 EL POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA CONSTRUCCIÓN:**

En el sector de la construcción, tanto en la edificación como en las obras de ingeniería civil, se encuentran numerosas aplicaciones del Poliestireno Expandido-EPS. Placas y paneles de aislamiento termo-acústico, casetones y bovedillas para forjados, moldes de encofrado, juntas de dilatación, elementos decorativos interiores, bloques de EPS para dotar de ligereza a terraplenes de carreteras, pantanales flotantes, islas artificiales, etc. Esta extensa presencia se debe a las extraordinarias cualidades y propiedades de este material entre las que destacan su elevada capacidad de aislamiento térmico, su ligereza, sus propiedades de resistencia mecánica, su adecuado comportamiento frente al agua y resistencia a la difusión del vapor de agua y, en comparación con otros

materiales, su versatilidad en forma y prestaciones que se concretan en una amplia gama.

### **1.5.3 POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA FUNDICIÓN:**

Es importante destacar que el proceso LFC es utilizado mundialmente para la fabricación de piezas con requerimientos dimensionales y geométricos especiales con gran versatilidad en cuanto al diseño; ya que pueden ser fundidas piezas complejas que no podrían ser fundidas con otras técnicas. Las piezas fundidas por la técnica de LFC presentan un buen acabado superficial y unas tolerancias dimensionales muy estrechas logrando una calidad insuperable por otras técnicas de fundición.

Solo alrededor de 32 plantas de fundición a nivel mundial tienen implementado este proceso de manera eficiente, en países como Francia, Japón Canadá y Estados Unidos. Cobral Ltda. es la única planta de FEP en Latinoamérica.

Desde un principio el principal campo de aplicación fue el de la industria del automóvil. Así, se producen cabezotes, culatas, block de motores, bombas, autopartes, discos y campanas de freno. Muchos fabricantes producen piezas con modelos de EPS siendo las ventajas notorias. Últimamente se ha producido la extensión desde la industria del automóvil a otros sectores que precisan de piezas o componentes de fundición (véase figura 1.9) como son la aeronáutica, acuática, electrónica, armamentista, transporte de fluidos, hidrantes, ductos entre otras.



**Figura 1. 9.** Aplicaciones varias del Poliestireno en la fundición.<sup>12</sup>

Otra gran aplicación es la escultura ya que en este caso, el modelo perdido, y con respecto a la cera, no solo permite la supresión del molde negativo, sino que

<sup>12</sup> Fuente: <http://www.lostfoam.com/index.php>

prescinde de todo un repertorio de operaciones tediosas como la elaboración de una forma madre, la preparación del molde por pieza, la fabricación del macho, el vertido de la cera y la eliminación de la misma, la cocción del molde, etc.

## **1.6 MÉTODO DE MOLDEO**

### **1.6.1 EL PROCESO LOST FOAM CON MODELOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Como sucede con muchas otras tecnologías, los procesos de fundición han avanzado mucho en los últimos años al incorporar a los mismos algunos de los resultados de la investigación en ingeniería. En este camino solamente han conseguido sobrevivir los mejores métodos, entre ellos el denominado **lost foam**, y que está basado en la utilización de modelos no permanentes de poliestireno expandido (EPS).

Este proceso presenta algunas similitudes con el proceso a cera perdida, pues ambos utilizan modelos perdidos, pero mientras que la cera se funde y por tanto no se destruye, el EPS desaparece completamente por vaporización en la etapa de colada.

El Proceso de fundición con Poliestireno expandido, en palabras simples, consiste en la obtención de una pieza metálica a partir de un modelo de espuma de poliestireno expandido. El proceso se describe en la figura 1.10.

(1) El modelo se recubre con un compuesto refractario; (2) el modelo de espuma se coloca en la caja del molde y la arena se compacta alrededor de este y (3) se vacía el metal fundido en la parte del patrón que forma la copa de vaciado y el bebedero. Al entrar el metal en el molde la espuma de poliestireno se vaporiza y deja que el metal llene su lugar en la cavidad.

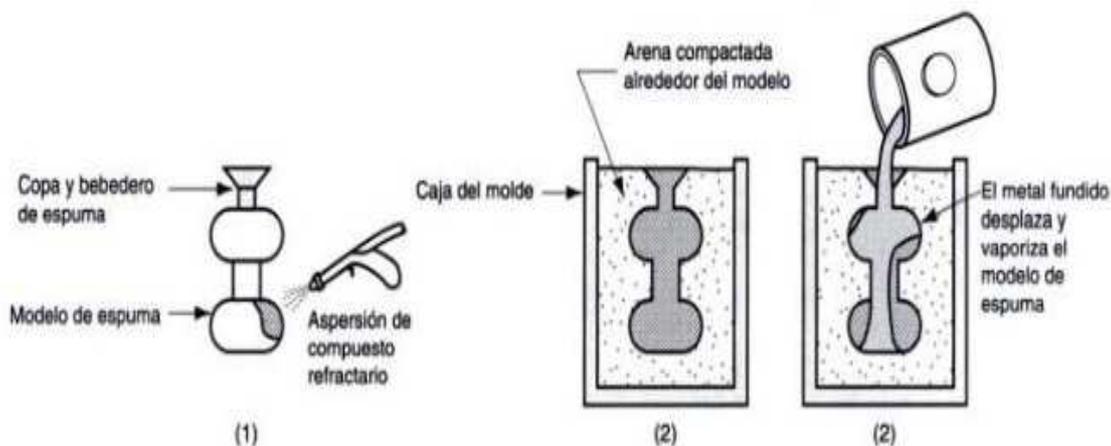


Figura 1. 10 Esquema proceso de fundición.<sup>13</sup>

### 1.6.2 PROCEDIMIENTO

En primer lugar se necesitan obtener los modelos de Poliestireno expandido, en este proceso, se colocan perlas (o pellets) de poliestireno crudo desechable (EPS), conteniendo de 5 a 8% de pentano (un hidrocarburo volátil), en una matriz precalentada que por lo general está hecho de aluminio.

El poliestireno se expande y toma la forma de la cavidad de la matriz; se aplica más calor a fin de fundir y unir las perlas entre sí. La matriz se deja enfriar y luego se abre, retirándose el modelo de poliestireno. Para piezas con mayor complejidad es posible unir varias secciones de modelos individuales utilizando un adhesivo de fusión en caliente.

El modelo de poliestireno incluye bebedero de colada, el sistema de vaciado y las mazarotas, y también puede contener almas (si se necesitan), eliminando así la necesidad de hacer almas por separado.

Los modelos se recubren normalmente con un compuesto refractario para darle una superficie más lisa al patrón y mejorar su resistencia a la alta temperatura, luego se seca y se coloca en una caja de moldeo. La caja se llena de arena suelta y fina, que rodea y soporta el modelo y puede secarse o mezclarse con agentes aglutinantes para darle resistencia adicional.

<sup>13</sup> Fuente: Fundamentos de manufactura moderna Autor Mikell P. Groover

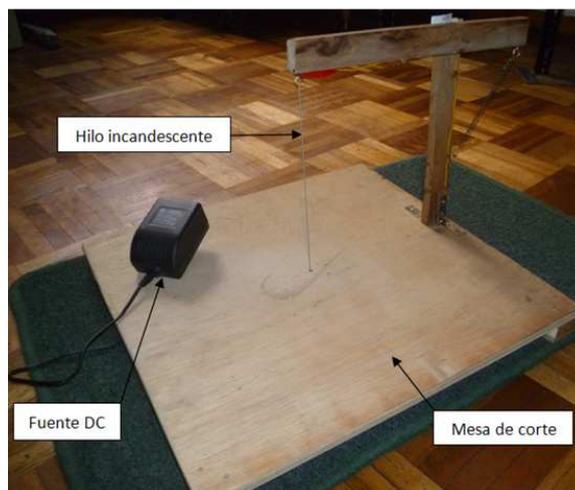
La arena es compactada de manera periódica utilizando diversos medios. Una vez compactada la arena, se realiza el vaciado del metal líquido dentro del molde sin extraer en ningún momento el modelo de poliestireno recubierto con pintura refractaria.

Cuando se realiza el vaciado; el metal fundido evapora la espuma, los gases generados se liberan a través de la arena y el metal solidifica tomando el lugar donde estaba ubicado el modelo. Finalmente, la arena es retirada mediante basculado del recipiente; momento en el cual es retirada la pieza. La arena pasa a un sistema de enfriamiento para recircularla.

Otra posibilidad de obtener el modelo es el siguiente el cual se utilizara en este proyecto:

#### 1.6.2.1 Laminado y corte del poliestireno

El laminado y corte de poliestireno se lo hace proporcionando Intensidad de corriente a una aleación de Níquel-Cromo (80-20) denominado hilo de resistencia eléctrica, la figura 1.11 muestra una instalación pequeña para corte de poliestireno.



**Figura 1. 11** Instalación pequeña para corte de poliestireno.

El laminado y corte consiste en hacer pasar una sección de poliestireno por el hilo de resistencia eléctrica siendo el poliestireno cortado por la alta temperatura que tiene el hilo, en algunos casos la sección de poliestireno tiene un movimiento

relativo respecto del hilo incandescente en otros casos el hilo de resistencia eléctrica tendrá un movimiento relativo respecto de la sección de poliestireno, en este proyecto se tendrá el primer caso.

Para obtener un corte óptimo se debe tomar algunos parámetros como son:

- La densidad del material
- La velocidad de corte
- El tipo de hilo a utilizarse: Aleación Ni-Cr 80-20
- La intensidad de corriente suministrada.

Estos parámetros se relacionan entre sí, por ejemplo con el aumento de la densidad del material la velocidad de corte disminuye, así mismo si se emplea un hilo de corte de mayor diámetro se logra incrementar la velocidad de corte por cuanto la temperatura del hilo es mayor, debido a que a mayor diámetro del hilo la resistencia es menor. Esto se justifica con la ecuación:

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (1)$$

Donde:

R: Resistencia del hilo de corte [m]

$\rho$ : Resistividad del hilo de corte

l: Longitud [m].

A: Área en [m<sup>2</sup>].

Pero según la ley de Ohm la corriente es igual al cociente entre el voltaje y la resistencia, así;

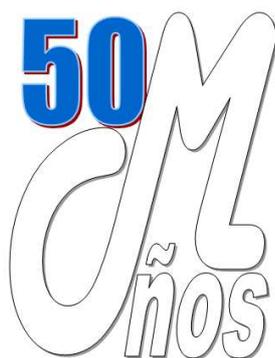
$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Mientras que la resistencia disminuye la intensidad de corriente es mayor, generándose de esta forma un problema, porque se tiene elevada corriente y se necesita elementos que trabajen a alta corriente. De la misma forma si se

aumenta el voltaje se tiene una elevada corriente, de manera que se debe encontrar condiciones de equilibrio entre estos parámetros.

Para este proyecto se dispone de un transformador regulable DC que suministra 3-12 voltios y un amperaje de 1700 mA, el  $\emptyset$  hilo =0.25mm, la resistencia es 11.83  $\Omega$  y la velocidad de corte es de 2 mm/seg.

#### 1.6.2.2 Construcción del modelo.



**Figura 1. 12** Modelo gasificable.

- Se diseña el modelo a replicarse en computadora (figura 1.12).
- Se imprime el diseño en una cartulina gruesa fácil de recortar.
- Se recorta el diseño dejando las comunicaciones por donde fluirá el metal fundido.
- Se coloca el diseño encima del poliestireno expandido y se procede a cortar con el alambre de nicron en la mesa de elaboración de modelos antes señalada.
- Se lija el modelo de poliestireno expandido con lija de grano N° 400 obteniendo el modelo listo para iniciar el proceso de fundición.
- Se elabora el sistema de alimentación con el mismo proceso de corte y se lo pega al modelo con silicona líquida, obteniendo el modelo listo para el recubrimiento de pintura refractaria, moldeo en arena y colado del metal.

### **1.6.3 VENTAJAS DEL PROCESO LOST FOAM**

- Como en todos los procesos que utilizan modelos perdidos, se evita el problema del almacenaje de los modelos.
- La precisión de las piezas coladas es grande, ya que la utilización del EPS permite tolerancias muy ajustadas.
- Sencillez en sus etapas y posibilidad de reciclado lo que supone un ahorro en algunos de sus materiales.
- Se facilita el reciclado de la arena debido a la ausencia de aglutinante
- La cantidad de arena empleadas es, generalmente, menor que en un método tradicional.
- No es necesaria la utilización de machos y la intervención del personal especializado en su producción.
- Los modelos pueden prepararse uniendo partes más sencillas con adhesivos adecuados.
- Facilidad de automatización lo que supone una disminución de costes de operación y defectos en modelos moldes y piezas.
- Mejores condiciones de acabado superficial que con el moldeo de arena superficial, y ausencia de rebabas y líneas de partición en la pieza final.
- Libertad de diseño, siendo esta prácticamente ilimitada.
- Posibilidad de incorporar insertos metálicos en la pieza de fundición

### **1.6.4 DESVENTAJAS DEL PROCESO LOST FOAM**

- Se requiere sumo cuidado en los parámetros iniciales del proceso
- Hay que controlar variables presentes en el colado (gases)
- El modelo es destruido en el proceso de fundición.
- Los modelos son más delicados en su manejo.
- No se puede utilizar equipo de moldeo mecánico.
- No se puede revisar el acabado del molde.
- Se necesita un nuevo patrón para cada fundición.

## CAPÍTULO 2

### MEZCLAS DE MOLDEO

#### 2.1 MATERIALES PARA MOLDEAR.

Los materiales iniciales se dividen en dos grupos:

- **Principales.**

Son indispensables en la mezcla y son: Base refractaria (Arena base), aglutinantes (arcillas) y aglomerantes (resinas).

- **Auxiliares.**

Son los aditivos (carbón, aserrín, etc.) y sirven para dar a la mezcla de moldeo características predeterminadas.

##### 2.1.1 BASE REFRACTARIA

La arena de moldeo está compuesta de sílice, alúmina y de impurezas inevitables, tales como óxido de hierro, cal, magnesio, álcali, etc. Tal como se muestra en la tabla 2.1, los cuales desempeñan distintas funciones dentro de las mezclas.

El principal componente es la arena base, que otorga la refractariedad. Entre los minerales que pueden ser empleados como arena base se encuentran la sílice, que es muy común en la naturaleza.

**Sílice (Cuarzo).** - Es una composición de silicio y oxígeno,  $\text{SiO}_2$ , denominado Dióxido de silicio. Su unidad estructural es un tetraedro de silicio-oxígeno, en el cual un átomo de silicio se encuentra rodeado de cuatro átomos de oxígeno que ocupan las esquinas del tetraedro. Esta estructura se mantiene unida a través de fuertes enlaces químicos. Puede existir en diferentes formas polimórficas, las cuales corresponden a diferentes combinaciones de los grupos tetragonales con todas las esquinas compartidas. Las tres formas cristalinas básicas son: el cuarzo, la tridimita y la cristobalita.

La sílice representa la parte preponderante de la arena de moldeo. Del tamaño de sus granos depende la distinción de las arenas entre arenas de granos finos, medianos y gruesos. La uniformidad de los granos de la arena es de mucha importancia para la permeabilidad de la misma; la arena uniforme resulta siempre porosa, mientras que mezclando arenas de granos gruesos y finos la permeabilidad disminuye, pues los granos finos rellenan los agujeros que dejan entre sí los granos gruesos.

La sílice resiste temperaturas de hasta 1400°C y se funde a unos 1600°C.

El contenido necesario de sílice en la arena de moldeo depende de la característica de la pieza a fundir; cuanto más gruesas las paredes de las piezas, tanto más elevado debe ser el contenido de sílice en la arena. La proporción normal de sílice en las arenas de moldeo, es de un 80 al 90%.

**Alúmina.** - Es una composición de aluminio y oxígeno  $-Al_2O_3$ . Está contenida en las arenas naturales en forma de arcilla y es la sustancia aglomerante; al mojarla obra como material de liga, manteniendo compactos los granos de sílice. En consecuencia, si la cantidad de arcilla es pequeña en la arena de moldeo, los moldes no tienen una resistencia suficiente y se desmoronan; por otra parte, si la cantidad es demasiado elevada, disminuye la permeabilidad de la arena.

Como se ha dicho antes, al humedecerse la arcilla se pone plástica, dando a los granos de arena una elevada fuerza adhesiva. Por otra parte, al perder la arcilla su humedad se pone dura y rígida, desapareciendo completamente su plasticidad.

Puesto que las arcillas contenidas en las arenas naturales de moldeo tienen puntos de fusión que oscilan entre 1250 y 1400°C, vale decir, que se funden a temperaturas más bajas que el cuarzo, son en realidad las arcillas las que determinan el grado de refractariedad de las arenas de moldeo.

**Oxido de hierro.** - Se encuentra en todas las arenas y determina el color de las mismas. Es perjudicial en proporciones mayores y aumenta el peligro de que los moldes se vitrifiquen. Es una de las llamadas sustancias *fundentes*: si el contenido del óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ) sobrepasa el 6%, debe tratarse la arena con

ácido clorhídrico para poder utilizarla. En caso contrario se corre el riesgo de obtener piezas de fundición defectuosas.

El contenido máximo de óxido de hierro admitido en la arena es normalmente de un 4%.

**Cal.** - Es una composición de oxígeno y de calcio (óxido de calcio CaO). Es también un fundente y es considerado como impureza de las arenas. Una arena de buena calidad no debe contener más del 2,5% de cal.

**El feldespato.**- es un mineral compuesto por silicatos de aluminio, presentes en la arcilla con granulometría muy fina, tiene la estructura análoga a la forma cristalina de la sílice, pero difiere de esta, en que los átomos de silicio en algunos tetraedros son remplazados por átomos de aluminio. Tienen un punto de fusión alrededor de los 1350°C. Se comportan como fundentes, siendo inertes y solo en cocción reaccionan con las partículas arcillosas, entrando formar parte de la estructura cristalina del material cocido y ayudan a la formación de fases vítreas.

**Magnesio, álcali, potasa, etc.** - Obran como fundentes y reducen la propiedad refractaria de la arena. El contenido debe ser lo más reducido posible; el límite máximo para magnesio es de 2,5%, y para álcali de 0,75% al 1%.

**Tabla 2. 1** Composición química de una arena base óptima.<sup>14</sup>

Sílice	SiO <sub>2</sub>	85%
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10%
Cal	CaO	2%
Álcali	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	1%
Sesquióxido de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2%

### 2.1.2 TIPOS DE ARENA BASE

**ARENA:** Es un material granular, resultante de la desintegración de las rocas. El diámetro de los granos puede variar entre 0.05 a 2.0 mm (6 a 270 mallas).la mayoría de arenas de fundición se componen de cuarzo y sílice.

<sup>14</sup> Fuente: Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones – Arenas de moldeo en fundiciones férreas, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, España, 2008.

Para clasificar las arenas se consideran varios factores. Una primera clasificación puede basarse en su contenido de arcilla y en él se distinguen cuatro grupos:

- Arenas arcillosas o tierras grasas, cuyo contenido de arcillas es superior al 18%.
- Arenas semigrasas, cuyo contenido de arcilla va del 8 a 18%.
- Arenas magras, cuyo contenido de arcilla va del 5 al 8%.
- Arenas silíceas o sintéticas, cuyo contenido de arcilla es inferior al 5%.

Una segunda clasificación puede hacerse según la forma del grano:

- Arena de grano esferoidal o redondo.
- Arena de grano angular.
- Arena de grano compuesto.

Otra clasificación según su clasificación en el molde es:

- Arenas de cara o de careo.
- Arenas de relleno.
- Arenas para corazones o machos.

#### **2.1.2.1 Arenas naturales**

Es la obtenida de depósitos naturales debido a la alteración de rocas feldespáticas caracterizadas por la materia arcillosa que envuelve a los granos de arena. Las arenas naturales contienen altos porcentajes de arcilla entre 5 a 20% que no es refractaria.

Se caracterizan por las grandes cantidades de finos que aumentan con su uso en la fundición, lo que provoca un aumento en la cantidad de agua para su preparación, disminuyendo la permeabilidad y punto de fusión de la arena.

Además puede contener cantidades variables de sustancias o materiales como:

- Carbonato de calcio o magnesio
- Oxido de hierro

- Mica
- Sales de sodio y potasio

### **2.1.2.2 Arenas sintéticas**

Las arenas sintéticas son aquellas que para propósitos de fundición se mezclan enriqueciéndolas con diferentes aditivos y aglutinantes especiales, con los que se les imparte mejores propiedades de plasticidad, moldeabilidad y resistencia a la temperatura, ya que se encuentran libres de arcilla y de materias orgánicas.

Son más económicas que las naturales, presentan mayor uniformidad en el tamaño y distribución de grano, por lo cual pueden controlarse más eficientemente. Tienen una mayor permeabilidad ya que los moldes pueden apisonarse más fuertemente, reduciendo el problema de arrastre de arena, fracturas y otros defectos asociados con los aprietes flojos. Se pueden obtener piezas dentro de márgenes más estrechos de exactitud en las dimensiones del modelo.

Las arenas sintéticas tienen más alta refractariedad, por lo cual se obtienen piezas más limpias y permite elevar a altas temperaturas el metal para el vaciado de piezas con espesores pequeños. Son más durables y económicas ya que para su reacondicionamiento se requiere adiciones bajas de aglutinantes.

### **2.1.2.3 Arena de zirconio**

La arena de zirconio  $ZrSiO_4$  posee buena conductibilidad térmica y alta densidad, no se adhiere a la superficie de las molduras. Su temperatura de fusión es mayor de 2400°C.

La arena de zirconio cuesta más que la sílice y por eso se emplea para la preparación de mezclas de revestimiento y para machos de molduras de importancia, como también para pinturas de moldeo para molduras grandes. A causa de su mayor conductibilidad térmica la arena de zirconio favorece al enfriamiento más rápido de la moldura en comparación con la cuarzosa, lo que da la oportunidad de regular el proceso de solidificación y enfriamiento de la moldura.

#### **2.1.2.4 Arena olivinítica**

La olivinita es un silicato de magnesio  $Mg_2SiO_4$ . El poder refractario es de 1750-1830°C. Las arenas oliviníticas por su eficiencia y costo ocupan un lugar intermedio entre las de zirconio y de cuarzo. La utilización más eficaz es en la producción de molduras de acero mangánico, para disminuir la rugosidad de la superficie de las molduras.

#### **2.1.2.5 La cromita**

La cromita  $FeO-Cr_2O_3$  molida se introduce en la composición de la mezcla de revestimiento, empleada para los moldes de grandes molduras de acero. La temperatura de fusión está entre 1450-1850°C, disminuye al aumentar el contenido de óxidos de hierro. Se utiliza en forma de polvo tamizada a través de mallas de 1,5 mm, no debe contener impurezas que reduzcan el poder refractario. La cromita se emplea para preparar mezclas de revestimiento de moldeo y para machos, como también pinturas al elaborar moldes para grandes piezas de acero.

Las propiedades naturales de la cromita son:

- Alto poder refractario.
- Volumen constante al calentarse
- Ausencia de afinidad química con el óxido de hierro.
- Obtención de molduras con menor rugosidad de la superficie.

#### **2.1.2.6 La magnesita**

La magnesita  $MgCO_3$  después de tostación tiene una temperatura de fusión de 2800°C. En la composición de la magnesita además de  $MgO$ , el cual se obtiene después de la tostación, entran impurezas: el carbonato de calcio, hierro, cuarzo y talco. Cuanto mayor es el contenido de  $MgO$  en la magnesita, tanto mayor es su poder refractario. La magnesita no entra en reacción con los óxidos mangánicos, se utiliza para preparar mezclas de revestimiento al fundirse acero alto en manganeso.

### 2.1.2.7 La chamota

La chamota  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  es una arcilla refractaria previamente tostada, tiene un elevado poder refractario 1670-1750°C. La chamota se emplea para elaborar moldes secos de grandes molduras de acero.

### 2.1.3 AGLUTINANTES

Un aglutinante se define como un material que tiene la propiedad de unir los granos de arena para proporcionarles resistencia.

Este material permite conferir cohesión y plasticidad a una mezcla en determinadas proporciones con arena y agua. La adhesión es una característica de los aglutinantes, ya que forman películas alrededor de los cuerpos extraños (arena) y se adhieren a ellos cuando son mezclados con una cantidad de agua en proporciones bien definidas.

Los aglutinantes deben satisfacer las siguientes exigencias:

- Distribuirse uniformemente por la superficie de las arenas de moldeo al preparar las mezclas de moldeo
- Asegurar la suficiente resistencia en estado húmedo y seco.
- Darle a la mezcla plasticidad para que esta llene todas las cavidades del molde.
- No adherirse al modelo y a la caja de machos
- Favorecer al rápido secado del macho y el molde y no absorber la humedad durante el montaje del molde y almacenamiento de los machos en el depósito.
- No desprender muchos gases durante el secado y vaciado del metal en el molde, asegurar la compresibilidad del molde y el macho.
- No disminuir el poder refractario de la mezcla de moldeo y no aumentar las costras de fundición en las molduras.
- Favorecer la fácil extracción del macho de la moldura.
- No ser nocivo para los operarios, ser de bajo costo y no escasos.

A continuación se detallaran los más utilizados:

### 2.1.3.1 Bentonita sódica.

Es un aglutinante inorgánico cuya finalidad es ligar o unir la arena del sistema en verde, eleva la resistencia a la compresión en verde, en seco y en caliente; previene la erosión y el corte y permite la expansión de la arena sílice. El análisis químico se muestra en la siguiente tabla.

Los efectos sobre las propiedades mecánicas son:

Resistencia a la compresión en verde	aumenta
Resistencia a la compresión en seco	aumenta
Resistencia a la compresión en caliente	aumenta

### Análisis Químico típico.

**Tabla 2. 2** Análisis químico de la Bentonita sódica<sup>15</sup>

SiO <sub>2</sub>	60 - 62%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21 - 23%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.4%
Na <sub>2</sub> O	2.5 - 2.7%
MgO	0.5 - 1.5%
KO <sub>2</sub>	0.4 - 0.45%
H <sub>2</sub> O contenido (en la mezcla)	5.0 - 9.0%

### 2.1.3.2 Bentonita cálcica.

Es un aglutinante mineral que se utiliza fundamentalmente para unir la arena del sistema, eleva la resistencia a la compresión en verde y moderadamente en seco y en caliente. Proporciona alta resistencia en verde y baja en seco y en caliente; promueve mejor la fluidez que la bentonita sódica. El análisis químico se muestra en la tabla 2.3.

<sup>15</sup> Fuente: Diseño y Fabricación de Modelos para Fundición; Avendaño Garrido Héctor Miguel, De La Luz Hernández Martín; Instituto Politécnico Nacional; Unidad Profesional Azcapotzalco; ESIME.

Los efectos sobre las propiedades mecánicas son:

Resistencia a la compresión en verde	aumenta
Resistencia a la compresión en seco	aumenta
Resistencia a la compresión en caliente	aumenta

### Análisis Químico típico

**Tabla 2. 3** Análisis químico de la Bentonita cálcica<sup>16</sup>

SiO <sub>2</sub>	56 - 59%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18 - 21%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4 - 9.1%
MgO	3 - 3.3%
CaO	1.2 - 3.5%
Na <sub>2</sub> O	0.34 - 4.6%
H <sub>2</sub> O contenido (en la mezcla)	5.0 - 8.0%

#### 2.1.3.3 El caolín

Es otro material refractario que se utiliza como enlazante en las mezclas de moldeo, tanto crudo como calcinado, es una arcilla primaria de color blanco que posee alta refractariedad. Sus dos principales minerales constituyentes son la caolinita y la haloisita, posee una plasticidad moderada y una alta contracción durante el secado y la calcinación. Debido a su alta pureza posee un alto punto de fusión y es la más refractaria de todas las arcillas.

**La caolinita.**- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*2SiO<sub>2</sub>\*2H<sub>2</sub>O es un silicato acuoso de aluminio cuya estructura cristalina consiste de una capa tetraédrica de sílice y una capa octaédrica de alúmina, combinadas de tal forma que construyen una unidad en donde las puntas de los tetraedros de sílice forman una capa común con una de las capas de la lamina octaédrica de alúmina, es combinada con la bentonita en la construcción de moldes, posee una alta refractariedad, baja plasticidad y poca durabilidad, su uso mejora la resistencia en caliente del molde y permite variar el

<sup>16</sup> Fuente: Diseño y Fabricación de Modelos para Fundición; Avendaño Garrido Héctor Miguel, De La Luz Hernández Martín; Instituto Politécnico Nacional; Unidad Profesional Azcapotzalco; ESIME.

contenido de agua en grandes intervalos. Su temperatura de fusión está entre 1750-1787°C. La caolinita es la parte principal de las arcillas caoliníticas.<sup>17</sup>

#### 2.1.3.4 El cemento portland

El cemento Portland es un compuesto formado por el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrita tetracálcico. La composición química del silicato de calcio hidratado es variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>), en una proporción sobre el orden de 3 a 2.

**Proceso cemento Portland:** Es de proporción de 1 a 10 para moldes de alta resistencia y buena permeabilidad. En la pasta de cemento ya endurecida, las partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La resistencia que se alcanza en las mezclas es gracias a la formación del hidrato de silicato de calcio que se forma. Este es un proceso antiguo que proporciona resistencia a la erosión, pandeo, su uso es en fundiciones grandes y pesadas.

El cemento Portland es una mezcla heterogénea de cinco compuestos con las siguientes composiciones según Pollard y Mollah, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2. 4** Composiciones del cemento Portland.<sup>18</sup>

Silicato tricálcico	Silicato Dicálcico	Aluminato Tricálcico	Alumino ferrita	Yeso
50-70 %	2-30 %	5-12 %	5-12 %	≈ 4 %

#### 2.1.3.5 Dextrina

Es una goma de carbohidratos soluble y que sirve como aglomerado, en seco, su finalidad es reducir la fragilidad y el desmoronamiento en mezclas de arena para

<sup>17</sup> Fuente: [www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html](http://www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html).

<sup>18</sup> C.M. Salcines Merino. Mezclas Autofraguantes con vidrio líquido. Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana. Cuba, 1985.

moldeo. Aumenta la resistencia a la compresión en verde, mejora la dureza superficial. El análisis químico se muestra en la tabla siguiente.

Los efectos sobre las propiedades mecánicas son:

Resistencia a la compresión en seco	aumenta
Resistencia a la compresión en caliente	No cambia
Resistencia a la compresión en verde	No varía
Resistencia al corte en seco	aumenta

### Observaciones.

- Disminuye la fluidez de la arena si se usa en exceso
- Disminuye el castrado formación de costras
- Aumenta la tersura del material.
- Origina en la arena que se una más
- Se usa de 0.12 a 1.5% en peso.
- Reduce el secado fuera del molde
- Cuida el ablandamiento por humedad atmosférica
- El total de gases producidos es variable.
- La dextrina soluble emigra hacia el exterior de la orilla del material, produciendo una alta dureza sobre la superficie de la arena.
- Endurece dentro de sacos si se almacena en lugar húmedo.

### Análisis Químico típico

**Tabla 2. 5.** Análisis químico de la dextrina.<sup>19</sup>

Humedad	3.6%
Agua soluble	98%
Azúcar reducida (como dextrosa)	4%

<sup>19</sup> Fuente: Diseño y Fabricación de Modelos para Fundición; Avendaño Garrido Héctor Miguel, De La Luz Hernández Martín; Instituto Politécnico Nacional; Unidad Profesional Azcapotzalco; ESIME

#### 2.1.4 AGLOMERANTES.

El aglomerante es un producto que mezclado con la arena lavada y seca forma una película alrededor de los granos de arena, la cual endurece y los liga entre sí, dando al alma o al molde la resistencia requerida.

Las mezclas preparadas con aglomerantes y arena no tienen cohesión ni plasticidad, como consecuencia su resistencia a las condiciones mecánicas prácticamente es nula. Por lo que para aglomerarse requieren sufrir un cambio termoquímico (fraguado, gaseo o estufado).

Algo que debemos de tener en cuenta en el empleo de aglomerantes es el tiempo de utilización, algunos son de corto tiempo de vida, que garantice su uso; de ahí, que se debe considerar esta apreciación cuando se trata de un producto a importar.

Los aglomerantes se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Inorgánicos.** Silicatos (El más empleado: Silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$ )). Materiales aglomerantes hidrocarbonados como pueden ser alquitrán, betún, etc.
- **Orgánicos.** Aceites vegetales.
- **Resinas.** Termoplásticas; termoendurecibles; autofraguantes

Se detallará únicamente los aglomerantes más utilizados:

##### 2.1.4.1 El yeso

Se obtiene de la roca algez o piedra de yeso. Es un material soluble, y adherente. Resiste a la tracción, a la compresión y al fuego, produce corrosión en el hierro y el acero.

#### **2.1.4.2 Silicato de sodio**

El silicato de sodio es un ligante bien conocido para arenas de moldeo. Es compatible con el almidón y la dextrina utilizados en la preparación de materiales de fundición. Los silicatos reemplazan exitosamente los aceites vegetales y resinas más costosos utilizados para formar ciertos tipos de moldes. Los compuestos de moldes basados en silicatos dan una capa dura a temperaturas moderadas, porosidad apropiada para la liberación de gases calientes y buena colapsibilidad. Para métodos de producción rápida, se aplica silicato de sodio en combinación con reacciones ácidas de gas, se emplean en el proceso común de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). También se pueden lograr moldes de fundición de autoendurecimiento con un ligante hecho de la mezcla de cemento portland o ésteres orgánicos con silicato de sodio.

#### **2.1.4.3 Aceites**

Los aceites pueden ser vegetales y de petróleo. A los aceites vegetales pertenecen al aceite de linaza y el aceite cocido. Estos aceites se emplean en una proporción de 1.5 al 2.0% y se puede mezclar con otros aglutinantes sobre todo para bajar los costos de los aceites. Se tiene de dos tipos fundamentalmente: De fraguado en estufa; de auto fraguado

#### **2.1.4.4 Resinas**

Al utilizar los aglomerantes de tipo aceitoso, es necesario el curado de los moldes y noyos en horno que requieran el gasto de energía y la superficie ocupada por los secadores, así como el tiempo que se tarda el molde en obtener las condiciones de uso. Por esta razón se utiliza cada vez más en la industria de calidad las *resinas sintéticas*. Las resinas pueden ser termoendurecibles o termoplásticas.

Las resinas termoplásticas al calentarse se funden y al enfriarse vuelve a endurecerse.

Las resinas termoendurecibles al calentarse se ablandan al principio y luego a consecuencia de los procesos químicos irreversibles se endurecen. Estas resinas se

utilizan para la elaboración de cáscaras y machos. La ventaja de estas resinas está en el hecho de que el proceso ocurre a alta velocidad y la temperatura relativamente baja (100-105°C).

En la actualidad a más de estas resinas, existen las autofraguantes, básicamente son furánicos, fenólicos, alquídicos-uretano y fenólicos-uretano. Se utilizan no solamente en la elaboración de noyos sino también en moldeo. La ventaja fundamental está en que no requieren de temperatura para producir el curado, tiene alta velocidad de producción y no producen contaminación posterior en las arenas de moldeo.

### **2.1.5 ADITIVOS ESPECIALES**

A los materiales auxiliares para moldear pertenecen los aditivos empleados para mejorar sus propiedades (poder refractario, compresibilidad, desmoldeo, etc.)

**Antiadherentes.**- Se añade a la mezcla con la finalidad de disminuir el contacto metal-molde (costra de fundición). Entre los principales tenemos:

- a. Polvo de carbón mineral, (para fundir hierro colado). Se seca al 120°C antes, el tamaño de grano debe corresponder a un 70% de la criba # 270. El carbón produce CO y CO<sub>2</sub>, los cuales forman una capa intermedia entre las paredes del molde y la masa fundida.

Ejem. 5 a 15 mm: 2-6%

- b. Polvo de carbón vegetal
- c. Grafito en polvo (pinturas de moldes y noyos)
- d. Zirconio Desferrizado (pinturas refractarias de moldes y noyos)

**Orientación térmica.**-Se introducen para crear una solidificación controlada y orientada en la moldura. Se usa la cromita y el aserrín.

- a. Enfriadores: o que aumenta el poder termo acumulativo: Cromita
- b. Retenedores de calor: aserrín, amianto, yeso. Estos aditivos disminuyen el poder termo acumulativo.

Los aditivos son productos que mejoran sus características y mejoran el comportamiento del molde durante la colada. A continuación se detallan algunos.

#### **2.1.5.1 Harina de maíz**

Es un cereal ligado altamente gelatinoso, que es producto de un proceso de molienda de maíz en estado seco y que se usa como aditivo para moldeo de arena en verde y mezclas de careo. Disminuye el abollamiento, las grietas, las costras y la erosión. Aumenta la deformación en verde. Su análisis químico se muestra en la tabla 2.6.

Los efectos sobre las propiedades mecánicas son:

Resistencia a la compresión en verde	aumenta
Resistencia a la compresión en seco	aumenta
Resistencia a la compresión en caliente	aumenta arriba de 260°C y disminuye a 1371- 1403°C

#### **Observaciones.**

- Aumenta la deformación en verde en un 0 a 2%, sin cambio en la resistencia en verde.
- Disminuye la rebaba y las costras.
- Aumenta la demanda de gases, se usa de 0.4 a 1.3% en peso en arenas de careo.
- Aumenta la tenacidad y la plasticidad. De secado rápido en horno, alta absorción a la humedad.
- Aumenta el pandeo y las propiedades en general de las mezclas en corazones.
- Aumenta el desmoronamiento.
- Reduce el porcentaje de secado en ausencia de arcilla refractaria y bentonita en las ligas de arena.

## Análisis químico típico

**Tabla 2. 6.** Análisis químico de la harina de maíz<sup>20</sup>

Humedad	4 a 9%
Ceniza	0.3 a 0.5%
Agua soluble	10 a 27.5%
Dextrina	18 a 24%

### 2.1.5.2 Melazas

Son productos formados en el proceso de la fabricación del azúcar, que se presenta en estado líquido.

Son fuertes estabilizadores de humedad, aumenta la resistencia en seco y reduce la pérdida de resistencia una vez secos los moldes. Se los utiliza por la importancia del azúcar como agente desarenante.

Se los emplea para la mezcla de arena con cereales.

### 2.1.5.3 El polvo de carbón mineral

Se añade a las mezclas para revestimiento o a las básicas al fundir hierro colado. Antes de ser molido, el carbón mineral se seca a una temperatura no mayor de 120°C. al calentar el molde con el metal fundido el polvo de carbón se gasifica y desprende sustancias volátiles, que contienen los gases CO, CO<sub>2</sub>, los cuales forman una capa intermedia de gas entre las paredes del molde y la masa fundida, impide la formación de la costra de fundición.

La cantidad de polvo de carbón que se le añade a la mezcla de moldeo, depende del espesor de la pared de la moldura. Cuanto mayor es el espesor de las paredes de la pieza fundida, tanto más polvo de carbón se añade a la mezcla de moldeo. Por ejemplo, a las mezclas para molduras de paredes delgadas (5-15 mm) se introduce un 2-6% de polvo de carbón mineral, y a las mezclas para las molduras de paredes gruesas un 12%.

<sup>20</sup> Fuente: Diseño y Fabricación de Modelos para Fundición; Avendaño Garrido Héctor Miguel, De La Luz Hernández Martín; Instituto Politécnico Nacional; Unidad Profesional Azcapotzalco; ESIME

#### **2.1.5.4 El mazut**

Se adiciona a la mezcla de revestimiento para evitar la costra de fundición en la superficie de las molduras de fundición y bronce al colarse en arena húmeda. A consecuencia del pequeño contenido de ceniza en el mazut aumenta la vida y la permeabilidad al gas de las mezclas de moldeo.

Se utiliza un mazut que contenga no más del 2% de ceniza, 2% de humedad y no más de un 0.5% de azufre.

#### **2.1.5.5 El polvo de carbón de leña**

Se utiliza como medio antiadherente para el revestimiento de las superficies de los moldes húmedos. El carbón es molido y cernido a través de una malla 01. Se aplica a las paredes de los moldes por medio de empolvamiento.

#### **2.1.5.6 El grafito plateado**

Se emplea para el empolvamiento de las superficies de los moldes húmedos, para disminuir la adherencia de la mezcla a la moldura. Posee un gran poder refractario.

#### **2.1.5.7 El cuarzo en polvo**

Se añade en calidad de material refractario para preparar pinturas antiadherentes para moldes y machos de molduras de acero, en ocasiones se emplea en la composición de las mezclas de revestimiento.

#### **2.1.5.8 El zirconio desferrizado**

Se emplea para la elaboración de pinturas refractarias para moldes y machos de molduras de acero.

#### **2.1.5.9 Aserrín de madera**

Se añade a la mezcla de moldeo para elevar la permeabilidad al gas y la compresibilidad de los machos. El aserrín debe estar seco y pasar por la criba

2.5. Este se quema con el metal vaciado en el molde, aumenta la porosidad, reduce la conductibilidad térmica y disminuye la densidad de la mezcla.

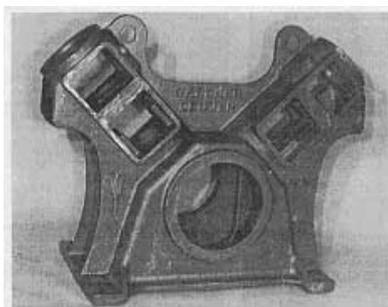
Un resumen de todas las adiciones y su propósito se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2. 7.** Resumen de las adiciones

<b>Propósito de la adición</b>	<b>Sustancia</b>
Aumento de la vida útil y resistencia al secado	Cereales, glicol dietileno
Resistencia en caliente	Oxido de hierro, alquitrán en polvo
Acabado superficial y resistencia a la penetración del metal	Alquitrán de polvo, carbón marino
Inhibir la reacción entre el metal y el molde	Sulfuros, ácido bórico
Colapsabilidad y resistencia de los defectos de expansión	Cereales, aserrín

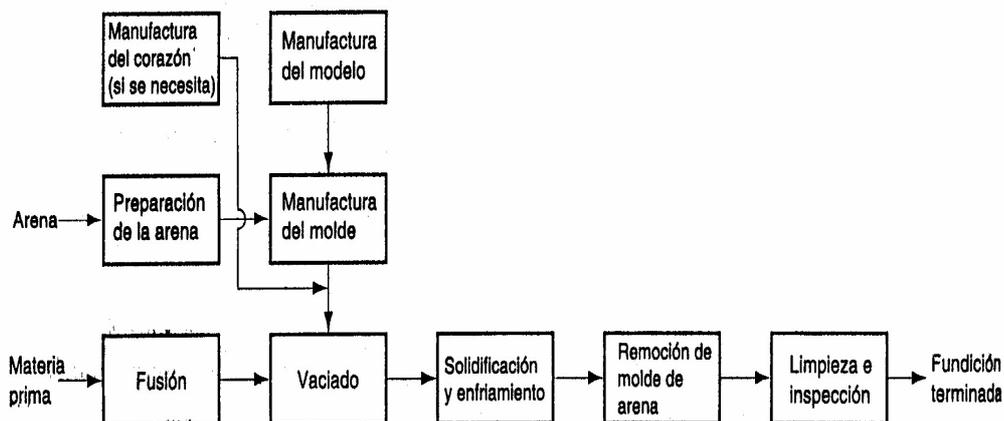
## 2.2 FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición en arena es el proceso más utilizado la mayor parte en fundición. Casi todas las aleaciones pueden fundirse en arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes (véase la figura 2.1) y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.



**Figura 2. 1** Fundición en arena para el cuerpo de un compresor con un peso de 680 Kg (Cortesía de Elkhart Foundry, Foto por Paragon Inc. Elkhart Indiana).

La fundición en arena consiste en vaciar el metal fundido a un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.



**Figura 2. 2** Pasos en la secuencia de producción de la fundición en arena.<sup>21</sup>

Los pasos (figura 2.2) incluyen no solamente las operaciones de fundición si no también la manufactura del modelo y del molde.

Para lograr la producción de una pieza fundida es necesario hacer las siguientes actividades:

1. Diseño de los modelos de la pieza y sus partes internas
2. Diseño del molde
3. Preparación de los materiales para los modelos y los moldes
4. Fabricación de los modelos y los moldes
5. Colado de metal fundido
6. Enfriamiento de los moldes
7. Extracción de las piezas fundidas
8. Limpieza de las piezas fundidas
9. Terminado de las piezas fundidas
10. Recuperación de los materiales de los moldes

<sup>21</sup> Fuente. UMSS – Facultad de Ciencias y Tecnología Ing. Mecánica – Tecnología Mecánica II

## **2.3 TIPOS DE MOLDEO**

### **2.3.1 MOLDEO EN ARENA VERDE**

Se denomina moldeo en verde cuando el estado de la arena en el molde contiene una humedad relativa en toda su masa.

Las ventajas de este moldeo son:

- Es un procedimiento sencillo.
- Son menos costosos
- Son los más ampliamente usados
- Tienen buena retractibilidad, permeabilidad y reutilización
- Se obtiene un enfriamiento rápido de la pieza
- La impresión de la cavidad se obtiene con relativa precisión

Los problemas comunes son:

- La poca resistencia del molde
- No tiene resistencia en la erosión
- Existe un templado superficial en las piezas
- La humedad en la arena puede causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.
- Requiere de mano de obra calificada.

### **2.3.2 MOLDEO EN SECO**

Un molde de arena seca se fabrica con aglomerantes orgánicos en lugar de arcilla. El molde se cuece en una estufa grande a temperaturas que fluctúan entre 204°C y 316°C. El cocido en estufa refuerza el molde y endurece la superficie de la cavidad. El molde de arena seca proporciona un mejor control dimensional en la fundición que los moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca es más costoso y la velocidad de producción es reducida debido al tiempo de secado. Sus aplicaciones se limitan generalmente a fundiciones de tamaño medio y grande y en velocidades de producción bajas.

En los moldes de capa seca, la superficie de la cavidad de un molde de arena verde se seca a una profundidad entre 10 mm y 25 mm, usando sopletes, lámparas de calentamiento u otros medios, aprovechando parcialmente las ventajas del molde de arena seca. Se pueden añadir materiales adhesivos especiales a la mezcla de arena para reforzar la superficie de la cavidad

### 2.3.3 MOLDE NO COCIDO

El proceso consiste en mezclar una resina sintética líquida con la arena, la mezcla se endurece a la temperatura ambiente y a estos procesos se los conoce como curado en frío. El endurecimiento de la mezcla cuando se usan resinas se consigue por polimerización en presencia de un catalizador. Durante este proceso se retícula las moléculas envolviendo los granos de arena y manteniéndolos firmemente unidos.

Las resinas que usan este proceso son:

**a) Resinas Fenólicas.**- se suministran en forma líquida. A través del porcentaje de urea puede influirse sobre las propiedades de las resinas (fragilidad, tiempo de endurecimiento, resistencia, contenido de agua). Las resinas fenólicas puras no suelen emplearse como aglomerante, debido a su alto grado de fragilidad.

Para el moldeado con resina fenólica el proceso es el siguiente:

- Determinar la cantidad de arena sílice para elaborar el molde
- Calcular la cantidad de resina fenólica en proporción a la sílice utilizada, de acuerdo a la siguiente lista:

Resina A = 5% de la masa de arena sílice

Resina B = 20% de la masa de la resina A

Resina C = 10% de la masa de la resina A

- Mezclar los materiales

**b) Resinas Furánicas.**- se encuentran en polvo o en forma líquida, pueden ser de alta viscosidad. El endurecimiento se obtiene por adición de un ácido

moderadamente fuerte, como el ácido p-toluensulfónico (PTS), mezclas de PTS y ácido fosfórico, y ácido fosfórico puro. Con esta mezcla de ácido, arcilla y resina en dos horas el molde se endurece lo suficiente para recibir el metal fundido.

**c) Resinas alquílicas.**- las resinas alquílicas, de uso preferente en la fundición de acero, se elaboran a partir de aceites (aceites de linaza, de madera) y de polialcoholes (glicerina, pentaeritrina). Antes de endurecer son bastantes fluidas.

#### **2.3.4 MOLDEO CON SILICATO DE SODIO.**

En este proceso se utiliza una mezcla de arena y de 1.5 a 6% de silicato de sodio como aglomerante. La mezcla del material de moldeo se endurece por inyección de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , también llamado iniciador. El silicato de sodio reacciona con el dióxido de carbono transformándose en sosa y ácido silícico en forma de gel que provoca la aglutinación de los granos de arena en el molde.

Esta técnica se emplea fundamentalmente en la fabricación de machos y en algunos casos para moldes en la fundición de hierro y metales no férricos para la elaboración de piezas sueltas y en serie de fundiciones de hasta 1000 kg de peso. La mala calidad de las superficies, comparada con la obtenida aplicando otras técnicas de moldeo, puede mejorarse utilizando revestimientos. Este proceso tiene desventajas de menor resistencia, conservabilidad limitada y malas propiedades de desintegración de los moldes y machos, mala regenerabilidad de las arenas usadas.

#### **2.3.5 MOLDEO EN YESO**

El molde se hace de yeso con adición de talco y harina sílice para mejorar la resistencia y controlar el tiempo requerido para el curado del yeso. Estos componentes se mezclan con agua y la mezcla resultante es vaciada sobre el modelo.

Una vez curado el yeso después de 15 minutos se retira el patrón y se deja secar el molde a  $120 - 260^\circ\text{C}$  para eliminar la humedad. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad del mismo y se precalientan hasta

aproximadamente 120°C, luego el metal fundido es vaciado en el molde. Dado que el molde tiene baja permeabilidad, los gases que se forman durante la solidificación del metal no pueden escapar por lo tanto, el metal fundido es colado en vacío o por presión.

Se puede incrementar sustancialmente la permeabilidad del molde utilizando el proceso de Antioch en el cual los moldes se deshidratan en un horno durante 6–12 horas y después se rehidratan en aire durante 14 horas. Otro método de incrementar la permeabilidad es utilizando yeso espumoso que contenga burbujas de aire atrapadas.

Las piezas fundidas tienen detalles finos con buen acabado superficial, dado que los moldes de yeso tienen menor conductividad térmica en comparación con otros, las fundiciones se enfrían lentamente y se obtienen una estructura de grano más uniforme, con menos deformación.

Este proceso por su elevada precisión dimensional y buen acabado superficial se pueden obtener componentes para cerraduras, engranes, válvulas, acoplamientos herramientas y piezas de ornato.

### **2.3.6 MOLDES DE CERÁMICA**

Las fundiciones con moldes cerámicos son similares a las fundiciones con molde de yeso, el modelo se introduce varias veces en una lechada refractaria (yeso con polvo de mármol) la que cada vez que el modelo se introduce este se recubre de una capa de la mezcla, generando una cubierta en el modelo. Posteriormente el modelo se extrae y luego el molde se introduce en un horno con lo que el material refractario se endurece. Así, los moldes cerámicos pueden usarse para fundiciones de acero, hierro y otras aleaciones de alta temperatura. Sus aplicaciones (moldes y piezas relativamente intrincadas) son similares a las de los moldes de yeso excepto por los metales que se funden. Sus ventajas buena precisión y acabado son también similares.

## **2.4 PROPIEDADES DE LAS ARENAS**

Las propiedades de las arenas pueden clasificarse en dos tipos. La primera considera los caracteres estructurales de las arenas y la segunda, las propiedades técnicas.

### **1. Propiedades estructurales**

- Análisis químico
- Contenido arcilloso
- Dimensión de los granos y su distribución
- Forma de los granos

### **2. Propiedades técnicas**

- Refractariedad
- Cohesión o resistencia
- Permeabilidad
- Fluidez
- Moldeabilidad

En este caso vamos a describir las propiedades técnicas dejando para luego las estructurales

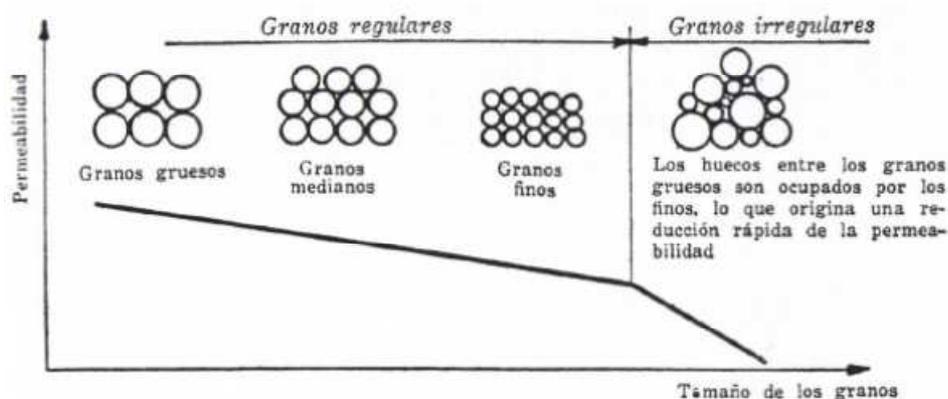
#### **2.4.1 REFRACTARIEDAD**

La refractariedad es la propiedad de soportar altas temperaturas sin mostrar índice de fusión (reblandecimiento) o de descomposición y sin que cambie sus propiedades. La refractariedad está íntimamente ligada con la composición química (tabla 2.8), de manera que una arena que contenga un 99,8% de  $\text{SiO}_2$  o más es considerada altamente estable y altamente refractaria. La presencia de pequeñas cantidades de óxido de hierro, de aluminio, de calcio o de magnesio, es causa fundamental para bajar la temperatura de fusión de la arena y por lo tanto ser causa de menor refractariedad.

**Tabla 2. 8** Refractariedad de la arena base

SiO <sub>2</sub> (%)	T. Fusión(°C)
100	1750
99	1650
90	1350

### 2.4.2 PERMEABILIDAD



**Figura 2. 3** Variación de la permeabilidad respecto al tamaño de grano.<sup>22</sup>

Es la propiedad que permite a la mezcla de moldeo ser atravesada por los gases y posibilita la evacuación de éstos del molde en el momento de la colada. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de gas en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de gas es despreciable. En este caso la porosidad de la arena es la que permite la permeabilidad, y el escape de los gases y vapores formados en el molde.

En la figura 2.3 se observa que a medida que decrece el tamaño de grano su permeabilidad disminuye viéndose afectada la mezcla de moldeo al no dejar escapar los gases producidos en el vaciado del metal fundido en el molde, además una mezcla de granos regulares con granos irregulares no presenta ninguna permeabilidad ya que los intersticios de la arena se ven ocupados por los granos finos e irregulares provocando un sello que no permite el escape de gases, produciéndose con seguridad sopladuras en la pieza.

<sup>22</sup> Fuente. F. R. Morral; Metalurgia general, volumen 2.

### 2.4.3 RESISTENCIA

Este debe resistir los esfuerzos mecánicos a que está sujeto, el molde debe mantener sus dimensiones y formas iniciales, es decir el molde debe tener:

- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la compresión
- Resistencia al corte
- Dureza superficial.

Este tipo de resistencia depende del tamaño, forma y uniformidad del grano de arena además del aglomerante o aglutinante utilizado.

La arena debe ser cohesiva hasta el grado de que tenga suficiente unión, tanto el contenido de agua como el de arcilla, afecta la propiedad de la cohesión.

### 2.4.4 PLASTICIDAD



**Figura 2. 4** Influencia de la arcilla en la plasticidad de la mezcla.<sup>23</sup>

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño y alta capacidad de hinchamiento.

<sup>23</sup> Fuente. F. R. Morral; Metalurgia general, volumen 2.

La plasticidad que debe tener la mezcla para llenar los diferentes detalles del modelo es conocida también como fluidez de la mezcla de moldeo, depende del tamaño y forma del grano de arena base, de su uniformidad. Así como del aglomerante y aglutinante utilizado. Tiene una relación inversa con la aptitud de apisonado como se muestra en la figura 2.4.

#### **2.4.5 MOLDEABILIDAD**

En si esta propiedad es la capacidad que tienen las mezclas para fluir alrededor de lo que se utilice como modelo, es la capacidad de permitir la reproducción de detalles, en conclusión es la facilidad para dar forma.

#### **2.4.6 COLAPSIBILIDAD**

Disminución brusca en el volumen por la adición de agua también es la facilidad para que el molde pueda ser destruido, como por lo general estos moldes son de una solo uso después de colar el metal se debe destruir el molde para sacar la pieza por lo que si debe ser fácil de destruir el molde.

#### **2.4.7 COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Más que la composición química propiamente dicha lo que mayormente interesa es el contenido de arcilla que se halla presente en la arena natural. La tabla siguiente nos presenta esta característica y su clasificación.

**Tabla 2. 9** Clasificación y Composición de las arenas de moldeo.<sup>24</sup>

<b>Arena</b>	<b>Clase</b>	<b>Componente Arcilloso</b>	<b>SiO<sub>2</sub> No menos de</b>	<b>Óxidos de metales alcalinos y alcalinos férricos no más de</b>	<b>Óxidos de hierro Fe<sub>3</sub>O<sub>3</sub> no menos de</b>
Concentrada Cuarzosa	Con 1K	≤ 0.2	98.5	0.4	0.2
	Con 2K	≤ 0.5	98	0.75	0.4
	Con 3K	≤ 0.1	97.5	1.0	0.6
Cuarzosa	1K	≤ 2	97	1.2	0.75
	2K		96	1.5	1.0
	3K		94	2.0	1.5
	4K		90	-	-
Magra	M	2-10	-	-	-
Semigrasa	S	10- 20	-	-	-
Grasa	G	20-30	-	-	-
Muy Grasa	MG	30-50	-	-	-

## 2.5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLA

Método A.F.S.- Se seca una cantidad determinada de arena durante 30 min .a 105°C, luego se pesan 50 gr de arena seca. Los 50 gr se introducen en un vaso normalizado de 1 litro y se lava de acuerdo al procedimiento siguiente:

1. Agregar 475 ml de agua destilada y 25 ml de una solución de sosa cáustica (concentración de 25 gr por litro)
2. Se agita durante 5 m con un agitador eléctrico (figura 2.5).
3. Se diluye con agua destilada hasta una altura de 15.24 cm.
4. Sedimentar durante 10 min.

<sup>24</sup> Fuente: N. D. TITOV, YU. A. STEPÁNOV; Tecnología del proceso de fundición; pág.52; editorial Mir Moscú.

5. Se sifonea 12.7 cm de agua y se diluye nuevamente hasta los 15.24 cm y se deja sedimentar por 5 minutos.
6. Repetir el proceso por lo menos 4 veces de tal modo que después de esperar 5 min el agua esté clara y transparente.
7. Sacar la arena, secar y pesar. Por la diferencia con el peso original se deduce el porcentaje arcilloso de la arena.



**Figura 2. 5** Agitador eléctrico y sifón

### 2.5.1 PORCENTAJE DE ARCILLA DE LAS ARENAS DEL LABORATORIO DE FUNDICION DE EPN.

**Tabla 2. 10** Arena negra del laboratorio de fundición de EPN.

	<b>peso inicial (g)</b>	<b>peso final (g)</b>	<b>% arcilla</b>
<b>1er prueba</b>	50	43,2	13,6
<b>2 da prueba</b>	50	40,5	19
<b>Promedio</b>			<b>16,3</b>

**Tabla 2. 11** Arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN.

	<b>peso inicial (g)</b>	<b>peso final (g)</b>	<b>% arcilla</b>
<b>1er prueba</b>	50	42,6	14,8
<b>2 da prueba</b>	50	43,3	13,4
<b>Promedio</b>			<b>14,1</b>

**Tabla 2. 12** Arena marrón nueva del laboratorio de fundición de EPN.

	<b>peso inicial (g)</b>	<b>peso final (g)</b>	<b>% arcilla</b>
<b>1er prueba</b>	50	48,2	3,6
<b>2 da prueba</b>	50	49,3	1,4
<b>Promedio</b>			<b>2,5</b>

Las tablas anteriores presentan el contenido de arcilla que se encuentra en las arenas respectivas, donde las dos primeras pertenecen al grupo de las semigrasa (10-20% de arcilla) y la última es magra (2-10% de arcilla)

## 2.6 TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DEL GRANO.

### 2.6.1 TAMAÑO DE GRANO DE LA ARENA

Este parámetro es sumamente importante ya que las principales propiedades de la mezcla de moldeo están influenciadas por el tamaño de grano de la arena. Más aún las propiedades de las piezas moldeadas dependen del tamaño de grano y de la uniformidad en la que los granos de arena están distribuidos, ya que por definición la arena tiene granos de tamaño variable entre 0,05 mm y 2 mm.

Una clasificación muy conocida se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 2. 13** Clasificación de los tamaños de Grano

<b>Arena</b>	<b>Índice AFS (i)</b>	<b>Tamaño de granos (mm)</b>
Muy gruesa	18	1-2
Gruesa	18-35	0.5-1
Media	35-60	0.25-0.5
Fina	60-150	0.10-0.25
Muy Fina	150	0.05-0.10

### 2.6.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

El procedimiento que universalmente es aplicado es el método A.F.S. Muchos países han elaborado sus propias normas pero las diferencias establecidas con respecto al método A.F.S. son insignificantes.

El procedimiento establece que se debe tomar el residuo arenoso obtenido en la determinación del contenido de la arcilla de la mezcla de moldeo. Esta cantidad que es pesada se tamiza por 15 minutos en un juego de tamices (figura 2.6).

Luego se pesa el contenido retenido en cada tamiz y se obtiene los porcentajes respectivos. Estos porcentajes multiplicados por un factor de la valorización de

cada tamiz como se muestra en la tabla 2.14, permiten obtener el ÍNDICE DE FINURA AFS de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de finura} = i = AFS = \frac{\sum(\alpha * \%)}{\sum \%} \quad (3)$$

Se puede también trabajar con 50g de arena sin lavar, pero en el informe correspondiente se deberá indicar el particular.



**Figura 2. 6** Aparato para determinar la composición granular de la arena

**Tabla 2. 14** Factores de Valorización para cada tamiz

Número	Apertura (mm)	Factor (α )
6	3.36	3
12	1.68	5
20	0.84	10
30	0.59	20
40	0.42	30
50	0.29	40
70	0.210	50
100	0.149	70
140	0.105	100
200	0.074	140
270	0.053	200
FONDO	-	300

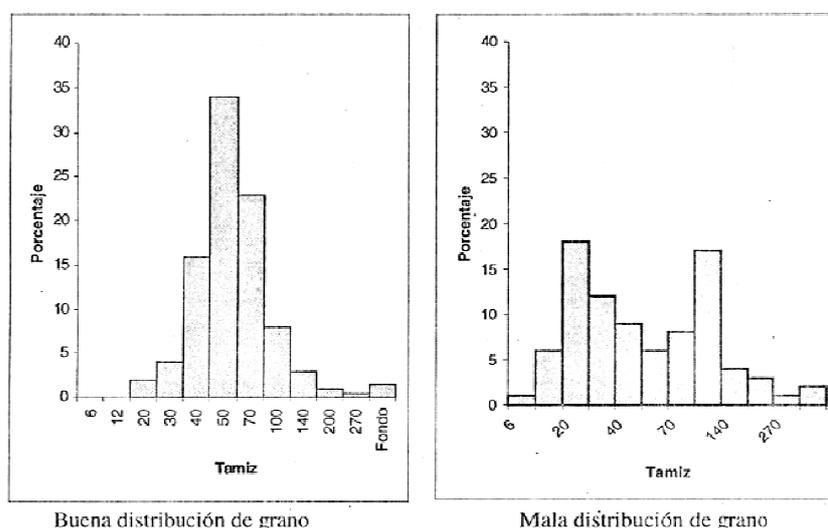
### 2.6.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS GRANOS

Dado el índice de finura AFS se podría considerar definido todo aspecto referido al tamaño de grano, pero no es así, dos arenas con un mismo índice pueden

tener una distribución muy diferente. Esto se debe a que el índice  $i$  es únicamente un promedio y como, tal puede aceptar infinitas combinaciones de composiciones de tamaño sin cambiar, los casos extremos son si a un índice medio coinciden una distribución que tenga tamaños grandes y pequeños con otra que tenga solo tamaños de grano medios; la primera sería una distribución irregular y la segunda regular (véase figura 2.7). Este hecho influiría directamente en las propiedades de la mezcla de moldeo, particularmente en una tan importante como la permeabilidad. De allí que se vuelve indispensable la elaboración de los histogramas que finalmente permitirán objetivar cual será el comportamiento de la arena base.

La permeabilidad de una arena es mayor cuanto más concentrada se encuentra la arena en un solo tamiz ya que entonces el tamaño de los granos será el más uniforme.

Es por ello que se crea cada regla práctica que dice que: Una arena base es buena para fundición cuando la sumatoria de los porcentajes retenidos en tres tamices adyacentes es superior al 75%



**Figura 2. 7** Distribución del grano

## 2.6.4 ESTUDIO DE LAS ARENAS BASE DISPONIBLES EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA EPN

### Arena negra del laboratorio de fundición de EPN.

**Tabla 2. 15** Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena negra del laboratorio de fundición EPN.

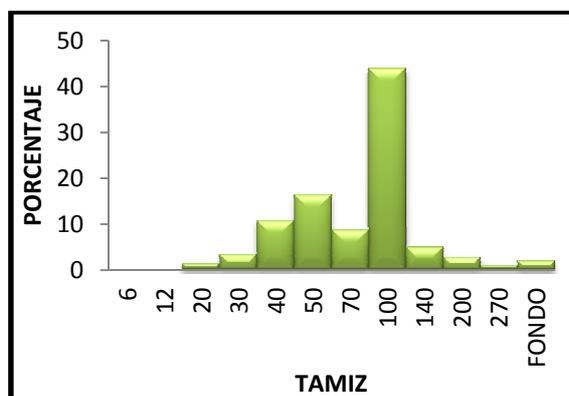
Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor ( $\alpha$ )	$\alpha^*\%$
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,7	1,4	10	14
30	1,7	3,4	20	68
40	5,4	10,8	30	324
50	8,2	16,4	40	656
70	4,4	8,8	50	440
100	22	44	70	3080
140	2,5	5	100	500
200	1,4	2,8	140	392
270	0,5	1	200	200
FONDO	1	2	300	600
<b>Total</b>	<b>47,8</b>	<b>95,6</b>		<b>6274</b>

$$i = AFS = 65,6276151 \approx 66$$

Según los resultados mostrados en la tabla 2.15, la arena tiene una calidad fina, donde su tamaño de grano fluctúa entre 0.10-0.25 mm.

### TAMICES ADYACENTES

69.2 %



**Figura 2. 8** Gráfica de la distribución de grano de la arena negra del laboratorio de fundición EPN.

En la figura 2.8 se observa una distribución de grano concentrada en los tamices nº 50-70-100, donde la sumatoria de los tamices es 69.2% no establecida en la regla del 75% como mínimo de los tamices adyacentes, la mayor concentración esta en el tamiz nº 100 donde el tamaño de abertura es 0.149 mm. Dando una concentración del 44% de finos. Esta arena es poco permeable.

### **Arena negra del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.**

**Tabla 2. 16** Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena negra del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

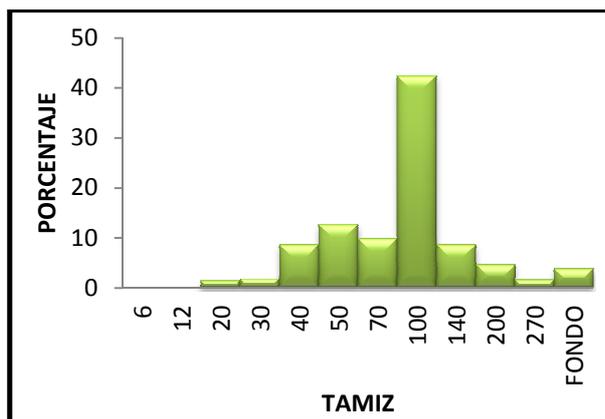
Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor ( $\alpha$ )	$\alpha^*\%$
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,7	1,4	10	14
30	0,9	1,8	20	36
40	4,3	8,6	30	258
50	6,3	12,6	40	504
70	4,9	9,8	50	490
100	21,2	42,4	70	2968
140	4,3	8,6	100	860
200	2,3	4,6	140	644
270	0,8	1,6	200	320
FONDO	1,9	3,8	300	1140
<b>Total</b>	<b>47,6</b>	<b>95,2</b>		<b>7234</b>

$$i = \text{AFS} = 75,987395 \approx 76$$

Se observa que los valores en la tabla 2.16 cambian, debido a que al someterla a la arena a un lavado varias impurezas son desalojadas, por lo tanto la arena sigue en el margen de calidad fina, con un tamaño de grano entre los valores de 0.10-0.25 mm.

#### **TAMICES ADYACENTES**

64.8 %



**Figura 2. 9** Gráfica de la distribución de grano de la arena negra del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla

Se observa en la figura 2.9, una distribución de grano concentrada en los tamices nº 50-70-100, donde la sumatoria de los tamices adyacentes es 64.8% no establecida en la regla del 75% de los tamices adyacentes. La mayor concentración esta en el tamiz nº 100 donde el tamaño de abertura es 0.149 mm. Por lo tanto se concluye que esta arena contiene una gran cantidad de impurezas y finos que afectan la calidad de permeabilidad de la arena.

### **Arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN.**

**Tabla 2. 17** Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN.

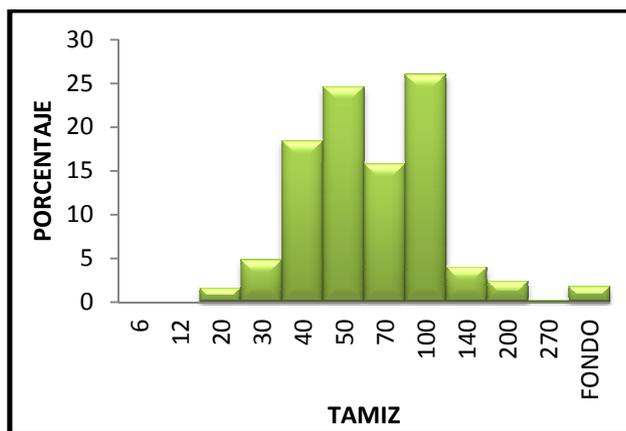
Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor ( $\alpha$ )	$\alpha^*\%$
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,8	1,6	10	16
30	2,4	4,8	20	96
40	9,2	18,4	30	552
50	12,3	24,6	40	984
70	7,9	15,8	50	790
100	13	26	70	1820
140	2	4	100	400
200	1,2	2,4	140	336
270	0,1	0,2	200	40
FONDO	0,9	1,8	300	540
<b>Total</b>	<b>49,8</b>	<b>99,6</b>		<b>5574</b>

$$i = AFS = 55,9638554 \approx 56$$

En la tabla 2.17, la arena presenta una calidad media, donde su tamaño de grano está entre 0.25-0.5 mm.

### TAMICES ADYACENTES

66.4%



**Figura 2. 10** Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN.

La figura 2.10 presenta una distribución regular ya que muestra una mezcla de varios tipos de granos, concentrando una cantidad de 66.4% de arena en los tamices adyacentes n° 50-70-100, mejorando así su calidad en las propiedades de permeabilidad.

### Arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

**Tabla 2. 18** Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor ( $\alpha$ )	$\alpha^{*}\%$
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,2	0,4	10	4
30	0,3	0,6	20	12
40	11,2	22,4	30	672
50	12	24	40	960
70	6	12	50	600
100	12,2	24,4	70	1708

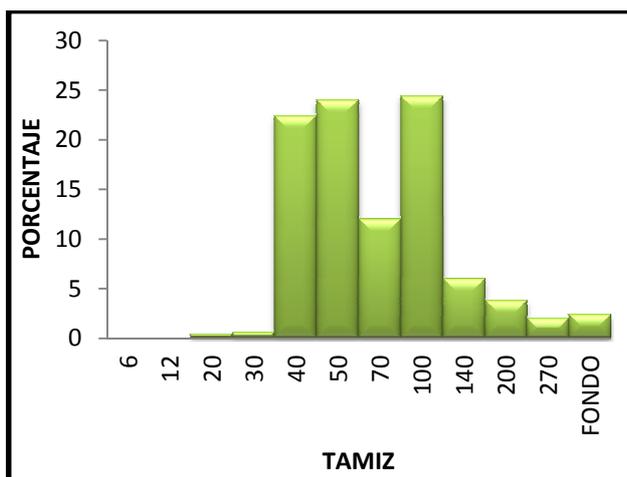
140	3	6	100	600
200	1,9	3,8	140	532
270	1	2	200	400
FONDO	1,2	2,4	300	720
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>98</b>		<b>6208</b>

$$i = AFS = 63,3469388 \approx 63$$

Se observa en los resultados de la tabla 2.18 que al someter la arena a un lavado varias impurezas son desalojadas, por lo tanto la arena pasa al margen de calidad fina, con un tamaño de grano entre los valores de 0.10-0.25 mm.

### TAMICES ADYACENTES

60.4%



**Figura 2. 11** Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla

La figura 2.11 presenta una distribución regular concentrando una cantidad de 60.4% de arena en los tamices adyacentes nº 50-70-100, mejorando así su calidad en las propiedades de permeabilidad.

## Arena marrón nueva del laboratorio de fundición de EPN.

**Tabla 2. 19** Cálculo del número de finura de grano AFS de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN.

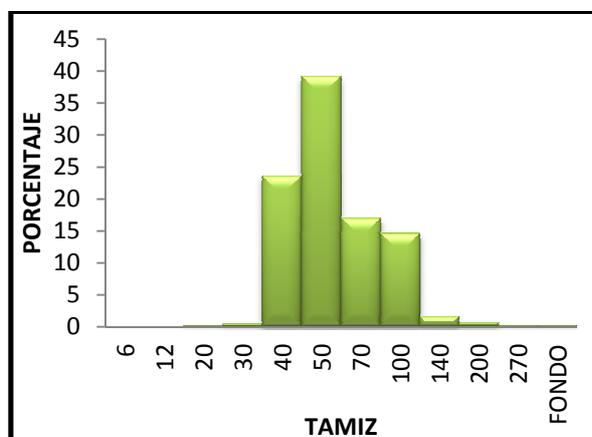
Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor ( $\alpha$ )	$\alpha^*\%$
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,1	0,2	10	2
30	0,2	0,4	20	8
40	11,8	23,6	30	708
50	19,6	39,2	40	1568
70	8,5	17	50	850
100	7,3	14,6	70	1022
140	0,8	1,6	100	160
200	0,3	0,6	140	84
270	0,1	0,2	200	40
FONDO	0,1	0,2	300	60
<b>Total</b>	<b>48,8</b>	<b>97,6</b>		<b>4502</b>

$$i = \text{AFS} = 46,1270492 \approx 46$$

Los resultados tabulados en la tabla 2.19, muestran que la arena presenta una calidad media, donde su tamaño de grano está entre 0.25-0.5 mm.

### TAMICES ADYACENTES

79,8%



**Figura 2. 12** Gráfica de la distribución de grano de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN.

La figura 2.12 presenta una distribución uniforme concentrando una cantidad de 79.8% de arena en los tamices adyacentes nº 40-50-70, mejorando así su calidad en las propiedades de permeabilidad.

La finura de la arena afecta las propiedades físicas que desarrollan las mezclas de arena para fundición, permeabilidad, resistencia, plasticidad, etc.

Cuando la arena tiene alto contenido de finos, se requiere para preparar mezclas, mayor cantidad de aglutinantes para obtener las propiedades físicas requeridas en el buen acabado de las piezas fundidas.

## 2.7 FORMAS DE GRANO

La geometría de los granos de arena es un parámetro influyente en las propiedades que posee la mezcla de moldeo y se clasifica en:

- Anguloso: resiste la compactación y requiere más humedad.
- Subángulo: tiene buena resistencia, aristas redondeadas, es la mejor.
- Redondo: buena permeabilidad, baja resistencia y fluye bien.
- Compuesto: tiende a romperse.

La forma de los granos (figura 2.13) permite establecer el probable comportamiento de la arena. El examen se lo realiza al microscopio. De hecho no existe arenas con todos los granos esferoidales y lo que se debe indicar es que forma es la que predomina. El redondeamiento es un fenómeno provocado por la acción abusiva de un grano sobre otro. Los granos muy redondeados son escasos y no se encuentran por debajo del cedazo No. 70. Se puede indicar que los granos angulosos sintonizan más fácilmente que los esféricos y los finos más que los gruesos.

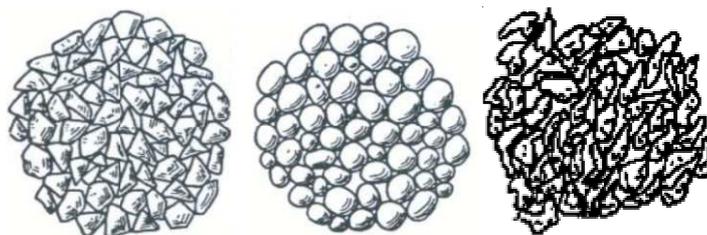


Figura 2. 13 Formas de grano

Las fotografías siguientes se realizan con una mezcla de granos de los tamices adyacentes obtenidas en las pruebas de la determinación de la finura de grano, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

#### **2.7.1 FORMA DE GRANO DE ARENA NEGRA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.**



**Figura 2. 14** Fotografía de la forma de grano de arena negra del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

La forma de grano que presenta la figura 2.14 es compuesta, ya que se observa que contiene granos angulares, subangulares y redondos en mínima cantidad.

Esta arena tiende a romperse e incluirse en el vaciado del metal provocando defectos en la fundición, como son las incrustaciones de arena.

#### **2.7.2 FORMA DE GRANO DE ARENA MARRÓN VIEJA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.**



**Figura 2. 15** Fotografía de la forma de grano de arena marrón vieja del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

La forma de grano que presenta la figura 2.15 es subangular. Esta arena tiene una buena resistencia, buena permeabilidad, facilidad de moldeo ya que sus granos se acomodan por sus aristas irregulares, es buena para la fundición.

### **2.7.3 FORMA DE GRANO DE ARENA MARRÓN NUEVA DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE EPN, DESPUÉS DE REALIZAR EL ENSAYO DEL CONTENIDO DE ARCILLA.**



**Figura 2. 16** Fotografía de la forma de grano de arena marrón nueva del laboratorio de fundición de EPN, después de realizar el ensayo del contenido de arcilla.

La forma de grano que presenta la figura 2.16 es subangular en mayor cantidad, además presenta una pequeña cantidad de forma angular y redonda, aumentando su permeabilidad, resistencia al moldeo y colapsibilidad. Se la recomienda para la fundición.

## **2.8 ENSAYOS DE LAS ARENAS**

### **2.8.1 PRUEBA DE HUMEDAD**

Para determinar la humedad, se utiliza una lámpara de secado rápido. Primamente se pesa una cantidad determinada de la mezcla ( $P_i$ ) y se seca aproximadamente durante 30 minutos, hasta que alcance un peso constante ( $P_f$ ) y posteriormente se pesa y por la diferencia de peso se determina la humedad.

Para este ensayo se utiliza el siguiente equipo que cuenta el laboratorio.



**Figura 2. 17** Instrumento para determinar el contenido de humedad de arenas para fundición.

Este secador de humedad Dietert (figura 2.17) es una unidad resistente, versátil equipada con un regulador termostático ajustable y el termómetro blindado. Un ventilador hace pasar el aire hacia abajo más allá elementos de calefacción de gran capacidad y el aire caliente se dispersa a través de la muestra y a través del fondo de 500 mallas de la bandeja de secado. La alta velocidad del aire asegura una muy rápida acción de secado y 50 gramos de arena de moldeo se pueden secar en unos 3 o 4 minutos. Un temporizador eléctrico puede ser pre-establecidos con el tiempo de secado estándar. Rango de temperatura es de 150 a 300 °F (65 a 149 °C).

$$h = [(P_i - P_f) / P_i] * 100 \quad (4)$$

$$h = [(110g - 109.6g) / 110] * 100$$

$$h = 0.36\%$$

#### **Arena marrón nueva**

<b>peso inicial(g)</b>	<b>peso final (g)</b>	<b>% humedad</b>
110	109,6	0,36

Temperatura de secado = 100° C

Tiempo de secado = 30 min

Las pruebas de secado a las otras arenas no se realiza ya que estas están dispuestas a la utilización de los estudiantes para las prácticas y su humedad varía de acuerdo a su uso en las practicas, considerando que no es un valor confiable y se descarta.

### 2.8.2 DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD

La permeabilidad es la propiedad física de la masa de arena moldeada en verde o en seco de permitir el paso de gas a través de la misma.

El alto contenido de aglutinante y material fino, el porcentaje de humedad, la densidad de atacado son factores importantes que influyen en la permeabilidad de una arena.

Para determinar la permeabilidad de una arena de fundición, se emplea la probeta de ensayo cilíndrica con diámetro de 50.8 mm. X 50.8 mm, de altura y la velocidad de flujo del aire bajo presión constante de 10 de columna de agua que pasa a través de la probeta.



**Figura 2. 18** Medidor de permeabilidad eléctrico y escala de colores

El Permmeter Electric (figura 2.18) es una unidad compacta, se recomienda para los laboratorios de control de la producción. Utiliza el método del orificio y la caída de presión. El medidor se suministra con 3 escalas de colores, uno para los valores superiores a 50 (orificio grande), uno de los valores de permeabilidad de menos de 50 (orificio pequeño) y un tercero para la presión.

La unidad no utiliza agua o el mercurio. Un arreglo simple de palanca se utiliza para expandir una junta tórica para formar un sello hermético en el tubo de muestra. La presión requerida (10 cm de agua) se mantiene por un ventilador de alta velocidad. Un dispositivo de liberación de presión flotante mantiene la presión de aire constante a pesar de las variaciones en el voltaje de la línea.

### **2.8.3 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA DE LA ARENA**

La resistencia de una mezcla de arena para fundición se puede determinar por medio de ensayos de compresión y corte en verde y en seco. La resistencia a la compresión y al corte en verde es la resistencia máxima que una probeta normalizada es capaz de soportar cuando se aplica una carga creciente en forma continua hasta que se produzca la rotura por la presión aplicada (en lb/plg<sup>2</sup>) a las dos mitades diametralmente opuestas de las dos superficies planas de la probeta.

La figura 2.19 muestra la máquina universal Dietert, esta máquina se compone de cuatro partes principales: una base sustancial, un péndulo, un brazo empujador robusto, y una unidad de motor. Todos estos componentes sirven para determinar la resistencia a la compresión o al corte de probetas de arena para moldes o machos.



**Figura 2. 19** Máquina universal para determinar la resistencia de las arenas y machos de moldeo

#### **2.8.3.1 Ensayo de compresión**

El ensayo de compresión se realiza con muestras en forma de cubo o cilíndricas tomadas de una muestra representativa de las mezclas durante el moldeo. Las

dimensiones de los cubos o cilindros serán estipuladas por los organismos locales de ensayo.

### **Probetas de ensayo**

La probeta norma se utiliza para ensayos de permeabilidad en verde o en seco, dureza, resistencia al corte y compresión en verde o en seco. La importancia de seguir el procedimiento recomendado para obtener probetas de acuerdo como lo establecen las normas es determinante para obtener resultados reproducibles en los ensayos que se hagan.

Las dimensiones y formas de las probetas para este tipo de ensayo, son cilíndricas con diámetro de 50,8 mm, y longitud de 50.8 mm, el peso de la arena usada es de 200 g en función del mismo contenido de aglutinantes.

El equipo para la preparación de las probetas es de base metálica con recipiente tubular para comprimir la arena, apisonador con peso de 6.356 Kg. y un machuelo para la extracción de las probetas.

La elaboración consiste en colocar cierta cantidad de la mezcla realizada para el ensayo en el cilindro formador de probetas, una vez colocado la base para comprimir probetas, colocarlo en el apisonador de probetas (figura 2.20) y aplicar tres golpes con el instrumento, observando que las probetas estén entre las marcas de tolerancia de 0.793 mm. Si no se encuentran se descartan y se inicia de nuevo la elaboración de las mismas.

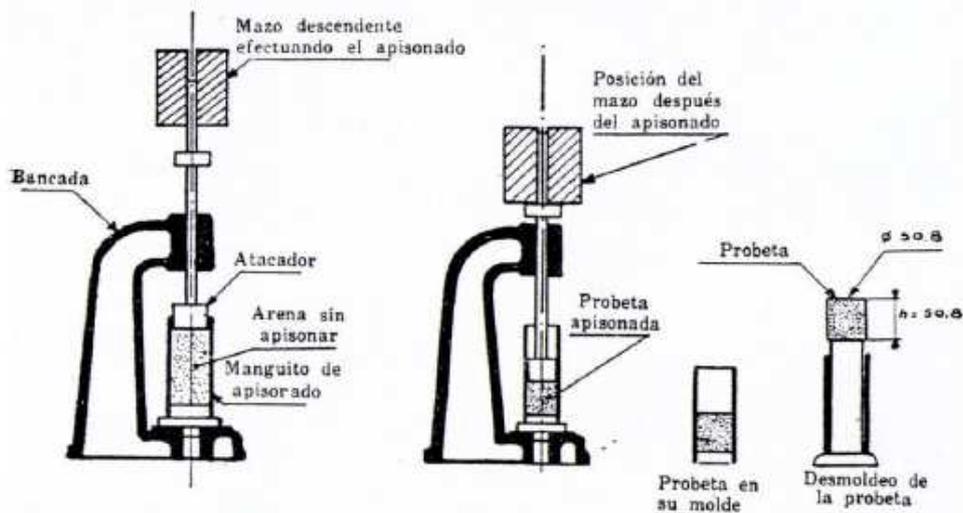


Figura 2. 20 Instrumento para apisonar la probeta de ensayos de norma AFS.

### 2.8.3.2 Resistencia a la cizalladura o corte

La resistencia al corte en verde es la resistencia máxima al corte que puede desarrollar una mezcla de arena humedecida. Las resistencias obtenidas en las probetas ensayadas con la máquina universal de resistencia se pueden graficar para hacer una evaluación de las propiedades aglutinantes y grado de saturación de la bentonita usada en base a diversos grados de dureza en verde, el aumento de dureza en las mismas está en función del número de golpes que se den al momento de apisonar la arena.

### 2.8.3.3 Determinación de la dureza

La dureza de la superficie de un molde o probeta, se determina por medio del probador de dureza o durómetro, figura 2.21, con graduaciones en el indicador de 0 a 100 milésimas de pulgada con subdivisiones de una milésima, se pone el vástago en contacto con la superficie de la probeta, se aplica la carga al indentador presionando firmemente y se lee la profundidad de penetración en el indicador.



**Figura 2. 21** Instrumento para determinar la dureza en verde de moldes y machos (escala B).

Es importante medir la dureza superficial de los moldes especialmente cuando se presentan problemas de excesiva dureza, generando sopladuras de superficie, darts, colas de cometa, etc., o defectos de dureza originando penetración del metal en la arena, obteniéndose superficies rugosas e incrustaciones de arena. Una clasificación de los moldes según su dureza se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2. 20.** Clasificación de los moldes por su dureza

<b>TIPO DE MOLDE</b>	<b>DUREZA</b>
Muy blando	20-40
Blando	40-50
Mediano	50-70
Duro	70-85
Muy Duro	85-100

Los siguientes ensayos se realizan con las arenas que tenemos en el laboratorio de fundición de la EPN, se escoge cada arena, se tamiza por el tamiz nº 20 para eliminar impurezas de la arena, se pesa cada arena en proporciones de 200 g para cada prueba, la arena negra y la marrón vieja no se aglutino con nada, la arena nueva se le adiciona 10g de bentonita para obtener la mezcla, a estas arenas se le agrega agua variando su porcentaje para observar su cambio en los ensayos respectivos dados en la tablas siguientes.

**Tabla 2. 21.** Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena marrón vieja del laboratorio de fundición EPN.

arena vieja marrón (g)	agua (g)	% agua	Permeabilidad rojo	dureza B	corte (kg/cm <sup>2</sup> )	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
200	4	2	200	85	3,2	13,4
	6	3	175	83	3,2	15
	8	4	185	81	3,3	11,5
	10	5	210	75	2,7	11
	12	6	140	65	3,9	10,7
	16	8	110	69	2,5	8,1
	20	10	92	72	2,1	6,9

**Tabla 2. 22.** Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN.

arena nueva marrón (g)	agua (g)	% agua	Permeabilidad rojo	dureza B	corte (kg/cm <sup>2</sup> )	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
190	4	2	276	68	1,3	6
	6	3	270	75	1,4	6,4
<b>bentonita (g)</b>	8	4	310	56	1,3	5
10	10	5	223	45	0,9	3,7
	12	6	237	45	1	3,4
	16	8	240	55	1	4
	20	10	230	50	0,8	2,4

**Tabla 2. 23.** Valores de permeabilidad, dureza (B), corte y compresión de arena negra del laboratorio de fundición EPN.

arena negra vieja (g)	agua (g)	% agua	Permeabilidad rojo	dureza B	corte (kg/cm <sup>2</sup> )	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
200	4	2	100	85	3	18,1
	6	3	90	84	3,8	17
	8	4	100	86	3	16,6
	10	5	90	83	3,7	15
	12	6	95	83	3,3	15,2
	16	8	50	82	3,9	14,5
	20	10	30	83	3,5	12,4

Valores óptimos para las mezclas

## **2.9 TIPOS DE ARENA Y LA FORMA DE EMPLEO PARA CONSTRUIR MOLDES DE FUNDICIÓN, SEGÚN LA NATURALEZA DE CADA METAL.**

Los moldes para el cobre se hace de arena verde mojada, muy poroso, para permitir el libre escape de los gases.

Los latones requieren arenas especiales, no muy grasosas pero de buena cohesión. Para que la superficie de las piezas fundidas resulte lisa y de buen aspecto, se aplicará arena de granos más finos y con una cierta cantidad de arcilla limitada, para que no impida la salida de los gases.

Para los bronce se pueden aplicar moldes de arena verde o los llamados desecados. Los primeros se adaptan mejor para la fundición de piezas pequeñas, mientras que los segundos se usan para piezas de mayor tamaño.

Para el aluminio y sus aleaciones, se usa arena no muy grasosa ni demasiado fina, con un contenido de arcilla de 10 a 15% y de 7 a 8% de agua; a esta arena se le agrega un poco aceite de lino, melaza, polvo de carbono o resina para aumentar la cohesión.

Para las aleaciones de magnesio se aplica, por lo general, los mismos moldes que para la fundición del aluminio, pero con una diferencia solamente, que consiste en agregar a la arena de 3 a 10% de azufre y de 0.25 a 1% de ácido bórico. Estas 2 sustancias tienen por objeto, formar gases durante la fundición para impedir quemaduras en la superficie del metal o agujeros.

Las aleaciones de bronce aluminio presentan dificultad en colarse en moldes de arena verde debido a las altas tendencias de oxidación de los aleantes y la posibilidad de una superficie con agujeros finos y porosidades en la pieza fundida y acabada. Generalmente no es recomendable usar arena de contacto (arenas de cara) para los bronce aluminios debido a la alta tensión superficial causada por la presencia de la delgada capa de óxido de aluminio durante el vertido. Entonces para el moldeo de piezas que van a ser coladas en bronce aluminio puede utilizarse cualquier arena que normalmente sirve para bronce al estaño, incluso

aceros, cuidando su permeabilidad, ésta no debe ser inferior a 40, y la humedad debe ser la más baja que se pueda conseguir.<sup>25</sup>

En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados para obtener arenas de moldeo óptimas para conseguir resultados satisfactorios.

**Tabla 2. 24.** Características recomendadas de arenas de moldeo para conseguir resultados satisfactorios en la fundición de diferentes aleaciones.<sup>26</sup>

<b>ALEACION</b>	<b>Humedad</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Compresión en verde kPa</b>	<b>Arcilla %</b>	<b>IF</b>
Aluminio	6 a 8.5	7 a 13	39 a 50	10 a 16	220 - 160
Bronce y latón	6 a 8	13 a 20	44 a 54	11 a 13	150 - 140
Cupro-níquel	6 a 7.5	37 a 50	39 a 54	11 a 13	130 - 120
<b>HIERRO FUNDIDO</b>					
Piezas ligeras planas	6.5 a 8.5	10 a 15	36 a 49	10 a 12	200 a 180
Moldes muy prensados	6 a 7.5	18 a 25	39 a 49	11 a 13	120 a 90
Piezas de tamaño medio (arena ordinaria)	5.5 a 7	40 a 60	49 a 54	14 a 14	90 a 70
Piezas de tamaño medio (arena sintética)	4 a 6	50 a 80	49 a 59	5 a 10	75 a 55
Piezas grandes (arena seca o verde)	4 a 6.5	80 a 120	34 a 49	8 a 14	60 a 50
<b>HIERRO MALEABLE</b>					
Piezas ligeras	6 a 8	20 a 30	39 a 49	8 a 14	120 a 90
Piezas grandes	5.5 a 7.5	40 a 60	39 a 49	8 a 14	85 a 70
<b>ACERO</b>					
Piezas ligeras en arena verde	2 a 4	125 a 200	39 a 49	3 a 10	60 a 50
Piezas grandes en arena verde	2 a 4	125 a 253	39 a 49	5 a 10	60 a 50
Arena seca	1 a 6	100 a 200	39 a 49	7 a 12	60 a 40

<sup>25</sup> Fuente. <http://www.geocities.com/usmindustrial/Fundicion.htm>

<sup>26</sup> Fuente: Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones – Arenas de moldeo en fundiciones férreas, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, España, 2008.

## CAPÍTULO 3

### SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE MOLDEO

#### 3.1 SELECCIÓN DE LA ARENA BASE

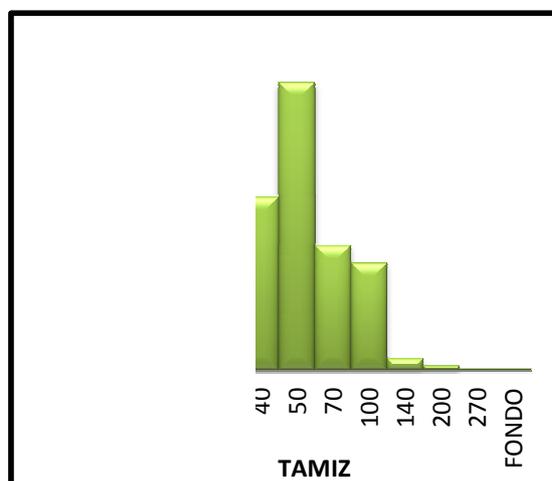
Una vez realizadas las pruebas en el capítulo 2, de forma , tamaño de grano, distribución, contenido de arcilla, humedad, permeabilidad, dureza, corte y compresión de las arenas de fundición de la EPN, se selecciona la arena más idónea para los ensayos respectivos en el moldeo del elemento gasificable.

##### Arena marrón nueva

- Contenido de arcilla 2.5 %
- Índice de finura (i) = AFS 46
- Tamaño de grano 0.25 - 0.5 mm (calidad media)
- Tamices adyacentes 79.8 %
- Forma de grano subangular, redonda
- % humedad 0.36
- Dureza (B) 50 - 70 (mediana)
- Permeabilidad 310 (rojo)
- Resistencia al corte 1 - 1,4 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Resistencia a la compresión 5 - 6,5 (kg/cm<sup>2</sup>)

**Tabla 3. 1.** Cálculo del número de finura de grano AFS y distribución de la arena marrón nueva del laboratorio de fundición EPN.

Tamiz	Peso	Porcentaje	Factor (α)	α*%
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0,1	0,2	10	2
30	0,2	0,4	20	8
40	11,8	23,6	30	708
50	19,6	39,2	40	1568
70	8,5	17	50	850
100	7,3	14,6	70	1022
140	0,8	1,6	100	160
200	0,3	0,6	140	84
270	0,1	0,2	200	40
FONDO	0,1	0,2	300	60
<b>Total</b>	<b>48,8</b>	<b>97,6</b>		<b>4502</b>



$i = AFS = 46$

La tabla 3.1 presenta el cálculo del índice de finura y la grafica de una distribución uniforme concentrándose una cantidad de 79.8% de arena en los tamices adyacentes n° 40-50-70, mejorando así su calidad en las propiedades de permeabilidad.

## 3.2 COMPONENTES INICIALES

### 3.2.1 MEZCLA N° 1: RESINAS FENOLICAS

**Tabla 3. 2** Composición de la mezcla N° 1.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arena Marrón vieja	65	2500
Resina A	5 % de la arena	125
Resina B	20 % de A	25
Resina C	10 % de A	12.5



**Figura 3. 1** Elementos de la mezcla N° 1.

#### 3.2.1.1 Preparación

- Se inicia con seleccionar la arena
- Cernir la arena con la malla ASTM N° 30 para obtener una finura de arena adecuada
- Se pesa los componentes de la mezcla N° 1 respectivamente con los valores antes detallados (véase tabla 3.2).
- Se coloca la arena en el recipiente de la mezcladora

- Se añade la resina A y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se añade la resina B y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se añade la resina C y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se espera un tiempo de 1 min hasta que se estabilice la mezcla
- Se procede a moldear el elemento a ensayar.

### 3.2.2 MEZCLA N° 2

**Tabla 3. 3** Composición de la mezcla N° 2.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arena Marrón vieja	78	2000
Aserrín	12% de la arena	240
Melaza	10 % de la arena	200



**Figura 3. 2** Elementos de la mezcla N° 2

#### 3.2.2.1 Preparación

- Se inicia con seleccionar la arena
- Cernir la arena con la malla ASTM N° 30 para obtener una finura de arena adecuada

- Cernir el aserrín por la malla ASTM N° 20 para eliminar impurezas mayores y obtener una finura inicial
- Cernir el aserrín por la malla ASTM N° 40 para obtener la finura adecuada para la mezcla
- Se pesan los componentes de la mezcla N° 2 respectivamente con los valores antes detallados (véase tabla 3.3).
- Se coloca la arena en el recipiente de la mezcladora
- Se le añade el aserrín y se mezcla por un tiempo de 2 min a una velocidad N° 1
- Se le añade la melaza y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se espera un tiempo de 1 min hasta que se estabilice la mezcla
- Se procede a moldear el elemento a ensayar.

### 3.2.3 MEZCLA N° 3

**Tabla 3. 4** Composición de la mezcla N° 3.

<b>Componentes</b>	<b>% porcentaje</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Arena negra súper fina	73 %	1000
Bentonita	7% de la arena	70
Aceite	15 % de la arena	150
Resina A	5% de la arena	50



**Figura 3. 3.** Elementos de la mezcla N° 3

### 3.2.3.1 Preparación

- Se inicia con seleccionar la arena
- Cernir la arena con la malla ASTM N° 70 para obtener una finura de arena adecuada y eliminar impurezas
- Se pesan los componentes de la mezcla N° 3 respectivamente con los valores antes detallados (véase tabla 3.4).
- Se coloca la arena en el recipiente de la batidora
- Se le añade bentonita y se mezcla por un tiempo de 1 min a una velocidad N° 1
- Se le añade la Resina A y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se le añade el aceite y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se espera un tiempo de 1 min hasta que se estabilice la mezcla
- Se procede a moldear el elemento a ensayar.

### 3.2.4 MEZCLA N° 4

**Tabla 3. 5** Composición de la mezcla N° 4.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arena nueva sílice	89 %	2400
Cemento Portland	7 % de la arena	168
Agua	4 % de la arena	96



**Figura 3. 4** Elementos de la mezcla N° 4.

### 3.2.4.1 Preparación

- Se inicia con seleccionar la arena
- Cernir la arena con la malla ASTM N° 40 para obtener una finura de arena adecuada y eliminar impurezas
- Se pesan los componentes de la mezcla N° 4 respectivamente con los valores antes detallados (véase tabla 3.5).
- Se coloca la arena en el recipiente de la mezcladora
- Se le añade cemento Portland y se mezcla por un tiempo de 1 min a una velocidad N° 1
- Se le añade el agua y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se espera un tiempo de 1 min hasta que se estabilice la mezcla
- Se procede a moldear el elemento a ensayar.

### 3.2.5 MEZCLA N° 5

**Tabla 3. 6** Composición de la mezcla N° 5.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arena marrón vieja	93.7 %	2400
Harina de maíz	1.3 % de la arena	31.2
Agua	4 % de la arena	96
Azúcar	0.5 % de la arena	12
Agar	0.5 % de la arena	12



**Figura 3. 5** Elementos de la mezcla N° 5

### 3.2.5.1 Preparación

- Se inicia con seleccionar la arena
- Cernir la arena con la malla ASTM N° 30 para obtener una finura de arena adecuada y eliminar impurezas
- Se pesan los componentes de la mezcla N° 5 respectivamente con los valores antes detallados (véase tabla 3.6)
- Se coloca la arena en el recipiente de la mezcladora
- Se le añade harina de maíz y se mezcla por un tiempo de 1 min a una velocidad N° 1
- Se diluye el azúcar y el agar en un recipiente metálico con el agua para la mezcla a una temperatura de 90 °C, hasta que la solución este completa
- Se le añade la solución anterior y se mezcla por un tiempo de 5 min a una velocidad N° 1
- Se espera un tiempo de 1 min hasta que se estabilice la mezcla
- Se procede a moldear el elemento a ensayar.

## 3.3 CARACTERISTICAS DE LAS MEZCLAS PREPARADAS

### 3.3.1 MEZCLA N° 1



**Figura 3. 6** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 1.

- Su coloración es verde gris
- Fácil de moldear
- No presenta grumos

### 3.3.2 MEZCLA N° 2



**Figura 3. 7** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 2

- Su coloración es dorada
- Facilidad de moldear
- Poca humedad
- Su estructura es esponjosa

### 3.3.3 MEZCLA N° 3



**Figura 3. 8** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 3

- Su color es negro carbón
- Presenta grumos
- Muy húmeda por la presencia del aceite

### 3.3.4 MEZCLA N° 4



**Figura 3. 9** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 4

- Su coloración es verde oliva
- No presenta grumos
- Fácil moldeo
- Buena humedad

### 3.3.5 MEZCLA N° 5



**Figura 3. 10** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 5

- Su coloración es gris verdoso
- Buena moldeabilidad
- Buena cohesión

### 3.4 ENSAYOS REALIZADOS EN LAS MEZCLAS PREPARADAS



Figura 3. 11 Probetas para ensayos de la mezclas.

#### 3.4.1 DENSIDAD DE ATACADO

Para determinar la densidad de atacado se utiliza el apisonador de probetas, primeramente se mide la altura del cilindro hueco (hc), que es el molde donde se confeccionan las probetas, se llena completamente de mezcla y se deja caer lentamente el cabezal apisonador del equipo con el objetivo de compactar la mezcla que está en el interior del cilindro, seguidamente se repite la operación y por último se lee la lectura que descende la mezcla dentro del cilindro (hd).

**Hc:** altura del cilindro hueco

**Hd:** altura que descende la mezcla

#### Ejemplo de cálculo mezcla N° 1.

$$\% \text{ de atacado} = (hd/hc) * 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ de atacado} = (47/121\text{mm}) * 100$$

$$\% \text{ de atacado} = 38.84$$

Tabla 3. 7 Densidad de atacado de las mezclas.

Muestra	Hc (mm)	Hd (mm)	% de atacado
Mezcla N° 1	121	47	38.84
Mezcla N° 2	121	70.9	58.59
Mezcla N° 3	121	61.2	50.57
Mezcla N° 4	121	35.3	29.17
Mezcla N° 5	121	58.6	48.43

En la tabla 3.7 el mayor porcentaje de atacado tiene la mezcla N° 2, este valor influye en su moldeabilidad ya que a mayor porcentaje de atacado mayor moldeabilidad.

### 3.4.2 ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos se realizan en probetas hechas (véase figura 3.11), de las mezclas una vez secas, a un tiempo de 48 h a temperatura ambiente (21 °C).

**Tabla 3. 8** Permeabilidad, dureza, compresión y corte de las mezclas en seco.

MUESTRAS	PRUEBAS			
	Permeabilidad (rojo)	Dureza en seco	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Corte (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla N° 1	230	30	95	50
Mezcla N° 2	250	0	26	10
Mezcla N° 3	0	0	86	16
Mezcla N° 4	260	0	68	11
Mezcla N° 5	300	0	35	24

Los ensayos se realizan en probetas hechas de las mezclas, en verde

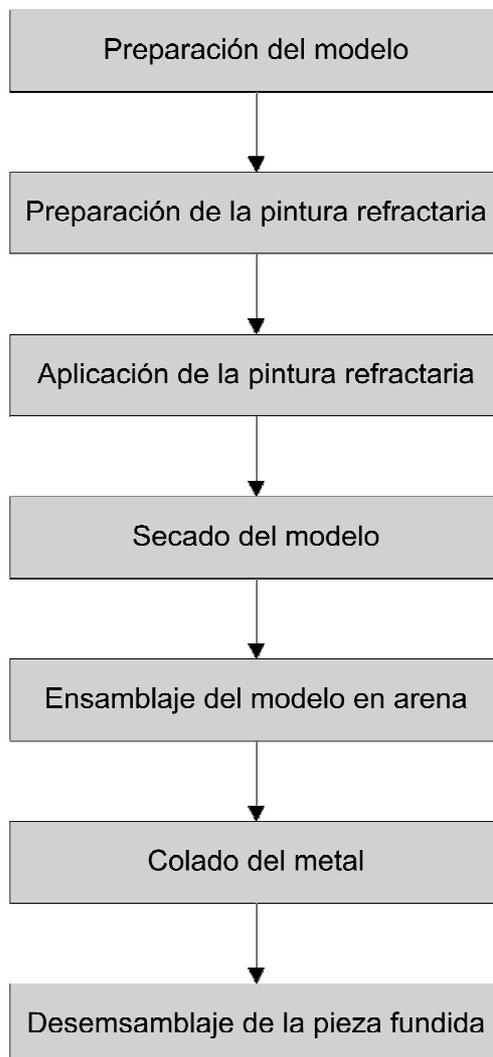
**Tabla 3. 9** Permeabilidad, dureza, compresión y corte de las mezclas en verde.

MUESTRAS	PRUEBAS			
	Permeabilidad (rojo)	Dureza (B)	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Corte (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla N° 1	-	-	-	-
Mezcla N° 2	170	55	2.9	0.9
Mezcla N° 3	0	53	6.8	2
Mezcla N° 4	-	-	-	-
Mezcla N° 5	240	80	13.4	3

(-) no se pudo realizar los ensayos por su consistencia, no formaban probetas.

En las tablas anteriores se tabulan los resultados obtenidos de los ensayos respectivos realizados a las mezclas antes fabricadas.

### 3.5 PROCESO DE FUNDICIÓN DE LA ESPUMA PÉRDIDA RECUBIERTA CON PINTURA REFRACTARIA



**Figura 3. 12** Diagrama de flujo o de bloques del proceso de fundición por el método de espuma pérdida.

### 3.6 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LA PINTURA REFRACTARIA.

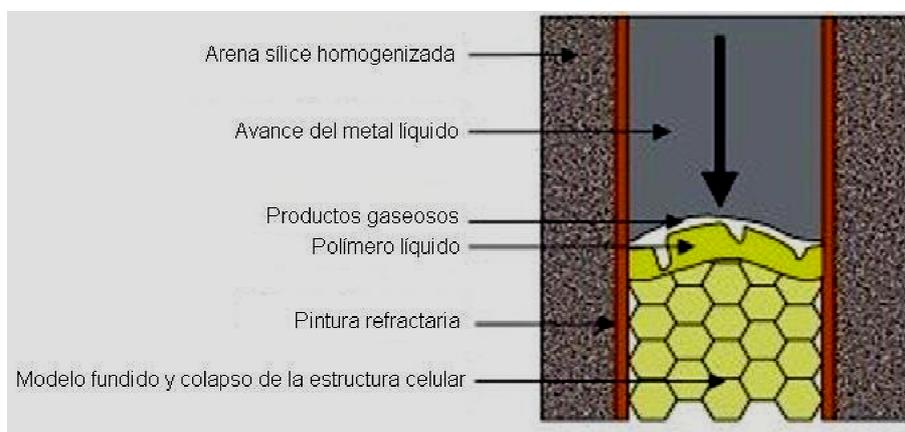
La definición de pintura refractaria se define como: mezcla líquida o semilíquida utilizada sobre la superficie de espuma de poliestireno expandido, constituida por los siguientes elementos o agentes:

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

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

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

El comportamiento de la pintura refractaria frente al colado del metal fundido y del modelo de espuma de poliestireno expandido, se detalla en la figura 3.13.



**Figura 3. 13** Comportamiento de la pintura al momento del colado.

Los componentes principales y su porcentaje dentro de la pintura refractaria se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 3. 10** Composición en porcentajes de la pintura.

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

### 3.6.1 AGENTE REFRACTARIO

Se define como agente o material refractario a cualquier compuesto o mezcla capaz de soportar el rango de temperaturas comprendido entre los 1500 a 4000 °C sin llegar a fundirse. Comprende el material base e imprescindible de la pintura refractaria, cuya finalidad es la de proteger a la pieza fundida de la temperatura y los gases generados por la combustión del modelo de espuma de poliestireno por acción del metal fundido. Estos gases conllevarían al deterioro de la superficie generando porosidad en la superficie de la pieza metálica final.

El tamaño de partícula de refractario constituye un valor predominante 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.

En la tabla 3.11 se presenta los principales compuestos cerámicos refractarios utilizados en la fabricación de la pintura refractaria.

**Tabla 3. 11** Principales materiales 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	$Y_2O_3$	2410
Zirconato cálcico	$CaO \cdot ZrO_2$	2345
Espinela	$MgO \cdot Al_2O_3$	2135
Alumina	$Al_2O_3$	2015
Mullita	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	1830
Sílice (Cuarzo)	$SiO_2$	1723

### 3.6.2 AGENTE DE SUSPENSIÓN

El principal propósito del agente de suspensión es la de suspender y retardar la sedimentación de las partículas de refractario para que exista una mayor homogeneidad de la pintura, comúnmente son materiales cerámicos arcillosos, los materiales utilizados como agente de suspensión se muestran en la tabla 3.12.

**Tabla 3. 12** Principales materiales de suspensión

Material	Fórmula química
Bentonita cálcica	$CaAl_4Mg_2Si_{12}O_{30}(OH)_6$
Bentonita sódica	$NaAl_5MgSi_{12}O_{30}(OH)_6$
Mica de calcio	$CaAl_4Si_2O_{10}(OH)_2$
Mica de potasio	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Yeso	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$

### 3.6.3 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.

Los principales materiales dispersantes se detallan en la tabla 3.13.

**Tabla 3. 13** Principales materiales dispersantes.

<b>Material</b>	<b>Fórmula química</b>
Silicato de calcio	$\text{CaSiO}_3$
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	$\text{SiO}_2$

#### **3.6.4 AGENTE SOLVENTE**

Es el componente de mayor proporción de la pintura refractaria, es en el medio en el cual los demás componentes se van a combinar y disolver para dar paso a una solución homogénea. Los principales solventes en orden de importancia son: el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y el etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

#### **3.6.5 ADITIVOS**

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

## 3.7 PINTURAS REFRACTARIAS

### 3.7.1 PINTURA N° 1

Tabla 3. 14 Composición de la pintura refractaria N° 1.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Sílice malla 200	53.6	640
Silicato de Sodio	11.74	140
Talco	8.38	100
Fosfato de Aluminio	3.35	40
Agua	22.93	273



Figura 3. 14 Elementos de la pintura refractaria N° 1.

#### 3.7.1.1 Preparación

- Se pesa la sílice previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes mencionados en la tabla 3.14.
- Se coloca el agua en la mezcladora y se adiciona el Fosfato de Aluminio, se bate hasta que el Fosfato desaparezca con un tiempo de 3 min a velocidad N° 1.
- Se adiciona la sílice, el talco y el silicato de sodio en la mezcladora y se mezcla por un tiempo de 8 min con una velocidad N° 1.
- Se aumenta la velocidad de la mezcladora a la N° 2 por un tiempo de batido de 10 min.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en el modelo por inmersión.

### 3.7.1.2 Características de la pintura.

- No posee cohesión, se desmorona.
- Su color es un verde perloso.
- Tiene una formación porosa
- Se inflama en el proceso de secado y forma escoria u hongo (véase figura 3.15).
- Se desprende de la pieza fundida fácilmente por su caracterización de quebradizo.



**Figura 3. 15** Aspecto de la pintura refractaria N° 1 después del secado.

### 3.7.2 PINTURA N° 2

**Tabla 3. 15** Composición de la pintura refractaria N° 2.

<b>Componentes</b>	<b>% porcentaje</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Sílice malla 200	61.2	800
Silicato de Sodio	3.06	40
Azúcar en polvo	0.4	5
Cemento Portland	7.65	100
Agua	27.69	362



**Figura 3. 16** Elementos de la pintura refractaria N° 2.

### 3.7.2.1 Preparación

- Se pesa la sílice previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes mencionados en la tabla 3.15.
- Se coloca mitad de agua en la mezcladora y se adiciona la sílice en porcentajes de  $\frac{1}{4}$  del total, a medida que desaparecen los grumos se adiciona poco a poco el resto, se mezcla por un tiempo de 15 min a velocidad N° 2.
- Se añade el cemento portland en la mezcladora y se mezcla por un tiempo de 5 min con una velocidad N° 2 hasta que no haya grumos en la pintura.
- Se adiciona el azúcar en el silicato de sodio y se disuelve para introducirlo en la mezcla, se mezcla a velocidad n° 2 en la mezcladora por un tiempo de batido de 10 min.
- Se adiciona el resto de agua para darle fluidez a la mezcla y se agita durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en el modelo por inmersión.

### 3.7.2.2 Características de la pintura

- Buena adherencia al modelo
- Buena dureza
- Posee coloración verdosa

- Es quebradizo al secarse como se ve en la figura 3.17
- Se desprende de la pieza fundida fácilmente por su caracterización de quebradizo.



**Figura 3. 17** Aspecto de la pintura refractaria N° 2 después del secado.

### 3.7.3 PINTURA N° 3

**Tabla 3. 16** Composición de la pintura refractaria N° 3.

<b>Componentes</b>	<b>% porcentaje</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Sílice malla 200	35	350
Silicato de Sodio	5	50
Yeso extra duro	15	150
Aserrín	5	50
Agar	0.2	2
Agua	39.8	398



**Figura 3. 18** Elementos de la pintura refractaria N° 3.

### 3.7.3.1 Preparación

- Se pesa la sílice previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes mencionados en la tabla 3.16.
- Se coloca 200 g de agua en un recipiente metálico y se calienta con el agar hasta que se mezcle con el agua.
- Se coloca la solución antes preparada en la mezcladora y se adiciona la sílice en porcentajes de  $\frac{1}{4}$  del total, a medida que desaparecen los grumos se adiciona poco a poco el resto, se mezcla por un tiempo de 5 min a velocidad N° 2.
- Se añade el yeso extra duro en la mezcladora y se mezcla por un tiempo de 5 min con una velocidad N° 2 hasta que no haya grumos en la pintura.
- Se adiciona el aserrín y se mezcla a velocidad n° 2 en la mezcladora por un tiempo de batido de 10 min.
- Se agrega el silicato de sodio a la mezcla y se agita durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona el resto de agua para darle fluidez a la mezcla y se agita durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en el modelo por inmersión.

### 3.7.3.2 Características de la pintura

- Su coloración es verde oliva claro (véase figura 3.19)
- Tiene buena mojabilidad
- Buena adherencia
- Buena fluidez
- Poca dureza
- Es quebradizo y se contrae
- Se desprende fácilmente de la pieza fundida



**Figura 3. 19** Aspecto de la pintura refractaria N° 3 después del secado.

### 3.7.4 PINTURA N° 4

**Tabla 3. 17** Composición de la pintura refractaria N° 4.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Sílice malla 200	35	350
Silicato de Sodio	5	50
Yeso extra duro	19	190
Agar	0.2	2
Agua	40.8	408



**Figura 3. 20.** Elementos de la pintura refractaria N° 4.

#### 3.7.4.1 Preparación

- Se pesa la sílice previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes mencionados en la tabla 3.17.
- Se coloca 200 g de agua en un recipiente metálico y se calienta con el agar hasta que se mezcle con el agua.

- Se coloca la solución antes preparada en la mezcladora y se adiciona la sílice en porcentajes de  $\frac{1}{4}$  del total, a medida que desaparecen los grumos se adiciona poco a poco el resto, se bate por un tiempo de 10 min a velocidad N° 2.
- Se añade el yeso extra duro en la mezcladora y se mezcla por un tiempo de 10 min con una velocidad N° 2 hasta que no haya grumos en la pintura.
- Se agrega el silicato de sodio a la mezcla y se agita durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona el resto de agua para darle fluidez a la mezcla y se agita durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en el modelo por inmersión.

#### 3.7.4.2 Características de la pintura

- Su coloración es canela
- Tiene buena mojabilidad
- Buena adherencia y homogeneidad
- Buena fluidez
- Media dureza
- Es quebradizo y se contrae al secar como se ve en la figura 3.21
- Se desprende fácilmente de la pieza fundida



**Figura 3. 21** Aspecto de la pintura refractaria N° 4 después del secado.

### 3.7.5 PINTURA N° 5

Tabla 3. 18 Composición de la Barbotina.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arcilla malla 200	59.70	300
Silicato de Sodio	0.3	1.5
Carbonato de Sodio	0.20	1
Agua	39.8	200



Figura 3. 22 Elementos de la Barbotina.

Tabla 3. 19 Composición de la pintura refractaria N° 5.

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Barbotina	44	220
Sílice malla 200	36	180
Melaza	5	25
Agua	15	75



Figura 3. 23 Elementos de la pintura refractaria N° 5.

### 3.7.5.1 Preparación

- Se pesa la arcilla previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes mencionados en la tabla 3.18.
- Se coloca mitad de agua en la mezcladora y se adiciona el carbonato de sodio y se mezcla alrededor de 2 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona la arcilla en porcentajes de  $\frac{1}{4}$  del total, a medida que desaparecen los grumos se adiciona poco a poco el resto, se mezcla por un tiempo de 15 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona el silicato de sodio y se mezcla a velocidad n° 2 en la mezcladora por un tiempo de mezclado de 8 min.
- Se adiciona el resto de agua para darle fluidez a la mezcla durante el batido de 5 min a velocidad N° 2.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en un recipiente cerrado para dejar reposar 24 h. Esto mejorará sus propiedades (adsorción, tixotropía, plasticidad, permeabilidad, comportamiento al secado, resistencia en fresco y cochura).
- Pasado las 24 h se adiciona a la Barbotina una cantidad de sílice (véase tabla 3.19).

Barbotina	100% en peso
-----------	--------------

Sílice	80% en peso
--------	-------------

Con relación al peso de la Barbotina

- Se agita durante 5 min a una velocidad N° 2, hasta que la pintura no presente grumos
- Se adiciona la melaza y se mezcla durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se añade el agua en la mezcladora y se mezcla por alrededor de 5 min a una velocidad N° 2.
- Se espera que la pintura se estabilice y se procede al pintado del modelo.

### 3.7.5.2 Características de la pintura

- Su coloración es café
- Tiene buena fluidez
- Buena adherencia y mojabilidad
- Es poco quebradizo al secar como se ve en la figura 3.24
- Presenta porosidades pequeñas
- Resiste bien a la temperatura
- Se desmorona de la pieza fundida fácilmente
- Da brillo a la pieza luego de su colado



**Figura 3. 24** Aspecto de la pintura refractaria N° 5 después del secado.

## 3.8 PROCEDIMIENTO DE PINTADO

- Inicialmente se somete al modelo de espuma a total limpieza de polvo y grasa, para permitir adherencia total de pintura.
- Luego se pinta el modelo por inmersión en la pintura, hasta que la capa sea homogénea y cubra todo el modelo.
- Se espera que seque la pintura hasta que en los filos del modelo la coloración de la pintura cambie, aproximadamente 30 min a una temperatura de secado de 60 °C.
- Se coloca una segunda capa de pintura por inmersión, para evitar fallas iniciales presentes en la primera capa y se seca aproximadamente 20 min a temperatura 60 °C.
- Se coloca la tercera capa de pintura por inmersión con la siguiente formulación:

49% de mezcla preparada

49% de arena sílice malla ASTM 40

2% de agua

Esto permitirá que el recubrimiento sea duro y no presente fisuras, por donde podría salir el metal fundido y dañar la forma del modelo.

- Se espera que el recubrimiento se seque por completo 24h a una temperatura de 50 °C, para el proceso de fundición.

### 3.9 ENSAYOS DE PINTURAS

Las siguientes pruebas se realizan con las formas de probetas para machos de mezclas de arena (figura 3.25) y con los equipos respectivos detallados en el capítulo anterior.



**Figura 3. 25** Forma de probetas para ensayos de pinturas refractarias.

Los resultados positivos muestran la contracción de las probetas mientras que las negativas son la expansión de las mismas.

Las probetas son secadas a temperatura de secado de 66 °C (120 °F), durante 2 días consecutivos, donde los resultados se tabulan en las tablas siguientes:

**Pintura N° 1****Tabla 3. 20** Contracción de la pintura refractaria N° 1.

		<b>Inicial (mm)</b>	<b>Final (mm)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	48,00	5,51
	Altura	50,8	63,00	-24,02
Probeta para tracción	Ancho	41,3	41,00	0,73
	largo	76,5	74,00	3,27
	Alto	25,5	31,00	-21,57

**Pintura N° 2****Tabla 3. 21** Contracción de la pintura refractaria N° 2.

		<b>Inicial (mm)</b>	<b>Final (mm)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	46,00	9,45
	Altura	50,8	49,10	3,35
Probeta para tracción	Ancho	41,3	40,50	1,94
	largo	76,5	74,60	2,48
	Alto	25,5	25,00	1,96

**Pintura N° 3****Tabla 3. 22** Contracción de la pintura refractaria N° 3.

		<b>Inicial (mm)</b>	<b>Final (mm)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	47,90	5,71
	Altura	50,8	41,70	17,91
Probeta para tracción	Ancho	41,3	39,00	5,57
	largo	76,5	71,70	6,27
	Alto	25,5	20,90	18,04

**Pintura N° 4****Tabla 3. 23.** Contracción de la pintura refractaria N° 4.

		<b>Inicial (mm)</b>	<b>Final (mm)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	47,00	7,48
	Altura	50,8	41,20	18,90
Probeta para tracción	Ancho	41,3	41,00	0,73
	largo	76,5	75,33	1,52
	Alto	25,5	24,60	3,53

## Pintura N° 5

**Tabla 3. 24** Contracción de la pintura refractaria N° 5.

		Inicial (mm)	Final (mm)	Porcentaje (%)
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	48,80	3,94
	Altura	50,8	50,00	1,57
Probeta para tracción	Ancho	41,3	41,04	0,63
	largo	76,5	75,93	0,75
	Alto	25,5	25,20	1,20

**Tabla 3. 25** Resumen de la Contracción de las pinturas refractarias.

Porcentaje (%)					
5,51	9,45	5,71	7,48	3,94	<b>Diámetro</b>
-24,02	3,35	17,91	18,90	1,57	<b>Altura</b>
0,73	1,94	5,57	0,73	0,63	<b>Ancho</b>
3,27	2,48	6,27	1,52	0,75	<b>largo</b>
-21,57	1,96	18,04	3,53	1,20	<b>Alto</b>

En la tabla 3.25, la pintura N° 5 presenta un margen de contracción menor al resto de pinturas permitiendo así su selección por el hecho de que no presentaría fisuras grandes al secarse.

**Tabla 3. 26** Permeabilidad, dureza, compresión, corte y tracción de las pinturas refractarias.

Pinturas	1	2	3	4	5
<b>Pruebas</b>	<b>valores</b>	<b>valores</b>	<b>valores</b>	<b>valores</b>	<b>valores</b>
permeabilidad	170 (rojo)	10 (rojo)	40 (rojo)	20 (rojo)	120 (rojo)
Dureza	0	55	75	37	77
compresión	15 (kg/cm <sup>2</sup> )	94 (kg/cm <sup>2</sup> )	90 (kg/cm <sup>2</sup> )	92 (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuera de escala
corte	14 (kg/cm <sup>2</sup> )	30 (kg/cm <sup>2</sup> )	75 (kg/cm <sup>2</sup> )	63 (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuera de escala
tracción	2 (kg/cm <sup>2</sup> )	3 (kg/cm <sup>2</sup> )	3 (kg/cm <sup>2</sup> )	3 (kg/cm <sup>2</sup> )	5 (kg/cm <sup>2</sup> )

Los valores de la pintura N° 5 mostrados en la tabla 3.26, son los más altos de todas las pinturas siendo esta la pintura seleccionada, ya que esta tiene mayor dureza y presenta buenas propiedades.

### **3.10 PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA**

Luego de analizada la viabilidad de la obtención de los diferentes materiales que constituyen cada una de las pinturas anteriormente expuestas en la tablas , además del costo de las mismos, se seleccionó a la pintura refractaria N° 5, debido que esta presenta constituyentes fáciles de obtener dentro del mercado nacional, además presenta las siguientes características.

- Poder de humectación y adherencia al momento de aplicar la pintura refractaria sobre el modelo espuma de poliestireno previamente confeccionado.
- Presenta mayor dureza y presenta buenas propiedades.
- Presenta un margen de contracción menor al resto de pinturas permitiendo así su selección por el hecho de que no presentaría fisuras grandes al secarse.
- Brinda una adecuada permeabilidad para permitir el escape al aire de los gases presentes en el proceso de fundición provocados por la reacción entre el metal líquido, la espuma del modelo, la arena sílice y el aire (medio ambiente), todo esto gracias a que presenta porosidades que no afectan la estructura de la pintura refractaria haciéndola porosa.
- A medida que el metal se va solidificando dentro de la caja de moldeo, la temperatura del mismo va disminuyendo en función del tiempo (velocidad de enfriamiento), esto convertiría a la arcilla como un factor protector, además la melaza proporcionaría mayor cohesión entre las partículas de material refractario que protege el modelo de espuma del contacto con la arena de moldeo, logrando de esta manera un óptimo acabado superficial y por ende en la rugosidad de la pieza fundida.

### 3.10.1 AGENTE REFRACTARIO: SÍLICE (SiO<sub>2</sub>)

El óxido de silicio o dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) es un compuesto de silicio y oxígeno, Este material refractario cuyo cono pirométrico o Seger, supera los 1500 °C demostrando su aplicabilidad como material refractario para utilizarlo en el proceso de fundición por espuma perdida, su obtención es relativamente difícil, debido a que el sílice encontrado comúnmente dentro del mercado local no satisface la medición de la malla ASTM 200.

Debido al problema anteriormente señalado con la sílice, se tuvo que emplear el molino de bolas disponible en el Laboratorio de metalurgia extractiva de la EPN (figura 3.26), para obtener finalmente el tamaño de grano requerido para dicho propósito, procedimiento que lo expongo a continuación.



**Figura 3. 26** Molino de bolas de metalurgia extractiva en funcionamiento

Se utiliza la arena seleccionada anteriormente y se procede a moler en el molino de bolas de metalurgia extractiva por el lapso de 5 h una cantidad de 10 kg de arena sílice, hasta conseguir la finura requerida para la pintura.

### 3.10.2 AGENTE DE SUSPENSIÓN: ARCILLA ROJA

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. Son fusibles y se usan a temperatura comprendidas entre 900 y 1050°C. Contiene grandes cantidades de Carbonato Cálcico y Óxidos de Hierro. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por los seres humanos, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales como la ocarina son elaborados con arcilla. También se la utiliza en muchos procesos industriales, tales como en la elaboración de papel, producción de cemento y procesos químicos.

Los cerámicos tradicionales están constituidos por tres tipos básicos: arcilla, sílice (silex) y feldespato. La arcilla está compuesta principalmente por silicatos de Al hidratados ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) con pequeñas cantidades de otros óxidos, como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ .

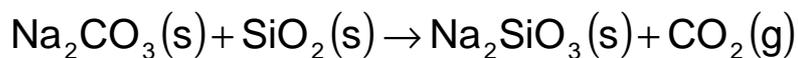
Productos estructurales de la arcilla tales como ladrillos para la construcción, tuberías de desagües, tejas y losetas para pisos están hechos de arcilla natural que contiene los tres componentes básicos.

Su obtención fue sencilla dentro del mercado local, recalcando que este presentó en su constitución algunos grumos e impurezas indeseables, todos estos inconvenientes fueron resueltos al tamizar el material en una criba seca de grado también ASTM 200.

### **3.10.3 AGENTE DISPERSANTE: SILICATO DE SODIO ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )**

El silicato de sodio que actuará como agente aglutinante y dispersante, este debe ser medido en proporciones adecuadas y deber ser agregado según el comportamiento de la mezcla. El silicato de sodio es una sustancia química sólida, blanca y cristalina, de fórmula  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

El silicato de sodio se forma cuando el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y el dióxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se funden juntos en un horno.



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

#### **3.10.4 AGENTE SOLVENTE: EL AGUA**

Es el componente de mayor proporción de la pintura refractaria, es en el medio en el cual los demás componentes se van a combinar y disolver para dar pasó a una solución homogénea. El solvente utilizado es el más abundante en la tierra, el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ )

#### **3.10.5 ADITIVOS: MELAZA**

La melaza o miel de caña es un producto líquido espeso derivado de la caña de azúcar, obtenido del residuo restante en las cubas de extracción de los azúcares. Su aspecto es similar al de la miel aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce, ligeramente similar al del regaliz, con un pequeño regusto amargo.

Nutricionalmente presenta un altísimo contenido en hidratos de carbono además de vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre y magnesio. Su contenido de agua es bajo.

Se elabora mediante la cocción del jugo de la caña de azúcar hasta la evaporación parcial del agua que éste contiene, formándose un producto meloso semicristalizado. Se la utiliza por su poder de cohesión y espesante.

### **3.11 PROCESO**

Para lograr una homogenización adecuada de todos los componentes presentes en la pintura, se emplea un agitador mecánico-eléctrico, esto en consideración de

la presencia de sílice que podría en un cierto momento decantarse y perjudicar al revestimiento al aplicarlo en los modelos.

El agitador mecánico-eléctrico usado en esta experiencia se presenta en la figura 3.27, sus características se presentan más detalladas en los anexos.



**Figura 3. 27** Agitador mecánico-eléctrico

Al finalizar conseguimos una cantidad pintura de masa igual a 1000 g siendo estimado según el volumen total del modelo a recubrir, todos estos fabricados a partir de EPS. La variabilidad de concentraciones en la pintura refractaria se detalla en la tabla siguiente.

**Tabla 3. 27** Composición final de la pintura refractaria.

<b>Componentes</b>	<b>% porcentaje</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Arcilla malla 200	26.27	262.7
Silicato de Sodio	0.13	1.3
Carbonato de Sodio	0.09	0.9
Sílice malla 200	36	360
Melaza	5	50
Agua	32.51	325.1

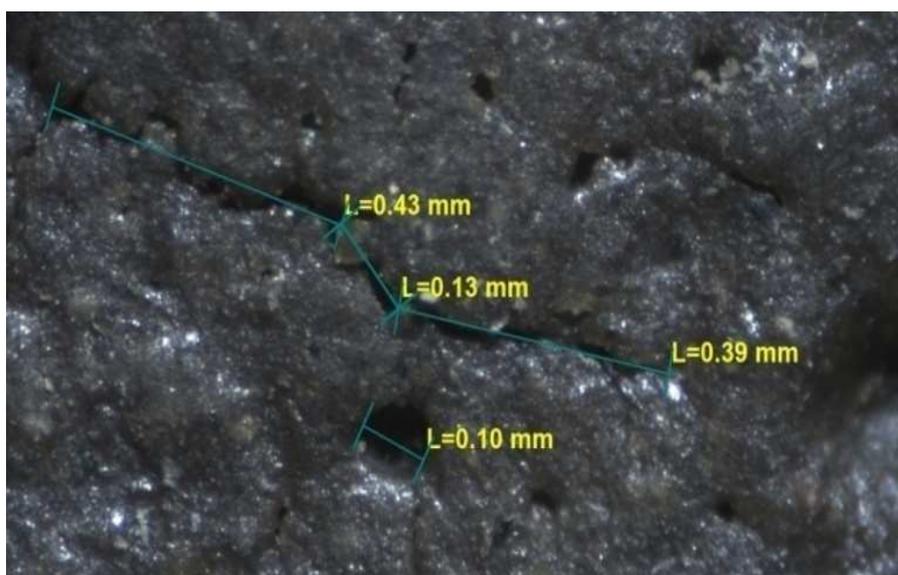
### **3.11.1 APLICACIÓN Y SECADO DE LA PINTURA REFRACTARIA FABRICADA.**

Al concluir con la elaboración de la pintura refractaria tipo 5 según la tabla 3.28, proseguimos con el siguiente paso, el de la puesta a punto de la aplicación en el modelo de espuma de poliestireno,

El tiempo de secado de la pintura refractaria depende casi enteramente de las dimensiones del modelo de poliestireno expandido y de las propiedades de los constituyentes de la pintura refractaria. Para el caso de la pintura de tipo 5, el tiempo de secado será el límite superior que es el de 24 horas para no tener complicaciones posteriores. Las concentraciones en porcentajes de melaza óptimas durante la aplicación de la pintura refractaria sobre la superficie de las probetas de espuma de poliestireno son del orden de 5-7 % en este intervalo de concentraciones se pudieron observar mejores propiedades de adherencia, humectación y homogeneidad del refractario sobre la superficie del modelo, además de no presentarse grietas en el revestimiento una vez secado el mismo por un lapso de tiempo de 24 horas.

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

### 3.11.2 ASPECTO DE LA CASCARA FORMADA POR LA PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA.

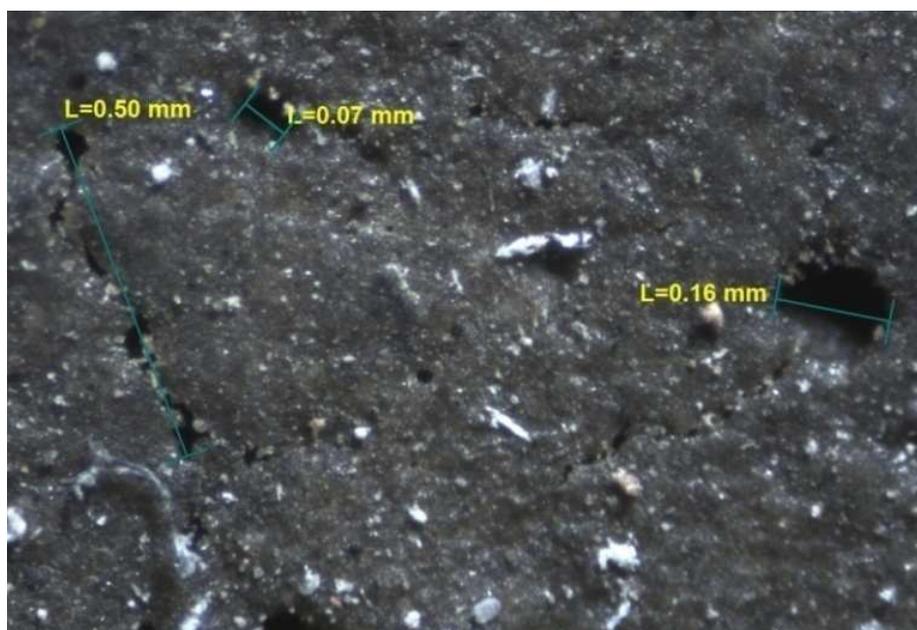


**Figura 3. 28** Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación.

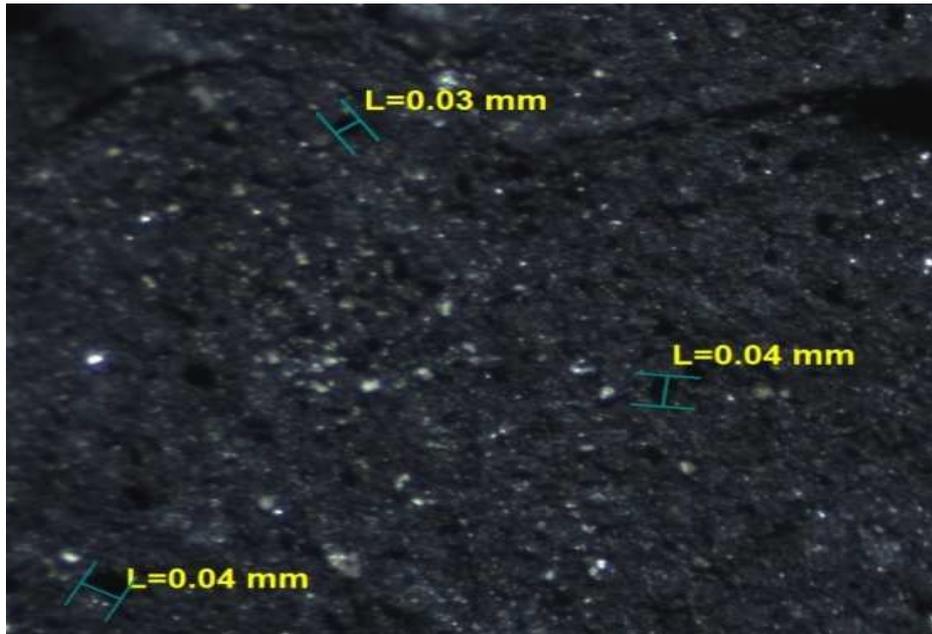
En la figura 3.28, se observa fisuras o grietas que están entre los valores de 0.13 hasta los 0.43 mm de longitud aproximadamente, esta característica facilita la salida de los gases del modelo gasificable en el momento del colado del metal. Además presencia de porosidades de diámetro de 0.08 – 0.10 mm mostrados en las siguientes figuras.



**Figura 3. 29** Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación.



**Figura 3. 30** Cascara de la pintura refractaria seca a 40X de ampliación.



**Figura 3. 31** Cascara de pintura refractaria después del colado a 40X de ampliación.

Una vez fundido el modelo, la pintura refractaria presenta fisuras y además su estructura está constituida por poros que están entre los valores de 0.03 - 0.04 mm como se observan en la figura 3.31, brindando así una superficie finamente porosa cualidad que es favorable para el proceso de fundición de modelos gasificables.

### **3.11.3 CÁLCULO DE POROSIDADES EN LA PINTURA REFRACTARIA SELECCIONADA**

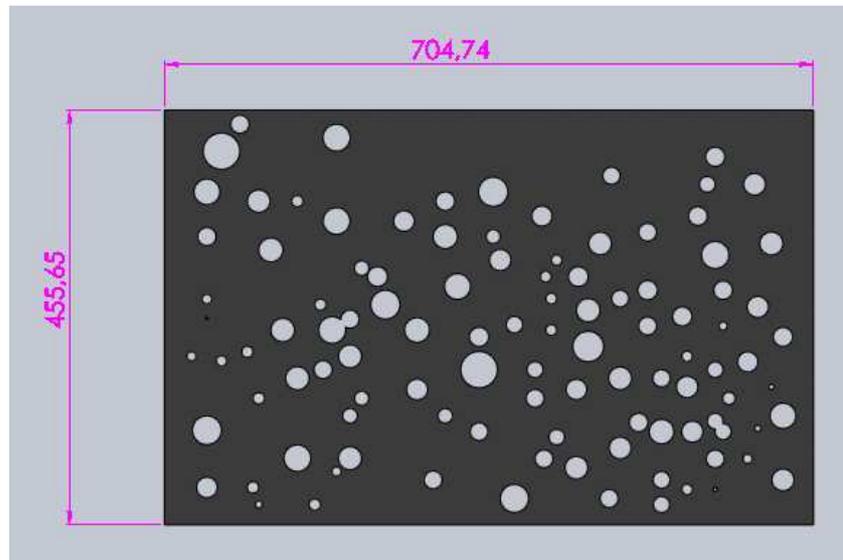
De la sección con porosidades

$$\text{Área} = 283214.86 \text{ mm}^2$$

De la sección sin porosidades

$$\text{Área} = 321114.78 \text{ mm}^2$$

**% de porosidades = 11.8 %**



**Figura 3. 32** Sección digital de la cascara de pintura refractaria

La pintura refractaria, busca incrementar la permeabilidad del modelo en el proceso LFC y aumentar la salida de los gases provocando así una superficie uniforme, evitando las fallas que se producen en el moldeo por arena, debido a que juega un papel radical en la calidad de las piezas fundidas, ya que una baja permeabilidad disminuye la transferencia de calor metal espuma e incrementa la cantidad de poros en la pieza final. Encontrando que el valor de viscosidad adecuado para la pintura refractaria, en la producción de partes por LFC, debe estar en el intervalo de 1900 a 2200cp para la pieza, y entre 1600 a 1800cp para el sistema de alimentación.

## CAPÍTULO 4

### MÉTODO EXPERIMENTAL CON MODELOS GASIFICABLES

#### 4.1 OBJETIVO Y PROCEDIMIENTO.

El objetivo general de este proyecto consiste en el mejoramiento del acabado superficial de componentes metálicos fundidos mediante el método de espuma perdida con aluminio. El procedimiento a seguir tiene que tener en cuenta varios aspectos importantes que son imprescindibles al momento de la ejecución de este proyecto.

- Selección del modelo a fundir
- Diseño del modelo
- Construcción del modelo en espuma de poliestireno
- Obtención y preparación de los componentes principales para la fabricación de la pintura refractaria
- Aplicación y secado de la pintura refractaria
- Moldeo del modelo con arena refractaria en la caja de moldeo y colado del componente mecánico
- Limpieza y maquinado de la pieza fundida

#### **Materiales y equipos utilizados.**

Los materiales utilizados en este proyecto son los siguientes:

- Una plancha de espuma de poliestireno expandido de grado T de 300x300x40 mm.
- Un frasco de silicona líquida.
- Arena sílice ( $\text{SiO}_2$ ) al 98% malla ASTM 70 y ASTM 200
- Arcilla malla ASTM 200
- Silicato de sodio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$
- Melaza

- Carbonato de sodio
- Agua
- Aleación de aluminio

**Los equipos utilizados en este proyecto son los siguientes:**

- Cortador de espuma de poliestireno expandido
- Calibrador
- Flexómetro
- Molino de bolas
- Mallas o cribas ASTM 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270
- Multímetro digital
- Agitador mecánico-eléctrico
- Recipiente de aluminio fundido
- Recipiente de polietileno (PE)
- Caja de moldeo
- Máquina vibradora o zaranda
- Horno a gas licuado de petróleo
- Crisol de hierro fundido
- Tenazas, guantes, gafas y cascos
- Comparador de rugosidad marca RUBERT & CO. LTD

## **4.2 PROCESO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO**

En el proceso LFC se utiliza espuma de poliestireno (EPS) con la forma de la pieza a producir, a la cual se adicionan solidariamente un sistema de alimentación y bajante (también de EPS). Este modelo en conjunto, es recubierto con pintura refractaria y luego colocado en un recipiente metálico donde se cubre con arena. Posteriormente, el modelo de espuma es fundido y degradado químicamente al contacto con el metal líquido.

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

Para la fabricación de modelos se escoge el grado T o X según la descripción de la tabla 4.1, esto se lo realiza a fin de obtener un mejor acabado final de la pieza fundida, para esto se lo clasifica según su uso y rango de diámetros de perla.

**Tabla 4. 1** Diámetros de perla de poliestireno expandido

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

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

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

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

### 4.3 CONTRACCIÓN METÁLICA

Al solidificar los metales se contraen y disminuyen su volumen, este fenómeno origina una reducción en las medidas de la pieza, por lo cual los modelos al ser diseñados deben contener en sus dimensiones varias tolerancias (véase figura 4.1).

1. *Tolerancia para la contracción.* Se debe tener en consideración que un material al enfriarse se contrae dependiendo del tipo de metal que se esté utilizando, por lo que los modelos deberán ser más grandes que las medidas finales que se esperan obtener.
2. *Tolerancia por acabado.* Cuando una pieza es fabricada es necesario realizar algún trabajo de acabado o terminado de las superficies generadas, esto se logra puliendo o quitando algún material de las piezas producidas por lo que se debe considerar en el modelo esta rebaja de material.
3. *Tolerancia de distorsión.* Cuando una pieza es de superficie irregular su enfriamiento también es irregular y por ello su contracción es irregular generando la distorsión de la pieza, estos efectos deberán ser tomados en consideración en el diseño de los modelos.

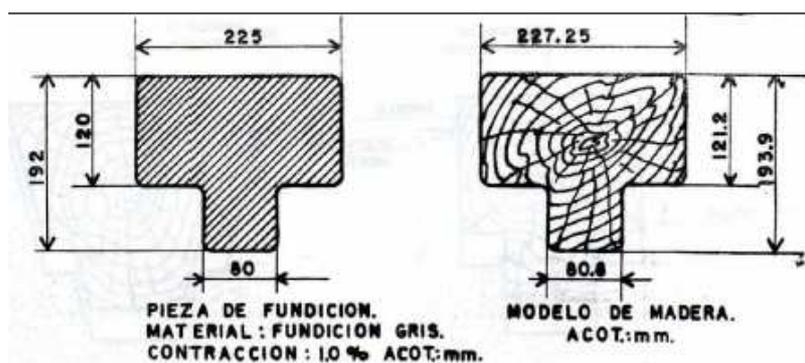


Figura 4. 1 Ejemplo de modelación de piezas

Teniendo en cuenta que la confección de los modelos de poliestireno depende de la contracción de los metales a fundir, se presenta la tabla 4.2 donde se evidencian los valores característicos de contracción volumétrica de metales y aleaciones no ferrosas y ferrosas.

**Tabla 4. 2** Contracción volumétrica de metales

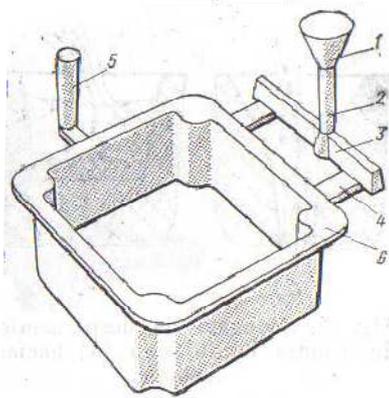
Metal o aleación	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación (%)	Contracción térmica del sólido (%)
Aluminio	7,0	5,6
Aleación de aluminio	7,0	5,0
Fundición de hierro gris	1,8	3,0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3,0
Fundición de acero al bajo carbono	3,0	7,2
Cobre	4,5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

#### 4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Son muchos los factores que deben controlar para obtener una buena pieza de fundición, uno de estos factores es debido al recorrido que efectúan el metal en el molde y su solidificación.

El metal líquido se introduce a la cavidad del molde a través de un sistema de alimentación compuesto de cinco partes principales (figura 4.2): el embudo de colada (bacín), canal vertical (bebedero), colector de escoria, los alimentadores y los respiraderos.

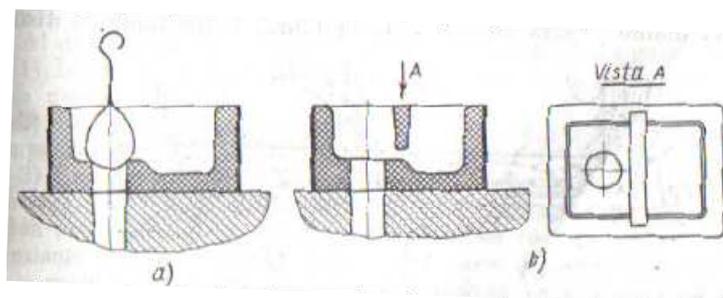
El metal se vacía primeramente en el bacín y pasa el canal vertical, después fluye a través del colector de escoria y por ultimo ingresa por los alimentadores para llegar a la cavidad del molde.



**Figura 4. 2** Moldura de fundición con sistema de alimentación: 1- embudo de colada; 2- canal vertical; 3- colector de escoria; 4- alimentador; 5- respiradero; 6- moldura.

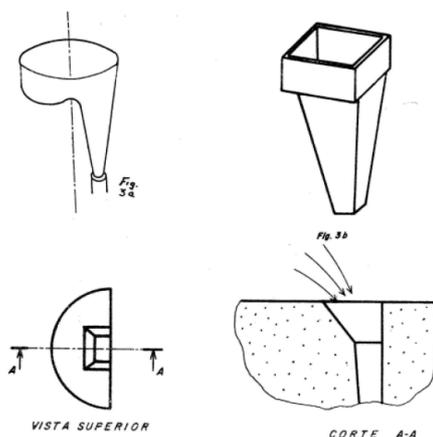
#### 4.4.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

**El embudo de colada (Bacín):** es el componente número uno destinado a recibir el metal líquido y encargado de mantener el resto del sistema lleno de metal líquido, además ayuda a retener la escoria e inclusiones antes de que fluya a través del sistema. Algunas formas de bacías se muestran a continuación.



**Figura 4. 3** Bacías de colada para el llenado de molduras medianas (a) y grandes (b)

**El canal vertical** sirve para transmitir la masa fundida del embudo a los otros elementos del sistema de alimentación, debe ser cónico en vez de recto, con la menor área en el fondo a fin de minimizar el efecto de vértice y evitar el atropellamiento de burbujas de aire durante el vaciado del metal. La conicidad del canal es de 2-4%. El área transversal del bebedero puede ser circular o rectangular (véase figura 4.4).



**Figura 4. 4** Formas de canales verticales.

**El colector de escoria:** dispuesto en el plano horizontal, sirve para retener la escoria y transmitir la masa fundida del canal vertical a los alimentadores. Son de sección rectangular y se deben diseñar de forma tal que permita distribuir el metal

en forma uniforme a la pieza (véase figura 4.5). La sección transversal de los colectores de escoria se hace trapezoidal.

Para una mejor retención de la escoria, el colector debe estar obligatoriamente lleno con masa fundida y la sección del canal vertical debe ser mayor que la sección del colector de escoria, y la sección del colector de escoria mayor que la sección total de los alimentadores, llamándose a este sistema como cerrado.

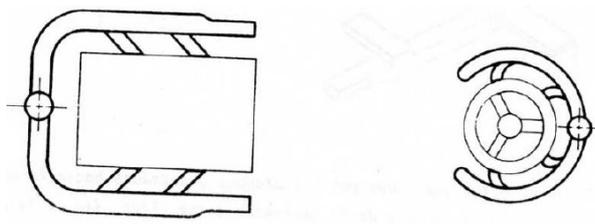


Figura 4. 5 Colectores de escoria según la moldura.

**Pozo (Base del fondo del bebedero):** no debe tener aristas ni esquinas, como se muestra en la figura 4.6, se recomienda la forma circular y el fondo plano para reducir la tendencia a la turbulencia y la aspiración de aire.

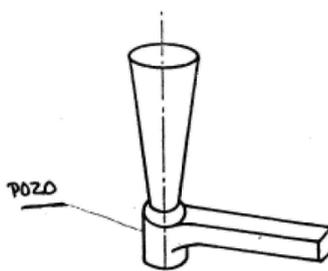
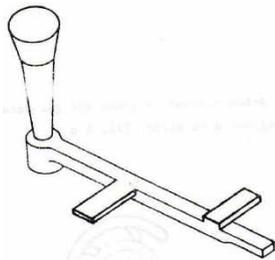


Figura 4. 6 Pozo

**Los alimentadores (ataques)** son canales destinados para suministrar la masa fundida directamente a la cavidad del molde. La sección de los alimentadores debe ser de una configuración tal que la masa fundida llegue suavemente la cavidad del molde, se enfríe poco en el trayecto del colector de escoria a la moldura, y que después de su solidificación los alimentadores se quiebren con facilidad de la moldura (véase figura 4.7).

La práctica ha establecido que la mejor configuración de la sección transversal de los alimentadores es el trapecio que pasa a un rectángulo ancho en el lugar de conjugación con la moldura.

Para una mejor separación de los alimentadores de las molduras, cuando el espesor de su cuerpo es menor que la altura del alimentador, en el alimentador a una distancia de 2- 2.5 mm de la moldura se hace un estrechamiento.



**Figura 4. 7** Alimentadores abajo y arriba del plano de partición.

**Los respiraderos** sirven para la evacuación de los gases de la cavidad del molde y para alimentar la moldura. Estos disminuyen la presión dinámica del metal sobre el molde e indican el final de la colada. En dependencia de la magnitud del molde se emplean uno o varios respiraderos. La sección del respiradero en la base se adopta habitualmente igual a  $1/2-1/4$  de la sección de la pared de la moldura. Más arriba de la base la sección del respiradero se hace más grande.

#### 4.4.2 SISTEMAS DE BEBEDEROS

Al elegir el modo de suministrar el metal fundido al molde y diseñar la estructura del sistema de bebederos, se debe tener en cuenta que el metal fundido debe llegar al molde suavemente, sin chocar con sus paredes y machos, sin remolinos, con una velocidad de elevación del nivel en el molde determinada, como también asegurar una sucesiva expulsión del aire y gases del molde. Además el modo de suministrar el metal fundido debe asegurar una solidificación dirigida de la moldura, teniendo en cuenta su estructura y las propiedades de la masa fundida.

**Los sistemas de bebederos con suministro de la masa fundida por el plano de separación:** Son los más sencillos, se utilizan para la mayoría de las molduras que tienen una profundidad del molde de la línea de separación de hasta 200 mm.

**El sistema de bebederos de sifón:** se suministra el metal por la parte de abajo, asegura un llenado paulatino del molde, se utiliza para molduras pequeñas y grandes. Es poco utilizado en producciones a gran escala.

**Los sistemas de bebederos de lluvia:** se utilizan para la fabricación de molduras medianas y grandes, tales como volantes, engranajes, cilindros, etc. La masa fundida se suministra al molde por arriba, a través de una serie de orificios de pequeño diámetro, realizados en el bacín de colada.

La ventaja del sistema de bebederos de lluvia es el llenado uniforme de todo el molde sin recalentar sus partes con la masa fundida. Gracias a esto la moldura resulta compacta, sin porosidades y oquedades de contracción.

**Los sistemas de bebederos combinados:** están destinados para molduras complicadas, altas, de paredes delgadas. Al comienzo de la colada el molde se llena con masa fundida a través del sistema de sifón y luego a través del de lluvia. Gracias a este llenado el molde no se destruye y no se crean régulos.

**El sistema de bebederos de varios niveles** se emplea al fabricar molduras grandes y pesadas. Asegura un funcionamiento sucesivo de los alimentadores inferiores y superiores, la masa fundida primero llega a la parte inferior y luego a medida que se va llenando, a través de los alimentadores de la hilera superior. Este sistema permite evitar el calentamiento y derrubio del molde en el lugar de penetración de la masa fundida y obtener molduras de calidad.

## 4.5 PARÁMETROS DEL COLADO

### 4.5.1 TEMPERATURA DE VACIADO DEL METAL

El metal se calienta a una temperatura ligeramente mayor que el de la fundición. En este caso se utiliza el aluminio donde su temperatura de fusión está entre 670-680 °C, dependiendo de su aleación.

**Energía calorífica** = Calor para elevar la temperatura hasta el  $T_m$  + calor de fusión para convertir el metal de sólido a líquido + calor para elevar el metal fundido a la temperatura de vaciado.

#### 4.5.2 VACIADO

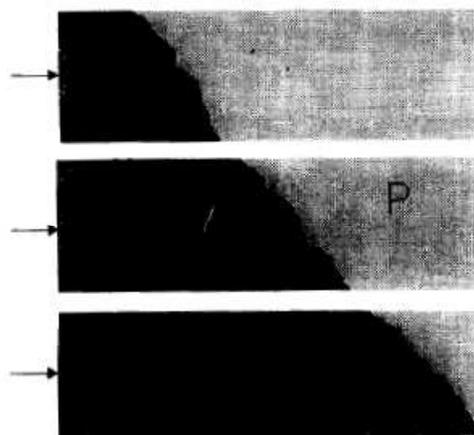
El metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde. Los factores que afectan el vaciado son:

- Temperatura de vaciado.
- Velocidad de vaciado
- Turbulencia de flujo

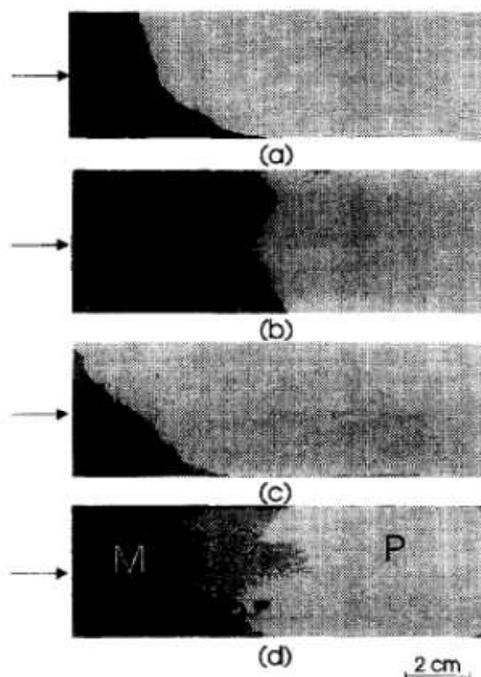
El volumen de productos gaseosos formados en la degradación de la masa del polímero aumenta con la temperatura. Durante el llenado de modelos de EPS, se convierten casi 60% del polímero en residuo viscoso y se transforman 40% a los productos gaseosos. Por ejemplo, en el caso de EPS, el volumen de gases producidos a los 750°C y 1300°C está en el orden de 220 cm<sup>3</sup> y 760 cm<sup>3</sup> respectivamente. Los gases formados al frente de metal se eliminan en la arena a través de la capa porosa. Algunos de los gases pueden condensar en el contacto con la arena fría. Como la temperatura de la arena aumenta por el traslado de calor del metal, los gases condensados pueden evaporizarse y salir por la arena. Esta sucesión de vaporización-condensación-vaporización incluso continúa después de que el molde está lleno. Si la proporción de formación de gases al del metal es mayor que la proporción de eliminación, algunos de los gases pueden acumularse en el frente del metal.

Las fases secuenciales durante el llenado de una tira de EPS con estaño líquido a 325 °C se muestran en Figura 4.8, ninguna capa de gas se descubre al frente de metal. También note que la forma del frente de metal es lisa y se mantiene durante el flujo.

En el caso de modelos de EPS, ninguna capa de gas se descubre al frente de metal a aproximadamente 525°C. Sin embargo, cuando la temperatura se aumenta a 750 °C, una capa de gas se observa al frente de metal (Figura 4.9). El espesor de la capa de gas está típicamente en el orden de 5 mm. En 1150 °C, una capa de gas sustancial (> 2 centímetros) puede estar presente al frente del metal como se muestra en la Fig. 4.9 (d). Además, en el frente de metal aparece la turbulencia indicada durante el proceso de llenado.



**Figura 4.8** Fotografías secuenciales de la posición del metal durante varios tiempos en el proceso de llenado del molde de espuma con metal a T 325 °C.



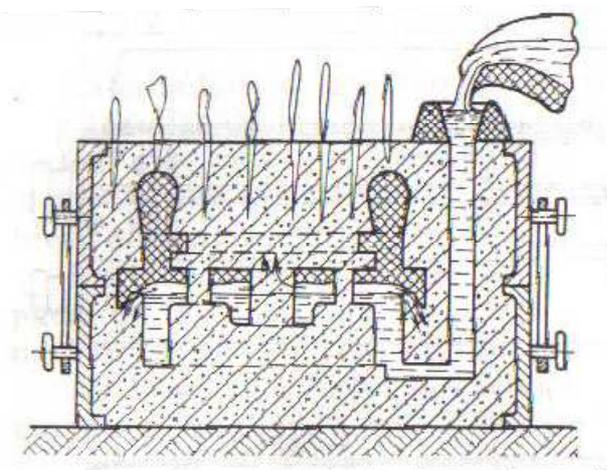
**Figura 4.9** Fotografías mostrando la morfología del metal frente a varias temperaturas de colado en modelos de EPS, (a) 275 °C, (b) 525 °C, (c) 750 °C, (d) 1150 °C.<sup>27</sup>

#### 4.5.3 VELOCIDAD DE FLUJO

La velocidad de flujo en el molde depende de la rapidez de degradación del polímero. Los estudios han mostrado que el flujo del metal fundido es

<sup>27</sup> Fuente: POLYMER-MELT INTERACTIONS DURING CASTING FORMATION IN THE LOST FOAM PROCESS; S. Shivkumar, X. Yao and M. Makhlof; Department of Mechanical Engineering; Worcester Polytechnic Institute; 1995

básicamente laminar, con número de Reynolds del orden de 400 a 3000. Se han medido las velocidades de flujo del metal fundido, en el frente del modelo de metal-polímero, están respectivamente en el orden de 0.22 cm/s y 12.2 cm/s a 200°C y 1150°C para los modelos de EPS. La velocidad se puede controlar produciendo modelos con cavidades o secciones huecas; por tanto la velocidad aumentará al cruzar el metal fundido estas regiones huecas, de manera similar a vaciar en una cavidad vacía como ocurre en la fundición de arena.



**Figura 4. 10** Llenado de un molde con modelo gasificable.<sup>28</sup>

La gasificación del modelo, se produce cuando el metal entra en contacto con el modelo gasificable, ya que el metal se suministra por abajo. En este caso los productos gaseosos de la descomposición del modelo son expulsados al molde a través de la holgura entre la superficie de descomposición del modelo como se observa en la figura anterior.

En lo referente al llenado de cavidades se reporta la existencia de una zona de cinética, existente entre el frente de avance del metal y el modelo de espuma que se degrada. Dicho fenómeno, que controla la velocidad y la calidad del flujo en el frente de metal es la velocidad de descomposición de la espuma que es una función lineal de la presión metalostática y la temperatura del frente de avance de metal.

<sup>28</sup> Fuente: N. D. TITOV, YU. A. STEPÁNOV; Tecnología del proceso de fundición; pág. 124; editorial Mir Moscú.

Dado que el polímero requiere de una considerable energía para degradarse, se presentan grandes gradientes térmicos en la interfaz metal-polímero; en otras palabras, el metal fundido se enfría más rápido de lo que haría si se vaciara en una cavidad. En consecuencia, la fluidez es inferior a la de la fundición en arena. Esto tiene efectos importantes en la microestructura en toda la fundición y también conduce a una solidificación direccional del metal.<sup>29</sup>

**Fluidez:** medida de la capacidad del metal para llenar el molde antes de enfriarse. Es inversa a la viscosidad.

#### 4.5.4 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

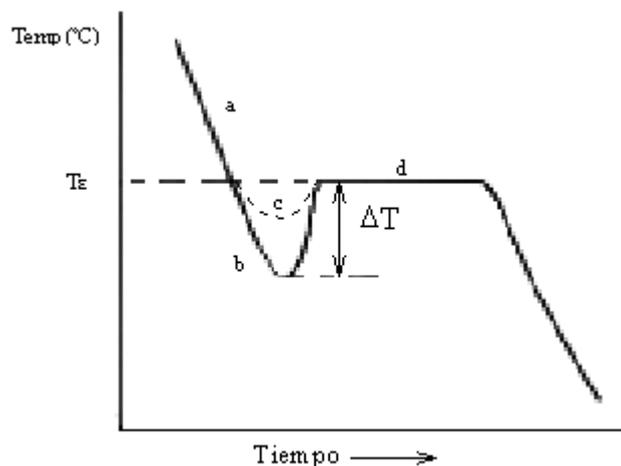
En general, los productos metálicos producidos por Fundición se originan en una primera etapa en estado líquido, luego del cual se pasa al estado sólido en moldes o por colada continua. El proceso de solidificación es determinante para la calidad del producto final, porque si el material queda defectuoso en esta etapa, será muy difícil efectuar las correcciones en el procesamiento posterior.

Es importante considerar la contracción del metal que se produce en el proceso de solidificación la cual es de las más importantes que se produce desde que el metal está en estado líquido a temperatura de colado hasta que está en estado sólido a temperatura de desmoldeo.

La figura 4.11 presenta el diagrama Temperatura (T) v/s tiempo (t) donde se muestra la forma para la solidificación de un metal puro:

---

<sup>29</sup> Fuentes: Flow Science Inc, Flow-3D manual, *Mem. Flow-3D Training Course*, Febrero de 2006; 10.  
C.W. Hirt y M.R. Barkhudarov,  
Modeling the lost foam process with defect prediction, *Flow Science Technical note 03-TN45-1*, abril de 1997



**Figura 4. 11** Diagrama T vs t de la solidificación de un metal puro

#### 4.5.4.1 Aleaciones con intervalo estrecho de Solidificación

En este grupo se encuentran los aceros de bajo carbono, los bronce, los latones de alta resistencia y la mayoría de las aleaciones de aluminio.

Las aleaciones con intervalo estrecho de solidificación solidifican en un tiempo breve, lo que provoca que se demande metal para alimentar la contracción durante poco tiempo, lo que significa menores exigencias de alimentación.

Las aleaciones solidifican en un intervalo de temperaturas en lugar de una temperatura única. En el centro de la fundición se segregan componentes al solidificarse. Esta diferencia de tiempos de solidificación genera contracciones desiguales, que pueden crear grietas en lugares de la pieza donde hay cambios bruscos de sección

El fenómeno de contracción se da porque la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida.

La tendencia a la solidificación rápida en las zonas mencionadas va de la mano con la distribución y forma del frente de metal entrante durante el vaciado. Debe tenerse en cuenta que la etapa de llenado define la distribución de las temperaturas del molde y del fluido antes del comienzo de la solidificación, por lo tanto, es adecuado conservar un único frente de metal, disminuyendo el

enfriamiento rápido por el contacto entre zonas frías y el aire a temperatura ambiente.<sup>30</sup>

La preservación de un frente de metal único facilita la solidificación homogénea ya que un gran porcentaje de la masa de la pieza conserva la misma temperatura antes del inicio de la solidificación. Igualmente, un solo frente de metal genera una menor probabilidad de aparición de defectos por atrapamiento de gases.

## **4.6 IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS**

En cuanto a los defectos propios del proceso de fundición de modelos gasificables, éstas pueden provenir por dos vías: las generadas en la etapa de producción de los modelos de espuma y las que están relacionadas con el proceso de fusión del metal.

### **4.6.1 DEFECTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MODELO DE ESPUMA**

La fabricación de las secciones de espuma es considerada como una de las etapas más críticas del proceso de fundición de modelos gasificables, pues del adecuado control de cada una de sus variables depende la obtención de un modelo en EPS que sea la réplica exacta de la pieza a fundir.

Los defectos típicos de este proceso son: el llenado incompleto del modelo, superficie con perlas con fusión deficiente, rebabas, poliestireno crudo, superficies quemadas, deformidades, variaciones dimensionales del modelo, contaminación del modelo y daño por almacenamiento, manipulación y transporte. En la figura 4.12 se ilustran tres ejemplos de los defectos de mayor frecuencia.

---

<sup>30</sup> Fuente: M. R. Barkhudarov, Is Fluid Flow Important for Predicting Solidification, Solidification Processing '97 Conference, July 1997.



**Figura 4. 12** Defectos típicos en los modelos de espuma de poliestireno; a) Rebabas, b) Superficie quemada, c) desnivel.<sup>31</sup>

#### 4.6.2 DEFECTOS DEBIDOS AL PROCESO DE FUNDICIÓN

Entre los defectos debidos al proceso de fundición de espuma perdida (FEP) y dejando de lado aquellos defectos típicos producidos por las técnicas de fundición convencionales, se encuentran los siguientes: Incrustaciones de arena y penetración del metal, inclusiones no metálicas, porosidad debida a la pirolisis del modelo, distorsión del modelo, erosión del modelo, fracturas en caliente, colapso del molde y desmoronamientos. En la figura 4.13 se muestran tres de los defectos mencionados de mayor aparición en las piezas.



**Figura 4. 13** Defectos debidos al proceso de fundición; a) Gases atrapados, b) Inclusiones de arena, c) superficie rugosa.<sup>31</sup>

#### 4.6.3 DEFECTOS COMUNES.

**Porosidad:** es causada por los gases que durante el vaciado del metal en el molde, no tienen una salida fácil al exterior. Si la porosidad está distribuida de manera uniforme en la pieza, es señal de que el gas estaba ya disuelto con el metal antes del vaciado (véase figura 4.14).

<sup>31</sup> Fuente: PROCESO DE FUNDICIÓN EN ESPUMA PERDIDA PARA LA FABRICACIÓN DE AUTOPARTES; Patricia Fernández m.; Medellín, Marzo de 2007

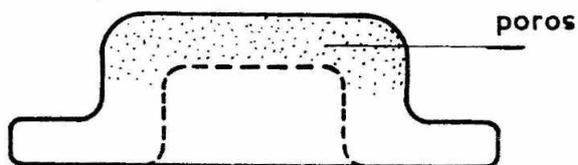


Figura 4. 14 Ejemplo de porosidad

**Rechupe:** es un hueco dejado en la pieza como resultado de la contracción líquida y de solidificación propia de los metales como se muestra en la siguiente figura.

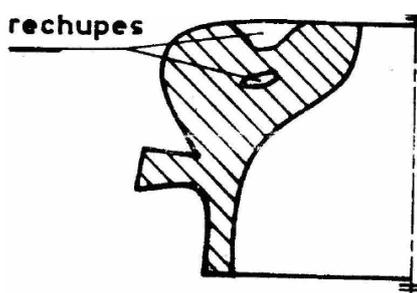


Figura 4. 15 Ejemplo de rechupe

**Sopladura:** Agujero en la pieza fundida causada por el gas atrapado durante la solidificación. Estos huecos alcanzan hasta la superficie (véase figura 4.16). La sopladura puede ser causada también por arena demasiado húmeda.

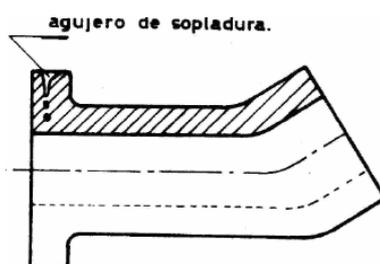


Figura 4. 16 Ejemplo de sopladura

**Grietas:** las grietas en caliente o roturas en caliente se producen cuando hay una rigidez en el molde que origina un esfuerzo de tracción en la pieza (véase figura 4.17).

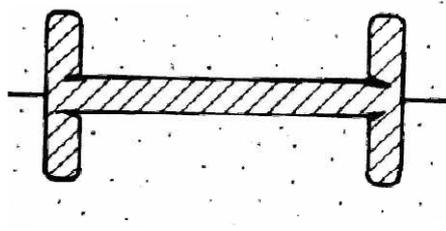


Figura 4. 17 Ejemplo de grietas

**Llenado incompleto:** es el resultado de la solidificación del metal antes de que el molde sea lleno, esto se observa en la figura 4.18. Este defecto ocurre también por tener un sistema de alimentación deficiente.

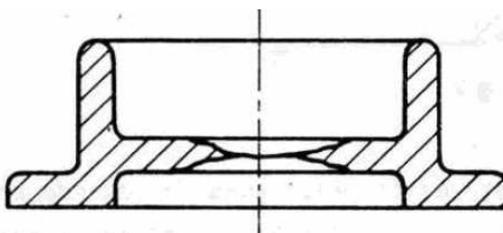


Figura 4. 18 Ejemplo de llenado incompleto

**Explosiones de arena:** Son granos de arena incrustados en la pieza debido a un apisonado flojo o un excesivo impacto del metal contra la superficie del molde (véase figura 4.19).

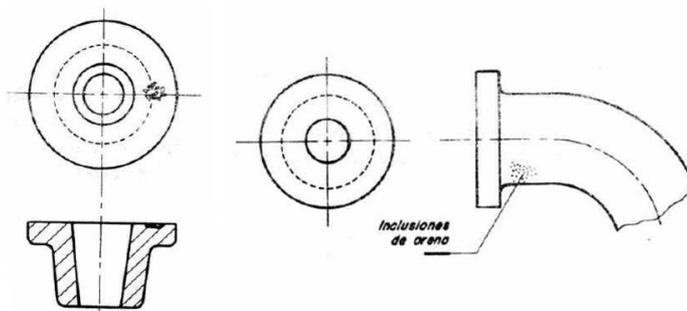


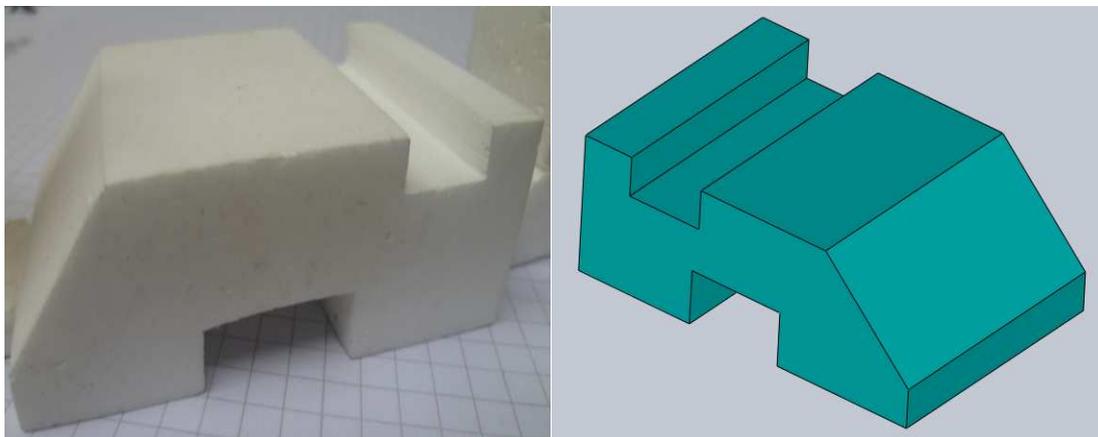
Figura 4. 19 Ejemplo de explosiones de arena <sup>32</sup>

**Escoria en la pieza:** La formación de escoria se debe a la oxidación del metal producida por la fusión del metal en el horno, o al vaciar el metal en el molde de tal manera que esta queda incluida en la pieza creándose el defecto.

<sup>32</sup> Fuente: Diseño y fabricación de modelos para fundición; ESIME.

## 4.7 PRUEBAS EN LAS MEZCLAS DE MOLDEO PREPARADAS

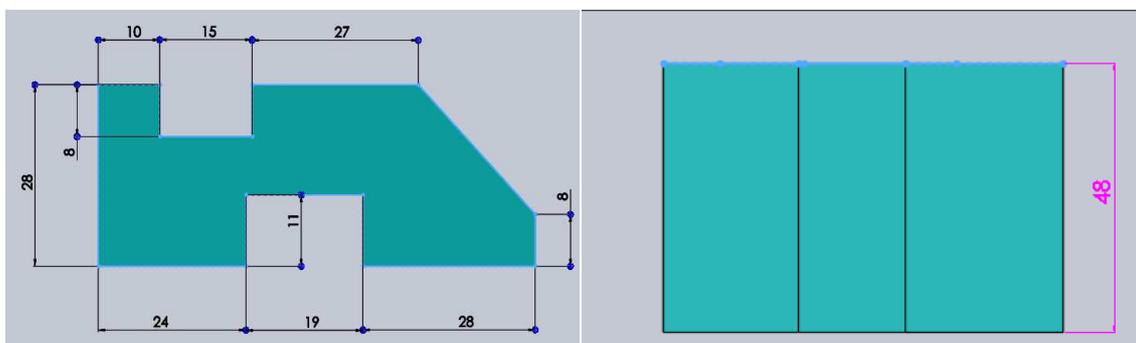
### 4.7.1 MODELO



**Figura 4. 20** Fotografía y diseño del modelo de espuma a ensayarse.

Con el diseño de modelo de la figura 4.20 se busca observar que los vértices del modelo salgan bien definidos en el proceso de fundición por modelos gasificables, además sus formas huecas y caras mantengan su forma y dimensión.

### 4.7.2 DIMENSIONES DEL MODELO GASIFICABLE



**Figura 4. 21** Dimensiones del modelo de espuma a ensayarse.

$$\text{Volumen} = 70,512 \text{ cm}^3$$

$$\text{Área frontal} = 14,69 \text{ cm}^2$$

### 4.7.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN



**Figura 4. 22** Forma del sistema de alimentación y ubicación en el modelo de espuma

Una ventaja que tiene este proceso es que se diseña el sistema de alimentación del mismo material que el modelo (EPS), permitiendo recoger todas las consideraciones que plantea un buen diseño de alimentación, para mejorar el finalizado de la pieza fundida evitando defectos provocados por un ineficiente sistema de alimentación.

Se escoge el sistema de alimentación por sifón (figura 4.22), ya que el metal fluye desde abajo alcanzando la parte superior del modelo y expulsando todos los gases que se producen al evaporarse el modelo gasificable, permitiendo una pieza completamente terminada y sin fallas por acumulación de gases.

### 4.7.4 CAJA DE PRUEBAS



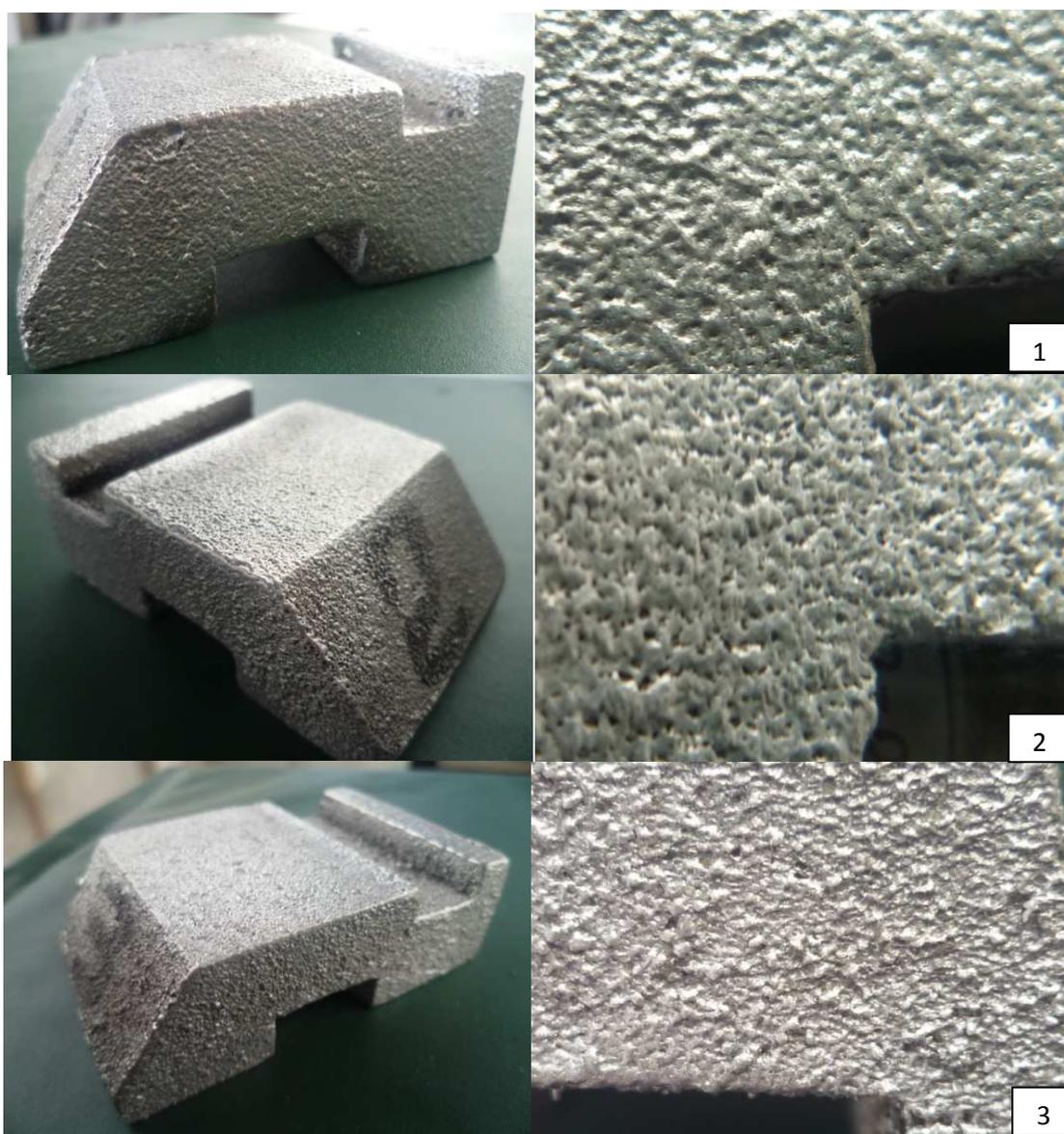
**Figura 4. 23** Fotografía de la caja de pruebas.

Sus dimensiones son 40x40 cm, altura 13 cm, dividido en seis partes iguales.



Figura 4. 24 Moldeado del modelo.

#### 4.7.5 MODELOS FUNDIDOS





**Figura 4. 25** Piezas fundidas con las mezclas de arena respectivamente y forma de la superficie a 5x ampliado

En la figura 4.25 se observa en la primera imagen, una superficie rugosa áspera con vértices bien definidos, un acabado superficial N11 de 25  $\mu\text{m}$ , además presenta incrustaciones de arena en la superficie.

La pieza N°2 presenta una superficie no tan áspera con vértices bien definidos, un acabado superficial N11 de 25  $\mu\text{m}$ , además presenta incrustaciones de carbón generados por el aserrín en menor porcentaje en la superficie.

La pieza N°3 presenta una superficie bien áspera con vértices poco definidos, un acabado superficial N11 de 25  $\mu\text{m}$ , además presenta incrustaciones de arena en la superficie de mayor porcentaje que la pieza N°1.

En la pieza N°4 se observa un llenado incompleto y ninguna forma definida.

En la pieza N°5 se observa una superficie no tan áspera con vértices medianamente definidos, un acabado superficial N11 de 25  $\mu\text{m}$ , además presenta incrustaciones de arena en las formas huecas del modelo y en menor porcentaje en la superficie.

#### 4.7.6 DEFECTOS EN LOS MODELOS ENSAYADOS CON LAS MEZCLAS DE MOLDEO RESPECTIVAS





**Figura 4. 26** Defectos en la piezas fundidas con la mezclas de arena fabricadas respectivas.

En la figura 4.26, en la pieza N°1 se observa sopladura en la parte superior de la pieza, además fallas en el llenado en la parte posterior del modelo, no permitiendo la forma del modelo completo.

Esta falla se da por el atrapamiento de gases producidos al colar el metal en la mezcla de moldeo preparada, no deja salir los gases.

En la pieza N°2 se observa sopladura en la parte lateral de la pieza en menor porcentaje que la pieza ensayada en la mezcla N° 1y ninguna falla adicional.

En la pieza N°3 se observa sopladura en la parte lateral de la pieza en menor porcentaje que la pieza ensayada en la mezcla N° 1y ninguna falla adicional.

En la pieza N°4 se observa llenado incompleto del modelo generado por el atrapamiento de gases generados por el espumaflex al momento de colar no dejando el llenado total de la pieza, se descarta esta mezcla.

En la pieza N°5 se observa sopladura en la parte lateral de la pieza, además fallas en el llenado en la parte inferior del modelo, no permitiendo la forma del modelo completo.

Esta falla se da por el atrapamiento de gases producidos al colar el metal en la mezcla de moldeo preparada, no deja salir los gases.

Con estos resultados la mezcla que presenta mejores características en sus propiedades y terminado de la pieza fundida es la mezcla N° 2. Ya que presenta menores defectos producidos por gases, su permeabilidad es adecuada.

**Tabla 4. 3** Composición de la mezcla N° 2.

<b>Componentes</b>	<b>% porcentaje</b>	<b>Cantidad (g)</b>
Arena Marrón vieja	78	2000
Aserrín	12% de la arena	240
Melaza	10 % de la arena	200

**Figura 4. 27** Coloración y textura en verde de la mezcla N° 2

- Su coloración es dorada
- Facilidad de moldear
- Poca humedad
- Su estructura es esponjosa
- % de compactibilidad 58.59 %
- Permeabilidad en seco = 250 (rojo)
- Resistencia a la compresión en seco = 26 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Resistencia al corte en seco= 10 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Dureza en seco = 0
- Permeabilidad en verde = 170 (rojo)
- Resistencia a la compresión en verde = 2.9 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Resistencia al corte en verde= 0.9 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Dureza en verde = 55 (B)

#### **4.8 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS**

Como en las pruebas realizadas con mezclas de moldeo no se logra conseguir un acabado fino de la superficie de la pieza se implementa el segundo método que consiste en recubrir el modelo con pintura refractaria y moldear con arena

seleccionada en el capítulo 3, sin adición de aglutinantes y aglomerantes, para así dar una mayor permeabilidad a la arena que soportara el moldeo del elemento recubierto con pintura refractaria, la cual permitirá un llenado completo de la pieza y una superficie más fina.

#### 4.8.1 SELECCIÓN DE LA ARENA PARA EL MOLDEO

Puesto que la arena para el moldeo se utiliza seca y en ausencia de aglutinantes, su reciclabilidad se convierte en una de las ventajas más sobresalientes del proceso de fundición de modelos gasificables.

##### Arena marrón nueva

- Contenido de arcilla 2.5 %
- Índice de finura (i) = AFS 46
- Tamaño de grano 0.25 - 0.5 mm (calidad media)
- Tamices adyacentes 79.8 %
- Forma de grano subangular, redonda
- % humedad 0.36
- Dureza (B) 50 - 70 (mediana)
- Permeabilidad 310 (rojo)
- Resistencia al corte 1 - 1,4 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Resistencia a la compresión 5 - 6,5 (kg/cm<sup>2</sup>)

#### 4.8.2 CONSTRUCCIÓN DE UN BACÍN METÁLICO

Se construye un bacín metálico para recibir el metal fundido y permitir que este genere una presión metalostática en el interior del modelo permitiendo así desalojar todos los gases generados en el instante del colado del metal fundido generando un avance de frente de solidificación uniforme y sin turbulencias. Además permite que la contracción del metal se genere en ella y no produzca defectos causados por falta de metal.

El bacín es un tubo de acero de diámetro interior 63 mm, de cedula 5 y altura 102 mm, el cual es cortado en dos partes iguales e incorporada una bisagra para su

abertura y cierre, además se sueldan dos varillas para su sostén y aseguramiento, esto se observa en la figura 4.28.



**Figura 4. 28** Función del bacín metálico

#### **4.8.3 ENSAYO CON PINTURAS REFRACTARIAS.**





**Figura 4. 29** Piezas fundidas recubiertas con pintura refractarias en su orden respectivamente.

En la figura 4.29, se observa en la pieza N° 1 una superficie defectuosa con vértices no definidos, solo redondeados, además presenta fisuras en su superficie esto debido a que la pintura que lo cubría no soporto el colado del material rompiéndose y produciendo una deformidad en sus partes laterales.

En la pieza N° 2 su superficie se ve como si fuera un panal de abejas debido a la solidificación de la pintura y fractura de la misma produciendo rebabas en la parte superior y filos redondeados por la falta de escape de gases, su permeabilidad no se muy buena.

En la pieza N° 3 se observa una mejora en su superficie, pero presenta rebabas en su superficie provocadas por la ruptura de la pintura refractaria que lo cubría, en proporciones mínimas que las anteriores.

En la pieza N° 4 se observa un llenado incompleto de la pieza en este caso el metal no alcanza a llenar el molde por el gas generado por la espuma que se quedo atrapada dentro del modelo, ya que su pintura es poco permeable y no recomendable para este proceso .

Con todos estos resultados observados se toman medidas de corrección y se establece una nueva pintura que se coloca en la pieza N° 5 donde se ve que su superficie es mejor que todas las anteriores y su llenado es definido y completo, además no presenta fallas dentro del modelo fundido estableciendo como optima la pintura aplicada sobre este modelo.

#### **4.9 ACABADO SUPERFICIAL EN LA PIEZA FUNDIDA.**

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

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

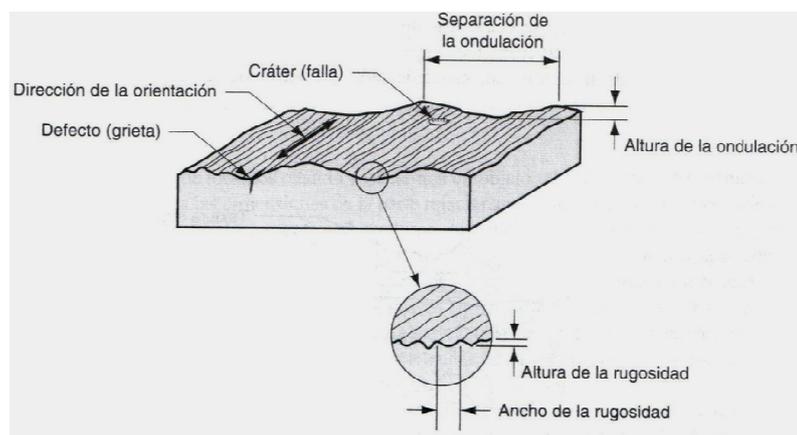
La textura de la superficie que consiste en desviaciones repetitivas y aleatorias con respecto a la superficie nominal de un objeto, se define por cuatro elementos principales: rugosidad, ondulación, orientación y fallas.

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

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

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

Finalmente las *fallas* son irregularidades que ocurren ocasionalmente en la superficie y comprenden a las grietas, rayas, inclusiones y defectos similares en la superficie. Aunque algunas grietas afectan a la textura de la superficie, afectan también su integridad. La figura 4.30 muestra las diversas formas de textura superficial.



**Figura 4. 30** Formas de la textura superficial

#### 4.9.1 MEDICIÓN DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL

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

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

Por la no disponibilidad de los dos últimos métodos en nuestros laboratorios, se tuvo que recurrir al primer método que se encuentra disponible en el Laboratorio de Materiales de la FIM; es decir, se procede a la comparación de superficies entre la pieza generada en el proceso de fundición gasificable con la rugosidad que presenta en comparador de rugosidades marca Rubert Rugotest 129 03A. Para estimar la rugosidad de un espécimen de prueba determinado, la superficie se compara con el estándar tanto en forma visual como mediante la “prueba de la uña”. La prueba de la uña consiste en raspar suavemente las superficies del espécimen y el estándar, y determina qué estándar se acerca más al espécimen (tabla 4.4).

**Tabla 4. 4** Especificaciones técnicas del rugosímetro comparador

	<b>Rugotest 129 03A Granulado y Granallado combinado</b>
<b>Perfiles de sección</b>	Los perfiles están marcados: N6, N7, N8, N9, N10, N11 (equivalente a promedios de rugosidad 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5 y 25 micras respectivamente).
<b>Referencias</b>	200129300

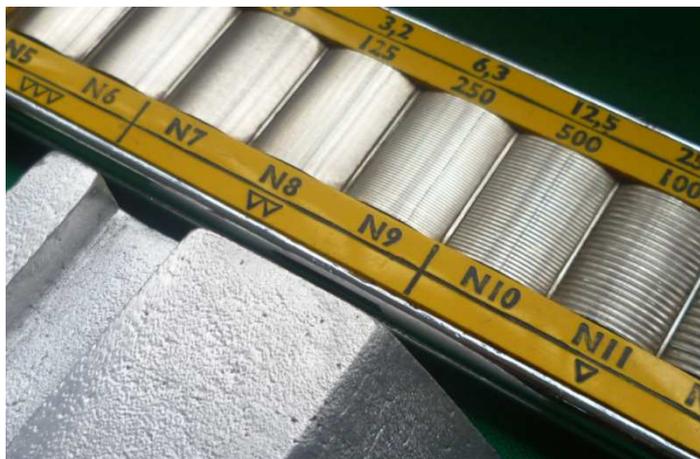
Se procede a la medición de grado de rugosidad con la placa de comparación que se muestra en la figura 4.31.



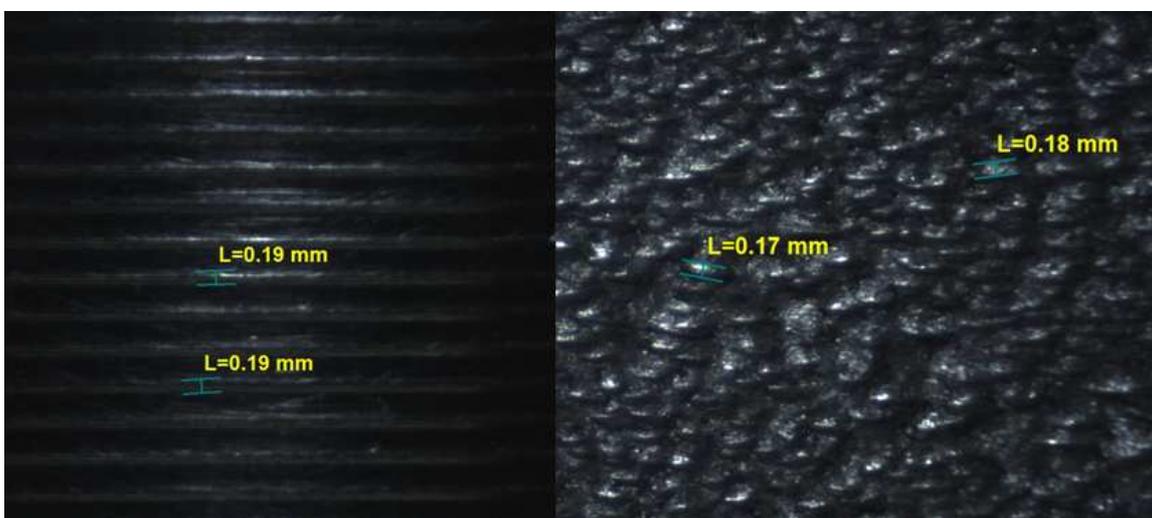
**Figura 4. 31** Comparador de rugosidad superficial.

Comparando la superficie del modelo fundido con el comparador (figura 4.32), se puede comprobar visualmente que el valor de la rugosidad superficial de la pieza fundida coincidía con el segmento N 9 donde su rugosidad esta en:

$$R_a = 0.5\text{mil} = 250\mu\text{in} = 6.3\mu\text{m}$$



**Figura 4. 32** Comparación de superficies a simple vista



**Figura 4. 33** Comparaciones de superficies entre placa comparadora y el elemento fundido a 10X de ampliación

Además se comprueba con una fotografía de microscopio ampliada a 10X tomada en el laboratorio de ciencia de materiales de FIM de la EPN (véase figura 4.33), que los tamaños de granos están entre 0.17-0.19 mm del elemento fundido y el comparador tiene tamaño de grano 0.19 mm, comprobando que la superficie encontrada en el elemento fundido tiene un acabado superficial N9.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo primordial de este proyecto consiste en encontrar una mezcla óptima para la fundición de modelos gasificables, la cual debe dar cero fallas y un acabado superficial óptimo. Donde que la pintura refractaria encontrada y ensayada mostraba los mejores resultados. Por tal motivo se inicio como el orden especificado a continuación.

#### 5.1 PARAMETROS INICIALES

##### 5.1.1 SELECCIÓN DE LA ARENA

###### Arena marrón nueva

- Contenido de arcilla 2.5 %
- Índice de finura (i) = AFS 46
- Tamaño de grano 0.25 - 0.5 mm (calidad media)
- Tamices adyacentes 79.8 %
- Forma de grano subangular, redonda
- % humedad 0.36
- Dureza (B) 50 - 70 (mediana)
- Permeabilidad 310 (rojo)
- Resistencia al corte 1 - 1,4 (kg/cm<sup>2</sup>)
- Resistencia a la compresión 5 - 6,5 (kg/cm<sup>2</sup>)

La arena tiene una distribución uniforme concentrándose una cantidad de 79.8 % de arena en los tamices adyacentes nº 40-50-70, mejorando así su calidad en las propiedades de permeabilidad.

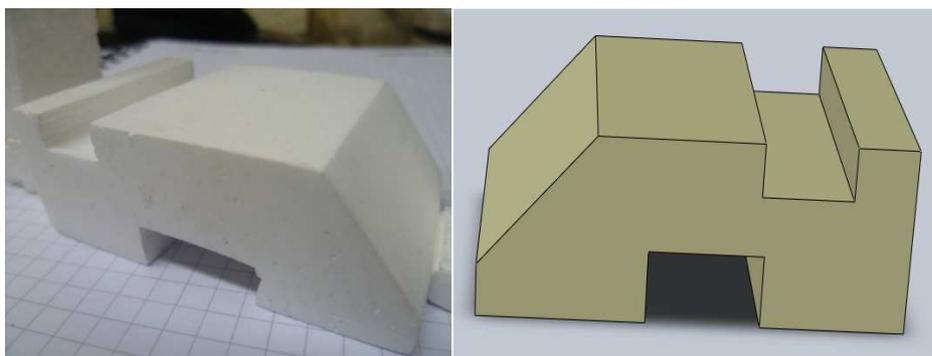
## 5.1.2 SELECCIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO

**Tabla 5. 1** Grados de poliestireno expandido

Grado de perla	Diámetro bruto de la perla		Diámetro para 24 Kg/m <sup>3</sup>		Uso típico
	mm	in	mm	in	
A	0.83-2.00	0.033-0.078	2.5-5.9	0.097-0.231	Aislamiento
B	0.58-1.2	0.023-0.047	1.7-3.5	0.068-0.138	Empaque
C	0.33-0.71	0.013-0.028	1.0-3.1	0.040-0.082	Vasos (café)
T	0.25-0.51	0.010-0.020	0.74-1.5	0.029-0.058	Espuma perdida
X	0.20-0.33	0.008-0.013	0.61-1.0	0.024-0.040	

Se selecciono el grado T ya que el otro no se encuentra en el mercado local y es fácil de maquinar y dar el acabado que se requiere para obtener un mínimo de fallas a nivel dimensional y superficial.

## 5.1.3 SELECCIÓN DEL MODELO



**Figura 5. 1** Fotografía y diseño del modelo de espuma a ensayarse.

Con este diseño de modelo se busca observar que los vértices del modelo salgan bien definidos en el proceso de fundición por modelos gasificables, además sus formas huecas y caras mantengan su forma y dimensión.

## Dimensiones del modelo gasificable

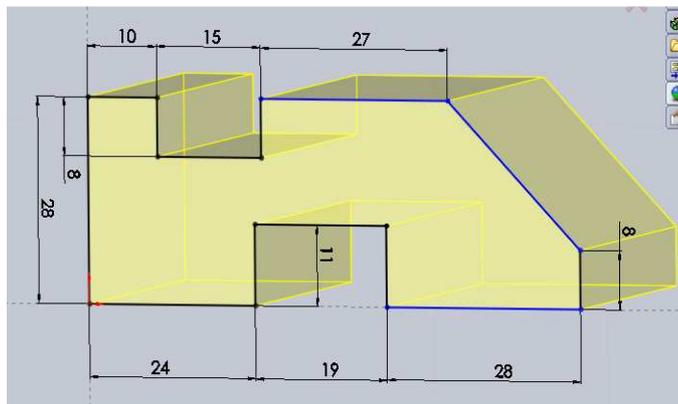


Figura 5. 2 Dimensiones del modelo de espuma a ensayarse.

Volumen =  $70,512 \text{ cm}^3$

Área frontal =  $14,69 \text{ cm}^2$

### 5.1.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN



Figura 5. 3 Forma del sistema de alimentación y ubicación en el modelo de espuma

### 5.1.5 CONSTRUCCIÓN DE UN BACÍN METÁLICO

El bacín es un tubo de acero de diámetro interior 63 mm, de cedula 5 y altura 102 mm, con un volumen =  $317.96 \text{ cm}^3$ , el cual es cortado en dos partes iguales e incorporada una bisagra para su abertura y cierre, además se sueldan dos varillas para su sostén y aseguramiento, esto se observa en la figura 5.4.



Figura 5. 4 Forma del bacín metálico construido

### 5.1.6 SELECCIÓN DE LA PINTURA REFRACTARIA

Tabla 5. 2 Composición final de la pintura refractaria

Componentes	% porcentaje	Cantidad (g)
Arcilla malla 200	26.27	262.7
Silicato de Sodio	0.13	1.3
Carbonato de Sodio	0.09	0.9
Sílice malla 200	36	360
Melaza	5	50
Agua	32.51	325.1

### 5.1.7 PREPARACIÓN

- Se pesa la arcilla previamente molida con tamaño de partícula ASTM 200.
- Se pesan los distintos componentes antes mencionados en la tabla 5.2.
- Se coloca mitad de agua en la mezcladora y se adiciona el carbonato de sodio y se mezcla alrededor de 2 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona la arcilla en porcentajes de  $\frac{1}{4}$  del total, a medida que desaparecen los grumos se adiciona poco a poco el resto, se mezcla por un tiempo de 15 min a velocidad N° 2.
- Se adiciona el silicato de sodio y se mezcla a velocidad n° 2 en la mezcladora por un tiempo de batido de 8 min.

- Se adiciona el resto de agua para darle fluidez a la mezcla durante el batido de 5 min a velocidad N° 2.
- Se espera que la mezcla se estabilice y se procede a colocarla en un recipiente cerrado para dejar reposar 24 h. Esto mejorará sus propiedades (adsorción, tixotropía (gelatinoso), plasticidad, permeabilidad, comportamiento al secado, resistencia en fresco y cochura). Ya que al esperar un día se observa que se forma una capa gelatinosa en la pintura brindando esta característica para que la pintura no se fracture al secarse y en fresco se adhiera homogéneamente al modelo.
- Pasado las 24 h se adiciona a la Barbotina una cantidad de sílice.

Barbotina	100% en peso
Sílice	80% en peso

Con relación al peso de la Barbotina

- Se agita durante 5 min a una velocidad N° 2, hasta que la pintura no presente grumos
- Se adiciona la melaza y se mezcla durante 5 min a velocidad N° 2.
- Se añade el agua en la mezcladora y se bate por alrededor de 5 min a una velocidad N° 2.
- Se espera que la pintura se estabilice y se procede al pintado del modelo.

### 5.1.8 CARACTERÍSTICAS DE LA PINTURA

- Su coloración es café como se observa en la figura 5.5.
- Tiene buena fluidez
- Buena adherencia y mojabilidad
- Es poco quebradizo al secar
- Presenta porosidades pequeñas
- Resiste bien a la temperatura
- Se desmorona de la pieza fácilmente después del colado
- Da brillo a la pieza fundida

- % de porosidades = 11.8 %



**Figura 5. 5** Aspecto de la pintura refractaria después del secado.

En la tabla 5.3 se presenta los valores de contracción de la pintura refractaria óptima para el proceso de fundición con modelos gasificables, además en la tabla 5.4 las propiedades de esta pintura.

**Tabla 5. 3** Contracción de la pintura refractaria

		Inicial (mm)	Final (mm)	Porcentaje (%)
Probeta para compresión y corte	Diámetro	50,8	48,80	3,94
	Altura	50,8	50,00	1,57
Probeta para tracción	Ancho	41,3	41,04	0,63
	largo	76,5	75,93	0,75
	Alto	25,5	25.20	1,20

**Tabla 5. 4** Permeabilidad, dureza, compresión, corte y tracción de la pintura refractaria.

Pruebas	valores
permeabilidad	120 (rojo)
Dureza	77
compresión	Fuera de escala
corte	Fuera de escala
tracción	5 (kg/cm <sup>2</sup> )

### 5.1.9 PROCEDIMIENTO DE PINTADO

- Inicialmente se somete al modelo de espuma a total limpieza de polvo y grasa, para permitir adherencia total de pintura.

- Luego se pinta el modelo por inmersión en la pintura, hasta que la capa sea homogénea y cubra todo el modelo.
- Se espera que seque la pintura hasta que en los filos del modelo la coloración de la pintura cambie, aproximadamente 30 min a una temperatura de secado de 60 °C.
- Se coloca una segunda capa de pintura por inmersión, para evitar fallas iniciales presentes en la primera capa y se seca aproximadamente 20 min a temperatura 60 °C.
- Se coloca la tercera capa de pintura por inmersión con la siguiente formulación:

49% de mezcla preparada

49% de arena sílice malla ASTM 40

2% de agua

Esto permitirá que el recubrimiento sea duro y no presente fisuras, por donde podría salir el metal fundido y dañar la forma del modelo.

- Se espera que el recubrimiento se seque por completo 24h a una temperatura de 50 °C, para el proceso de fundición.

#### 5.1.10 MOLDEO



**Figura 5. 6** Proceso de moldeo del modelo recubierto con pintura refractaria

Se coloca el modelo una vez pintado y secado en la caja de moldeo y se coloca arena seca alrededor del modelo, completando toda su forma y dejando solo la

entrada del metal y el respiradero, finalizado esto se somete a la caja a un vibrado para que la arena ocupe todas las partes del modelo y se compacte. Este proceso se observa en la figura anterior.

### 5.1.11 COLADO



**Figura 5. 7** Colado del metal en el modelo gasificable

Una vez seleccionado los materiales para la colada de aluminio, se somete al calentamiento del metal a la temperatura de fusión en el horno a gas del laboratorio de fundición, siguiendo todos los parámetros para una colada limpia sin porosidades y gases.

Hecho esto y el metal haya alcanzado un calentamiento superior al de fusión se coloca la colada en el bacín metálico (figura 5.7) ubicado sobre el modelo ya compactado con la arena y se espera que el metal fluya consumiendo o evaporando el modelo de espumaflex recubierto con pintura refractaria permitiendo el desalojo total de los gases generados en el momento de colado y observando que se haya llenado hasta el respiradero, condición para que el modelo esté totalmente lleno.

### 5.1.12 DESMOLDE

Finalizado el colado y esperando un tiempo prudencial hasta que la solidificación se haya completado y terminado se procede al desmolde de la pieza fundida observando que en su superficie se mantiene la pintura refractaria en coloración negra (véase figura 5.8), ya que esto es debido al calentamiento de la misma por el colado del metal.

Esta pintura es fácilmente removible del modelo permitiendo una facilidad en el proceso de acabado de la pieza, facilitando así su terminado, para darle brillo se procede a pasar por la grata la pieza terminada.



**Figura 5. 8** Desmolde del modelo fundido.

### 5.1.13 PIEZA FUNDIDA

La superficie del modelo fundido (figura 5.9), presenta una rugosidad superficial de la pieza fundida de N 9 donde su rugosidad esta en:

$$R_a = 0.5\text{mil} = 250\mu\text{in} = 6.3\mu\text{m}$$

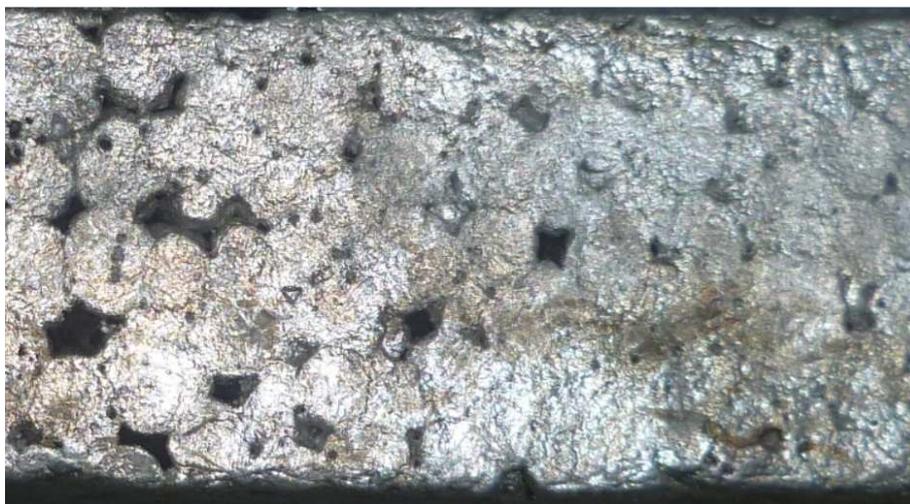
Concluyendo que estamos entre un acabado fino.



**Figura 5. 9** Pieza fundida terminada

Ahora mostraremos el avance del proyecto de la misma superficie del modelo gasificable, antes y después de la investigación.

En el modelo inicial donde los parámetros de selección del grado del poliestireno no era el aconsejable ni optimo par este proceso y el proceso era solo en arena con aglutinante y aglomerantes, la finura de la arena no era la adecuada, la permeabilidad no era apreciable se distingue fallas en el modelo de un acabado superficial defectuoso como muestra la figura.

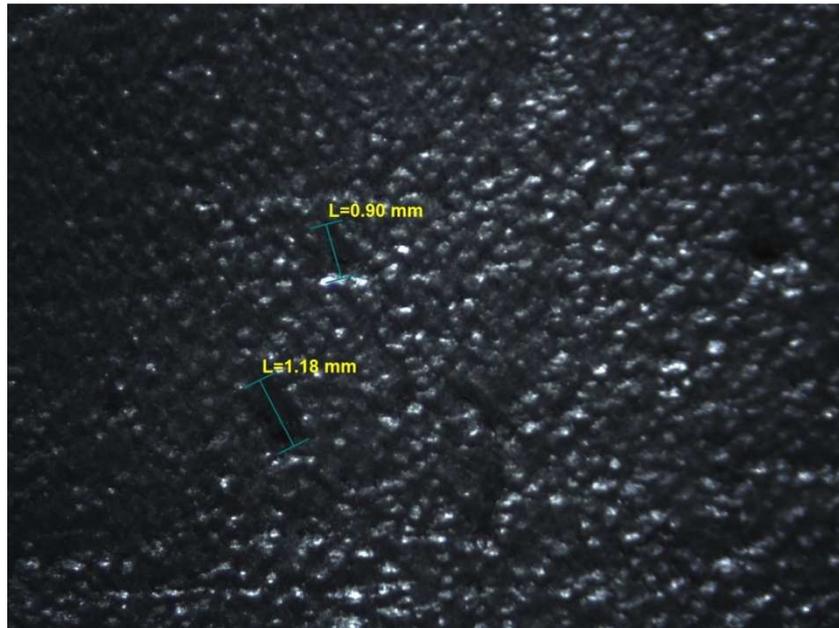


**Figura 5. 10** Superficie del modelo fundido de espumaflex antes de la investigación a 5X.

Ahora en el modelo después de la investigación y optimizado el grado del poliestireno expandible, escogida la arena adecuada, seleccionada la pintura refractaria y considerando todas las propiedades que tendría el proceso, la superficie del modelo fundido se aprecia en la siguiente figura:



**Figura 5. 11** Superficie del modelo fundido de espumaflex después de la investigación a 5X.



**Figura 5. 12** Superficie del modelo fundido terminado ampliado a 40X

En la figura 5.12, se observa micro porosidades en su superficie debido al tipo de colada, y a pocos gases que quedaron atrapados pero en porcentaje menor al inicial de este proyecto.

## CONCLUSIONES

- El poliestireno expandible presenta en su estructura una facilidad de colapso con el metal fundido ya que está conformado del 98% de aire y el 2% de estireno, para la fabricación de moldes de moldeo se requiere menos tiempo, el acabado es uniforme y liso, no requiere de piezas sueltas y complejas, no requiere de corazones. El moldeo se simplifica notablemente.
- El proceso de fundición, su moldeo es fácil y rápido siempre y cuando los parámetros sean los idóneos mostrados en este proyecto, facilitando su escape de gases generados en el colado (metal-polímero), que garantizan un acabado perfecto de la pieza.
- La selección de la arena debe regirse a las pruebas detalladas en el capítulo 2, donde el índice de finura recomendado está entre 36 – 60, calidad media, forma de grano redonda, garantizando así una moldeabilidad adecuada, permeabilidad, dureza, resistencia mecánica y una distribución uniforme alrededor del modelo, brindando una compactación y moldeo idóneo para el proceso.
- La obtención de la pintura refractaria fabricada a partir de materia prima y mano de obra nacional, cuyas características - propiedades en aplicación y protección son de óptima calidad dentro del proceso de fundición por modelo gasificable (EPS) y fáciles de obtener en el mercado, se establece que la composición porcentual de la misma es la siguiente: arcilla 200 (26.27%), Silicato de sodio (0.13%), Carbonato de sodio (0.09%), Sílice 200 (36%), melaza (5%) y agua (35.51%).
- El colado del metal influye notablemente en el colapso del polímero, ya que un metal frío tendría una tendencia a no completar la pieza y dar fallas de llenado, mientras que en metal sobrecalentado afectaría el colapso de la pintura refractaria, produciendo fallas en la forma del modelo, por lo que el metal debe sobrepasar su temperatura de fusión a nivel que garantice la fluidez del metal y el llenado de la pieza sin afectar la pintura y la finalización de la pieza fundida. Alrededor de (670-700 °C).

## RECOMENDACIONES

- En el modelaje tratar de que las dimensiones sean las mas exactas posibles, considerando la contracción del metal que va a ser colado, y considerar el acabado superficial tanto al modelo como a la pieza terminada.
- Tratar que el grado de perla del poliestireno expandible sea el más adecuado, se recomienda el grado T o grado X, sino considerar la densidad del material, a mas densidad mejor acabado superficial y facilidad de maquinado del modelo.
- Se recomienda que el modelo en su elaboración ya incluya sistema de alimentación para evitar fallas en el pegado de piezas, utilizando una sola pieza compacta y del mismo material, facilitando así el flujo continuo del metal a colar a través del modelo gasificable.
- En el sistema de alimentación se recomienda que el sistema sea hueco, no completamente de poliestireno expandible, si es posible utilizar tubos preparados que permitan el ingreso y la salida de los gases, pero recordando que el acabado superficial de la pieza es la importante sin verse afectado este parámetro.
- Para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los recubrimientos refractarios, se recomienda experimentar con materiales refractarios tales como el zirconio, itria, magnesia o calcio cuyas temperaturas de trabajo son más elevadas que sílice o alúmina, y conseguir de esta manera, la fabricación de un compuesto refractario capaz de ser usado en la fundición de espuma perdida para aleaciones de tipo ferrosos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. H. S. BAWA; *Procesos de Manufactura*; Mc Graw Hill; Interamericana Editores S.A. de C.V.; 1er Edición; México; 2007.
2. SPECHT Ernest y Dr. TANZEN Witt; *Metales Ligeros*; Tratado General de Metalurgia; Editorial SINTES; Volumen IV; Barcelona, España; 1982.
3. N. D. TITOW, YU. A. STEPANOV; *Tecnología del Proceso de Fundición*; Editorial Mir Moscú; URSS; 1981.
4. KREKELER K., Micro fusión; *Fundición con modelo perdido*, EDITORIAL GUSTAVO GILI, Barcelona; 1971.
5. AFS/Cast Metals Institute, Inc. *Lost Foam Casting Process and Applications*. [www.castmetals.com](http://www.castmetals.com). February 26, 2003.
6. AFS; *Manuales para clases de fundición*; ESPOL; Guayaquil, Ecuador; 1978
7. FERNÁNDEZ M., Gloria P., MARTÍNEZ T., Hader V. y CRUZ R., Luis J.; *Optimización del procesamiento por lost foam casting para la fabricación de autopartes*; Cuba: CYTED; mayo de 2005.
8. DEL POZO VILLA, Marcelo; *Estudio de la influencia de la granulometría de arena y la viscosidad del Silicato de Sodio en las propiedades de las Arenas de moldeo Nacional desarrolladas en el proceso Silicato de Sodio-CO<sub>2</sub>*; EPN; Quito, Ecuador; 1986.
9. YANDUN CARDENAS, Henry; *Estudio de propiedades de Arena de moldeo Nacionales Aglomeradas con resinas del Sistema Fenólico-Uretano*; EPN; Quito, Ecuador; noviembre, 1981.
10. ARELLANO BUENO, Antonio; *Estudio de Arcillas Nacionales para Fundición*; Quito, Ecuador; 1973.
11. EZPINOZA MALDONADO, Roque; *Estudio de Arenas Silíceas Nacionales para Fundición*; EPN; Quito, Ecuador; 1972.
12. COELLO PORRAS, Gerardo; *Ensayos de arenas y arcillas para fundición*; ESPOL; Guayaquil, Ecuador; 1983.
13. FREIRE TORRES, Mario; *Estudio de las Pinturas Refractarias en el Proceso de Fundición por el Método de Espuma Perdida en Aleaciones No Ferrosas*; ESPOL; Guayaquil, Ecuador; 2008.
14. C.M. Salcines Merino; *Mezclas Autofraguantes con vidrio líquido*; Tecnología de fundición. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana. Cuba, 1985.

15. S. Shivkumar, X. Yao and M. Makhlof; *Polymer-melt interactions during casting formation in the lost foam process*; Department of Mechanical Engineering; Worcester Polytechnic Institute; 1995
16. Hirt y M.R. Barkhudarov; *Flow Science Inc, Flow-3D manual*, Mem; Flow-3D Training Course; 10. C.W; Febrero de 2006.
17. Modeling the lost foam process with defect prediction, Flow Science Technical note 03-TN45-1, abril de 1997
18. M. R. Barkhudarov, *Is Fluid Flow Important for Predicting Solidification*, Solidification Processing '97 Conference, July 1997.
19. HIRT, C.W. *Predicting Defects in Lost Foam Castings*. Diciembre 13, 2001
20. Monroe W., Raymond; *Expendable Pattern Casting*; American Foundrymen's Society with Casteel Technology Associates; 1992.
21. ASM International. *Metals Handbook / The Materials Information Society*; J.R. Davis. 2 ediciones; Págs. 24, 37, 736 – 744, Materials Park, Ohio; 1998.
22. Lawrence E. Doyle, Carl A. Keyser, James L. Leach, George F. Schrader, Morse B. Singer; *Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros*; Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Tercera Edición, 1992.
23. Howard F. Taylor, Merton C. Flemings. *Fundición para Ingenieros*, Editorial CECSA, México, 1961.
24. B. H. Amstead, Phillip F. Ostwald, Myron L. Begeman. *Procesos de Manufactura*, Versión SI, Editorial CECSA. M
25. Murray Patz, Thomas S. Piwonka. *Unbonded Sand Molds; Lost Foam Technologies*, Inc. and University of Alabama. *Molding and Casting Processes*, p 230 – 237.
26. Cortés Zamora, Carlos David; *Caracterización del Poliestireno Expandido (EPS) como material de aligeramiento de terraplenes*; Universidad de Los Andes, Centro de Estudio e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CIFI), Bogotá; 1997.
27. Gómez, Jorge Iván; *Uso del poliestireno expandido y arena sin aglutinante en la obtención de artículos fundidos*; Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, sede Medellín. *Revista DYNA*, N°116, Noviembre de 1993.
28. López, Carlos; *La fundición con modelos gasificables*. Uso del poliestireno expandido. Investigación realizada en la Universidad del Valle con el patrocinio de Conciencias. Bogotá, septiembre de 1980.
29. Valencia, Asdrúbal; *Lexicón de Metalurgia y Materiales*; Sociedad de Ingenieros Metalúrgicos de la Universidad de Antioquia SIMEDUA; Medellín; Diciembre 1994.

## Páginas de Internet

- [www.webber.net.ua/ucast/ecol001t.htm](http://www.webber.net.ua/ucast/ecol001t.htm)
- [www.centros5.pntic.mec.es/](http://www.centros5.pntic.mec.es/)
- [www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno](http://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno)
- [www.aape.com.ar](http://www.aape.com.ar)
- [www.politekh.com/index.html](http://www.politekh.com/index.html)
- [www.lostfoam.com/index.php](http://www.lostfoam.com/index.php)
- [www.geocities.com/usmindustrial/Fundicion.htm](http://www.geocities.com/usmindustrial/Fundicion.htm)
- [www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html](http://www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html)
- [www.moderncasting.com/archive/LostFoam](http://www.moderncasting.com/archive/LostFoam)
- [www.castings-ez.com/castings/0026256\\_0026206\\_26.html](http://www.castings-ez.com/castings/0026256_0026206_26.html)
- [www.eod.gvsu.edu/~jackh/eod/manufact/manufact-189.html](http://www.eod.gvsu.edu/~jackh/eod/manufact/manufact-189.html)
- [www.sfsa.org/tutorials/panel/float\\_07.htm](http://www.sfsa.org/tutorials/panel/float_07.htm)
- [www.tempfoam.com/Lost%20Foam%20Metalcasting/lostfoam\\_metalcasting.htm](http://www.tempfoam.com/Lost%20Foam%20Metalcasting/lostfoam_metalcasting.htm)
- [web.umn.edu/~foundry/](http://web.umn.edu/~foundry/): American Foundrymen's Society AFS Division 11
- [www.atl-usa.com/lostfoam-technology.htm](http://www.atl-usa.com/lostfoam-technology.htm)
- [www.anape.com](http://www.anape.com)

## **ANEXOS**

Item # \_\_\_\_\_

Quantity \_\_\_\_\_

C.S.I. Section 11400

**HOBART**701 S Ridge Avenue, Troy, OH 45374  
1-888-4HOBART • www.hobartcorp.com**N50  
MIXER****HOBART****STANDARD FEATURES**

- ½ H.P. Hobart Designed Fixed Speed Motor
- Gear-Driven Transmission
- Three Fixed Speeds
- Hybrid Powder Coat finish available in Hobart Gray
- Large, Easy-To-Reach Controls
- #10 Taper Attachment Hub
- Manual Bowl Lift
- 5-Quart Stainless Steel Bowl, "B" Flat Beater, "D" Wire Whip, "ED" Dough Hook, Cord and Plug

**ACCESSORIES**

- Stainless Steel Bowl
- "B" Flat Beater
- Stainless Steel "B" Flat Beater
- "D" Wire Whip
- "ED" Dough Hook

**MODEL**

- N50 – 5-Quart All Purpose Mixer with Bowl, Beater, Whip and Hook
- N50A – 5-Quart All Purpose Mixer with Bowl and Stainless Steel Beater (ASTM Standard C305)

Specifications, Details and Dimensions on Inside and Back.

**N50 MIXER**

## N50 MIXER

**HOBART**

 701 S Ridge Avenue, Troy, OH 45374  
 1-888-4HOBART • www.hobartcorp.com

### SOLUTIONS/BENEFITS

#### ½ H.P. Hobart Designed Motor

##### Durability

- Heavy-duty to meet the most demanding operations

#### Gear-Driven Transmission

##### Durability, Reliability

- Ensures consistent performance and minimum downtime with positive drive under heavy loads

#### Three Fixed Speeds

##### Flexibility, Reliability, Consistency

- For incorporating, blending, mixing ingredients
- Supports consistent results and thorough mixing

#### Hobart Agitators

##### Durability, Flexibility

- Hobart manufactured agitators are designed for long-term usage under heavy-duty conditions
- Large array of agitators provide multiple uses for recipe and product processing

### N50 MIXER CAPACITY CHART

Recommended Maximum Capacities - dough capacities based on 70°F. water and 12% flour moisture.

PRODUCT	AGITATORS SUITABLE FOR OPERATION	N50
CAPACITY OF BOWL (QTS. LIQUID)		5
Egg Whites	D	½ pts.
Mashed Potatoes	B & C	3 lbs.
Mayonnaise (Qts. of Oil)	B or C or D	1½ qts.
Meringue (Qts. of Water)	D	¼ pts.
Waffle or Hot Cake Batter	B	2 qts.
Whipped Cream	D or C	3 pts.
Cake, Angel Food (8-10 oz. cake)	C or I	2
Cake, Box or Slab	B or C	4 lbs.
Cake, Cup	B or C	3 lbs.
Cake, Layer	B or C	3 lbs.
Cake, Pound	B	3 lbs.
Cake, Short (Sponge)	C or I	3 lbs.
Cake, Sponge	C or I	2 lbs.
Cookies, Sugar	B	3 lbs.
Dough, Bread or Roll (Lt.-Med.) 60% AR	§ ED	4 lbs.
Dough, Heavy Bread 55% AR	§ ED	—
Dough Pie	B & P	3 lbs.
Dough, Thin Pizza 40% AR (max. mix time 5 min.)	§‡ ED	—
Dough, Med. Pizza 50% AR	§‡ ED	—
Dough, Thick Pizza 60% AR	§‡ ED	—
Dough, Raised Donut 65% AR	ED	—
Dough, Whole Wheat 70% AR	ED	—
Eggs & Sugar for Sponge Cake	B & C or I	2 lbs.
Icing, Fondant	B	2 lbs.
Icing, Marshmallow	C or I	½ lbs.
Shortening & Sugar, Creamed	B	3 lbs.
Pasta, Basic Egg Noodle (max. mix time 5 min.)	ED	—

NOTE: % AR (% Absorption Ratio) - Water weight divided by flour weight. Capacity depends on moisture content of dough. Above capacities based on 12% flour moisture at 70°F water temperature.

§ If high gluten flour is used, reduce above dough batch size by 10%.

‡ The N50 requires a 50% reduction in batch size to mix in Speed 2 with 50% or less AR doughs.

**USE OF ICE REQUIRES A 10% REDUCTION IN BATCH SIZE.**

**1 gallon of water weighs 8.33 lbs.**

NOTE: Attachment hub should not be used while mixing.

**HOBART**701 S Ridge Avenue, Troy, OH 45374  
1-888-4HOBART • www.hobartcorp.com**N50  
MIXER****SPECIFICATIONS****MOTOR:**

1/8 H.P., Hobart designed, ventilated, sleeve bearing, drip-proof enclosure.

Single Phase	100-120V	2.9 Amps
	230V	1.4 Amps

**ELECTRICAL:**

100-120/60/1 - U L Listed for residential and commercial use. Also available in 100/50/1, 230/50/1, 220/60/1 and 230/60/1 - not submitted for U L Listing.

**CONTROLS:**

Single pole, toggle-type, mechanically interlocked with transmission shift handle. Includes automatic circuit breaker with manual reset switch.

**TRANSMISSION:**

Three speed selection transmission. Convenient shift handle mounted near "OFF" and "ON" switch.

**SPEEDS:**

Three positive speeds - Low, Intermediate, and High.

	Agitator (RPM)	Attachment (RPM)
Low	136	60
Intermediate	281	124
High	580	255

**BOWL AND BEATERS:**

Bowl is 5-quart capacity stainless steel. Locks at top and bottom of lift travel, which is controlled by convenient hand lever. A stainless steel beater is also available.

**FINISH:**

Hybrid Powder Coat finish available in Hobart Gray.

**STANDARD EQUIPMENT:**

Consists of the mixer unit with one (1) 5-quart stainless steel bowl, one (1) "B" flat beater, one (1) "D" wire whip, one (1) "ED" dough hook, cord and plug.

**ATTACHMENT HUB:**

Equipped with front-mounted Hobart standard #10 taper attachment hub, and any #10 size attachments may be used.

**ATTACHMENTS AND ACCESSORIES:**

The following are available at extra cost:

Stainless Steel Bowl  
"B" Flat Beater  
Stainless Steel "B" Flat Beater  
"D" Wire Whip  
"ED" Dough Hook

**LISTED BY:** Underwriters Laboratories, Inc. and NSF International.

# N50 MIXER

## HOBART

701 S Ridge Avenue, Troy, OH 45374  
1-888-4HOBART • www.hobartcorp.com

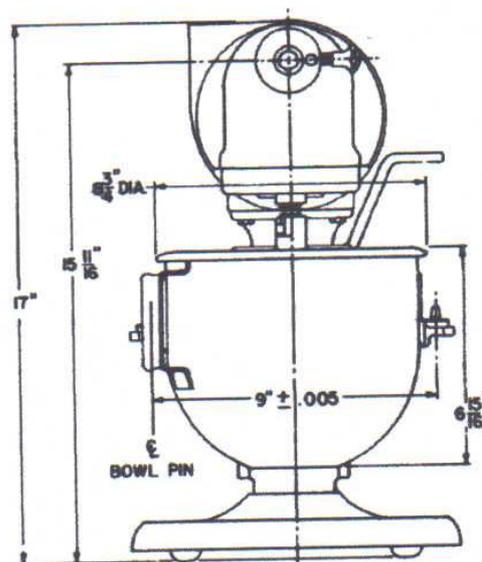
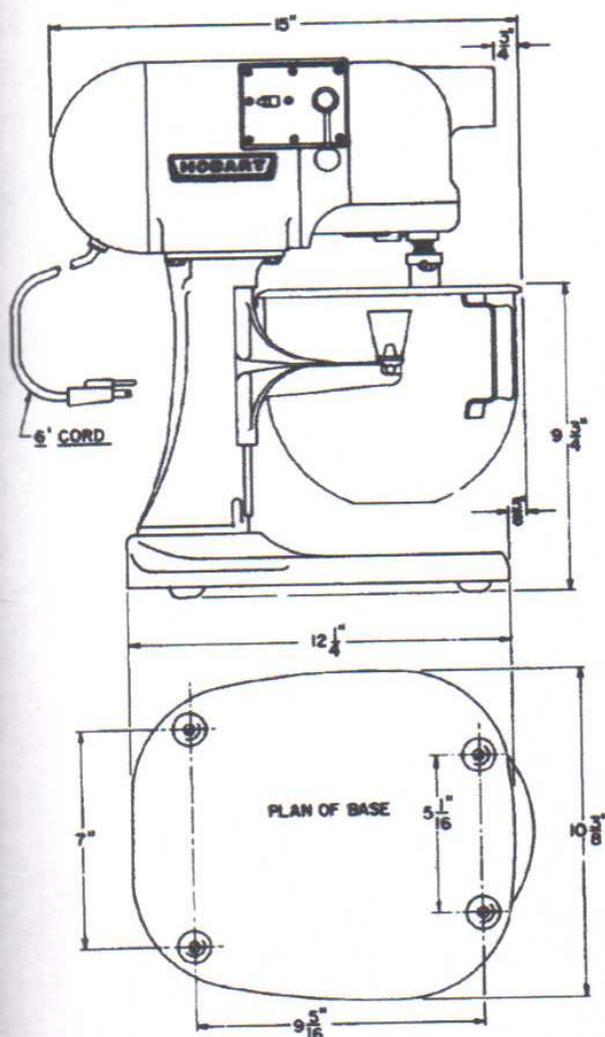
### SPECIFICATIONS

**ELECTRICAL SPECIFICATIONS:** 100-120/60/1 - U L Listed for residential and commercial use. Also available in 100/50/1, 230/50/1, 220/60/1 and 230/60/1 - not submitted for UL Listing.

**WEIGHT:** 44½ lbs. net; 55 lbs. domestic shipping.

**WARRANTY:** Unit has full one-year warranty on parts and labor against manufacturer's defects. Carry-in warranty to local authorized Hobart service office.

### DETAILS AND DIMENSIONS



**WARNING**  
ELECTRICAL AND GROUNDING CONNECTIONS MUST COMPLY WITH THE APPLICABLE PORTIONS OF THE NATIONAL ELECTRICAL CODE AND/OR OTHER LOCAL ELECTRICAL CODES IN FORCE.

As continued product improvement is a policy of Hobart, specifications are subject to change without notice.