

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MANUALES  
DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS Y  
MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIÓN DE  
ALEACIONES DE ALUMINIO**

PRESENTADO POR:

**LEONEL MIGUEL GONZÁLEZ AQUINO**

**JAIRO EMERSON RAMÍREZ ALFONZO**

**ANA ROCÍO VILLALTA VALENZUELA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2015

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR :

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MANUALES  
DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS Y  
MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIÓN DE  
ALEACIONES DE ALUMINIO**

Presentado por :

**LEONEL MIGUEL GONZÁLEZ AQUINO  
JAIRO EMERSON RAMÍREZ ALFONZO  
ANA ROCÍO VILLALTA VALENZUELA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, octubre de 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso por haberme obsequiado la vida, la fortaleza para seguir adelante ante la adversidad y la perseverancia para continuar siempre sobre todas mis metas, y por haber labrado mi camino derramando sus bendiciones por medio de cada una de las personas que han llegado a mi vida. A mis padres que los amo, José Leonel González Herrera y Marina Elizabeth Aquino de González que forjaron mi camino para ser el hombre de bien que hoy soy y que me brindaron la oportunidad con gran sacrificio, una firme iniciativa y enorme voluntad de llevarme a ser el profesional que con orgullo he llegado a ser.

A mis tres bellas hermanas, Andrea, Patricia y Claudia que en este camino han sido mi guía, un apoyo en tiempos difíciles, una ayuda en mis momentos que más las necesité y una compañía, haciendo así que este camino junto a ellas fuera más corto y menos pesado hasta alcanzar esta tan anhelada meta.

A todos mis amigos que hoy son parte de mi familia: Jairo Ramírez y Rocío Villalta de Muñoz, Mauricio Martínez, Carlos Arévalo, Susana Vides, Fátima y Lourdes Orantes, Oscar Martínez, Connyshe Masis, Laura Choto, Jackeline Andrade, Cristina Cortez y Lorena Hernández que me regala amor, comprensión y paciencia, amigos que me acompañaron siempre que pusieron su granito de arena y esfuerzo por ayudarme. Un especial agradecimiento a Jairo y Rocío que sin ellos este camino no sería lo mismo y que lo hemos logrado juntos como grandes amigos y un grupo por excelencia

Leonel González.

## **DEDICATORIA**

Al forjador de mi camino, mi padre celestial, a mi madre Milagro del Carmen Alfonzo por ser la persona que siempre me motivó a ser mejor, quien siempre ha sido mi apoyo cuando más lo he necesitado, sin ella este sueño no hubiera sido posible , a mi hermano Ivan Ramírez por sus palabras de ánimo y su apoyo, a mis amigos Ana Rocío Villalta y Leonel González, por ser un buen grupo de trabajo y muy buenos amigos, con quienes juntos logramos superar obstáculos en la realización de este trabajo de graduación, a Oscar Martínez y Fátima Orantes por su amistad y apoyo en todos estos años de formación profesional, por estar siempre presentes cuando más necesité de su ayuda, a la familia González Aquino por ser como mi segunda familia, a nuestro asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Berrios, por compartir su conocimiento en el área de fundición y guiarnos en el desarrollo de este trabajo de graduación, al personal del área productiva de la escuela de Ingeniería Mecánica por ayudarnos con su experiencia y facilitarnos el equipo y herramientas necesarias para la construcción de las partes de los moldes y modelos.

Jairo Emerson Ramírez

## DEDICATORIA

Primeramente quiero agradecer a nuestro Dios Todopoderoso por permitirme culminar con éxito este trabajo de graduación, y por darme tantas bendiciones en mi vida, como una gran familia, mi esposo y mis amigos.

A mi papá José Villalta Platero ya que con su esfuerzo me brindó mi educación, gracias por sus consejos y porque mi éxito es gracias a él.

A mi mamá Guadalupe Valenzuela de Villalta por su apoyo y por estar conmigo siempre y por su amor incondicional.

A mi amado esposo Melvin Muñoz ya que desde siempre me brindó su ayuda, y palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

A mis hermanas: Claudia, Ruth y María José por su apoyo y por estar siempre unidas.

A mis amigos Jairo Ramírez y Leonel González, ya que nuestra verdadera amistad contribuyó a que concluyéramos con éxito nuestro logro.

A la familia González Aquino, por su amistad sincera y por su apoyo.

A los ingenieros docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica por nuestra formación profesional, a los encargados de la Unidad Productiva de la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos su apoyo en la construcción de los elementos que se necesitaron en la realización de los moldes y modelos para fundición.

Ana Rocío Villalta Valenzuela

## **AGRADECIMIENTOS**

A:

Todas aquellas personas que directa e indirectamente ayudaron con la realización de este trabajo de graduación

La Unidad Productiva de la Escuela de Ingeniería Mecánica por su ayuda y conocimientos en el uso de los equipos y herramientas necesarias para la construcción de los modelos.

El área de carpintería de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura por su desinteresada ayuda, especialmente a Don Cañas.

Lic. y Master Guillermo Mejía Díaz de la Escuela de Ingeniería en Sistemas Informáticos por el préstamo de la cámara interactiva Mimio patrocinada por AECID.

Área administrativa de la Escuela de Ingeniería Mecánica.



# **ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MANUALES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS Y MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO**

Estudiantes: Brs. Leonel Miguel González Aquino, Jairo Emerson Ramírez  
Alfonzo y Ana Rocío Villalta Valenzuela  
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## **RESUMEN**

Se elaboraron e implementaron manuales para el diseño y construcción de modelos y moldes para fundición de aleaciones de aluminio, a partir de la bibliografía. Se construyeron modelos de madera y moldes con arena de río de dos índices de finura diferentes. Así, se obtuvieron dos grupos de probetas fundidas de una aleación de aluminio AA6061, con diferentes rugosidades, con el fin de determinar la influencia que tiene la granulometría de la arena en el comportamiento a la fatiga flexión rotativa. Se realizó un estudio fractográfico a bajos aumentos. Además, se caracterizó la macroestructura de las probetas. Finalmente, se evidenció que los manuales son satisfactorios, ya que mediante la prueba de fatiga flexión rotativa se comprobó que las rugosidades de las probetas causadas por las diferentes granulometrías de las piezas fundidas no presentan variaciones significativas en la resistencia a la fatiga flexión rotativa de la aleación estudiada.

## ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Historia de la fundición.....	2
1.2. Arenas de moldeo.....	3
1.2.1. Clasificación de las arenas de moldeo.....	4
1.2.2. Composición de las arenas.....	6
1.2.3. Aglutinantes y arenas de moldeo.....	8
1.3. Clasificación de los modelos para fundiciones de metales.....	9
1.3.1. Materiales para la construcción de modelos.....	9
1.4. Tipos de moldes para fundiciones en arena.....	12
1.4.1. Moldeo en cáscara.....	14
1.4.2. Fundición a la cera perdida.....	15
1.4.3. Moldes furánicos.....	17
1.4.4. Fundición con moldes de arena y silicato de sodio, sistema de CO <sub>2</sub> .....	19
1.5. Herramientas utilizadas en el proceso de fundición.....	19
1.5.1. Elementos utilizados para fundir.....	20
1.5.2. Elementos utilizados para la elaboración del molde.....	21
1.5.3. Elementos utilizados para la elaboración del modelo.....	26
1.6. Fundición de aluminio en moldes de arena.....	27
1.7. Diseño de moldes y modelos para fundiciones.....	29
1.7.1. Consideraciones generales.....	29
1.7.2. Recomendaciones para el diseño de las piezas fundidas.....	31
1.7.3. Parámetros de diseño para moldes de fundición.....	36
1.7.4. Diseño del bebedero.....	40
1.7.5. Diseño de la mazarota.....	48
1.8. Parámetros de diseño para modelos de fundición.....	55

	Pág.
1.8.1. Contracción de los metales.....	56
1.8.2. Ejemplo de dimensionamiento de modelos.....	57
2. DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIONES EN MOLDES DE ARENA.....	59
2.1. Pasos para el proceso de diseño de modelos para fundición en moldes de arena.....	59
2.2. Desarrollo de proceso de diseño.....	60
3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ARENA PARA MOLDES.....	82
3.1. Arenas de moldeo.....	82
3.2. Materiales para la fabricación de moldes.....	84
3.3. Granulometría de la arena.....	86
3.4. Aglomerantes para arenas de moldeo.....	90
3.5. Humedad en la arena de moldeo.....	98
3.6. Arena para machos.....	102
4. IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE LOS MANUALES.....	105
4.1. Planteamiento del problema.....	105
4.2. Aplicación de manuales para el diseño de modelos para fundición en moldes de arena.....	106
4.3. Aplicación del manual para la elaboración de moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio.....	117
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROBETAS FUNDIDAS EN MOLDES DE ARENA.....	133
5.1. Resultados.....	133
5.2. Análisis de resultados.....	140

	Pág.
CONCLUSIONES.....	143
RECOMENDACIONES.....	144
BIBLIOGRAFÍA.....	145
ANEXOS	
Anexo A: Manual de diseño de modelos para fundición de aleaciones de aluminio en moldes de arena.....	147
Anexo B: Manual para la elaboración de moldes de arena para fundiciones de aleaciones de aluminio.....	166

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Técnica del moldeo en cáscara.....	15
Fig. 1.2. Moldeo a la cera perdida.....	17
Fig. 1.3. Crisol normal.....	20
Fig. 1.4. Crisol con abrazaderas.....	20
Fig. 1.5. Tenazas para la extracción del crisol.....	20
Fig. 1.6. Bastidores.....	22
Fig. 1.7. Placas para moldear.....	22
Fig. 1.8. Pisones.....	22
Fig. 1.9. Reglas de hierro.....	23
Fig. 1.10. Fuelles sin tubo. ....	23
Fig. 1.11. Compases de varas y de punta. ....	23
Fig. 1.12. Reglas. ....	23
Fig. 1.13. Niveles. ....	23
Fig. 1.14. Utensilios para remover la arena.....	24
Fig. 1.15. Mazos.....	24
Fig. 1.16. Tipos de pinceles.....	24
Fig. 1.17. Agujas. ....	24
Fig. 1.18. Tipos de prensa.....	25
Fig. 1.19. Tubos. ....	25
Fig. 1.20. Trompo.....	25
Fig. 1.21. Apisonador. ....	26
Fig. 1.22. Espátula.....	26
Fig. 1.23. Cepillos de crin.....	27
Fig. 1.24. Etapas principales del proceso de fundición.....	30
Fig. 1.25. Modificaciones de diseño sugeridas.....	33
Fig. 1.26. Ejemplos de diseño de secciones transversales.....	34
Fig. 1.27. Ángulos de Salida sugeridos para modelos.....	34
Fig. 1.28. Esquema de una fundición y sus partes principales.....	38
Fig. 1.29. Bebedero, posición referida a la línea de corte y la altura de la pieza.....	41
Fig. 1.30. Tipos de flujos según el Número de Reynolds.....	43
Fig. 1.31. Cambios de sección y efecto de generación zonas de bajas presiones.....	44
Fig. 1.32. Diseño de la base del bebedero para evitar turbulencias.....	44

	Pág.
Fig. 1.33. Efecto de la presión causada por los cambios bruscos de dirección del fluido.....	45
Fig. 1.34. Disposición de los canales de distribución.....	45
Fig. 1.35. Sistema de canales de alimentación.....	46
Fig. 1.36. Mazarota cilíndrica abierta.....	49
Fig. 1.37. Mazarota cilíndrica cerrada en molde de arena.....	49
Fig. 1.38. Curva de Caine.....	50
Fig. 1.39. Resultados obtenidos experimentalmente por Bishop .....	51
Fig. 1.40. Tipos de mazarotas cilíndricas.....	53
Fig. 1.41. Rendimiento de la mazarota cilíndrica.....	53
Fig. 1.42. Proceso de alimentación líquida durante la solidificación.....	55
Fig. 1.43. Distancias de alimentación en placas.....	56
Fig. 1.44. Contracción de una fundición cilíndrica.....	58
Fig. 1.45. Dimensiones de la pieza final, cotas en mm.....	58
Fig. 1.46. Dimensiones del modelo considerando porcentaje de contracción.....	58
Fig. 2.1. Soporte tubular para sistema transmisión de gas de alta presión.....	61
Fig. 2.2. Recomendación para cambios de secciones.....	61
Fig. 2.3. Recomendación de rediseño para cambios de dirección.....	62
Fig. 2.4. Recomendación de diseño para intercepciones de paredes.....	62
Fig. 2.5. Detalle de la zona a rediseñar.....	63
Fig. 2.6. Dimensiones de la pieza con el rediseño.....	63
Fig. 2.7. Posicionamiento de la línea de partición.....	64
Fig. 2.8. Ubicación de la línea de partición para el soporte tubular.....	65
Fig. 2.9. Corte transversal para el diseño de los componentes del molde.....	66
Fig. 2.10. Formas de mazarotas.....	69
Fig. 2.11. Partes principales para determinar el volumen de la pieza.....	71
Fig. 2.12. Redimensionamiento del soporte tubular según porcentaje de contracción metálica.....	78
Fig. 2.13. Modelo inferior del soporte tubular con sus ángulos de extracción.....	80
Fig. 2.14. Modelo para el soporte tubular.....	80
Fig. 3.1. Forma correcta de colocar los tamices.....	87
Fig. 3.2. Colocación de la arena en los tamices.....	88
Fig. 3.3. Vibrador mecánico o tamizadora.....	88
Fig. 3.4. Limpieza de los tamices.....	89
Fig. 3.5. Balanza de precisión donde se pesa la muestra de arena.....	92

	Pág.
Fig. 3.6. Solución de azul de metileno preparada.....	93
Fig. 3.7. Procedimiento para la obtención de la lechada.....	93
Fig. 3.8. Mezcla del agua destilada con la arena de muestra.....	94
Fig. 3.9. Mezcla de la solución de azul de metileno con la lechada.....	94
Fig. 3.10. Prueba de coloración.....	95
Fig. 3.11. Ensayos de titulación con azul de metileno, por gotas.....	96
Fig. 3.12. Registro del peso de la muestra con su recipiente.....	99
Fig. 3.13. Peso de la muestra representativa.....	100
Fig. 3.14. Peso de la muestra húmeda junto con su recipiente.....	100
Fig. 3.15. Colocación de la muestra húmeda en el horno secador.....	101
Fig. 3.16. Elaboración de macho.....	104
Fig. 3.17. Posición del macho en el molde de fundición.....	104
Fig. 4.1. Dimensiones de las probetas para el ensayo en la máquina de fatiga a flexión rotativa.....	106
Fig. 4.2. Línea de partición para las probetas de aluminio AA6061.....	107
Fig. 4.3. Disposición de los sistemas de alimentación.....	108
Fig. 4.4. Modelo superior.....	108
Fig. 4.5. Modelo inferior.....	108
Fig. 4.6. Dimensiones del bebedero y copa de vaciado.....	111
Fig. 4.7. Redimensionamiento de probetas, considerando el porcentaje de contracción volumétrica por solidificación del aluminio.....	113
Fig. 4.8. Mazarota parte superior que es dividida por la línea de partición.....	114
Fig. 4.9. Mazarota parte inferior que es dividida por la línea de partición.....	114
Fig. 4.10. Dimensiones de la base del bebedero y su canal de alimentación.....	114
Fig. 4.11. Presentación del trabajo realizado a las probetas.....	116
Fig.4.12. Procedimiento de pesaje de la cantidad adecuada de agua.....	121
Fig. 4.13. Forma adecuada de mezclar la arena con su humedad correspondiente .....	121
Fig. 4.14. Efectos del exceso de humedad a las piezas fundidas.....	122
Fig. 4.15. Dimensiones de la caja del molde.....	123
Fig. 4.16. Visualización del modelo en su forma final.....	124
Fig. 4.17. Forma correcta de expandir talco sobre el modelo.....	124
Fig. 4.18. Llenado de la caja de moldeo con arena.....	125
Fig. 4.19. Compactando la arena de moldeo.....	125
Fig. 4.20. Forma para remover el exceso de arena y giro de la caja de moldeo.....	126
Fig. 4.21. Proceso de retiro de la placa de moldeo y el modelo.....	126

	Pág.
Fig. 4.22. Acabados realizados al molde antes de unir ambas partes de la caja.....	127
Fig. 4.23. Detalles finales del molde: a) copa del bebedero y respiraderos señalado: y b) unión de los 2 moldes.....	127
Fig. 4.24. Precalentamiento del crisol.....	128
Fig. 4.25. Proceso de llenado del crisol.....	129
Fig. 4.26. Revisión y carga del material.....	129
Fig.4.27. Procedimiento antes de la colada con el aluminio, colocación del desgasificador.....	129
Fig. 4.28. Colada del aluminio sobre la copa de vaciado.....	131
Fig.4.29. Limpieza del crisol.....	131
Fig. 4.30. Piezas obtenidas en las fundiciones.....	131
Fig. 4.31 Probeta obtenida de fundición de aluminio AA6061.....	132
Fig.4.32. Probetas obtenidas en moldes de arena de granulometría media.....	132
Fig.4.33. Probetas obtenidas en moldes de arena de granulometría gruesa.....	132
Fig. 5.1. Macrografía de probeta de aluminio AA6061.....	134
Fig. 5.2. Máquina de ensayo de fatiga a flexión rotativa.....	135
Fig. 5.3. Diagrama de momentos y fuerzas.....	135
Fig. 5.4. Curvas semilogarítmicas de los ensayos de fatiga flexión rotativa para una aleación de aluminio AA6061 obtenida por fundición.....	138
Fig. A.1. Esquema de una fundición y sus partes principales.....	151
Fig. A.2. Vista lateral para el diseño de los componentes del molde.....	152
Fig. A.3. Formas de mazarotas.....	154
Fig. A.4. Efecto de la presión causada por los cambios bruscos de dirección del fluido.....	158
Fig. A.5. Recomendación para cambios de secciones: a) el flujo se vuelve turbulento en el cambio de sección y b) el flujo de metal fundido es correcto y evita turbulencias.....	159
Fig. A.6. Recomendación de diseño para intercepciones de paredes: a) no recomendado y b) recomendado.....	159
Fig. A7. Recomendación de diseño para base del bebedero.....	160
Fig. A.8. Forma correcta de colocar los machos: a) En voladizo y b) Portada de modelo cónica.....	161



Fig. A.9. Manera para sostener los machos provistos de una sola portada: a) Macho simple horizontal, b) Macho con marcas de cazuela y c) Ejemplo de macho dobles.....	161
Fig. B.1. Forma correcta de colocar los tamices.....	171
Fig. B.2. Colocación de la arena en los tamices.....	171
Fig. B.3. Vibrador mecánico o tamizadora.....	172
Fig. B.4. Limpieza de los tamices.....	172
Fig. B.5. Balanza de precisión donde se pesa la muestra de arena.....	175
Fig. B.6. Solución de azul de metileno preparada.....	175
Fig. B.7. Procedimiento para la obtención de la lechada.....	176
Fig. B.8. Mezcla del agua destilada con la arena de muestra.....	176
Fig. B.9. Mezcla de la solución de azul de metileno con la lechada.....	177
Fig. B.10. Prueba de coloración.....	177
Fig. B.11. Ensayos de titulación con azul de metileno, por gotas.....	179
Fig. B.12. Registro del peso de la muestra con su recipiente.....	181
Fig. B.13. Peso de la muestra representativa.....	182
Fig. B.14. Peso de la muestra húmeda junto con su recipiente.....	182
Fig. B.15. Colocación de la muestra húmeda en el horno secador.....	183
Fig. B.16. Placa de moldeo y caja de moldeo.....	186
Fig. B.17. Forma de colocar el polvo separador en la placa de moldeo.....	186
Fig. B.18. Forma para colocar la primera capa de arena de moldeo sobre el modelo la placa de moldeo.....	187
Fig. B.19. Procedimiento de compactación de arena.....	187
Fig. B.20. Forma para remover el exceso de arena y giro de la caja de moldeo.....	188
Fig. B.21. Proceso de retiro del modelo.....	188
Fig. B.22. Unión de los moldes superior e inferior.....	189

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Límites técnicos y económicos para el uso de los procedimientos principales de colada.....	28
Tabla 1.2. Composición química de las aleaciones de aluminio.....	29
Tabla 1.3. Ángulos de salidas para la extracción de modelos.....	35
Tabla 1.4. Valores de contracción metálica para fundiciones.....	35
Tabla 1.5. Número de Reynolds.....	42
Tabla 1.6. Valores del coeficiente, s.....	47
Tabla 2.1. Criterios de ubicación de línea de partición.....	65
Tabla 2.2. Porcentaje de contracción metálica para metales y aleaciones comunes.....	68
Tabla 2.3. Viscosidades cinemáticas de metales.....	75
Tabla 2.4. Valores aconsejables para ángulos de salida.....	79
Tabla 2.5. Características de los materiales de construcción de modelos.....	81
Tabla 3.1. Temperatura de fusión de metales no ferrosos comunes.....	83
Tabla 3.2. Propiedades de las arenas de moldeo.....	83
Tabla 3.3. Características y propiedades de las arenas de moldeo en función de su aplicación.....	85
Tabla 3.4. Índice de finura según el metal a fundir.....	86
Tabla 3.5 Índice de finura de las arenas de moldeo.....	87
Tabla 3.6. Registro de datos obtenidos durante el ensayo.....	89
Tabla 3.7. Selección de la muestra de arena.....	99
Tabla 4.1. Resultados obtenidos durante el ensayo de granulometría.....	118
Tabla 4.2. Datos obtenidos prueba de humedad.....	120
Tabla 5.1. Resultados de ensayo de fatiga a flexión rotativa a probetas de una aleación de aluminio AA6061 utilizando arena de moldeo con granulometría media.....	137
Tabla 5.2. Resultados de ensayo de fatiga a flexión rotativa a probetas de una aleación de aluminio AA6061 utilizando arena de moldeo con granulometría gruesa.....	137
Tabla 5.3. Superficie de fractura de probetas de una aleación de aluminio AA6061, obtenidas por fundición en moldes de arena con granulometría media.....	139
Tabla 5.4. Superficie de fractura de probetas de una aleación de aluminio AA6061, obtenidas por fundición en moldes de arena con granulometría gruesa.....	140
Tabla A.1. Criterios de ubicación de línea de partición.....	150
Tabla A.2. Viscosidades cinemáticas de metales.....	157

Tabla A.3. Porcentaje de contracción volumétrica para metales y aleaciones comunes.....	162
Tabla A.4. Valores aconsejables para ángulos de extracción según su altura.....	164
Tabla A.5. Características de los materiales de construcción de modelos.....	165
Tabla B.1. Temperatura de fusión de metales no ferrosos comunes.....	168
Tabla B.2. Propiedades de las arenas de moldeo.....	168
Tabla B.3. Características y propiedades de las arenas de moldeo.....	169
Tabla B.4. Índice de finura según el metal a fundir.....	170
Tabla B.5. Índice de finura de las arenas de moldeo.....	170
Tabla B.6. Registro de datos obtenidos durante el ensayo.....	173
Tabla B.7. Selección de la muestra de arena.....	181

## SÍMBOLOS Y SIGLA

h:	Altura por encima de un cierto plano de referencia
$\mu$ :	Viscosidad del fluido
A:	Área de la sección transversal de la corriente del líquido
As:	Área de la superficie de la pieza
C:	Altura total de la cavidad respecto al canal de alimentación
$C_m$ :	Constante del molde
d:	Diámetro del canal de alimentación
f:	Pérdida por fricción en el líquido
g:	Gravedad
H:	Distancia promedio debido a las contrapresiones que puede generar el metal líquido al momento de realizar la colada
L:	Longitud
$M_{pieza}$ :	Módulo de la pieza
$M_{mazarota}$ :	Módulo de la mazarota
n:	Exponente utilizado en la regla de Chvorinov
$N_R$ :	Número de Reynolds
p:	Presión en un punto específico
P:	Distancia de la cavidad respecto al canal de alimentación
Q:	Gasto volumétrico
s:	Relaciona el espesor de las paredes de la pieza
T:	Tiempo de llenado del molde
t:	Tiempo de duración de la colada
$T_s$ :	Espesor
$T_{TS}$ :	Tiempo total de solidificación
v:	Velocidad del líquido a una elevación específica
V:	Volumen de la cavidad del molde
$V_p$ :	Volumen de la pieza a fundir
$V_{RF}$ :	Volumen final del metal solidificado de la mazarota
W:	Anchura
$\rho$ :	Densidad del fluido o metal
$\beta$ :	Coeficiente de contracción volumétrica por solidificación
C:	Coeficiente de contracción volumétrica del metal
K:	Nivel de seguridad
$V_{pieza}$ :	Volumen de la pieza a fundir
$S_{pieza}$ :	Superficie de contacto de la pieza con la arena de moldeo
%Q:	Porcentaje de arena retenida en cada tamiz con respecto al peso total
%Ar:	Porcentaje de arcilla presente en la arena
$P_O$ :	Peso inicial
q:	Peso retenido en cada tamiz
M:	Coeficiente multiplicador correspondiente a cada tamiz
CAM:	Capacidad de azul de metileno

AMT: Azul de metinelo requerido para la titulación  
B<sub>eq</sub>: Bentonita equivalente  
% de: Porcentaje de agua presente en la muestra de arena o  
Humedad: humedad.  
W<sub>1</sub>: Masa del recipiente y del espécimen húmedo  
W<sub>2</sub>: Masa del recipiente y del espécimen seco  
M<sub>b</sub>: Momento en el concentrador de esfuerzo  
F: Carga aplicada  
a: Longitud de la probeta hacia el concentrador  
W<sub>b</sub>: Momento de resistencia  
σ<sub>a</sub>: Amplitud de esfuerzo  
σ<sub>u</sub>: Esfuerzo nominal a carga máxima  
F<sub>max</sub>: Valor a carga máxima  
F<sub>u</sub>: Carga última  
N<sub>f</sub>: Número de ciclos a la fractura  
D<sub>mt</sub>: Diámetro mazarota teórica  
AFS: Asociación Americana de Fundidores, siglas en inglés

## INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, los procesos y técnicas de modelado y moldeado para las fundiciones han experimentado muchos avances desde sus inicios, las cuales se fueron perfeccionando y se convirtieron en nuevos procesos de fabricación. Entre las diversas maneras de implementar técnicas de moldes y modelos de fundición, se destacan los moldes de arena verde, siendo el más utilizado a través de las décadas, debido a que de esta manera se obtienen piezas de una buena calidad a un bajo costo y con una mayor versatilidad para implementarla para muchos tipos de piezas.

La necesidad de la elaboración e implementación de manuales de diseño y construcción de moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio se hace con el objeto de facilitar los fundamentos teóricos y los criterios para el diseño; a personas con estudios técnicos, estudiantes o personas particulares que se interesen en este tipo de procesos, para que puedan construir y diseñar sus propios modelos y moldes en base a sus necesidades.

Para comprender a fondo lo que se requiere para diseñar estos manuales, se realizó el presente trabajo de grado, en el cual se recopiló la teoría necesaria que permite una adecuada selección de: materiales, diseño y fabricación. Con estos parámetros ya establecidos se continua con el desarrollo de un ejemplo, con el cual se generan los pasos seguir para la elaboración de los modelos y moldes, que después se retoman para la fabricación de probetas para ensayo de fatiga a flexión rotativa y los resultados obtenidos se presentan a través de una curva de caracterización de vida a la fatiga, un estudio fractográfico y una macrografía de las probetas ensayadas para dos tipos de granulometrías de los moldes de arena.

## **1. MARCO TEÓRICO**

Para llevar a cabo la producción de una pieza fundida es necesario realizar las siguientes actividades: el diseño del modelo y sistemas de alimentación, determinación de los materiales para los modelos, la fabricación de los modelos y caja de moldeo, fabricación del molde, preparación de las arenas del molde, colado de metal fundido, enfriamiento del conjunto metal vaciado y el molde, extracción de las piezas fundidas, limpieza de las piezas fundidas, terminado de las piezas fundidas y finalmente la recuperación de los materiales de los moldes.

Estas actividades a realizar tienen su metodología de manera que se haga correctamente como se describirá a continuación mostrando su historia y los pasos a seguir.

### **1.1. HISTORIA DE LA FUNDICIÓN**

La fundición inició durante la edad de piedra (año 6000 a.C.) y al iniciar la edad de cobre. Entonces el hombre empezó a explotar el oro y el bronce, dándole forma de la única manera que conocía, es decir, martillándolas; lo cual posteriormente recibió el nombre de forjado [1].

Luego observó que el cobre se quebraba con los golpes aplicados, pero que al calentarse se fundía, se podía vaciar el metal líquido en moldes abiertos y que a medida se enfriaba, se solidificaba. Los primeros moldes eran de esmectita llamada también piedra de jabón o jaboncillo de sastre, ésta era una piedra blanda y de fácil corte que soportaba las altas temperaturas del metal fundido.

Pero por la dificultad de tallar la piedra se empezó a utilizar la arcilla arenosa, en que se podía envolver el objeto, para luego quemarlo; es decir, se

pasó al molde cerrado utilizando una técnica que se asemejaría a la cera perdida [1].

La técnica era elemental, se vaciaba la colada de metal sobre moldes abiertos de piedra o arena arcillosa, para ésta época las piezas fabricadas mediante éste método sólo eran para armas o utensilios de guerra. Luego se hicieron algunos avances como por ejemplo: los moldes abiertos se diseñaron para poder fundir varias piezas, se descubrió los moldes cerrados (en la edad del bronce), posteriormente al molde cerrado se le incorporaron canales de alimentación para su llenado, esto gracias a la tecnificación del proceso y la producción masiva de herramientas y armas; en cuanto a la fundición en general se empezaron a utilizar hornos rudimentarios para lograr elevadas temperaturas y se descubrió la fusión de metales con lo cual se inició el proceso metalúrgico de fabricar objetos con aleaciones de cobre con estaño, aluminio, magnesio, manganeso, oro y plata. Esta técnica se ha ido perfeccionando desde el milenio III a.C en Asia y Egipto hasta la actualidad, para generar herramientas que faciliten la vida del hombre [1].

## **1.2. ARENAS DE MOLDEO**

Las principales características de las arenas de moldeo son: carácter refractario, cohesión, porosidad y permeabilidad [7].

La arena debe resistir el calor del metal fundido, por cuya razón es necesario que tenga una gran proporción de sílice con un mínimo de los ingredientes que aumentan la fusibilidad, tales como ciertos óxidos metálicos.

Por lo tanto, para trabajar con metales no ferrosos y fundiciones ligeras se requiere una proporción de sílice próxima al 80%, para la fundición media al 85%, para la pesada al 90% y para el acero del 90 al 93% [7].

Además, del carácter refractario de la arena, tienen importancia la plasticidad y la cohesión lograda con el material de unión. La arena ha de



formar un todo y mantener la forma una vez que se ha hecho compacta por golpeo con el apisonador, y resistir la fluencia y la presión del metal fundido [7].

En cuanto al material de unión más usado universalmente en el moldeo es la bentonita la cual es una sustancia análoga a la arcilla [7].

### **1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS DE MOLDEO**

Entre las arenas de moldeo más utilizadas en el área de fundición se tienen:

- Arena verde: es una arena húmeda; es decir, que no se ha secado. La colada en moldes de arena verde es una práctica muy común para obtener piezas coladas de dimensiones pequeñas y medianas de metales ferrosos y no ferrosos [2].
- Arena seca: es la que se fabrica con aglomerantes orgánicos en lugar de arcilla, el molde se cuece en una estufa grande a temperaturas de 204 a 316 °C, el cocido en una estufa refuerza el molde y endurece la superficie de la cavidad. La arena seca se emplea principalmente para colar piezas grandes o cuando se exige exactitud en las dimensiones de las piezas [2].
- Arena de revestimiento: es la arena que se apisona contra la cara del modelo y que forma la cara del mismo. Suele ser una mezcla de arena reciclada y arena nueva con proporción del 50% cada una, con más proporción de aglomerantes en la arena reciclada, tal como la arena refractaria o también la bentonita [2 y 7].
- Arena de relleno: arena procedente de los moldes ya colados y que se vuelve a preparar para completar el llenado de los moldes, posterior a la arena de revestimiento [2].
- Arenas especiales para moldeado: cuando se necesita un acabado más terso o mayor exactitud dimensional de los que se pueden obtener en una colada normal, se pueden construir moldes grandes para piso y pozo, con variantes

del proceso básico de colada en arena. Un molde de arena especial se construye con ~50% de arena para moldes y ~50% de arcilla. El molde se suele construir sobre una estructura de ladrillo común [2].

- Arena sintética: esta denominación se emplea para las arenas preparadas artificialmente a partir de arena de sílice prácticamente pura a la que se adicionan arcillas aglutinantes adecuadas, las arenas sintéticas pueden contener una cierta proporción de arena aglutinada natural, la denominación incluye en su sentido general a las arenas aglutinadas con cemento o con medios orgánicos, como los aceites, que normalmente se consideran como aglutinantes para machos [2].
- Arenas para machos: el macho es el que da forma a la parte interior de la pieza, por lo que ha de cumplir unos requisitos diferentes a los de la parte exterior. Las principales propiedades que debe tener el macho son gran dureza, resistencia a la compresión, la permeabilidad, homogeneidad de la superficie, carácter refractario, capacidad de unión, producción de gases y absorción de la humedad. Los machos han de mantener su forma hasta que el metal solidifica; el macho ideal es el que se desmorona y pasa a la masa de arena una vez que ha solidificado el metal. Si la consistencia del macho es mayor que la necesaria, será difícil extraer esta arena del interior de la pieza moldeada [2].

La mezcla de arena para hacer estos machos consta de dos partes: arena rica en sílice con poca o nada de la arcilla aglomerante y un aglutinante.

Así es pues, deseable un elevado porcentaje de cuarzo para que el macho no se deshaga cuando sufra la acción del calor. La función del aglomerante empleado con la arena para machos es unir los granos de arena en la forma deseada y dar suficiente consistencia a los machos para evitar que se rompan, deterioren o desgasten cuando se fabrican, se instalan para el moldeo o durante la colada [2].

## 1.2.2. COMPOSICIÓN DE LAS ARENAS

El constituyente fundamental de las arenas para fundición es el cuarzo (sílice), los otros minerales presentes son: compuestos de sílice y alúmina, silicatos complejos en diferentes proporciones, cal magnesia, óxidos de hierro y de metales alcalinotérreos, sosa, y potasa [2].

Estos componentes de las arenas pueden dividirse en tres grandes grupos, como son:

- a) Cuarzo, el cual es el constituyente principal de los granos de las arenas.
- b) Materia Arcillosa, la cual es el aglutinante que envuelve los granos de cuarzo.
- c) Feldespato, mica y otras sustancias fundentes, cuya presencia no es deseable en los materiales refractarios, pero que se encuentran normalmente en los yacimientos de arena [2].

La composición de las arenas de moldeo son generalmente: 80 a 90% de sílice; tazas a 3% de álcali libre; alúmina (como arcilla) 4 a 9%; y cal y magnesia desde tazas al 3% y de 1 a 4% de óxidos de hierro, respectivamente. Es importante destacar, que cuanto más bajo sea el contenido en álcalis y cal o magnesia más refractarias son las arenas. La composición química de las arenas es un buen indicativo de su carácter refractario, no obstante los factores que determinan esencialmente la utilidad de una arena de moldeo son: 1) la forma, tamaño, distribución y carácter superficial de los granos; 2) la cantidad y tipo de arcilla, y 3) la humedad [2].

La forma y tamaño de los granos de arena tiene mucha importancia en relación con la compacidad del empaquetamiento de una masa de granos, lo que repercute en la porosidad, permeabilidad y plasticidad de la arena. Los granos angulosos proporcionan más resistencia mecánica que los redondeados para la misma cantidad de arcilla aglutinante, por lo que cuando se necesita la máxima resistencia, son ventajosos los granos muy angulosos o semi-angulosos con superficies rugosas cubiertas con una capa delgada y tenaz de la materia aglutinante. Los granos redondeados producen la máxima plasticidad

y la mejor permeabilidad y son preferibles por la facilidad del apisonado, especialmente en la confección mecanizada de machos. Por el empaquetamiento compacto de los granos de forma uniforme, las arenas que están formadas por ellos son propensas a producir defectos tales como grietas superficiales y darts (defectos en forma de costras metálicas irregulares que se presentan en la superficie de las piezas) por la dilatación de los granos de cuarzo al calentarse [2].

La arena de moldeo es una mezcla natural de granos de cuarzo y arcilla. El cuarzo es sólido y difícilmente fusible, según el tamaño de grano del cuarzo la arena puede ser de grano grueso, medio o fino.

La arcilla adquiere propiedades aglomerantes al absorber agua, sirve como aglomerante y hace que los granos de cuarzo se adhieran unos a otros según el contenido de arcilla. Así, las arenas de moldeo por su contenido de arcilla se denominan grasas cuando tienen más de 15%, semi-grasas cuando tienen de 8 a 14%, y magras cuando tienen menos de 8% [2].

En cuanto a la refractariedad, ésta es la característica natural que presenta la arena para resistir elevadas temperaturas de los metales fundidos en el proceso de colada [15].

La refractariedad propia de la arcilla es función de la presencia de impurezas básicas, óxidos metálicos o materias orgánicas. La refractariedad de una arena se determina por la temperatura, cuando se somete a altas temperaturas se puede determinar si la arena presenta signos de fusión. Como ya se dijo, la refractariedad viene asegurada por la sílice, cuyas características resultan siempre modificadas por la presencia de otros elementos. La temperatura de vitrificación de una arena disminuye en proporción inversa del contenido de otros materiales [15].

También, la forma y el tamaño de los granos tienen una notable influencia sobre la refractariedad: los granos angulosos sinterizan más fácilmente que los esféricos y los finos más que los gruesos [15]. Además, el grado de refractariedad que se exige de una arena de fundición depende del metal que se colará; es decir, la arena para colar aceros debe de poder resistir

temperaturas de 1350 a 1400 °C, las arenas para colar aleaciones de metales no ferrosos debe de poder resistir temperaturas de 850 a 1400 °C, etc. [15].

### **1.2.3. AGLUTINANTES Y ARENAS DE MOLDEO**

Los aglutinantes usados en fundición para la preparación de mezclas de arenas para moldes y machos (noyos) se clasifican como:

- a) Aglutinantes inorgánicos: Arcilla, bentonita, óxido de Fe, cemento, silicato de sodio y harina de sílice; y
- b) Aglutinantes orgánicos: Cereales, almidones, harina de maíz, dextrina, harina de madera, melaza, alquitrán, resinas, aceites y carbón vegetal [2].

El objetivo de las pruebas de las arenas de fundición, es predecir su comportamiento durante la operación de colada. Los ensayos se deben de realizar a las mismas condiciones de operación con las que se trabaja en la industria de la fundición, ya que la calidad de la pieza fundida depende directamente de las propiedades de la arena de moldeo [2].

Los distintos tipos de arena para construir moldes de fundición y la forma de empleo, según la naturaleza de cada metal, son:

- a) Para el cobre se utilizan moldes de arena verde muy porosa, para permitir el libre escape de los gases [2].
- b) Para los latones se requiere arenas especiales, no muy grasas pero de buena cohesión. Para que la superficie de las piezas fundidas obtenidas sean lisas y de buen aspecto, se requiere arena de granos muy finos y con una cierta cantidad de arcilla, sin olvidar que esta última ha de estar limitada, para que no impida la salida de los gases [2].
- c) Para los bronce se utilizan moldes de arena verde para piezas pequeñas o moldes secos cuando las piezas son de mayor tamaño [3].
- d) Para el aluminio y sus aleaciones, se usa arena con un contenido de arcilla de 10 a 15% (no ha de ser muy grasa), de 7 a 8% de agua y no demasiado fina; (0.14 a 0.11 mm) [2].

e) Para las aleaciones de magnesio se aplica, por lo general, los mismos moldes que para la fundición del aluminio, con la diferencia que se agrega a la arena de 3 a 10% de azufre y de 0.25 a 1% de ácido bórico [2].

### **1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS PARA FUNDICIONES DE METALES**

Los modelos son los elementos principales que se valen los fundidores para hacer las piezas coladas. Aun cuando se desee realizar una sola pieza, es necesario contar con un modelo que por lo general podría ser útil para fabricar una mayor cantidad de piezas. Así, el contar con un modelo apropiado es la primera etapa de la elaboración de piezas coladas [3].

Puede definirse un modelo como una réplica de la pieza que se desea obtener teniendo en cuenta la disminución de sus dimensiones ocasionadas por la contracción de la pieza colada en el proceso de enfriamiento y solidificación, la rugosidad de las superficies de la pieza depende de la calidad de la arena [3].

#### **1.3.1. MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS**

Los materiales utilizados en la elaboración de modelos pueden ser: madera, metal, poliestireno, plástico, resina epóxica, cera o bien mercurio congelado. La información que se puede recabar sobre éstos materiales es muy amplia, y considerando que se llevará a cabo la producción del modelo se busca la mejor alternativa en cuanto a disposición de materiales a un bajo costo para este trabajo de graduación; por lo que en esta sección se presentará información sobre la madera ya que cumple con los objetivos de este trabajo [3].

Así, la madera para modelos posee muchas propiedades importantes como son: baja densidad, buena facilidad de elaboración, capacidad de

aglutinación, retención de barnices y bajo costo. Sin embargo ésta tiene una estructura heterogénea: es decir, que es capaz de absorber y disipar la humedad, en este caso, varía su volumen, produciendo una deformación y cambio en sus propiedades mecánicas. Estos inconvenientes se pueden evitar parcialmente con la selección idónea de las correspondientes especies de madera, el régimen de secado y el labrado durante la elaboración de los modelos [4].

Además, las maderas disponibles en El Salvador según la Norma técnica para el control de calidad de los materiales estructurales, para la realización de los modelos se dividen en dos tipos [3 y 12]:

- a) Latifoliadas o Duras: Fresno, haya, olmo, roble, caoba y teca;
- b) Coníferas o Blandas: Pino, picea, alerce y abeto.

Las maderas duras tienen una magnífica resistencia a la abrasión, sin embargo algunos inconvenientes que tienen son su fragilidad y la dificultad para ser trabajadas. Toda madera que se emplee para la fabricación de modelos, deberá ser sometida a un secado completo. Esta madera usualmente tendrá una humedad de 6 a 8% para almacenarse e impedir la reabsorción de humedad para evitar el alabeo, el cual representa un encorvamiento o flexión de la madera aserrada durante su secado o almacenamiento. Este alabeo altera la forma de la madera aserrada, dificulta su uso según la destinación, el maquinado y el corte a medida; el hinchamiento y las costosas reparaciones que tenga que hacerse a los modelos, durante su uso y aun antes en lo que toca a corrección dimensional.

Los modelos sueltos son generalmente de construcción en madera. Las placas modelo se construyen en ocasiones de modelos de madera, montados en una placa metálica o en otras completamente de madera, aun cuando lo más recomendable es hacerlas completamente de metal [3 y 4].

Cuando se describen modelos contruidos de madera se debe pensar en la calidad de la pieza acabada, la cual se establece en función de la frecuencia de uso, la vida del modelo o el número de piezas a fundir y la calidad de la superficie de las piezas coladas a obtener. No obstante, para los modelos de

madera, se pueden hacer las siguientes clasificaciones de calidad del modelo, las cuales son:

- a) Excelente calidad: Son modelos preparados para el moldeo a mano o máquina de grandes cantidades de piezas (se pueden estimar de 500 a 1,000 de tamaños medianos). Tienen fuertes exigencias dimensionales, por lo que se construyen con maderas duras y refuerzos metálicos en su armazón y en zonas sometidas a desgaste. Las medias cañas mayores a 3 mm se construyen de madera o de cuero. Las guías entre partes de modelos o cajas de machos serán metálicas [5].
- b) Muy buena calidad: Son modelos preparados para el moldeo a mano o a máquina de cantidades elevadas de piezas (se pueden estimar de 200 a 500 de tamaños medianos y de 15 a 25 de piezas grandes). La construcción y montaje es similar a la de los modelos de excelente calidad, sin tantas exigencias de armaduras metálicas [5].
- c) Buena calidad: Son modelos preparados para el moldeo a mano de cantidades medias de piezas (se pueden estimar de 30 a 50 de tamaños menores y de 5 a 15 de piezas grandes) [5].
- d) Calidad regular: Son modelos preparados para el moldeo a mano de piezas unitarias (se pueden estimar de 1 a 5 en modelos pequeños y de 1 o 2 en modelos grandes). Comprende modelos propiamente dichos, modelos en esqueleto, rasquetes y terrajas. Podrán tener piezas sueltas y las medias cañas estarán indicadas en el modelo. No precisan refuerzos especiales metálicos [5].

En cuanto al acabado de los modelos, todos deberán tener dos capas de pintura y en algunos casos con una primera capa de imprimación para su conservación y protección de los agentes externos (aire, agua y ácidos de la fundición). En el mismo sentido, cuando éstos se almacenen deberán de estar de tal forma que no se deformen. Además, es importante destacar que el mantenimiento del modelo o reparación durante la vida del mismo es responsabilidad del fundidor, y toda actuación sobre el modelo que le permita aumentar su vida útil es responsabilidad del fabricante [5].



#### **1.4. TIPOS DE MOLDES PARA FUNDICIONES EN ARENA**

Los moldes de arena o también llamados moldes desechables se caracterizan por los tipos de arena que los componen y por los métodos utilizados para producirlos. La arena más común es la arena verde para moldeo, que es una mezcla de 90% de arena, 7% de arcilla y 3% de agua. El término “verde” indica que la arena dentro del molde está húmeda, mientras se vacía el metal en su interior. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena retractsibilidad, permeabilidad y reutilización.

También son de bajo costo, es por ello que son los más usados, también tienen sus desventajas ya que la humedad en la arena puede causar defectos en algunas fundiciones [6].

Otro tipo de moldes es el de arena seca, la cual se cuece en una estufa a temperaturas que fluctúan entre 204 a 316 °C. El cocido en la 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.

Estos moldes son producidos completamente de aglomerantes orgánicos en lugar de arcilla. Los moldes deben ser cocidos totalmente antes de usarse, por lo cual las cajas son de metal. Los moldes de arena seca mantienen su forma cuando son vaciados y están libres de turbulencias de gas debidas a la ausencia de humedad [6 y 12].

Además, por el método de preparación, existen dos tipos de moldes, estos son:

Método 1. La arena se mezcla con un aglomerante y se coloca alrededor del modelo formando una capa de ~10 mm, se recubre el molde completamente con arena verde y finalmente el molde se seca por medio de una antorcha o aire caliente. El aglomerante utilizado en la mezcla de arena es con el fin de que al secar esta capa quede dura.

Método 2. El molde entero se construye de arena verde y luego se recubre su superficie con una solución mediante un rociador de tal manera que se endurezca la arena cuando el calor es aplicado por medio de antorcha o aire caliente. La solución rociada contiene por lo general aceite de linaza, agua de melaza o almidón gelatinizado [12].

En el proceso de moldeo de caja fría se mezclan diversos aglutinantes orgánicos e inorgánicos con la arena de sílice lavada y seca, para unir químicamente los granos y obtener una mayor resistencia. Estos moldes tienen dimensiones más precisas que los de arena verde, pero son más costosos. Para el proceso de molde de caja fría se sigue el mismo procedimiento: se prepara el material de moldeo, se retiran las cajas y se deja que continúe el endurecimiento hasta alcanzar su resistencia final. Con objeto de conseguir un mejor acabado superficial se aplica algún tipo de pintura o recubrimiento como la plumbagina acuosa. La preparación de la arena y construcción del molde en este proceso se le conoce como curado en frío [6 y 12].

Entre las ventajas de usar moldes de arena se tienen: amplia variedad de tamaños, geometrías de complejidad media, válido para cualquier aleación media (es decir, aquellas que tienen Ni, Cr, Mo, o Cu en porcentajes inferiores a 5% y para aceros de media aleación con Mn de 1.20 a 1.65% según el porcentaje de carbono), piezas libres de esfuerzos residuales, económico (reducida inversión en equipos para series cortas o prototipos), rápido y flexible para series cortas o prototipos [6].

Entre los inconvenientes que se pueden presentar están: tolerancias dimensionales grandes, aspecto y calidad superficial como rugosidades altas, piezas con baja resistencia mecánica, cierta probabilidad de defectos, necesidad de mano de obra cualificada y especializada; y baja producción (artesanal) [6].

También existen los moldes utilizados para procesos de colada en serie o repetitivos, fabricados con metales que mantienen su resistencia a altas temperaturas, estos llamados moldes permanentes. Una de las características principales es que el metal es mejor conductor térmico que los moldes

desechables fabricados con refractarios, y los moldes compósitos son los que se producen con dos o más materiales (como arena, grafito y metales) y combinan las ventajas de tener una parte permanente y otra desechable, se utilizan en diversos procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde y controlar las velocidades de enfriamiento en fundición [14].

Por último, cabe nombrar otros procesos de fundición en arena que emplean técnicas especiales para la construcción de los moldes, como por ejemplo, en el moldeo en cáscara y de cera perdida [7].

#### **1.4.1. MOLDEO EN CÁSCARA**

Este procedimiento es un excelente medio para lograr buenas tolerancias y piezas de moldeo con acabados finos. Se utilizan para el modelo de placas metálicas calientes, montadas con las superficies hacia arriba en una caja de moldeo, en la que se introduce arena con resina aglutinante, (ver, Fig. 1.1).

La composición de la mezcla de arena y resina es probablemente el factor más importante en el éxito de este tipo de moldeo. Al inicio del procedimiento se empleó arena de sílice fina (de tamaño granular medio de 0.15 a 0.20 mm) lavada, con un 6 a 8% de aglomerante del tipo resina fenólica [7 y 12].

El método general, que se emplea para recubrir el modelo, se conoce como “caja de descarga”; es una caja con un extremo abierto, que contiene la mezcla de arena y resina, en la que están unas pinzas para fijar el extremo abierto la placa modelo caliente, consiguiendo de este modo el cierre de la caja. Esta ha de ser lo suficientemente profunda para que, al invertirla, la mezcla de arena-resina disponga, cuando menos, para su caída de un espacio libre de unos 30 cm, y asimismo para retener la cantidad suficiente de arena para cubrir las partes más altas del modelo con un espesor de unos 10 cm [7].

La placa modelo, calentada a una temperatura de 250 a 300 °C se fija, en la debida posición, con las pinzas, y se hace girar la caja. Finalmente se quita el casquete del modelo [8].

Dado que el molde no contiene humedad, no se produce el enfriamiento del metal fluido por el cambio del agua a vapor, lo que hace que la superficie sea más fina y lisa, permitiendo una reproducción más fiel de los detalles [7].

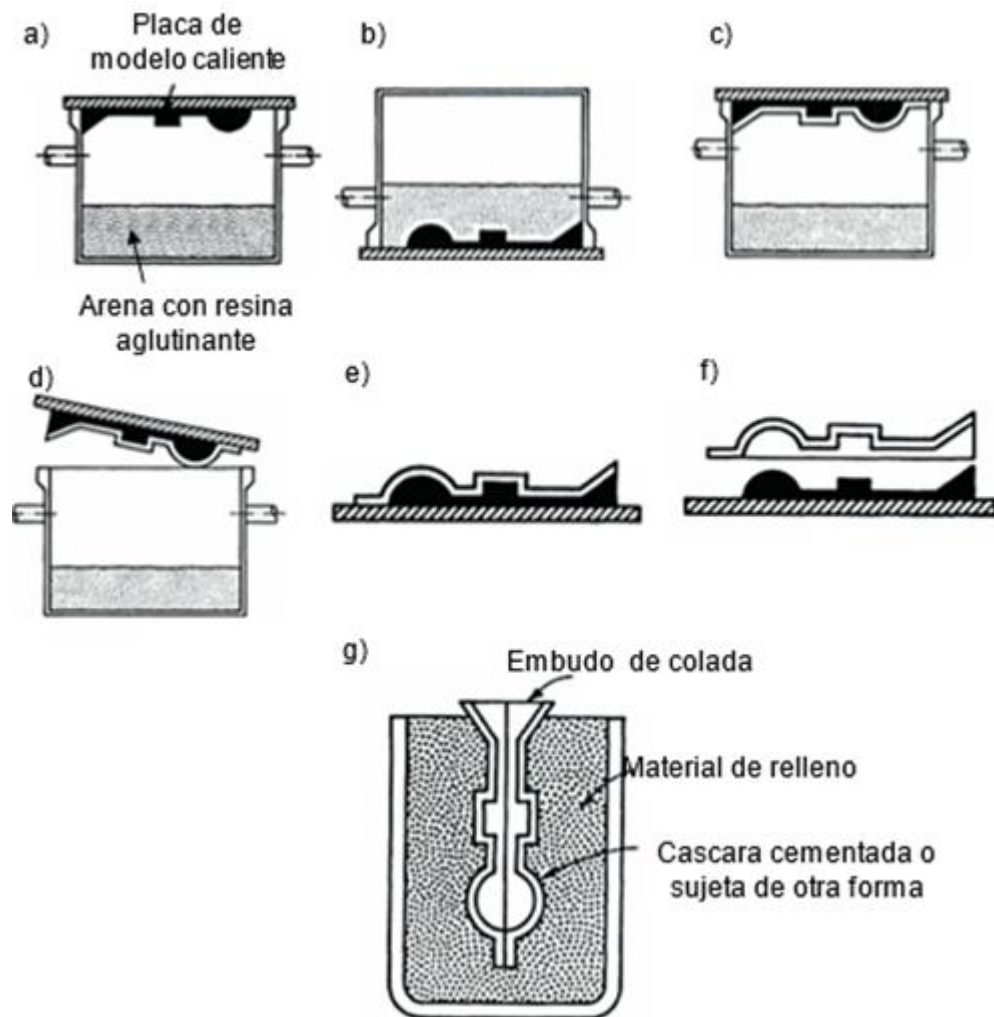


Fig. 1.1. Técnica del moldeo en cáscara.

## 1.4.2. FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

El proceso para la fundición a la cera perdida inicia con la obtención del modelo, el cual se fabrica con cera (ver, Fig. 1.2a) o con un plástico como el poliestireno, mediante moldeo o técnicas de elaboración rápida de prototipos; es decir, se pueden unir varios modelos para hacer un molde, al que entonces se le llama árbol (ver, Fig. 1.2b) lo que incrementa la capacidad de producción de piezas pequeñas [6].

Después el modelo se sumerge en una pasta de material refractario (ver, Fig. 1.2c), por ejemplo, arena sílice muy fina con aglutinantes, incluyendo agua, silicato de etilo y ácidos. Una vez que se ha secado este recubrimiento inicial, el modelo se recubre varias veces para aumentar su espesor y mejorar su resistencia (ver, Fig. 1.2d).

El molde de una pieza se seca al aire y se calienta a una temperatura entre 90 a 175 °C. Se sostiene en posición invertida durante 12 h para fundir y extraer la cera (ver, Fig. 1.2e). Después se calienta entre 650 a 1050 °C por ~4 h (dependiendo del metal a fundir) a fin de sacar el agua de cristalización (agua combinada químicamente) y quemar cualquier cera residual [6].

Este modelo recubierto se introduce en un contenedor y se recubre con una arena de moldeo para darle una mayor integridad. A continuación se puede realizar la colada del metal (Ver, Fig. 1.2f), este proceso se puede realizar mediante presión o por centrifugación para facilitar el llenado de los moldes. Por último, se rompen los moldes y se extraen las piezas (ver, Fig. 1.2g) [8].

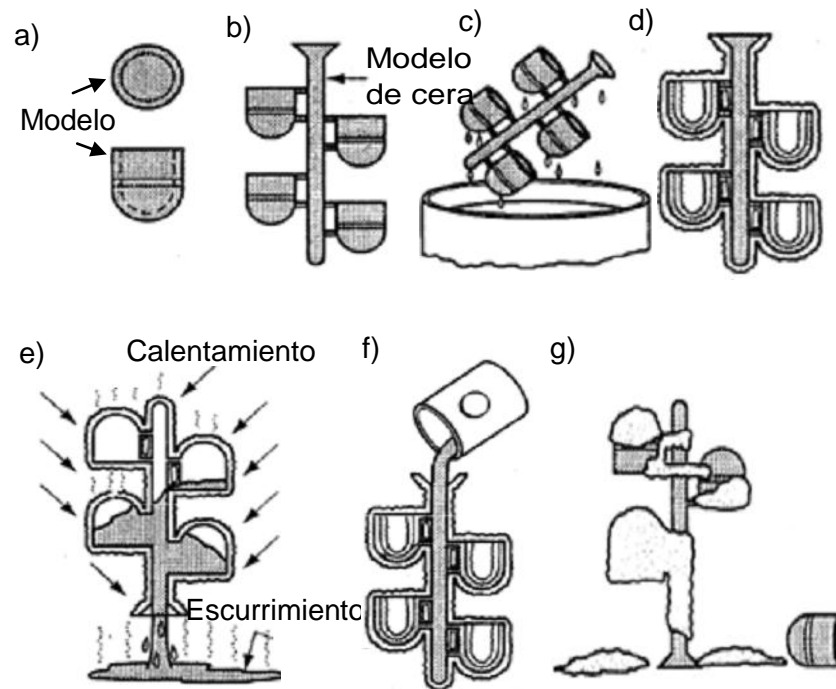


Fig. 1.2. Moldeo a la cera perdida.

### 1.4.3. MOLDES FURÁNICOS

Están fabricados con arenas secas de grano agudo, que se mezclan con ácido fosfórico el cual actúa como acelerador en el endurecimiento. Después se agrega resina furánica. El material de arena empieza a endurecerse de inmediato al aire. El ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) utilizado, es un ácido inorgánico, relativamente débil que se emplea en la industria de alimentación como conservante, emulgente, acidulante (en bebidas de cola) o como corrector de acidez, se obtiene mediante la acción del ácido sulfúrico sobre el fosfato tricálcico [6].

La resina furánica se obtiene a partir de alcohol furfúrico y polímeros fenólicos. Se caracterizan por ser polímeros basados en el núcleo de furano, unidos entre sí por grupos metilenos. Las más importantes son aquellas basadas en alcohol furfúrico en términos de uso y volumen. Estas se clasifican en resinas furánicas puras y modificadas. Debido a su resistencia térmica son

utilizadas como agentes aglomerantes en moldes para la industria de la fundición, también son utilizados como inhibidores de la corrosión para cementos, lechada, argamasa, fibra de vidrio, entre otros [6].

Entre las características de construcción de estos modelos desechables, la arena de resina furánica puede ser empleada como una pared o cáscara alrededor del modelo que estará soportado con arena de grano agudo o en verde o puede ser usada como el material completo del molde [6].

Entre las ventajas que presentan estos tipos de moldes están: al endurecer rápido el molde está listo para recibir el metal fundido, se puede utilizar varias veces, el proceso es bueno para la fabricación de moldes usando modelos y corazones desechables, se puede utilizar con la mayoría de los metales ferrosos, se puede usar para grandes y pequeñas cantidades, el molde es de alta resistencia, requiere de menos mano de obra y habilidad que en el moldeo tradicional y se obtiene un mejor control dimensional [6].

Entre las desventajas se tienen la disminución en la pérdida de tiempo en la fabricación del molde. No obstante, son de mayor costo por los aditivos, no se pueden utilizar con materiales no ferrosos y los modelos requieren de mantenimiento adicional [6].

Dentro del sistema furánico existen desde hace unos años productos de moldeo que ayudan a evitar defectos superficiales en piezas grandes. Se destacan en primer lugar el sistema furánico de bajo azufre, en el cual intervienen catalizadores que contienen solo la mitad de azufre y ácido sulfúrico que los convencionales. Este sistema reduce los defectos de fundición causados por la acumulación de azufre y humedad. Permite además reutilizar la arena más veces, reduciendo los costos de vertido de la misma [6].

#### **1.4.4. FUNDICIÓN CON MOLDES DE ARENA Y SILICATO DE SODIO, SISTEMA DE CO<sub>2</sub>**

En este tipo de moldes la arena verde se mezcla con silicato de sodio para posteriormente ser apisonada alrededor del modelo. Una vez armado el molde se inyecta bióxido de carbono a presión con lo que reacciona el silicato de sodio aumentando la dureza del molde. Con la dureza adecuada de la arena del molde se extrae el modelo, si este fuera removible, para posteriormente ser cerrado y utilizado, Los aglutinantes típicos de silicato son inodoros, no inflamables, apropiados para todos los tipos de trabajo (alta producción de moldes grandes), y aplicable a todos tipos de agregados. No producen gases nocivos en la mezcla para el moldeo [16].

La cantidad de aglutinante de silicato utilizado para machos y moldes varía de 3 a 6%, dependiendo del tipo de arena, la finura del grano y el grado de contaminantes de arena. El tipo de metal vertido y su temperatura, de su resistencia a la erosión del molde que tiene que soportar son factores adicionales a considerar, cuando la finura de arena aumenta la cantidad de aglomerante que debe ser usado para recubrir cada grano aumenta. Por lo tanto, una arena con índice de finura de 120 a 140, requiere de 1.5 a 3.0% más aglutinante de una arena con índice de finura de 55 [16].

#### **1.5. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN**

Los utensilios que se utilizan en una planta de fundición dependen de la cantidad de metal fundido o del tamaño de las piezas a fundir, en este estudio y para el fin didáctico propuesto, estos aparatos serán para fundiciones de piezas pequeñas. No obstante, para una mayor amplitud de este tema se puede consultar el Manual del fundidor, J. Duponchelle en el cual se explica también los utensilios utilizados para grandes plantas de fundición [9].



### 1.5.1. ELEMENTOS UTILIZADOS PARA FUNDIR

Entre los principales utensilios para el proceso de colada se tienen el crisol y armaduras. Las armaduras o armazones de hierro se emplean para manejar los crisoles donde se vierte el metal líquido. Para la colada de piezas pequeñas se emplea un cazo de acero embutido (ver, Fig. 1.3), de una sola pieza y que tiene una capacidad que puede contener de 13 a 25 kg de metal líquido. Cuando se ha de colar más de 50 kg de metal es preferible emplear el crisol con abrazadera (ver, Fig. 1.4). Además, se utilizan tenazas (ver, Fig. 1.5) que se emplean para tomar y sacar el crisol del horno, siendo los tipos más usadas las que tienen los brazos curvos y llevan anillos de seguridad [9].



Fig. 1.3. Crisol normal de grafito con cierta cantidad de arcilla.

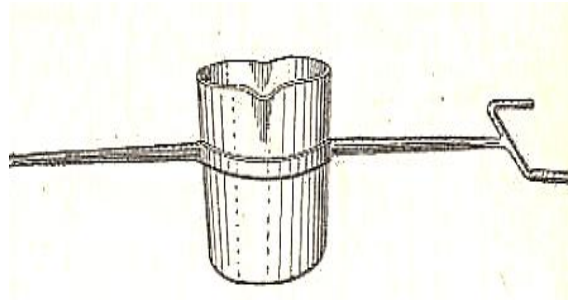


Fig. 1.4. Crisol con abrazaderas para la realización de la colada.

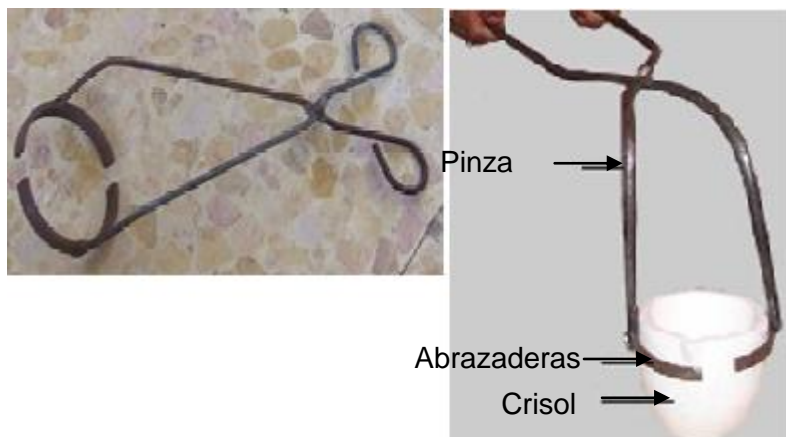


Fig. 1.5. Tenazas para la extracción del crisol.

## 1.5.2. ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MOLDE

Los bastidores son los elementos principales y necesarios, ya que se utilizan para formar las cajas (ver, Fig. 1.6). Así, las cajas pueden variar en cuanto a sus dimensiones y formas si se quisiera disponer de cajas especiales para cada una de las piezas que se pueden fabricar en un taller de fundición. Generalmente se dispone de una serie de bastidores, con los cuales se pueden formar cajas en las que se puede moldear. En los talleres de fundición de cobre se emplean bastidores de hierro de distintas dimensiones, con los cuales se puedan hacer todas las combinaciones posibles para obtener las cajas de la altura requerida para moldear las piezas que se han de fundir [9].

En la Fig. 1.6, se presentan las formas de los bastidores y los perfiles de los hierros que se emplean en su construcción y se unen entre sí por medio de pernos entre las orejas que llevan en ellos [9].

Además entre los elementos utilizados para el moldeo está [9]:

- Placas para moldear (ver, Fig. 1.7): se emplean para colocar el bastidor sobre ellas y luego voltearlo.
- Pisones: se utilizan para apisonar la arena de moldeo en la caja (ver, Fig. 1.8).
- Reglas de hierro (ver, Fig. 1.9): se emplean para aplanar la cara superior de los moldes después de haber comprimido la arena de moldeo con el pisón.
- Fuelles sin tubo (ver, Fig. 1.10): sirven para quitar el polvo y la arena de moldeo sobrante que queda en el fondo de los moldes.
- Compás de varas y de puntas (ver, Fig. 1.11): se emplean para el ajuste de los machos y los moldes.

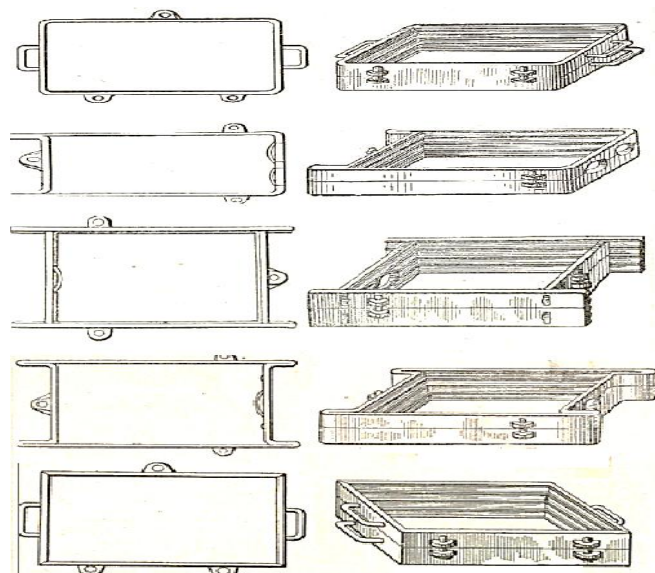


Fig. 1.6. Bastidores.

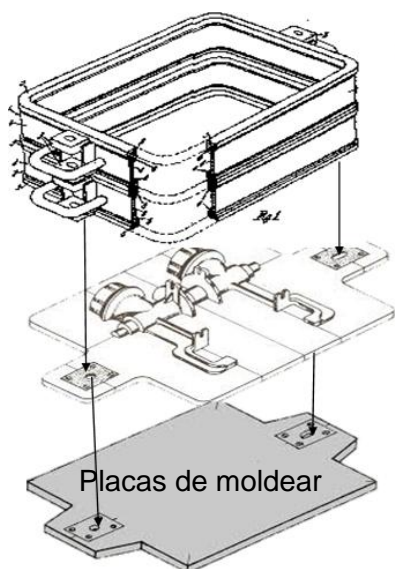


Fig. 1.7. Placas para moldear.

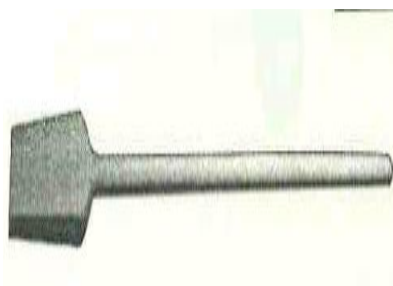


Fig. 1.8. Pisones.

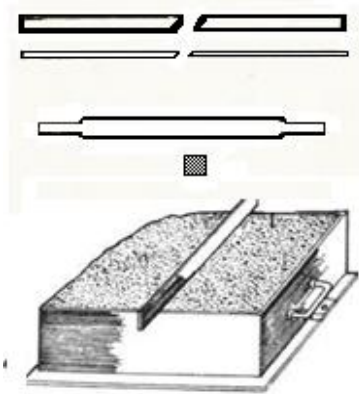


Fig. 1.9. Reglas de hierro.



Fig. 1.10. Fuelles sin tubo.



Fig. 1.11. Compases de varas y de punta.

- Reglas y niveles (ver, Figs. 1.12 y 1.13): se emplean para ajustar y nivelar los bastidores.

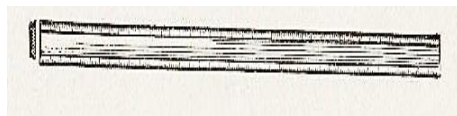


Fig. 1.12. Reglas.



Fig. 1.13. Niveles.

- Palas y picos (ver, Fig. 1.14): se utilizan para extraer y mover las arenas.

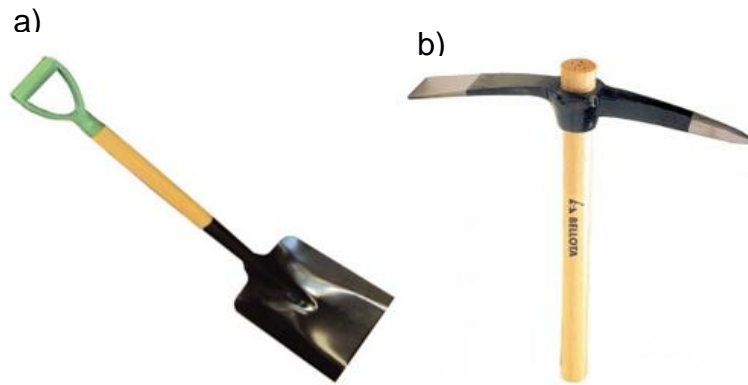


Fig. 1.14. Utensilios para remover arena: a) pala y b) pico.

- Mazos (ver, Fig. 1.15); sirven para compactar los moldes.

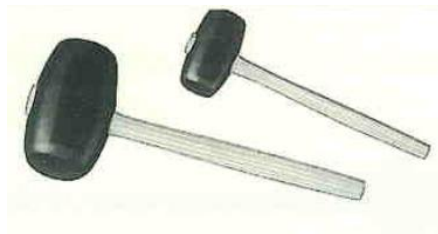


Fig. 1.15. Mazos.

- Pinceles de pluma y de mango (ver, Fig. 1.16): sirven para engrasar la cara interior de los moldes para que al ser introducido en el horno su superficie se endurezca más rápido, la solución rociada contiene aceite de linaza, agua de melaza o almidón gelatinizado.



Fig. 1.16. Tipos de pinceles: a) pincel de pluma y b) pincel de mango.



Fig. 1.17. Agujas.

- Las agujas (ver, Fig. 1.17): sirven para hacer en los moldes agujeros para el escape de gases.

- Prensas: sirven para compactar los bastidores cuando se acumulan formando una pila (ver, Fig. 1.18). Estas prensas pueden ser utilizadas para efectuar la colada por las embocaduras de planta o por la lateral del molde.

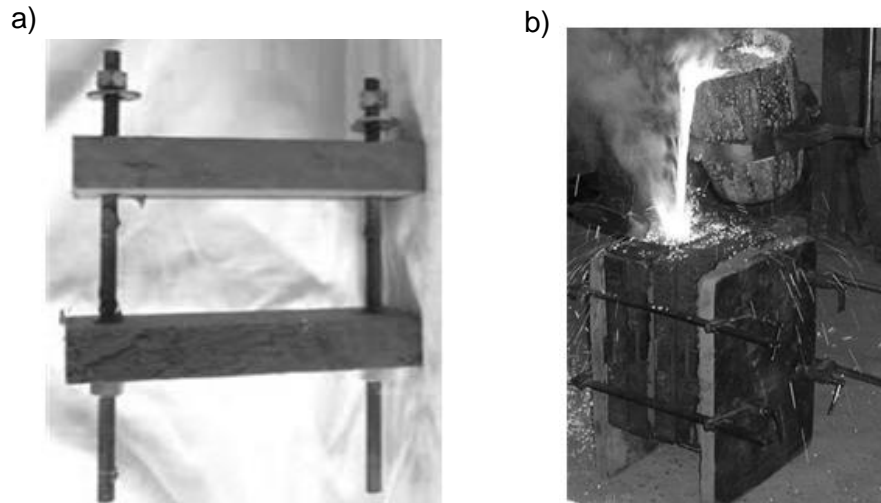


Fig. 1.18. Tipos de prensa: embocaduras a) de planta y b) laterales.

- Tubos (ver, Fig. 1.19): se utilizan en la elaboración de moldes artesanales, estos permiten generar las cavidades en la arena, que se convertirán en los bebederos del molde.
- Trompo (Fig. 1.20): se utiliza para facilitar el proceso de verter el metal fundido en la cavidad de arena, el extremo del bebedero tiene forma cónica. Para lograr esta forma el trompo se presiona en la boca de la cavidad que deja el tubo al salir de la arena.



Fig. 1.19. Tubos.



Fig. 1.20. Trompo.

- Apisonador: éste permitirá compactar la arena sobre el modelo y darle firmeza a todo el molde en general. Las formas diversas de sus extremos buscan adaptarse a las diferentes formas de los modelos (ver, Fig. 1.21).



Fig. 1.21. Apisonador.

- Espátula (ver, Fig. 1.22): se utiliza para aplanar la superficie de cada mitad del molde con el fin de garantizar un buen acople entre ellas. Ésta se utiliza después de remover el exceso de arena en una caja de moldeo mediante una regla.

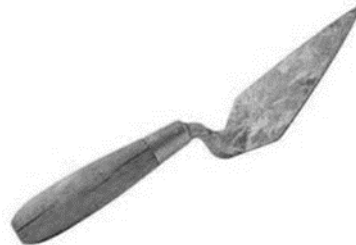


Fig. 1.22. Espátula.

### 1.5.3. ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO

Para la elaboración de los modelos es necesario contar con las herramientas necesarias para realizarlos, estas se describen a continuación:

- Torno para madera: se utilizan generalmente para realizar los modelos permanentes [9].
- Cepillos de crin: se emplean generalmente para limpiar los modelos (ver Fig. 1.23a y b), y los de cerdas metálicas se utilizan para limpiar las piezas fundidas (ver, Fig. 1.23c) [9].

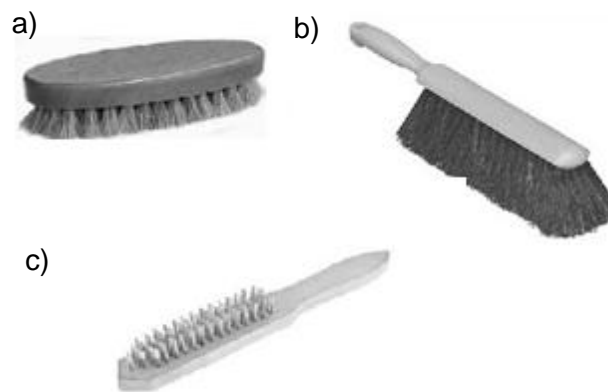


Fig. 1.23. Cepillos de crin.

## 1.6. FUNDICIÓN DE ALUMINIO EN MOLDES DE ARENA

El proceso de fundición para la fabricación de piezas en moldes de arena es muchas veces el camino más viable, el cual comprende desde el metal en bruto a la pieza terminada y cumple, en muchos casos, las principales exigencias sobre el diseño de los elementos de construcción de todo tipo, ya que las piezas moldeadas por fundición se construyen con altos estándares de calidad, son prácticas y estéticamente aceptables. Así, se tiene la posibilidad de disponer de materiales auxiliares para la elaboración de moldes, hacen posible una fabricación óptima, tanto tecnológica como económica, de piezas pequeñas hasta las de gran tamaño con masas comprendidas entre pocos gramos hasta las de varias toneladas, sean piezas sueltas o en forma de pequeñas o grandes series. Al haber estudiado el sistema de colada y solidificación, a la vez de una gran diversidad de materiales para colada, con características muy específicas desde un punto de vista mecánico, físico, químico y tecnológico, se concluye que es posible la fabricación de elementos de construcción fundidos para casi todos los campos de aplicación [10].



Conforme se ha desarrollado trabajos de fundición y colada se han obtenido límites técnicos y económicos para los distintos tipos de moldes, tal como se presenta en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Límites técnicos y económicos para el uso de los procedimientos principales de colada [10].

Procedimiento de colada	Fundición en arena	Fundición en metal	Fundición inyectada
Masa posible de la pieza	Desde 1000 kg y mas	50 kg máximo	Hasta 50 kg
Tamaño posible de la pieza	Grande	Medio	Medio
Idoneidad para colada de paredes delgadas	Inadecuada	Buena	Muy buena
Idoneidad para pequeñas tolerancias en cotas	Inadecuada	Buena	Muy buena
Idoneidad para colada con densidad regular	Satisfactorio	Muy buena	Satisfactoria
Plazo de entrega de la pieza según la construcción	Corto	Intermedio	Plazos largos
Costos de modelo, moldeo y utillaje	Bajos	Medio	Altos
Aplicación económica	Fabricación unitaria	Fabricación en serie	Fabricación de grandes series
Costos de fabricación por piezas	Altos	Medios	Bajos

Por consiguiente, los costos de fabricación por fundición en moldes de arena de piezas de aluminio y sus aleaciones en pequeñas cantidades son altos, no obstante, dado que entre los objetivos de este trabajo de graduación es obtener piezas de una aleación de aluminio, se eligió fundir piezas recicladas de los marcos de ventanas tipos solaires. Las cuales según la Aluminium Association Incorporated estos son marcos de aleaciones de aluminio de la serie 6000 la cual es una aleación aluminio-manganeso-silicio con las siguientes características: buena resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad y buena soldabilidad. Así, en la Tabla 1.2 se presentan las dos aleaciones más utilizadas de esta serie las cuales son la AA6061 y la AA6063.

Tabla 1.2. Composición química de las aleaciones de aluminio, en % en peso.

Elementos	AA6061	AA6063
Silicio	0.4 a 0.8	0.2 a 0.6
Hierro	0.70	0.35
Cobre	0.15 a 0.4	0.10
Manganeso	0.15	0.10
Magnesio	0.80 a 1.2	0.45 a 0.9
Cromo	0.25	0.10
Zinc	0.15	0.10
Titanio	0.15	0.10
Otros	0.15	0.15
Aluminio	Balance	Balance

## 1.7. DISEÑO DE MOLDES Y MODELOS PARA FUNDICIONES

En general, todos los procesos de fundición comparten ciertas características en común, como los cambios de estado de líquido a sólido y de fases en estado sólido y las contracciones térmicas durante el ciclo de enfriamiento. Por consiguiente, muchas de las características descritas en este apartado son aplicables por igual para el diseño de fundición en moldes de arena y a presión, aunque es de considerar que cada proceso de fundición presenta sus propios criterios de diseño [14].

Las consideraciones planteadas en ese apartado no representan una lista exhaustiva para combatir los problemas y defectos que presentan las fundiciones. En la mayoría de los casos, cierto diseño de molde produce un gran porcentaje de partes con las características deseadas y algunas defectuosas. Es muy difícil que en un molde no se produzcan partes defectuosas, por estas razones, se deben establecer procedimientos de control de calidad para partes críticas de los mismos [14].

### 1.7.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Por lo general el proceso de fundición involucra los siguientes pasos [14]:

a) Diseñar la pieza de manera que pueda fundirse con facilidad;

- b) Seleccionar un proceso de fundición, tamaño y un material apropiado para el modelo;
- c) Localizar la línea de partición del molde en la pieza;
- d) Localizar y diseñar las compuertas que permitan la alimentación uniforme de la cavidad del molde con el metal fundido;
- e) Seleccionar una geometría apropiada del canal de alimentación para el sistema, y;
- f) Localizar las características del molde, como filtros y mazarotas.

En general para realizar el proceso de fundición se puede seguir el diagrama mostrado en la Fig. 1.24, en el cual se presentan las diferentes etapas de diseño y fabricación de piezas [14].

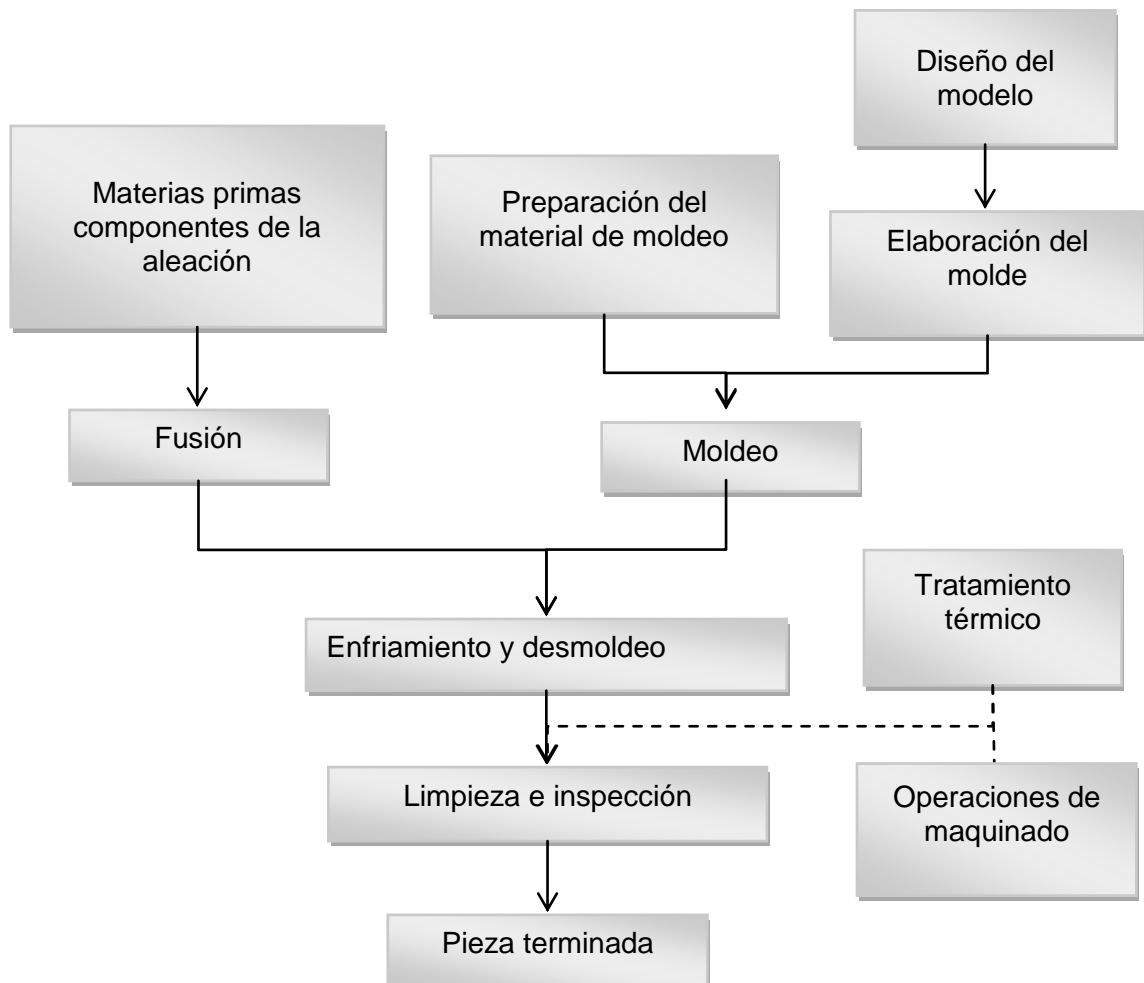


Fig. 1.24. Etapas principales del proceso de fundición [14].

## 1.7.2. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE LAS PIEZAS FUNDIDAS

Un buen diseño de las partes del modelo y molde garantiza un eficiente llenado del mismo en el proceso de colada, para esto se debe considerar ciertos criterios en cuanto al diseño de la pieza y así evitar defectos, dichas recomendaciones se observan a continuación:

- **Cambios de sección y esquinas.** Estos actúan como concentradores de esfuerzos que hacen que el metal se agriete cuando se produce su solidificación, por tal razón se deben evitar los mismos, o adecuar el diseño para evitar los defectos en la pieza terminada, si se debe hacer un cambio de sección en el cual no es posible realizarlo de forma gradual como se presenta en la Fig. 1.25a se puede realizar mediante la adecuada selección de radios de los filetes, con esto se puede asegurar que no se generen esfuerzos y garantizar un flujo continuo del metal líquido durante el vaciado [14].

Por lo general, los radios de los filetes van desde 3 a 25 mm (1/8 a 1 pulg), aunque se pueden permitir radios menores en fundiciones. Si los radios de los filetes son demasiados grandes, el volumen del material en esas regiones también es grande y por lo tanto la velocidad de enfriamiento es inferior a las de menor volumen [14].

Otra recomendación es mantener espesores uniformes, tal como se presenta en la Fig. 1.25c, ya que cuando no son uniformes en las zonas de mayor espesor (zonas calientes) se desarrollan cavidades por contracción del material a causa de las bajas velocidades de enfriamiento, por lo que si no es de suma importancia se puede adecuar el diseño reduciendo el espesor en esas zonas, de forma tal que resulte un espesor lo más uniforme posible [14].

- **Áreas planas.** Es común que el acabado de las superficies planas después del proceso de fundición sea deficiente o no muy uniforme debido a que el flujo del metal no es uniforme y debe recorrer una gran extensión del molde, otro defecto común es que en áreas planas se pueden presentar

distorsiones causadas por el gradiente de temperatura en el enfriamiento.

Así, para evitar estos defectos se recomienda dividir las superficies planas [14].

- **Contracciones.** El molde y el modelo deben permitir la contracción del metal cuando este se enfría para evitar el agrietamiento, así en el diseño se proponen costillas para aliviar los esfuerzos de tracción, también es aconsejable disponerlos de tal forma que estos no se intercepten. Así, es aconsejable disponerlos de forma alternada, tal como se presenta en el Fig. 1.25d [14].
- **Machos o corazones.** El uso de los machos nos ayuda a generar piezas que tienen orificios o partes internas huecas, además, permiten que no existan zonas de calor, (ver, Fig. 1.25e), las grietas comúnmente se presentan en zonas en donde el metal líquido no fluye con uniformidad, esto es perjudicial en el proceso de solidificación ya que se generan grietas por contracciones, (ver, Fig. 1.25c). En la Fig. 1.26c-e se presentan las regiones con más probabilidades de apareamiento de grietas a causa de la contracción del metal [14].

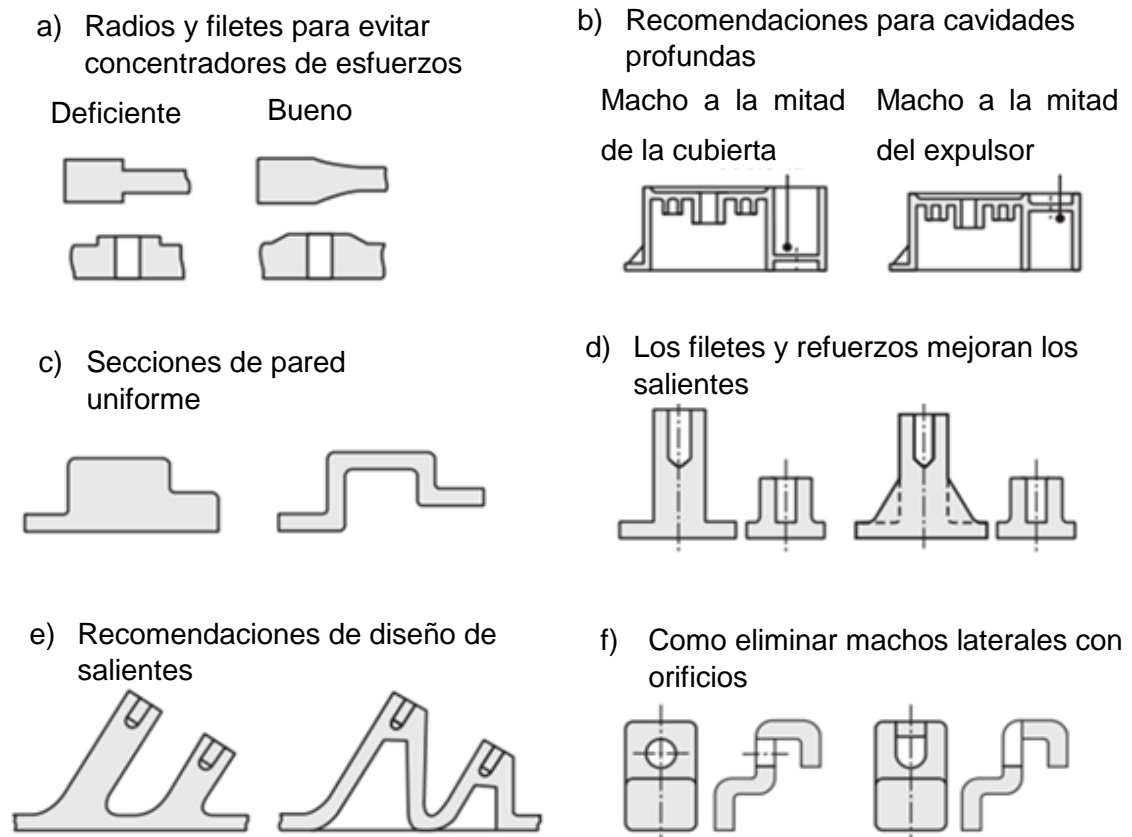


Fig. 1.25. Modificaciones de diseño sugeridas para evitar defectos en las fundiciones.

- **Ángulo de salida.** Para una fácil extracción del modelo, en la fabricación de los moldes de arena usualmente se diseña una pequeña conicidad o ángulo de extracción a los modelos que permite que su extracción no dañe el molde, tal como se presenta en la Fig. 1.27. Estos ángulos de salida que se le confieren a los modelos son pequeños (ver, Tabla 1.3), lo cuales suelen ser de 5 a 15 mm/m (1/16 a 3/16 in/pie). Además, dependiendo de la calidad del modelo, es común que los ángulos de salida sean de 0.5 a 2°. Los ángulos en superficies internas son por lo general dos veces esta medida; es decir, tienen que ser mayores a los de las superficies exteriores porque la fundición se contrae hacia el núcleo [14].

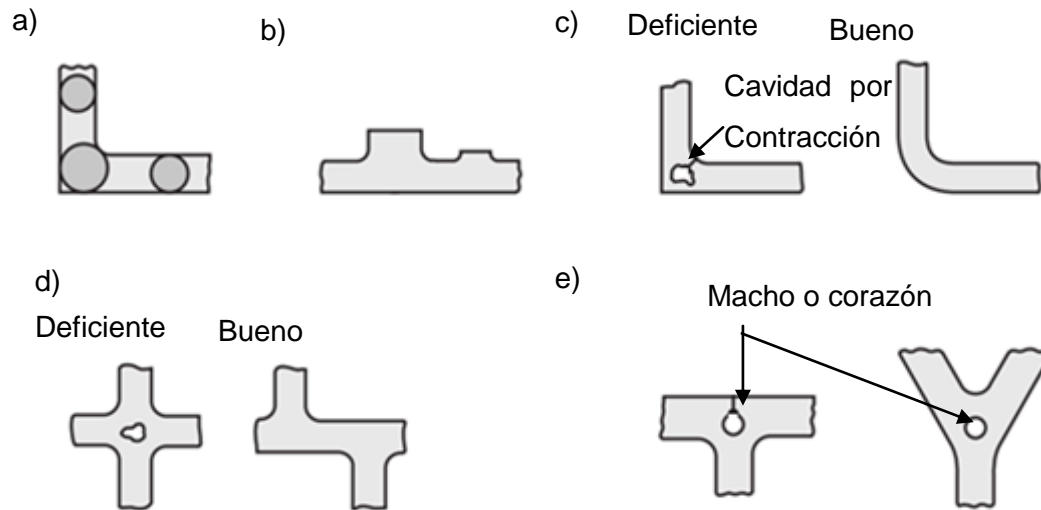


Fig. 1.26. Ejemplos de diseño de secciones transversales en fundiciones.

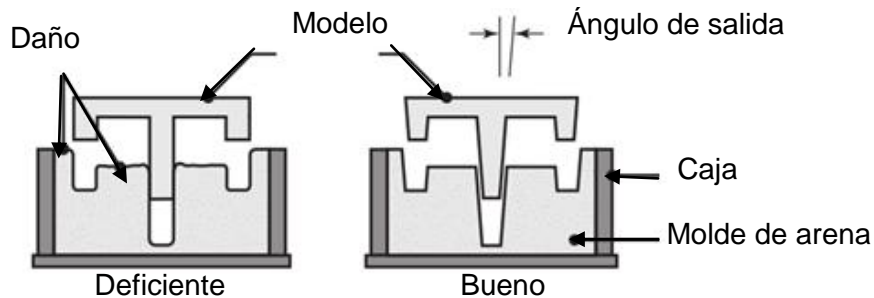


Fig. 1.27. Ángulos de salida para modelos que facilitan su extracción del molde.

- **Tolerancias dimensionales.** Se definen según la fundición en particular, el tipo de molde, modelo utilizado, tolerancias y acabados finales. Así, en la Tabla 1.4 se dan algunos valores de contracción volumétrica por solidificación metálica, para aplicarlos a las dimensiones del modelo, en función del metal en que será vaciada la pieza [14].

En la práctica es común utilizar como margen de tolerancia dimensional el intervalo de  $\pm 0.8$  mm ( $\pm 1/32$  pulg) para fundiciones de pequeño tamaño, y para fundiciones mayores se pueden tener valores hasta de  $\pm 6$  mm ( $\pm 1/4$  pulg) [14].

Tabla 1.3. Ángulos de salidas para la extracción de modelos.

Altura del modelo, mm	Ángulos de salidas y pendientes
De 1 a 10	3°
11 a 20	2°
21 a 35	1°
36 a 65	0.75°
66 a 150	0.50°
151 a 250	1.5 mm
251 a 400	2.5 mm
401 a 600	3.5 mm
601 a 800	4.5 mm
801 a 1000	5.5 mm

Tabla 1.4. Valores de contracción metálica para fundiciones.

Metal	% de contracción
Fundición gris	0.5 a 1.2
Fundición blanca	1.2 a 2.0
Acero moldeado	1.5 a 2.0
Bronce de estaño	0.8 a 2.0
Bronce rojo	0.8 a 1.6
Latón	0.8 a 1.8
Aleaciones de zinc	1.0 a 1.5
Aluminio	0.5 a 1.0
Aleaciones de aluminio	1.0 a 2.3

- **Operaciones de acabado.** En ciertas ocasiones, una vez terminada la pieza es necesario realizarle una serie de procesos de maquinado para llevarla a las medidas requeridas. Es por eso que al diseñar el modelo y el molde se consideran las operaciones posteriores para facilitar la manipulación; por ejemplo: si se necesita realizar una perforación en la fundición, se recomienda que se haga de preferencia en una superficie plana y no en una curva, para evitar que la perforación se desvíe, un diseño ideal sería que en el molde se incluya una pequeña hendidura que se utilice de referencia o guía para la operación de perforado [14].



### **1.7.3. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA MOLDES DE FUNDICIÓN**

Los parámetros a considerar en el diseño de un molde en arena son: el sistema de alimentación (el bebedero con su copa y base), canales de alimentación y las mazarotas [14].

Además, de estos parámetros es de tener en consideración ciertos datos que facilitan el análisis como el tiempo de llenado y el tiempo de enfriamiento del metal fundido [14].

#### **➤ LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA DE PARTICIÓN DEL MOLDE**

Es aquella línea o plano que separa las mitades superior e inferior de los moldes, es deseable que esta quede a lo largo de un plano único, en lugar de seguir un contorno para evitar el arrastre de arena al retirar la pieza solidificada, otros problemas relacionados a la ubicación de la línea de partición es que debe posicionarse de manera que facilite el flujo de material ya que si se coloca de manera equivocada, podría haber la dificultad de que al verter el metal fundido este tome mayor velocidad y pueda minar la arena en su fondo; también reduce en lo posible los defectos de forjado. La colocación de la línea de partición del molde es importante debido a que esta influye en gran medida en el diseño, elementos de soportes, forma del molde y ángulos de salidas del modelo, en el proceso de moldeo y el sistema de compuertas a utilizar [14].

Se recomienda que para fundiciones de aluminio y sus aleaciones, la línea de partición se coloque por debajo de la mitad del modelo, minimizando la altura de la parte más crítica de la pieza, esto se recomienda porque en la fundición de aluminio el hidrógeno es soluble con el metal líquido generando una gran cantidad de burbujas que ascienden a la parte superior de la pieza para luego solidificar [14].

Al diseñar el modelo y el molde no se debe permitir que el metal fluya verticalmente, en especial cuando no está restringido por un bebedero. La

colocación de la línea de partición tiene un gran efecto en el resto del diseño del molde [14].

### ➤ **Diseño de Compuertas**

Las compuertas son conexiones entre los canales de alimentación y las partes a fundir (ver, Fig. 1.28), algunas consideraciones en el diseño de compuertas son [14]:

- Para piezas grandes es aconsejable que se utilicen varias compuertas, con esto se logra un flujo continuo de metal fundido y permite que la temperatura de vaciado se controle y sea lo más baja posible, reduciendo el gradiente de temperatura por consiguiente los defectos causados por la contracción del material en su solidificación [14].
- Las compuertas deben ubicarse en las secciones gruesas de la pieza, ya que esto facilitará la alimentación del material fundido [14].
- Se debe utilizar un filete en las partes donde la compuerta topa con la fundición, esta característica produce menos turbulencia que las uniones abruptas [14].
- La compuerta más cercana al bebedero debe colocarse a una distancia suficiente, de manera que se pueda retirar con facilidad [14].
- La longitud mínima de la compuerta entendida como la separación entre la cavidad de la pieza y el elemento del sistema de alimentación, debe ser de tres a cinco veces su diámetro calculado para la base del bebedero, esto según el metal que se esté fundiendo. La sección transversal tiene que ser suficientemente grande para permitir el llenado de la cavidad del molde y más pequeña que la sección transversal del canal de alimentación [14].
- Se deben evitar las compuertas curvas, pero cuando sean necesarias, se tiene que localizar una sección recta en la compuerta más próxima a la fundición. [14].

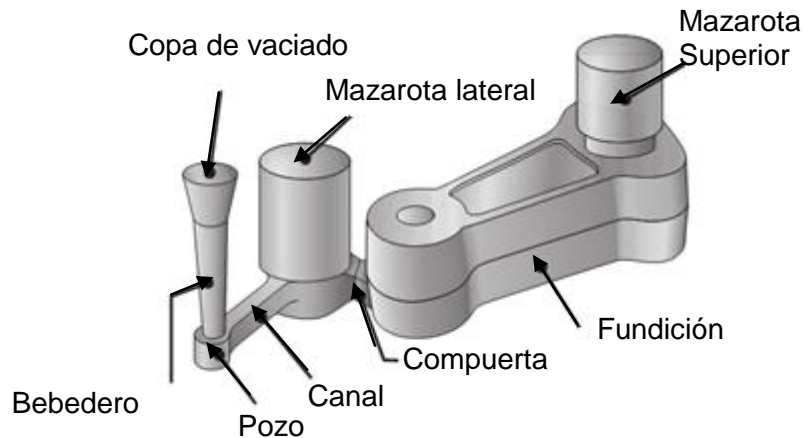


Fig. 1.28. Esquema de una fundición y sus partes principales.

### ➤ ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL FLUJO DEL METAL FUNDIDO

El canal de alimentación es una vía de distribución horizontal que acepta metal fundido del bebedero y lo conduce a las compuertas.

Existen dos principios fundamentales en el diseño de los canales de alimentación los cuales son el teorema de Bernoulli y la ley de continuidad de la masa.

### ➤ TEOREMA DE BERNOULLI

Se basa en el principio de la conservación de la energía y relaciona la presión, velocidad, elevación del fluido a cualquier punto del sistema y las pérdidas por fricción en un sistema lleno de líquido, Ec. 1.1 [14]:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{Constante} \quad (1.1)$$

donde  $h$  es la elevación por encima de cierto plano de referencia,  $p$  la presión a esa elevación,  $v$  es la velocidad del líquido a esa elevación,  $\rho$  la densidad del fluido (suponiendo que es incompresible) y  $g$  es la constante gravitacional.

La conservación de la energía obliga a que, en una ubicación particular en el sistema, se cumpla la siguiente relación: Ec. 1.2 [14]:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f. \quad (1.2)$$

Los subíndices 1 y 2 representan dos elevaciones diferentes. En la Ec. 1.2, las pérdidas incluyen factores como la pérdida de energía en las interfaces líquido-pared del molde y la turbulencia en el líquido [14].

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción y se supone que el sistema permanece a presión atmosférica, Ec. 1.3 [14]:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (1.3)$$

Este teorema se utiliza para determinar la velocidad del metal en estado líquido en la base del bebedero. Se define el punto 1 como la parte superior del bebedero y el punto 2 como la base. Si el punto 2 se usa como el plano de referencia, entonces la altura piezométrica en éste es igual a cero ( $h_2 = 0$ ) y  $h_1$  es la altura de la entrada. Cuando el metal se vierte en el embudo y fluye por el bebedero, su velocidad inicial en la parte superior es cero ( $v_1 = 0$ ). Así, la ecuación anterior se simplifica aún más y queda como la Ec. 1.4 [14]:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}. \quad (1.4)$$

Para determinar la velocidad del flujo de metal líquido se despeja  $v_2$  de la Ec. 1.4 y obtiene la expresión para la velocidad, Ec. 1.5 [14]:

$$v_2 = \sqrt{2 g h_1}. \quad (1.5)$$

## ➤ LEY DE LA CONTINUIDAD DE MASA

La ley establece que para líquidos incompresibles y en un sistema con paredes impermeables, la velocidad de flujo es constante, tal como se ve en la Ec. 1.6 [14]:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.6)$$

donde: Q es el gasto volumétrico; A, el área de la sección transversal de la corriente del líquido y v la velocidad promedio del líquido en dicha sección. Los subíndices 1 y 2 se refieren a dos puntos diferentes en el sistema.

Así, de acuerdo con esta ley, el gasto debe mantenerse en cualquier parte del sistema. La permeabilidad de las paredes es importante, porque de lo contrario parte del líquido pasaría a través de las paredes (como ocurre en los moldes de arena). Por ello, el gasto disminuye conforme el líquido se mueve a través del sistema. Por lo cual, con frecuencia se utilizan recubrimientos para inhibir dicho comportamiento en los moldes de arena [14].

### 1.7.4. DISEÑO DEL BEBEDERO

El bebedero es la parte ligeramente cónica que conecta la copa o cono de alimentación con los canales que conducen el metal líquido hacia la cavidad del molde. Para el diseño del bebedero se puede utilizar la Ec. 1.7, que relaciona la altura (h) y la sección o área transversal (A) del mismo [14]:

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (1.7)$$

donde: el subíndice 1 indica la parte superior del bebedero y el subíndice 2, el fondo. Así, la altura del bebedero se determina con la Ec. 1.8, considerando que no existen pérdidas por fricción [14].

$$h = \frac{2H \cdot C - P^2}{2C} = H - \frac{P^2}{2C} \quad (1.8)$$

donde:  $h$ , es la altura del bebedero;  $C$ , la altura total de la cavidad a reproducir;  $P$ , es la distancia o altura de la cavidad respecto del canal de alimentación. El valor de  $H$  se toma como una distancia promedio debido a las contrapresiones que puede generar el metal líquido al momento de realizar la colada, si la cavidad del molde tiene elementos por arriba del nivel del canal de alimentación.

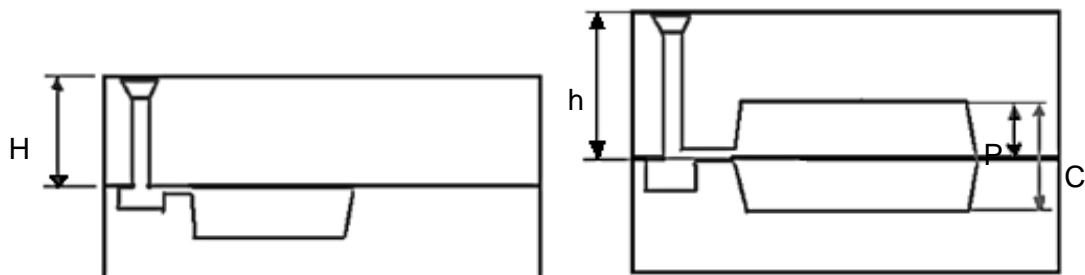


Fig. 1.29. Bebedero, posición referida a la línea de partición con respecto a la altura de la pieza.

Determinada la velocidad y la altura del bebedero, Ec. 1.5 y Ec. 1.8 respectivamente, se deben tener en consideración los factores que pueden provocar problemas durante el vertido del metal líquido en el molde, los cuales son [14]:

- La velocidad de vertido, es la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde. Si la tasa es baja, el metal se enfriará y solidificará antes de llenar la cavidad. Si la tasa de vertido es excesiva, la turbulencia se vuelve un problema serio [14].
- La turbulencia, la cual en el flujo de un fluido se caracteriza por variaciones erráticas en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido. La

turbulencia tiende a acelerar la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados durante la solidificación lo que degrada la calidad del molde, otro problema que se le puede atribuir a la turbulencia es la *erosión* del molde debido al impacto del flujo de metal derretido con las paredes del molde [14].

En la Ec. 1.7 se indica que el bebedero debe ser cónico. Conforme el metal se acelera durante su descenso por la abertura del bebedero, el área de la sección transversal del canal debe reducirse, mientras la velocidad del metal aumenta en su camino hacia la base del bebedero, el líquido podría aspirar aire y llevarlo a la cavidad del molde. Para impedir esta condición, el bebedero se diseña con una conicidad, de modo que el gasto volumétrico siempre sea el mismo en la parte superior e inferior del mismo [14].

Además, el flujo líquido se puede caracterizar midiendo el Número de Reynolds, mediante la Ec. 1.9 [14]:

$$N_R = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (1.9)$$

donde  $N_R$  es el Número de Reynolds;  $v$ , la velocidad del líquido;  $d$ , el diámetro del canal de alimentación;  $\rho$ , la densidad del metal líquido y  $\mu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

La importancia de este parámetro es que indica el tipo de flujo, tal como se presenta en la Fig. 1.30 y Tabla 1.5 [14].

Tabla 1.5. Número de Reynolds.

$N_R$	Tipo de flujo
<2000	Laminar
2000 a 20000	Turbulento
>20000	Turbulento severo

Si el Número de Reynolds se encuentra entre 2,000 y 20,000 significa que en el canal se generará algo de turbulencia, este tipo de turbulencia es común en los sistemas de alimentación para las fundiciones y ocasiona que el

aire quede atrapado, generando también cámaras en donde las impurezas se acumulan obstruyendo el paso libre del metal fundido [14].

Al inicio se presentaron recomendaciones referentes a los cambios bruscos de secciones, este es un problema que muchas veces se pasa por alto y que al no tener la idea del comportamiento del metal líquido en los canales de distribución generará problemas cuando se vierte el metal fundido, como un ejemplo el cambio de sección en la Fig. 1.31, ocasiona que el flujo del metal líquido no sea uniforme debido a las zonas con baja presión [14].

Para los canales de alimentación es importante considerar los cambios de direcciones del flujo, tal como se presenta en la Fig. 1.33. Además, se puede concluir que para los canales de alimentación, cuanto menor sea el cambio brusco de dirección del flujo la presión generada en esa sección será menor, evitando así aspiraciones de aire que viajen con el metal líquido y burbujas de aire atrapadas en esa sección [14].

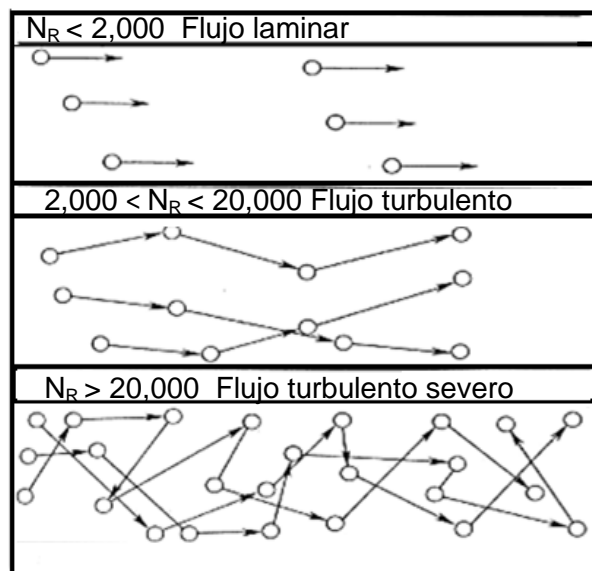


Fig. 1.30. Tipos de flujos según el NR.



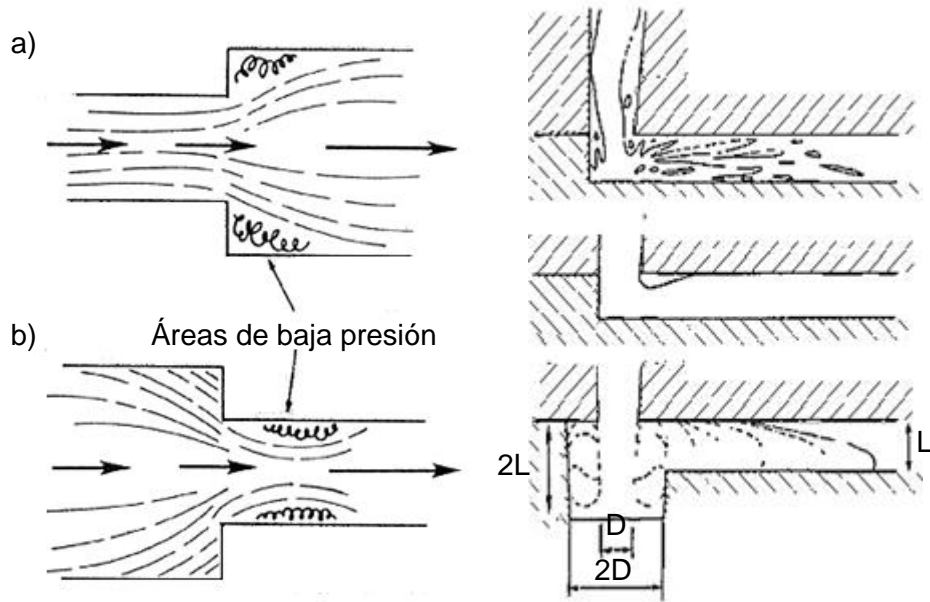


Fig. 1.31. Cambios de sección y efecto en la generación de zonas de bajas presiones.

Fig. 1.32. Diseño de la base del bebedero para evitar turbulencias.

También, al inicio del capítulo se presentó la recomendación de evitar en el diseño que el fluido pase por canales que realizan cambios de dirección en ángulos cerrados, en el caso del bebedero debido a su configuración este presenta un canal vertical y luego la dirección del fluido pasa a un canal de distribución horizontal, en este cambio de dirección se provocan turbulencias que pueden causar problemas para un óptimo flujo del metal líquido. Así, para solventar este problema se propone comúnmente la configuración del bebedero siguiente, Fig. 1.32, que adiciona una base que elimina este problema [14].

Una consideración para el diseño de los componentes del sistema de alimentación como los canales, es que en las partes simples se utiliza un canal, pero las fundiciones más complejas requieren sistemas de dos canales o más (ver, Fig. 1.33).

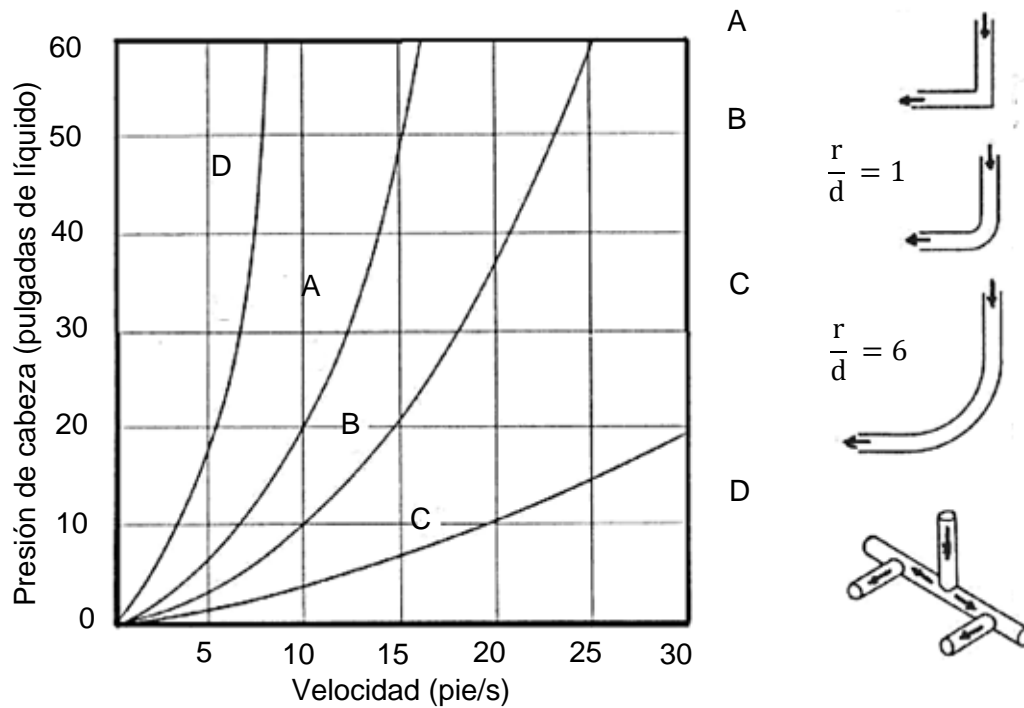


Fig. 1.33. Efecto de la presión causada por los cambios bruscos de dirección del fluido.

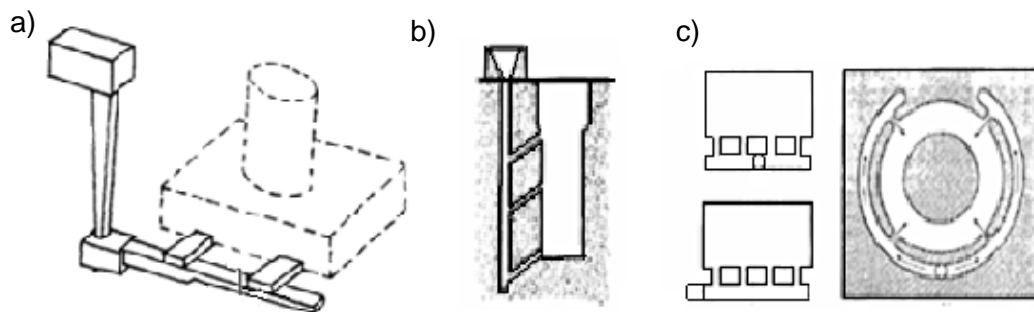


Fig. 1.34. Disposición de los canales de distribución: a) Horizontal, b) Escalonado y c) Horizontal con múltiples canales de alimentación (vista en planta).

Los canales de alimentación se utilizan para atrapar escoria (mezcla de óxido y metal que se forma en la superficie de los metales) y evitar que se introduzca en las compuertas y en la cavidad del molde. Es común colocar trampas para escoria al final de los canales, éstos se proyectan arriba de las compuertas para garantizar que el metal en las mismas se extraiga de la parte inferior de la superficie [14].

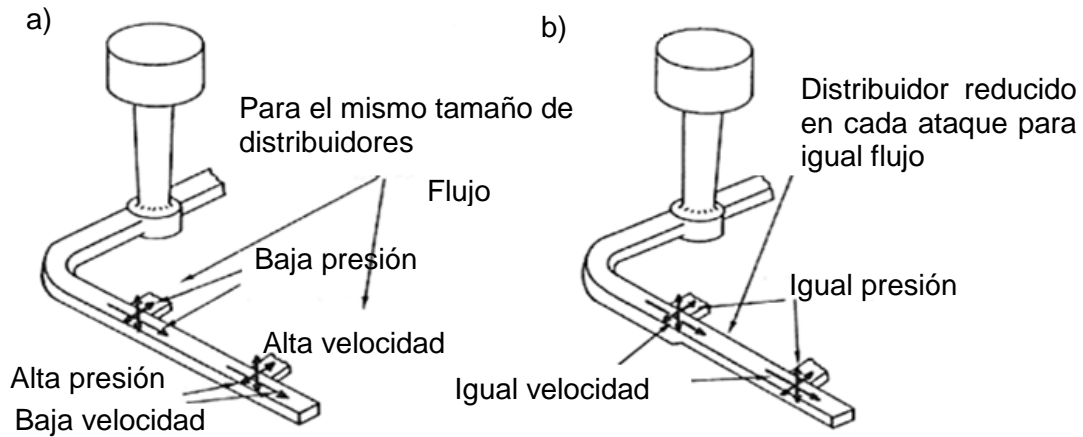


Fig. 1.35. Sistema de canales de alimentación: a) Sin regulación de velocidad ni presión de llenado y b) Con regulación de velocidad y presión del metal líquido.

Un sistema de alimentación consta de una o más vías de alimentación para la cavidad del molde, considerando este hecho y que el metal a su paso por las vías de acceso va perdiendo energía cinética debido a la fricción del metal contra las paredes del molde se debe diseñar los canales para que cada punto en donde ingrese el metal fundido presente la misma velocidad y presión que los demás puntos de llenado, para realizar esto se pueden ocupar las ecuaciones antes descritas para diseñar el canal de alimentación [14].

### ➤ TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE

Si se supone que el canal que va de la base del bebedero a la cavidad del molde es horizontal (y por lo tanto la altura piezométrica  $h$  es la misma que en la base del bebedero), entonces el gasto volumétrico a través del paso hacia la cavidad del molde permanece igual a  $vA$  en la base. Por lo tanto, para determinar el tiempo requerido para llenar la cavidad del molde se utiliza la Ec. 1.10 [14]:

$$T = \frac{V}{Q} \quad (1.10)$$

donde T es el tiempo de llenado del molde; V, el volumen de la cavidad del molde; y Q el gasto volumétrico.

Se tiene que notar que la Ec. 1.10 no se incluye las pérdidas por fricción y por obstrucciones en los canales de alimentación, por eso el resultado obtenido representa el tiempo mínimo para el llenado del molde en condiciones óptimas, por lo que el tiempo real será mayor que el obtenido mediante esta ecuación [14].

➤ **MÉTODO DE CÁLCULO DEL TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE**

Otra forma para hacer el cálculo del tiempo de llenado del molde es considerando la masa total que será vaciada al interior de la cavidad del molde y de los espesores de la pieza a reproducir, el cálculo se puede hacer mediante la Ec. 1.11 [14]:

Para una pieza con una masa de hasta de 450 kg con paredes de 2.5 a 15 mm [14].

$$t = s \sqrt{M} \quad (1.11)$$

donde: t, es el tiempo de duración de la colada; s, el coeficiente que relaciona el espesor de las paredes de la pieza y M, la masa de la pieza y de la mazarota.

El coeficiente “s” oscila entre diferentes valores dependiendo de los espesores de las paredes de la pieza (ver, Tabla 1.6) [14]:

Tabla 1.6. Valores del Coeficiente, s.

Espesores de pared de pieza, mm	s
2.5 a 3.5	1.68
3.5 a 8.0	1.85
8.0 a 15	2.20

### ➤ **TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN MEDIANTE LA REGLA DE CHVORINOV**

El tiempo total de solidificación ( $T_{TS}$ ) es el que se requiere para que el material fundido solidifique después del vertido. Este tiempo depende del tamaño y forma de la pieza a fundir, en una relación empírica conocida como regla de Chvorinov, se establece como sigue [14]:

$$T_{TS} = C_m \left( \frac{V_p}{A_s} \right)^n \quad (1.12)$$

donde  $T_{TS}$  es el tiempo total de solidificación;  $V_p$ , el volumen de la pieza a fundir;  $A_s$ , el área de la superficie de la pieza y  $n$  es un exponente que por lo general se usa el valor de 2.

El valor de  $C_m$  depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, incluido el material del molde (por ejemplo, calor específico, conductividad térmica), propiedades térmicas del metal que se funde (por ejemplo, calor de fusión, calor específico, conductividad térmica) y la temperatura de vertido respecto a la de fusión del metal [14].

### **1.7.5. DISEÑO DE LA MAZAROTA**

La contracción que los metales experimentan en el proceso de enfriamiento y solidificación debe compensarse para evitar problemas de escaso llenado del molde, solidificación de la entrada de alimentación, obstrucciones por rechupes, entre otros. Para esto se emplean depósitos que se colocan en los sistemas de alimentación del metal fundido, a estos elementos se les conoce comúnmente como mazarotas [14].

La mazarota es un almacenamiento en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción durante la solidificación. La mazarota debe estar diseñada para que se solidifique después que la pieza a obtener [14].

Las mazarotas pueden ser abiertas o cerradas (Figs. 1.36 y 1.37). Las mazarotas abiertas están descubiertas a la superficie (atmósfera) y su forma de alimentación es directa, lo que representa una desventaja ya que esto ocasiona que el enfriamiento en la mazarota sea más rápido y esto es lo que se quiere evitar. En lo que respecta a las mazarotas cerradas no tienen salida a la atmósfera y al contrario a las mazarotas abiertas, estas tienen una velocidad de enfriamiento menor lo cual es beneficioso para el proceso de colado [14].

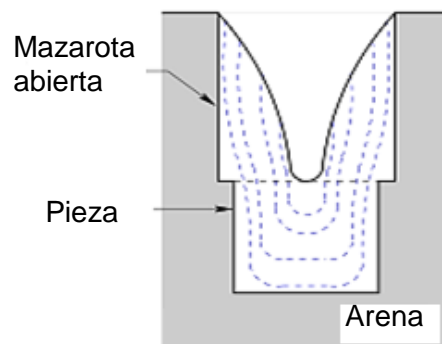


Fig. 1.36. Mazarota cilíndrica abierta, en la sección más ancha se observa el rechupe causado por la contracción del metal después de la solidificación.

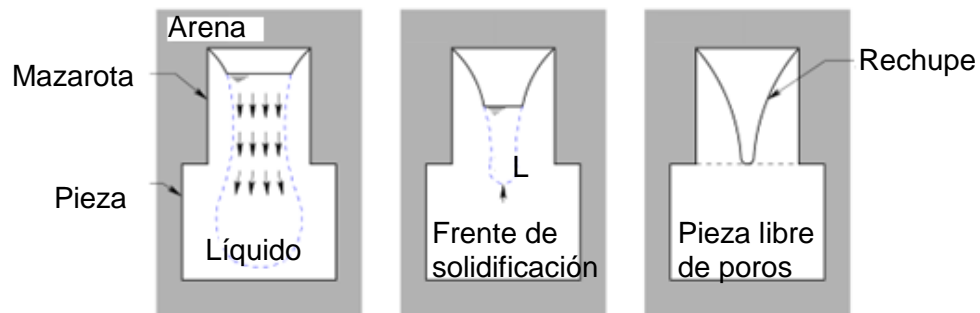


Fig. 1.37. Mazarota cilíndrica cerrada en molde de arena, se observa como se da paso la creación del rechupe al solidificar el metal.

En lo que respecta al diseño de la mazarota, se presentan dos métodos principales que tradicionalmente se utilizan, estos son:

- **Método de Caine.** Para que el proceso de alimentación líquida se efectúe correctamente, Caine (1949) obtuvo experimentalmente curvas, como la que

se presenta en la Fig. 1.38, para la obtención de las dimensiones de la mazarota para fundiciones de aceros con un contenido de carbono del 0.3%.

En este método el tamaño de la mazarota está determinado por dos valores: En el primero, el tiempo de solidificación de la mazarota debe exceder al de la fundición, y en el segundo, la mazarota debe suplir suficiente metal para compensar la contracción. En la curva de Fig.1.38, se puede determinar, para un valor dado el volumen de la pieza a la que alimenta,  $V_p$ , el valor mínimo del volumen que debe tener la mazarota para obtener piezas libres de poros. En la Fig. 1.38 la abscisa representa la relación de tiempo de solidificación de la mazarota de fundición y la ordenada representa la razón de volumen de la mazarota y pieza. La contracción por cambio de fase en la pieza, es ~3% del volumen del acero. Así, el razonamiento de Caine fue que “El calor disipado es una función de la superficie de la fundición, mientras que el calor contenido es función del volumen” [14].

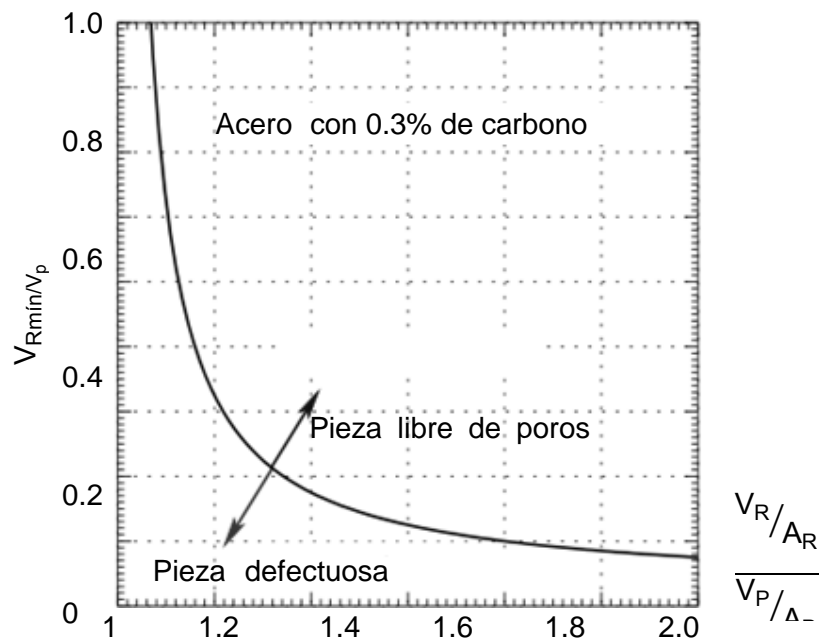


Fig. 1.38. Curva de Caine para la obtención de las dimensiones de la mazarota para fundición de acero al 0.3% C, en donde “R” se refiere a la mazarota y “p” a la pieza.

➤ **Método de NRL.** Bishop *et al.* (1955) establecieron un método análogo al método de Caine, en el que la relación de módulos utilizada por Caine se sustituye por el factor  $(L+W)/T_s$ . Además, estos son las dimensiones máximas que caracterizan la pieza a fundir, mediante la experimentación lograron graficar sus resultados, los cuales se presentan en la Fig. 1.39, muy similar a la curva de Caine. La ventaja principal de este método con respecto al de Caine, se debe a que cuando la geometría de la pieza es complicada, el cálculo del factor de forma resulta mucho más sencillo que la obtención del módulo  $V_p/A_p$  utilizado en el método de Caine [14].

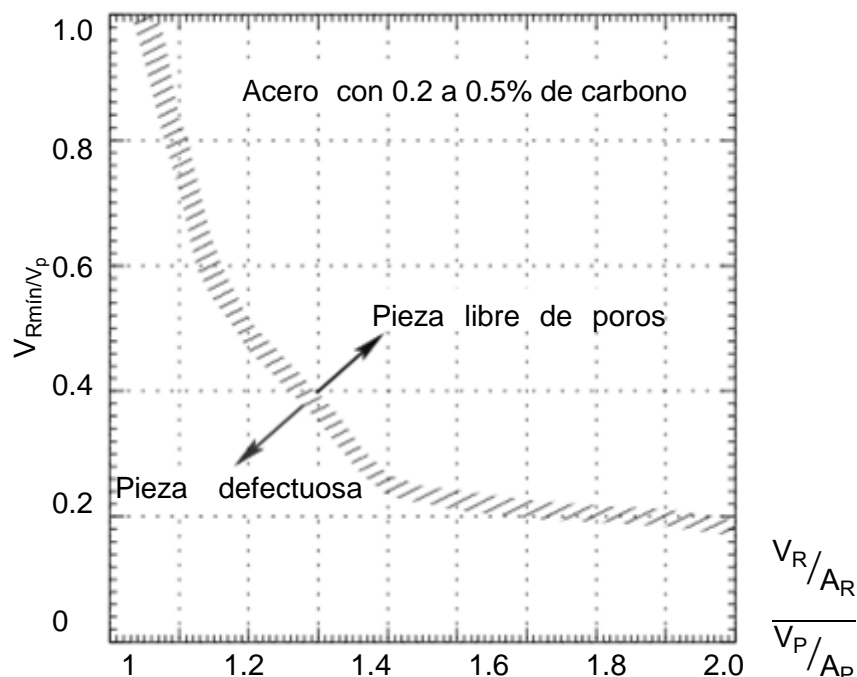


Fig. 1.39. Resultados obtenidos experimentalmente por Bishop *et al.* (1955) para aceros con contenido de carbono comprendido entre 0.2 y 0.5%.

Los dos procesos descritos anteriormente se basan en que la mazarota está definida según los factores de forma y las gráficas obtenidas experimentalmente, a continuación se realizará un análisis de diseño que involucra tanto el factor forma como el objetivo principal de la mazarota, el cual consiste en proporcionar el suficiente metal y solidificar por último [14].



El tamaño óptimo de una mazarota es aquella que permite que el metal de la mazarota se solidifique en el mismo instante o posterior que la última zona de la pieza. Así, la ecuación del tiempo de solidificación ( $T_{TS}$ ) para una pieza, se puede expresar mediante la Ec. 1.13 [14]:

$$T_{TS} = C_m \left( \frac{V}{A} \right)^2. \quad (1.13)$$

La mazarota se diseña con la condición que debe solidificar igual o después que la pieza, Ec. 1.14 [14]:

$$\left( \frac{V_{RF}}{A_R} \right)^2 = C_P \left( C_R \frac{V_P}{A_P} \right)^2. \quad (1.14)$$

Así,  $V_{RF}$  se puede obtener con la Ec. 1.15: [14]

$$V_{RF} = V_R - \beta (V_R + V_P) \quad (1.15)$$

donde  $\beta$ , un coeficiente que representa la contracción volumétrica de solidificación del metal (ver, Tabla 1.4) y realizando las operaciones matemáticas, se llegan a los siguientes términos que definen a la mazarota, ya sea en la configuración lateral o de planta sobre la pieza a fundir (ver, Fig. 1.40). Así, para mazarotas laterales, Ec. 1.16 [14]:

$$D^3 - 6 \frac{\left( \frac{V_P}{A_P} \right)}{1 - \beta} D^2 - \frac{4 \beta V_P}{\pi (1 - \beta)} = 0. \quad (1.16)$$

Para mazarotas verticales, Ec. 1.17:

$$\frac{1}{3} D^3 - 3 \frac{(V_P/A_P)}{1 - \beta} D^2 - \frac{4 \beta V_P}{\pi (1 - \beta)} = 0. \quad (1.17)$$

De las ecuaciones anteriores la incógnita sería el diámetro de la mazarota.

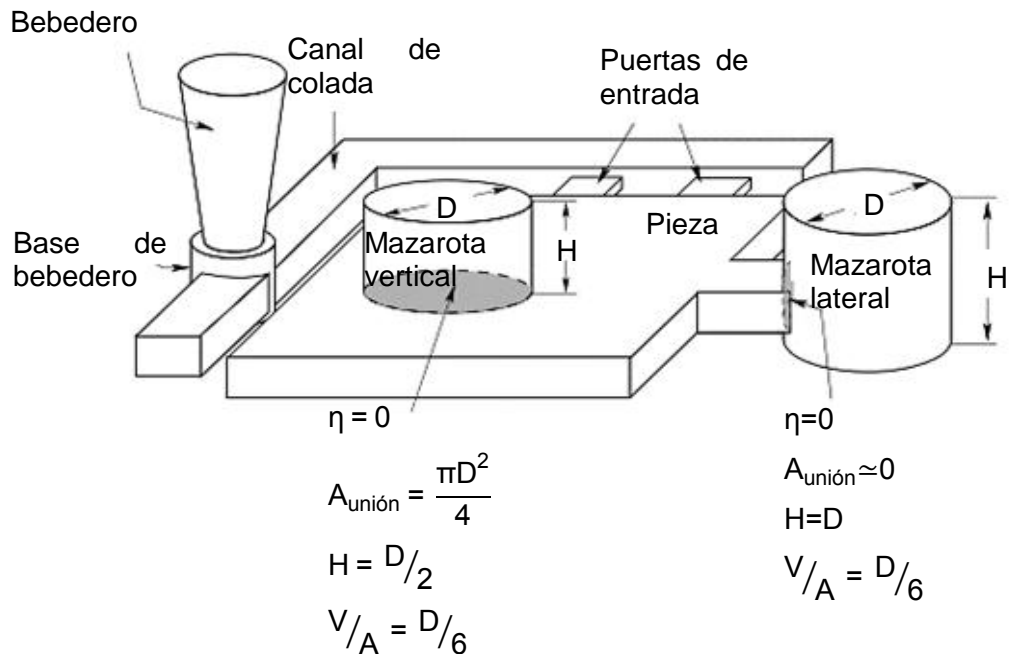


Fig. 1.40. Tipos de mazarotas cilíndricas, tipo lateral y vertical.

La esfera es el elemento geométrico que puede contener la mayor masa y posee la menor superficie para su enfriamiento, aunque posee la desventaja de que su unión con la pieza se hace por medio de un punto, el cual termina enfriándose y obstruyendo el paso de la alimentación del metal líquido [14].

Los únicos elementos geométricos que mantienen su factor de forma independientemente de su tamaño son la esfera y el cubo. Así, el rendimiento de la mazarota es bueno cuando la altura o profundidad alcanzada por el rechupe es del 80% de la altura de la misma [14].

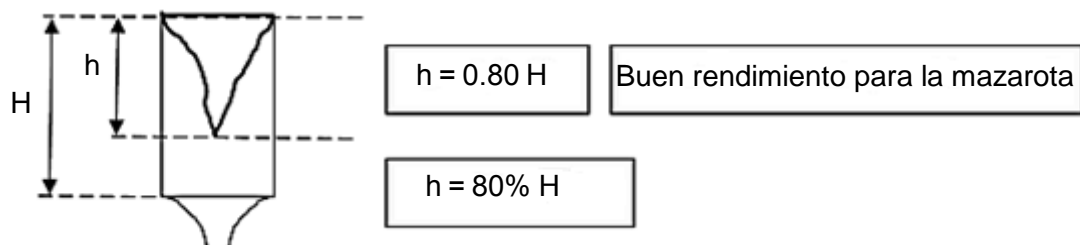


Fig. 1.41. Rendimiento de la mazarota cilíndrica.

Al dimensionar la mazarota cilíndrica según su configuración, lateral o vertical, la cual cumple con su objetivo de suministrar el metal líquido requerido

a causa de la contracción de metal al enfriarse y solidificar, también la mazarota está diseñada para solidificar después que la pieza ha sido colada [14].

Estudios realizados por Taylor *et al.* (1959) y Pellini (1953) demostraron que para placas de espesores de 10 mm es posible mantener un flujo adecuado de alimentación por medio de mazarotas cilíndricas y con el uso de enfriadores, los cuales tienen un alcance de hasta cuatro veces el espesor de la placa, sus resultados se pueden observar en la Fig. 1.42 [14].

Estudios posteriores realizados por Johnson y Loper (1969) determinaron la expresión para calcular la distancia de alimentación efectiva de la mazarota en placas, Ec. 1.18 [14]:

$$D_{MT} = 72 \left( \frac{V}{A} \right)^{1/2} - 140 \text{ mm.} \quad (1.18)$$

De igual forma Johnson y Loper, realizaron ensayos en barras de espesores pequeños (inferiores a 13 mm) con lo cual obtuvieron la Ec. 1.19, para determinar la distancia de alimentación efectiva de la mazarota en barras [14].

$$D_{MT} = 80 \left( \frac{V}{A} \right)^{1/2} - 80 \text{ mm.} \quad (1.19)$$

Todos los resultados presentados para el diseño de mazarotas solo son válidos para piezas de acero en moldes de arena verde. En general, para aleaciones con resistencia a la alimentación líquida inferior al acero, como el cobre, el plomo o el latón, estas expresiones anteriores se pueden aplicar. No obstante, para las aleaciones con una mayor resistencia a la alimentación líquida, como las aleaciones de aluminio, por ejemplo, requerirán un mayor número de mazarotas o alimentadores [14].

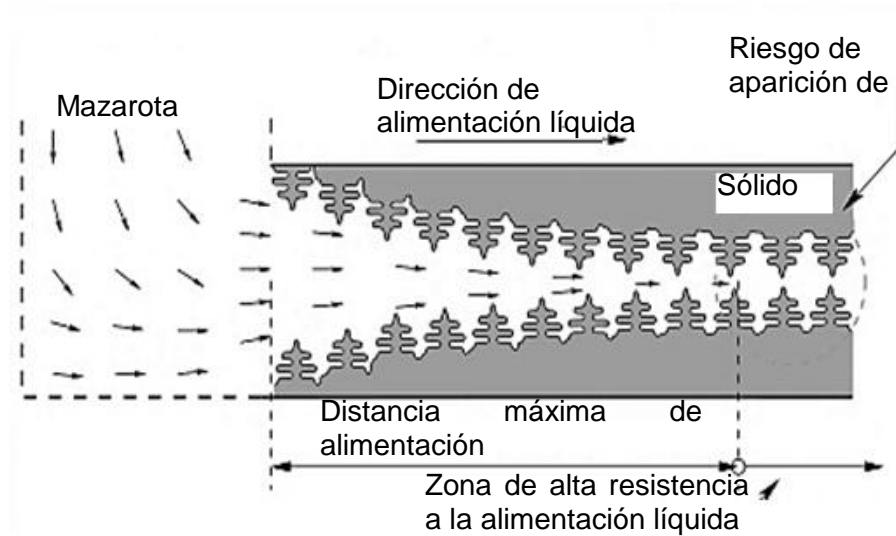


Fig. 1.42. Esquema del proceso de alimentación líquida durante la solidificación de una aleación metálica.

## 1.8. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA MODELOS DE FUNDICIÓN

El diseño del modelo tiene un especial cuidado debido a que se deben de considerar factores importantes como la contracción del material al solidificar y el desgaste que este puede presentar debido a las altas temperaturas y al número de piezas que se desea realizar utilizando un mismo modelo [14].

Cuando el metal está en el proceso de solidificación este experimenta una disminución en su volumen ocasionando que las medidas de las piezas varíen en proporción a lo que se conoce como el porcentaje de contracción metálica; es por ello que al diseñar el modelo se debe considerar este porcentaje de contracción para obtener las medidas requeridas [14].

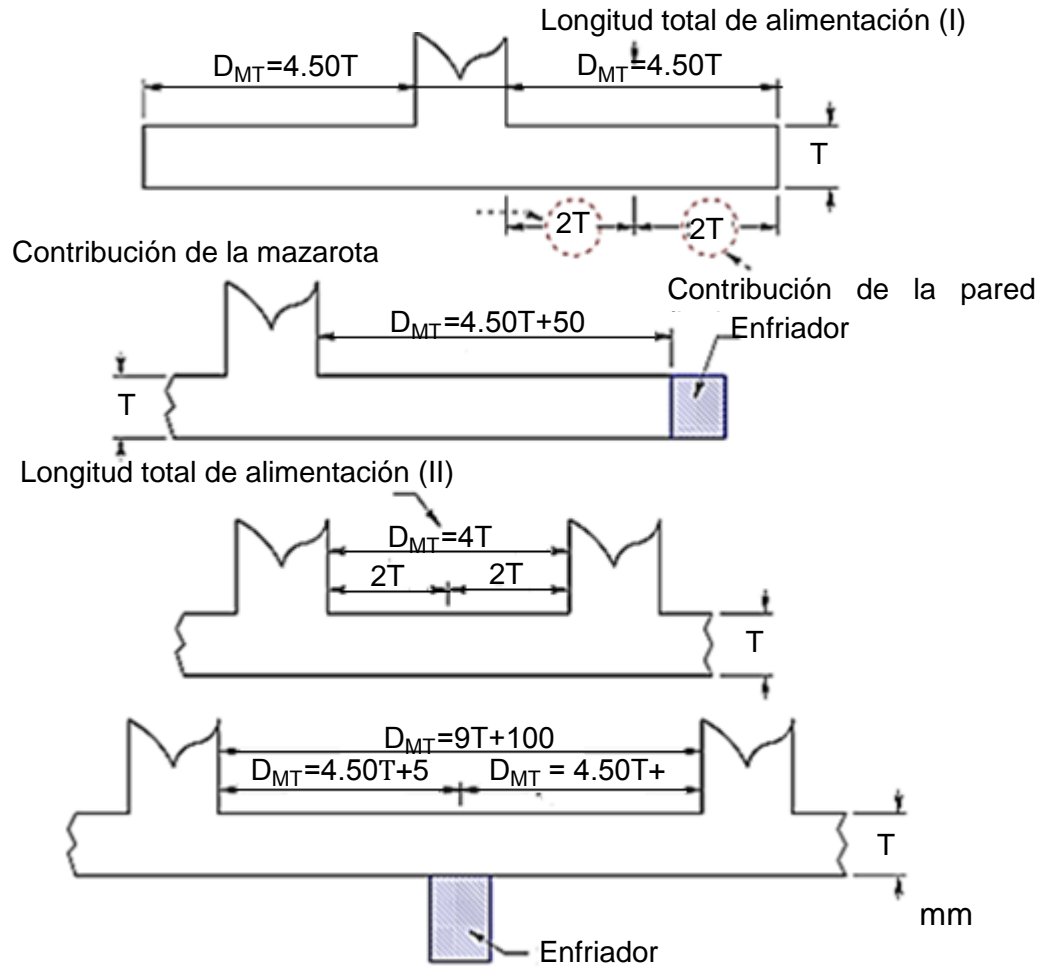


Fig. 1.43. Distancias de alimentación en placas obtenidas experimentalmente por Pellini (1953): (a) y (b) entre la mazarota y la pared final sin y con enfriador, respectivamente; (c) y (d) entre dos mazarotas sin y con enfriador entre ambas, respectivamente.

### 1.8.1. CONTRACCIÓN DE LOS METALES

La contracción de los metales ocurre en tres pasos, los cuales son: contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación, contracción durante el cambio de estado de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación; y la contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente [14].

Una secuencia de como se da el cambio de volumen o contracción se presenta en la Fig. 1.44 [14].

En el punto (a), la fundición se encuentra justo después del vaciado, la contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la de solidificación se presenta en el punto (b), en este punto la altura se reduce tal como se indica en la Fig. 1.44, generalmente la reducción es del 0.5%. En el punto (c) se producen dos efectos: primero, la contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición, y el segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se restringe. Esta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la fundición, la cual se llama rechupe. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría como en el punto (d), la cual se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, se aplica a la inversa para determinar la contracción [14].

### **1.8.2. EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE MODELOS**

En el siguiente ejemplo se presenta un diseño del modelo, considerando que se requiere una pieza de fundición gris con las siguientes medidas presentadas en la Fig. 1.45 y el porcentaje de contracción metálica es de 1.0% (ver, Tabla 1.4) [14].

La contracción volumétrica causada por el enfriamiento del metal hace necesario calcular las nuevas dimensiones del modelo, para ello se aumentan las dimensiones especificadas por un factor de contracción metálica de 1.0%. Así, por ejemplo, la altura de la pieza ya terminada es de 192 mm, la dimensión adecuada para el modelo será de 193.9 mm, de igual forma se calculan las dimensiones restantes hasta rediseñar el modelo, las dimensiones para el modelo serán las que se presentan en la Fig. 1.46 [14].

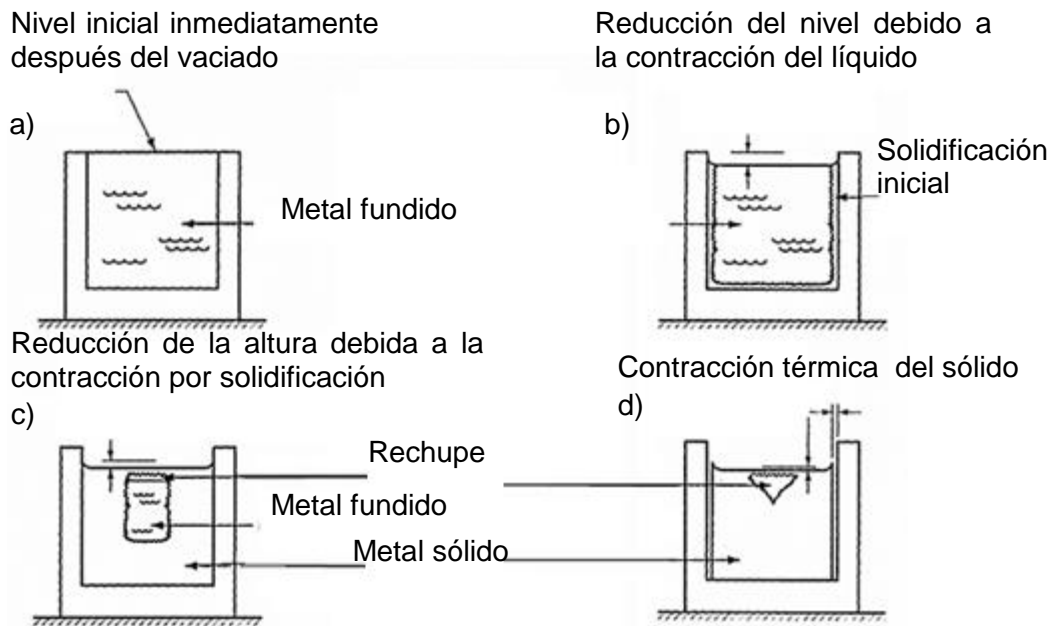


Fig. 1.44. Contracción de una fundición cilíndrica durante el proceso de solidificación.

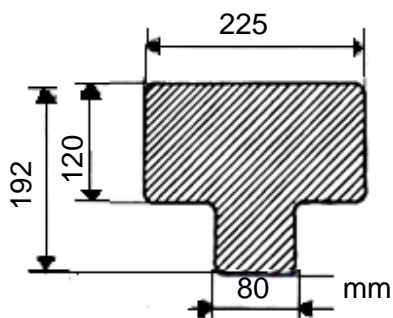


Fig. 1.45. Dimensiones de la pieza final.

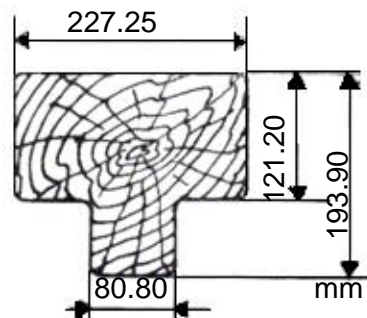


Fig. 1.46. Dimensiones para el modelo considerando porcentaje de contracción.

Este capítulo recopiló información sobre moldes y modelos para fundiciones de aluminio, principalmente, la descripción de las partes que componen los modelos y los moldes, sus características y recomendaciones para su fabricación; así, a partir de esta información se continúa con el capítulo siguiente, sobre diseño de modelos para fundición en moldes de arena.

## **2. DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIONES EN MOLDES DE ARENA**

Con el desarrollo del proceso de fundición de metales ferrosos y no ferrosos se ha logrado crear esta industria tal y como se conoce actualmente. La creciente demanda de fabricación de partes y piezas de maquinaria crea la exigencia en mejorar el proceso de fundición de piezas de gran tamaño y de geometría compleja que requiere métodos de diseño y fabricación especiales; es decir; ha permitido la fabricación de piezas complejas y de rápida producción. Así, a continuación se listan los pasos para el desarrollo del diseño de modelos que se utilizan en el proceso de fundición en moldes de arena, considerando las variables de diseño y una serie de recomendaciones importantes; se desarrolla el ejemplo de un soporte tubular de transmisión de gas a alta presión, el cual por su aplicación y exigencias en el campo de trabajo debe ser resistente y sin ningún tipo de defecto en el material con el que está construido, la pieza requiere por su geometría y sus dimensiones un rediseño ya que la fabricación del modelo presenta ciertas dificultades que se tienen que solventar para evitar defectos en el proceso de extracción del modelo del molde y defectos a causa de un deficiente llenado del molde con el metal fundido, en cada paso se detallan los aspectos más importantes a considerar en cuanto al diseño y luego se presenta el resultado aplicado al ejemplo anteriormente citado.

### **2.1. PASOS PARA EL PROCESO DE DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIÓN EN MOLDES DE ARENA**

El desarrollo de los pasos que se listan a continuación permite seleccionar los materiales, herramientas, variables y criterios de forma ordenada, dependiendo del tipo de aplicación, tamaño de las piezas a fundir, considerando la durabilidad del modelo, el material del cual se fundirán las



piezas y su posterior construcción. Así, los pasos para el diseño del modelo son los siguientes:

Paso 1: Elaboración de dibujo técnico de la pieza;

Paso 2: Evaluación de planos;

Paso 3: Ubicación de la línea de partición;

Paso 4: Diseño de sistemas de alimentación;

Paso 5: Selección del porcentaje de contracción volumétrica;

Paso 6: Redimensionamiento del modelo;

Paso 7: Ángulos de extracción del modelo, y

Paso 8: Selección del material del modelo.

## **2.2. DESARROLLO DE PROCESO DE DISEÑO**

A continuación se detallan los pasos del proceso de diseño de los modelos, explicando cada criterio de diseño y mostrando el resultado aplicado al ejemplo del soporte tubular de transmisión de gas de alta presión.

Paso 1: Elaboración de los dibujos técnicos de la piezas

Es de gran importancia tener a disposición los planos técnicos de la pieza que se desea fabricar por medio de fundición en moldes de arena, considerando sus tolerancias, acabados superficiales, materiales de la pieza que en este caso el metal seleccionado a fundir es una aleación de 90% Cu-10% Al, su aplicación, etc.

En el caso de tener a disposición la pieza, se tienen que elaborar los planos de la misma con todas sus especificaciones.

Para el desarrollo de este punto, se presentan las dimensiones para un soporte tubular, Fig. 2.1, utilizado en sistemas de tuberías de alta presión sujetos a vibraciones, este tipo de pieza se utiliza para las tuberías de transmisión de gas de las geotérmicas o en la transmisión de vapor de calderas.

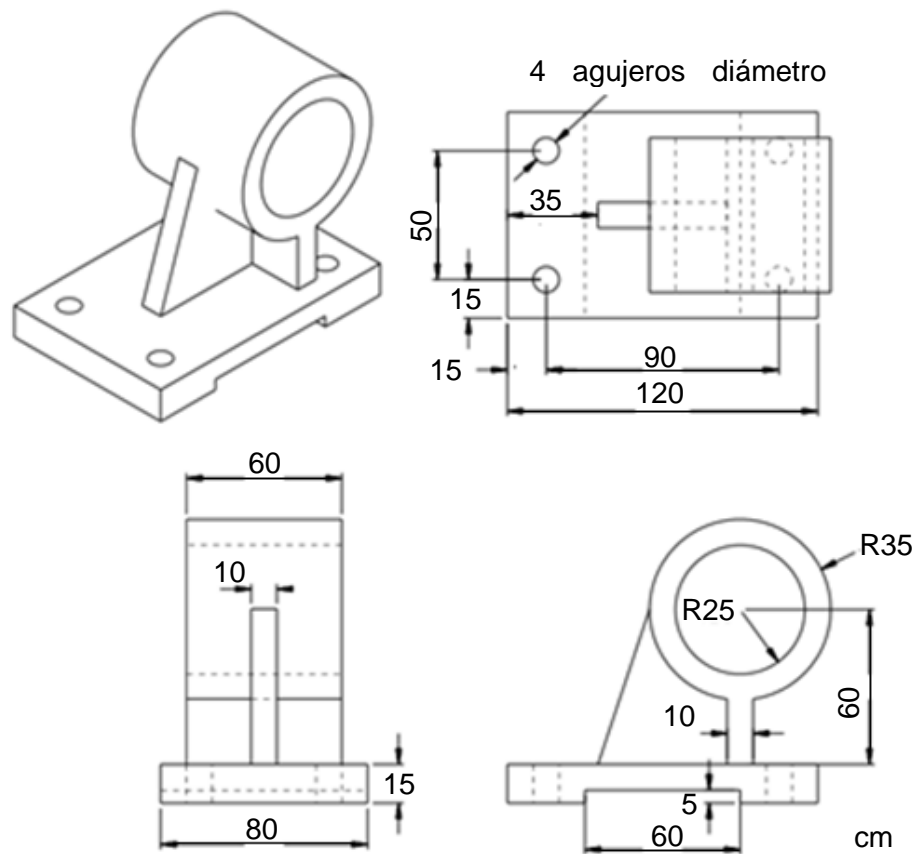


Fig. 2.1. Soporte tubular para sistema transmisión de gas de alta presión.

## Paso 2: Evaluación de planos

La evaluación de los planos tiene por objetivo asegurar que en el proceso de colada el metal fundido fluya de forma adecuada, esto se logra evaluando las consideraciones que se presentan en la Fig. 2.2: a) No favorable y b) favorable, para el flujo del metal fundido en el molde de arena.

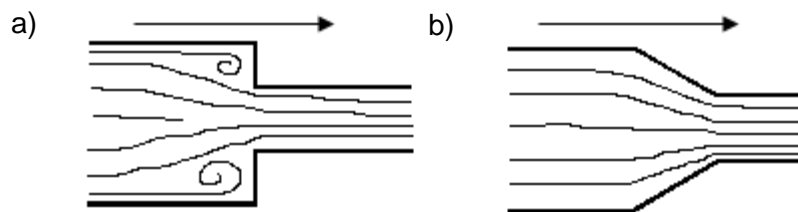


Fig. 2.2. Recomendación para cambios de secciones.

Los cambios de dirección en el modelo generan turbulencias que pueden causar rechupes o arrastre de material de las paredes internas del molde, debido a esto los cambios de dirección del flujo del metal fundido debe cambiar de dirección gradualmente, en la Fig. 2.3a, se logra apreciar una forma ineficiente y en la Fig. 2.3b, un diseño mejorado como una recomendación para cambios de sección. En el caso que la pieza no tenga cambios de sección, no será necesario rediseñar los planos, y cuando la pieza tenga paredes que se interceptan como en la Fig. 2.4a, debe realizarse un rediseño y en la medida de lo posible evitar intersecciones que puedan generar rechupes por la solidificación, esta recomendación de diseño se presenta en la Fig. 2.4b.

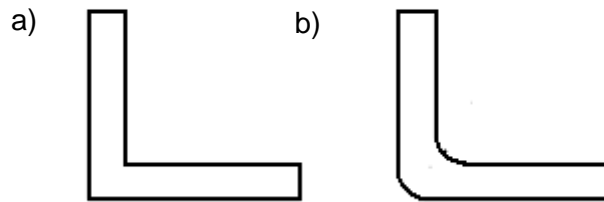


Fig. 2.3. Recomendación de rediseño para cambios de dirección.

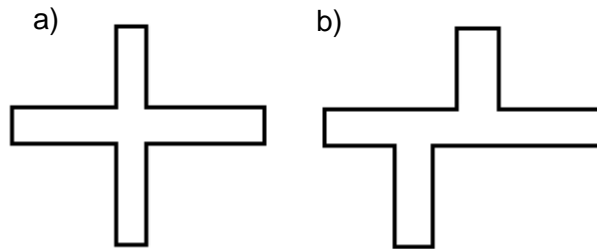


Fig. 2.4. Recomendación de diseño para intersecciones de paredes.

En el soporte tubular se presenta un inconveniente en la base ya que existe un cambio en la sección que puede causar que el flujo del metal fundido sea más lento y lo pueda obstruir, debido a esto se toma la recomendación de la Fig. 2.2, para hacer una evaluación y un rediseño de la pieza, en la Fig. 2.5, se presenta el detalle de la pieza que se rediseñará.

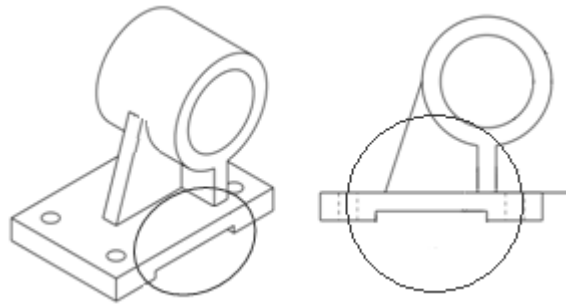


Fig. 2.5. Detalle de la zona a rediseñar.

En el rediseño se tomó en cuenta que a la pieza se le hará un maquinado posterior en su base, realizando el rediseño se asegura que en esta zona no se obstruya el flujo de metal fundido, las dimensiones de la pieza se observan en la Fig. 2.6.

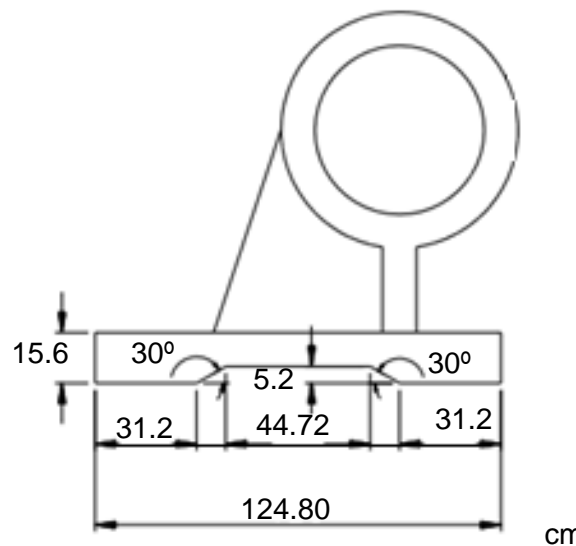


Fig. 2.6. Dimensiones considerando el rediseño.

Otra consideración en el rediseño del plano es que los cuatro agujeros de la base del soporte se fabricarán posteriormente, de esta forma se facilita el proceso de colada.

### Paso 3: Ubicación de la línea de partición

En el caso de la Fig. 2.7a, la línea de partición es la indicada ya que ésta se ubica a lo largo de un plano y en la Fig. 2.7b, se pretende una segunda

opción de línea de partición, ésta no es indicada ya que si se hace de esa manera, al separar el molde de la pieza existirán problemas como arrastre de material y la posibilidad de generar en la pieza ángulos de salida que se pueden omitir en el caso de una línea de partición como en la Fig. 2.7a, también, al no escoger bien la línea de partición puede hacer que cambie el posicionamiento de los canales de alimentación al igual de la generación de las mazarotas.

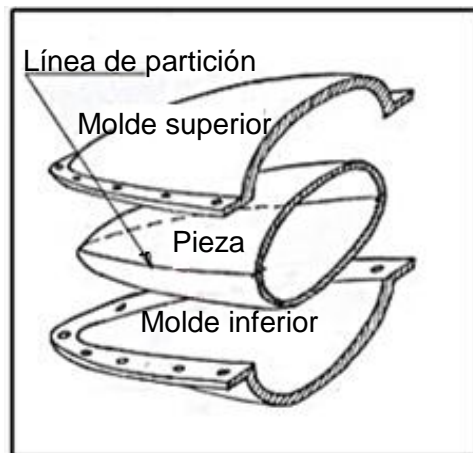


Fig. 2.7a. Posicionamiento óptimo de la línea de partición.

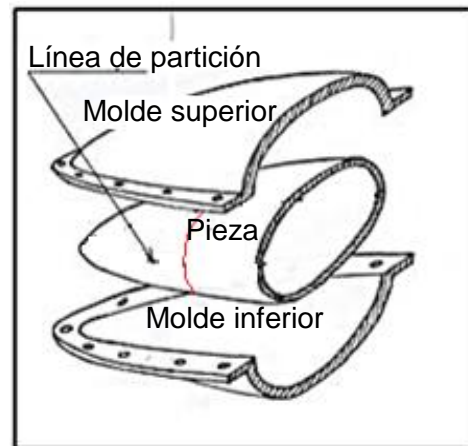


Fig. 2.7b. Posicionamiento alternativo de la línea de partición.







Como se observa es importante determinar donde va la línea de partición desde el concepto del diseño, porque afecta los ángulos de salida, el espesor de las paredes, el acabado superficial y costo del molde.

La línea de partición debe posicionarse para facilitar la sujeción del material durante el mecanizado que se le haría a la pieza después de que solidifique. En la Tabla 2.1 se pueden observar algunos criterios de donde debe posicionarse la línea de partición.

Para el ejemplo del soporte tubular, se evaluó la mejor ubicación de la línea de partición tomando en cuenta los sistemas de alimentación que serán colocados entre la separación de los dos moldes y colocando la mazarota lateralmente. Con los criterios anteriormente mencionados se decide colocar la línea de partición tal como se observa en la Fig. 2.8, ya que de esta manera la

línea de partición dividirá simétricamente la pieza, facilitando tanto el proceso de llenado del molde y la fabricación del modelo.

Tabla 2.1. Criterios de ubicación de línea de partición.

Criterio de diseño	Principios	
Línea de partición simétrica, la línea de partición no está a la orilla de la parte.	Correcto 	Incorrecto 
Línea de partición plana o recta.	<p>a) Línea de partición irregular              Diseño original</p> <p>b) Línea de partición plana              Diseño mejorado</p>	
Línea de partición que facilita el flujo del material fundido.	<p>Deseable  </p> <p>No deseable  </p>	

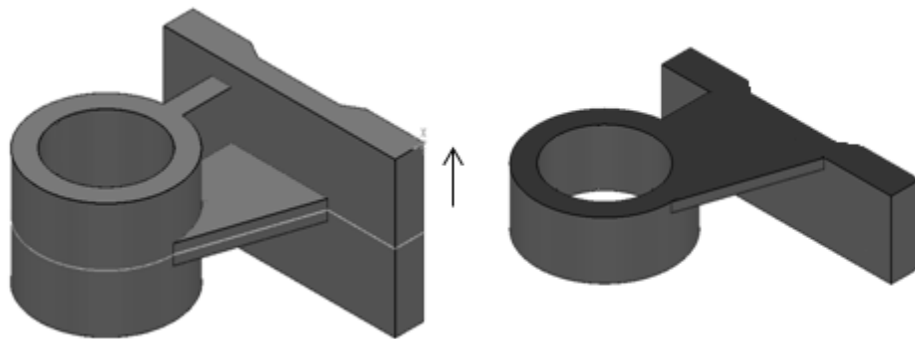


Fig. 2.8. Ubicación de la línea de partición para el soporte tubular.

#### Paso 4: Diseño de sistemas de alimentación

En este paso se diseñarán los sistemas de alimentación, el bebedero, la mazarota, los canales de alimentación, la copa de vaciado, etc.

- Diseño y Ubicación de sistemas de alimentación

El diseño de los sistemas de alimentación consiste en dimensionar los distintos elementos que permiten el llenado del molde de forma eficiente, (ver, Fig. 1.28). La copa de vaciado permite que el metal líquido ingrese de forma directa al molde, el bebedero determina que el flujo del metal líquido sea de forma laminar o turbulento, el objetivo del pozo es evitar que el metal líquido erosione las paredes del molde en su caída, la mazarota es uno de los elementos más importantes ya que suministra metal fundido adicional a la fundición conforme ésta se contrae durante la solidificación.

Al diseñar el sistema de llenado se debe tener en cuenta que el metal fundido debe fluir de forma homogénea, no debe causar daños en el interior del molde ni erosionar las paredes internas. Además, de la función de suministrar el metal fundido, se debe asegurar una solidificación dirigida de la pieza hacia la mazarota, evitando la formación de rechupes y defectos ocasionados por la contracción metálica durante la solidificación. En la Fig. 2.9 se presenta un corte transversal del diseño del molde.

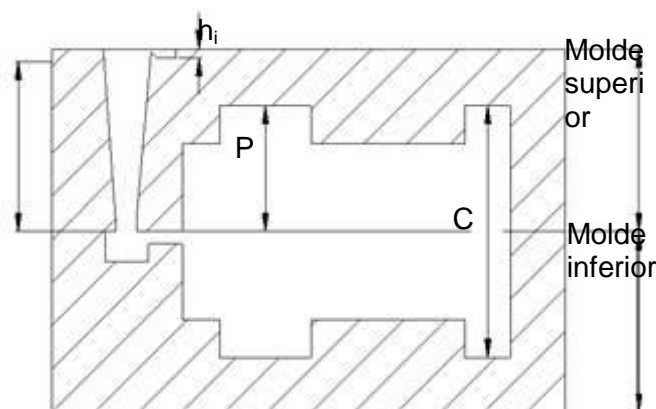


Fig. 2.9. Corte transversal para el diseño de los componentes del molde.

- Diseño de la mazarota

La contracción que los metales experimentan cuando se solidifican y enfrían debe ser compensada para evitar problemas como rechupes en las piezas, poros y el deficiente llenado del molde es por ello que se diseña la mazarota.

El volumen mínimo que debe tener una mazarota está determinado por la cantidad de metal requerido para compensar la contracción del metal solidificado. Por ejemplo, el volumen de la mazarota debería ser superior al 3% del volumen de la pieza. Por otro lado, la geometría óptima de una mazarota deberá ser aquella que proporcione el máximo tiempo de solidificación. En la práctica, por razones constructivas, se suelen emplear mazarotas cilíndricas.

Criterios para el cálculo de la mazarota: los criterios son dos, de acuerdo a su volumen y al módulo de enfriamiento (Wlodawer) así para el criterio de volumen se determina el diámetro,  $D_1$  correspondiente al volumen mínimo que debe tener la mazarota para cubrir la contracción de la pieza, Ec. 2.1.

$$V_{\text{mazarota min}} = V_{\text{pieza (partes gruesas)}} \cdot c \cdot k. \quad (2.1)$$

Las partes delgadas se consideran despreciables ya que se enfrían muy rápido y la mazarota no las puede alimentar. El coeficiente “c” es el coeficiente de contracción volumétrica del metal (ver, Tabla 2.2), el coeficiente “k” representa el nivel de seguridad,  $1 \leq k \leq 3$ , si  $k = 3$ , el camino de la mazarota a la pieza es muy largo, normalmente se toma un valor de  $k = 2$ .

La Tabla 2.2 presenta los metales más comunes para el proceso de fundición, con sus respectivos porcentajes de contracción metálica.

Y como segundo criterio de módulo de enfriamiento (Wlodawer).

El módulo de enfriamiento es un parámetro geométrico, que representa la velocidad o el tiempo de enfriamiento de la pieza, suponiendo un valor uniforme del coeficiente de transmisión de calor en toda su superficie, el módulo se determina mediante la Ec. 2.2.



$$M_{\text{pieza}} = \frac{V_{\text{pieza}}}{S_{\text{pieza}}} \quad (2.2)$$

Tabla 2.2. Porcentaje de contracción metálica para metales y aleaciones comunes.

Metal o Aleación	Porcentaje de contracción volumétrica por solidificación
Aluminio	7.1
Al - 4.5% Cu	6.3
Al - 12% Si	3.8
Cobre	4.9
70% Cu-30% Zn	4.5
90% Cu-10% Al	4
Fundición de hierro gris	2.5
Magnesio	4.2
Zinc	6.5

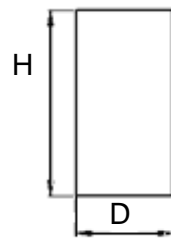
Fuente: según R.A.Flinn.

En el caso que el molde tenga machos, el cálculo del módulo de enfriamiento debe considerar la superficie del macho, debido a que esta es una superficie más refractaria por no tener humedad y tener una capa de resina, por regla general la superficie de la pieza con machos se determina según la Ec. 2.3.

$$S_{\text{pieza}} = S_{\text{en contacto con la arena del molde}} + 0.5 \cdot S_{\text{en contacto con el macho}} \quad (2.3)$$

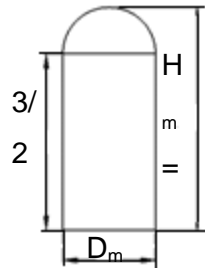
El módulo de enfriamiento es máximo cuando la mazarota a calcular es una esfera ( $M = R/3$ ), entonces la mazarota ideal es de una geometría esférica aunque presenta dificultades de moldeo y construcción, por lo que se recomienda utilizar formas cilíndricas sencillas con relaciones que se pueden obtener en la Ec. 2.2 como  $V/S$  o  $H/D \approx 1, 1.5, 2$ , etc.

El módulo  $M$ , es determinante para el cálculo de la mazarota, ya que esta tiene que enfriar y por tanto solidificar más lentamente que la pieza que alimentan, se trata de determinar el diámetro mayor ( $D_2$ ) para que la mazarota solidifique después que la pieza, entre el diámetro menor ( $D_1$ ) y el mayor ( $D_2$ ) se escoge el de diámetro mayor.



Mazarota  
cilíndrica

$$H = 2D$$



Recomendaciones de  
dimensionamiento para  
la mazarota mixta

- a)  $H_m = D_m$
- b)  $H_m = 1.5 D_m$

Fig. 2.10. Formas de mazarotas.

Se selecciona la mazarota bajo la hipótesis de que su módulo de enfriamiento  $M = V/S$ , debe ser 1.2 veces el de la pieza o sección a alimentar (ver, Ec. 2.4).

$$M_{\text{mazarota teórico}} = 1.2 M_{\text{pieza}} \quad (2.4)$$

Luego se determina la geometría de la mazarota (Fig. 2.10) mediante la expresión que relaciona el módulo de enfriamiento con su volumen, Ec. 2.5.

$$V_{\text{mazarota teórico}} = M_{\text{mazarota teórico}} S_{\text{mazarota teórico}} = V_{\text{mazarota mínimo}} \quad (2.5)$$

En cuanto a la altura de la mazarota ha de comprobarse que:

$$H_{\text{mazarota}} > H_{\text{pieza}}$$

$$H_{\text{mazarota}} < H_{\text{caja modelo}}$$

El rendimiento de la mazarota puede mejorarse recubriendo la mazarota con arena para macho, esto permite que el módulo aumente el doble o lo que

es equivalente, la superficie de contacto con el macho valdría la mitad ya que el enfriamiento es menor (ver, Ec. 2.6).

$$S_{\text{contacto}} = \frac{S_f}{2}. \quad (2.6)$$

Y que la mazarota alimente varias piezas a la vez. El número de piezas que podría alimentar la mazarota, el volumen de los canales de distribución y el rendimiento de la mazarota se determina mediante las Ecs. 2.7, 2.8 y 2.9 respectivamente.

$$n^{\circ} \text{ piezas} = \frac{V_{\text{mazarota}}}{V_{\text{mazarota te\u00f3rico}}} \quad (2.7)$$

$$V_{\text{canales}} = 1/10 (n^{\circ} \text{ piezas } V_{\text{pieza entera}}) \quad (2.8)$$

$$\eta = \frac{n^{\circ} \text{ piezas } V_{\text{pieza entera}}}{(n^{\circ} \text{ piezas } V_{\text{pieza entera}}) V_{\text{mazarota}} V_{\text{canales}}}. \quad (2.9)$$

➤ Criterio del volumen

Con los fundamentos te\u00f3ricos para el dise\u00f1o de la mazarota, se ejemplifica para una aleaci\u00f3n de cobre (90%Cu - 10%Al).

$$V_{\text{mazarota m\u00edn}} = V_{\text{pieza (partes gruesas)}} \cdot C \cdot k$$

donde:

C = 4% (ver, Tabla 2.2)

K = 2 (coeficiente de seguridad)

El volumen de la pieza considerando partes gruesas, sin considerar las costillas y la parte de sobre material de la base (ver, Fig. 2.11).

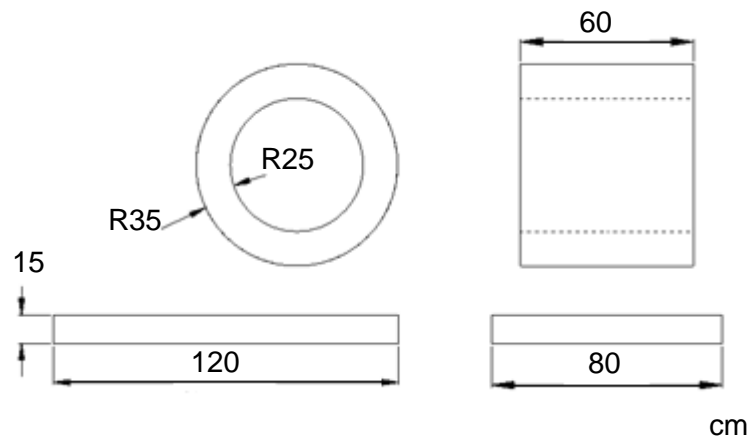


Fig. 2.11. Partes principales para determinar el volumen de la pieza.

$$V_{\text{pieza}} = V_{\text{cilindro hueco}} + V_{\text{base}}$$

$$V_{\text{pieza}} = \pi h (R^2 - r^2) + b \cdot h \cdot t$$

$$V_{\text{pieza}} = \pi \cdot 60 \cdot (35^2 - 25^2) + 120 \cdot 15 \cdot 80$$

$$V_{\text{pieza}} = 259,515.45 \text{ cm}^3.$$

Sustituyendo en la fórmula para obtener el volumen mínimo de la mazarota, según la Ec.2.1.

$$V_{\text{mazarota mín}} = 259,515.45 \cdot (0.04) \cdot 2$$

$$V_{\text{mazarota mín}} = 20,761.236 \text{ cm}^3.$$

➤ Diseño de mazarota mediante el criterio del Módulo de enfriamiento

El módulo para la mazarota está definido por la Ec. 2.4, pero antes será necesario encontrar el módulo de la pieza mediante las Ecs. 2.2 y 2.3.

$$M_{\text{pieza}} = \frac{V_{\text{pieza}}}{S_{\text{pieza}}}$$

$$S_{\text{pieza}} = S_{\text{en contacto con la arena del molde}} + 0.5 S_{\text{en contacto con el macho}}$$

Superficie en contacto con la arena de moldeo.

$$S_{\text{en contacto con la arena del molde}} = S_{\text{cilindro}} + S_{\text{base}}$$

$$S_{\text{cilindro}} = 2 (\pi R^2 - \pi r^2) + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$$

$$S_{\text{cilindro}} = 2 [\pi (36.4)^2 - \pi (24)^2] + \pi (36.4) (62.4)$$

$$S_{\text{cilindro}} = 18,977.23 \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{base}} = b \cdot h \cdot t = 124.8 (83.2) (10.4)$$

$$S_{\text{base}} = 107,986.94 \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{en contacto con la arena del molde}} = 126,964.17 \text{ cm}^2.$$

Superficie en contacto con el macho

$$S_{\text{en contacto con el macho}} = 2 \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

$$S_{\text{en contacto con el macho}} = 2 \cdot \pi \cdot (24)^2 + 2 \cdot \pi \cdot (24) \cdot (62.4)$$

$$S_{\text{en contacto con el macho}} = 13,028.81 \text{ cm}^2.$$

Por lo tanto, al sustituir los valores en la Ec. 2.2, se obtiene la superficie de la pieza considerando la superficie en contacto del macho.

$$S_{\text{pieza}} = S_{\text{en contacto con la arena del molde}} + 0.5 S_{\text{en contacto con el macho}}$$

$$S_{\text{pieza}} = 126,964.17 + 0.5 (13,028.8)$$

$$S_{\text{pieza}} = 133,478.58 \text{ cm}^2.$$

Para un volumen de la pieza  $V_{\text{pieza}} = 259,515.45 \text{ cm}^3$ , se encuentra el módulo según la Ec. 2.2.

$$M_{\text{pieza}} = \frac{V_{\text{pieza}}}{S_{\text{pieza}}} = \frac{259,515.45}{133,478.58}$$

$$M_{\text{pieza}} = 1.94 \text{ cm.}$$

Para determinar el módulo y la geometría de la mazarota se utiliza la Ec.2.4 y 2.5 respectivamente, como se presenta a continuación:

$$M_{\text{mazarota teórico}} = 1.2 M_{\text{pieza}}$$

$$M_{\text{mazarota teórico}} = 1.2 (1.94 )$$

$$M_{\text{mazarota teórico}} = 2.33 \text{ cm.}$$

La mazarota elegida es una mazarota cilíndrica con una relación ( $H_m = 2D_m$ ) (ver, Fig. 2.10).

Mediante el primer criterio se determinó que el volumen mínimo de la mazarota equivale a  $V_{\text{mazarota mín}} = 20,761.24 \text{ cm}^3$ , por lo tanto, se puede determinar el diámetro necesario despejando de la siguiente expresión:

$$V_{\text{mazarota mínimo}} = V_{\text{mazarota teórico}}$$

$$V_{\text{mazarota teórico}} = \pi R^2 h$$

$$20,761.24 \text{ cm}^3 = \pi R^2 h$$

$$20,761.24 \text{ cm}^3 = \pi R^2 [2(2R)]$$

$$R^3 = 1,652.13 \text{ cm}^3$$

$$R = 11.82 \text{ cm.}$$

Mediante el segundo criterio del módulo, se tiene que:

$$M_{\text{mazarota teórico}} = \frac{V_{\text{mazarota teórico}}}{S_{\text{mazarota teórico}}}$$

$$2.33 = \frac{\pi R^2 [2(2R)]}{2(\pi R^2) + 2\pi R [2(2R)]}$$

$$R = 5.83 \text{ cm.}$$

De los valores obtenidos por ambos métodos se tomará el mayor, es decir,  $R = 11.82 \text{ cm}$  ( $D_m = 23.64 \text{ cm}$ ), y  $H_m = 47.28 \text{ cm}$  ( $H_m = 2D_m$ ).

- Cálculo del bebedero

En la Fig. 2.11 se observa que la mayor longitud del modelo desde la línea de partición, es decir:  $P$ , en nuestro caso el  $H_{pieza} = 80 / 2 = 40 \text{ cm}$ , anteriormente se determinó que la altura de la mazarota es de  $47.28 \text{ cm}$ , por lo que se define lo siguiente:

$$H_{mazarota} > H_{pieza}$$

$$47.28 \text{ cm} > 40 \text{ cm}$$

$$H_{mazarota} < H_{caja \text{ modelo}}$$

$$H_{caja \text{ modelo}} > 47.28 \text{ cm}.$$

Para poder determinar la  $H_{caja \text{ modelo}}$ , que es la misma altura del bebedero  $h$ , se establece por medio de la Ec. 2.10.

$$h = H_{caja \text{ modelo}} - \frac{P^2}{2C} \quad (2.10)$$

donde:  $H_{caja \text{ modelo}}$ , representa la altura total de la caja de molde que es la suma de la altura del bebedero más la altura de la copa de vaciado;  $P$ , la altura de la pieza medida desde la línea de partición ( $P = 40 \text{ cm}$ ) y  $C$ , la altura total de la pieza ( $C = 80 \text{ cm}$ ) (ver, Fig. 2.11), al sustituir estos valores en la Ec. 2.10 se encuentra la altura del bebedero que debe ser un poco menor que la altura del molde.

$$h = H_{caja \text{ modelo}} - \frac{P^2}{2C}$$

$$h = H_{caja \text{ modelo}} - 10.4 \text{ cm}.$$

De esta forma,  $H_{\text{caja modelo}}$ , debe ser mayor que 48.28 cm y  $h$  debe ser 10.4 cm menor que  $H_{\text{caja modelo}}$ , con esto se puede elegir una altura apropiada, para este caso se elige una altura  $H_{\text{caja modelo}} = 55$  cm.

$$h = 55 - 10.4 \text{ cm}$$

$$h = 44.6 \text{ cm.}$$

Para calcular el diámetro del bebedero se emplea el Número de Reynolds, para asegurar un flujo turbulento, (ver, Ec. 2.11).

$$N_R = \frac{v d \rho}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (2.11)$$

donde:  $N_R$  es el Número de Reynolds;  $v$ , la velocidad del líquido;  $d$ , el diámetro del canal de alimentación;  $\rho$ , la densidad del metal líquido,  $\nu$ , viscosidad cinemática del fluido y  $\mu$ , viscosidad dinámica del fluido.

Tabla 2.3. Viscosidades cinemáticas de metales.

Elemento	Velocidad cinemática, $\text{cm}^2/\text{s}$	Velocidad cinemática, $\text{pulg}^2/\text{s}$
Agua	0.0100	0.0016
Aluminio	0.0127	0.0020
Magnesio	0.0080	0.0012
Cobre	0.0040	0.0006

Se debe considerar que en las fundiciones de piezas metálicas, el  $N_R$  es considerablemente más grande que 2,000 y por consiguiente presenta un flujo turbulento debido a las velocidades altas de vaciado del metal líquido en las aplicaciones reales, por lo tanto, se asume un  $N_R = 10,000$ , para luego encontrar el diámetro que permita un flujo estable.

Estudios del flujo de metales fundidos en procesos de colada comprueban que la velocidad máxima del frente de metal no debe superar el



intervalo de 0.4 a 0.6 m/s (400 a 600 mm/s), esto por la generación de óxidos al romperse la capa protectora que viaja al frente del flujo.

Tomando en cuenta que el material a fundir es una aleación cobre (90%Cu-10%Al), su viscosidad cinemática es de 0.0040 cm<sup>2</sup>/s (0.4 mm<sup>2</sup>/s) (ver, Tabla 2.3).

$$N_R = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

$$10,000 = \frac{(60 \text{ cm/s}) (d)}{0.004 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$d = 0.66 \text{ cm.}$$

Este es el diámetro final del bebedero, que regula el flujo del metal antes de ingresar a la cavidad del molde, si se toma un diámetro menor a este, el flujo del metal puede que sea muy lento y quede obstruido por la solidificación del material en dicha zona.

Utilizando la ley de continuidad de la masa se determina el diámetro del bebedero en la parte superior:

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$V_1 \left( \frac{\pi D_1^2}{4} \right) = V_2 \left( \frac{\pi D_2^2}{4} \right)$$

$$D_1^2 \sqrt{2 (9810) (5)} = 600 \text{ mm/s} \cdot (6.6)^2$$

$$D_1 = 9.13 \text{ mm.}$$

Paso 5: Selección del porcentaje de contracción volumétrica

Para el soporte tubular hecho de una aleación de 90% Cu-10% Al, de la Tabla 2.2 se selecciona su porcentaje de contracción metálica que es de 4%, este valor representa la contracción en forma lineal de cada longitud de la pieza.

#### Paso 6: Redimensionamiento del modelo

Seleccionado el porcentaje de contracción metálica, se utiliza la Ec. 2.12 para el redimensionamiento del modelo.

$$(D_f) = (D_o) + (D_o)(\% \text{ de contracción metálica}) \quad (2.12)$$

donde  $D_o$  representa la dimensión inicial y  $D_f$  la dimensión final de la pieza, esta fórmula se aplica para los diámetros y longitudes.

Una consideración en cuanto al redimensionamiento de las piezas consiste en que para diámetros externos, la dimensión del diámetro en el modelo será mayor de acuerdo al porcentaje de contracción metálica del material, mientras que para diámetros internos la dimensión para el modelo será menor de acuerdo al porcentaje de contracción metálica correspondiente al material seleccionado.

Para el soporte tubular seleccionado, se calculan sus dimensiones utilizando la Ec. 2.12 para obtener así las dimensiones del modelo con el porcentaje de contracción metálica aplicado a las dimensiones del soporte tubular, (ver, Fig. 2.12).

Las dimensiones de la Fig. 2.12 representan la primer etapa del diseño que tendrá el modelo, el siguiente paso será agregar los correspondientes ángulos de salida del modelo del molde, consideraciones de exceso de material para el maquinado en caso de que aplique, pero antes de realizar esto es necesario analizar la geometría de la pieza y evaluar un posible rediseño en los planos que facilite tanto la fabricación del modelo y su extracción del molde de arena, sin comprometer la función principal de la pieza por la cual ha sido diseñada.

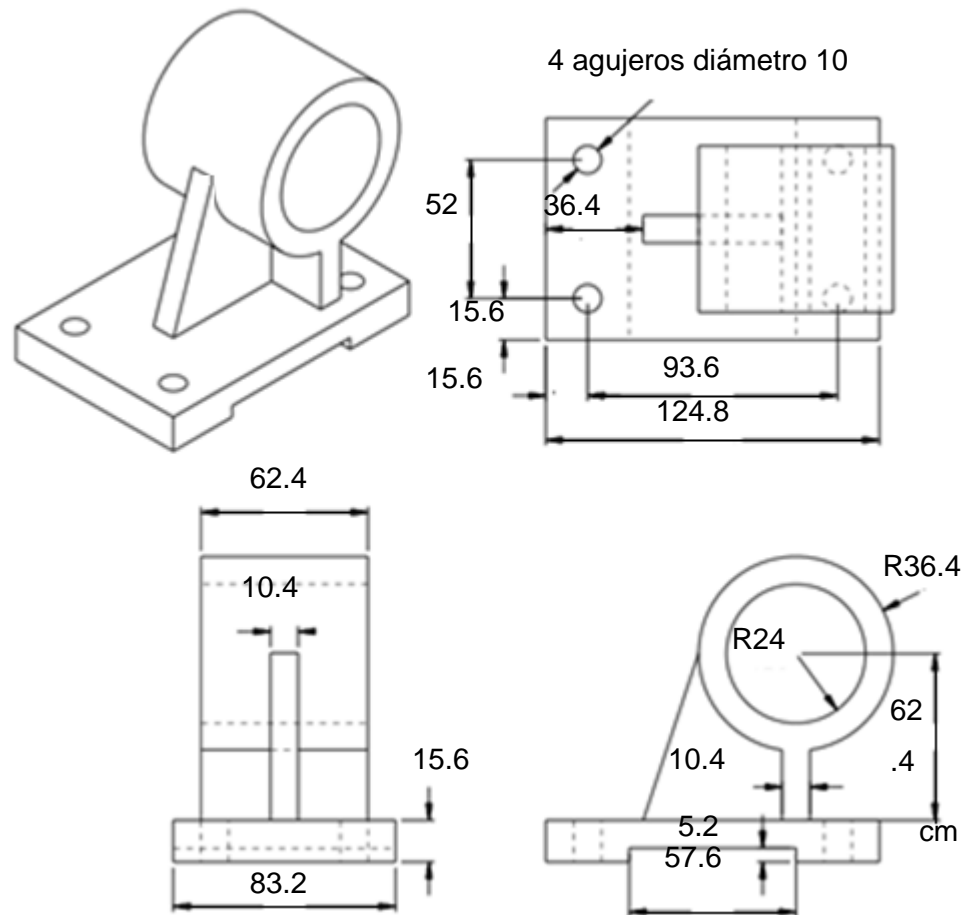


Fig. 2.12. Redimensionamiento del soporte tubular según porcentaje de contracción metálica.

### Paso 7: Ángulos de salida

Los ángulos de salida apropiados para la extracción de los modelos se colocan según la línea de partición, por tal razón la ubicación de la línea de partición es de gran importancia para el diseño del modelo, en la Tabla 2.4 se observan los ángulos apropiados para la extracción para modelos según la altura del mismo.

Para el ejemplo del soporte tubular, de la Fig. 2.10, se observa que la dimensión menor es de 10.4 cm (104 mm) y la dimensión mayor es de 83.2 cm (832 mm), con esta información sobre la pieza se obtiene los ángulos de salida mostrados en la Tabla 2.4, se observa que para las dimensiones de la pieza se

utilizará ángulos de extracción comprendidos entre 1.5 a 4 mm (0.666 a 0.5° respectivamente).

Tabla 2.4. Valores aconsejables para ángulos de salida [2].

Altura del modelo, mm	Valores de salida		Ángulo de salida, °	Ángulo de salida, grados, minutos segundos
	mm	%		
< 40	0.50	1.25	0.025	1'30"
40 a 60	0.75	1.80 a 1.20	0.016	1'00"
60 a 120	1.00	1.70 a 0.80	0.666	40"
120 a 160	1.50	1.25 a 0.90	0.666	40"
160 a 200	1.75	1.10 a 0.90	0.666	40"
200 a 250	2.00	1.00 a 0.80	0.500	30"
250 a 300	2.50	1.00 a 0.80	0.500	30"
300 a 400	3.00	1.00 a 0.75	0.500	30"
400 a 500	3.50	0.90 a 0.80	0.500	30"
>500	4.00	<0.80	0.500	30"

En la Fig. 2.13, se observa el molde inferior con los ángulos de extracción para el soporte tubular, considerando que la línea de partición se ubicó por la mitad de la pieza, los agujeros de la base se fabricarán posteriormente y el del soporte para el tubo mediante un macho, las dimensiones para el macho también se pueden ver en la Fig. 2.13, es de notar que la línea de partición especifica la dirección del desmodelado (Fig. 2.14) y en el número de partes en que se dividirá el modelo, para el caso del soporte tubular el modelo se divide en dos.

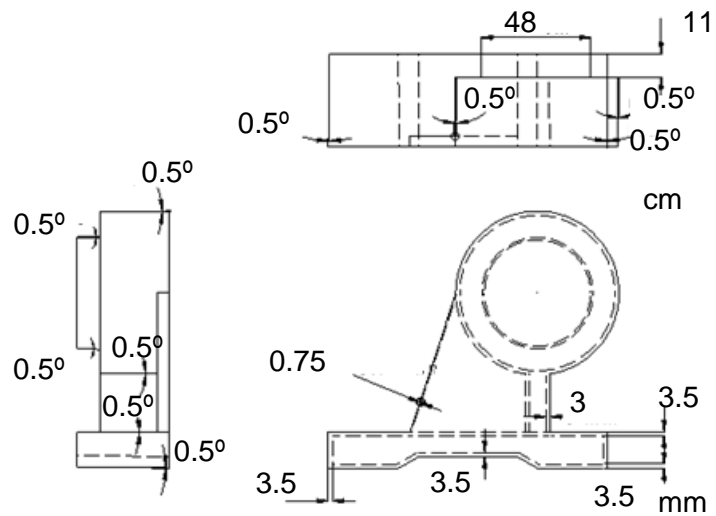


Fig. 2.13. Modelo inferior del soporte tubular con sus ángulos de extracción.

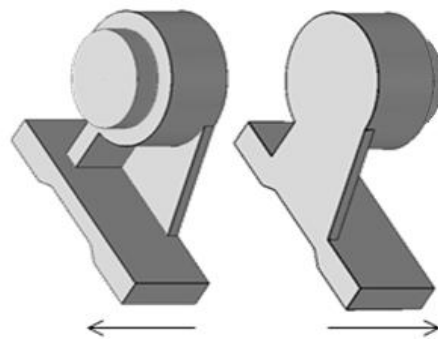


Fig. 2.14. Modelo para el soporte tubular.

#### Paso 8: Material del modelo

Los modelos deben ser resistentes a la compresión, humedad y temperatura, esto de acuerdo con el proceso de moldeo seleccionado, en ocasiones pueden servir para la producción de una sola pieza, para estos casos se utilizan modelos desechables, lo más usual es que el modelo sirva para varias operaciones de moldeo; en este caso se emplean como materiales más comunes la madera, plásticos como el uretano, hasta metales.

Usualmente se fabrican dos semimodelos correspondientes a las diferentes partes del molde que es necesario fabricar.

El tamaño de los modelos debe contemplar los valores de contracción del metal fundido y los excesos de material para procesos de maquinados.

La selección del material para el modelo dependerá de factores como: tamaño y forma de la fundición, precisión dimensional y la cantidad de veces que se quiera utilizar el modelo. En la Tabla 2.5, se aprecian características de diferentes materiales para ser usados en la fabricación de modelos.

Tabla 2.5. Características de los materiales de construcción de modelos.

Característica	Clasificación <sup>a</sup>				
	Madera	Aluminio	Acero	Plástico	Hierro fundido
Maquinabilidad	E	B	R	B	B
Costos	E	B	R	B	B
Resistencia al desgaste	P	B	E	R	E
Resistencia mecánica	R	B	E	B	B
Peso <sup>b</sup>	E	B	P	B	P
Facilidad de reparación	E	P	B	R	B
Resistencia a corrosión <sup>c</sup>	E	E	P	E	P
Resistencia a hinchamiento <sup>c</sup>	P	E	E	E	E

<sup>a</sup> E, excelente; B, bueno; R, regular; P, pobre.

<sup>b</sup> Como un factor en la fatiga del operador.

<sup>c</sup> Por agua

Fuente: D.C. Ekey y W.R. Winter, Introduction to Foundry Technology, New York, McGraw Hill, 1998.

El factor de costos siempre forma parte de la evaluación, considerando que la madera representa una opción viable económicamente y con buenas propiedades, se recomienda para pocos usos en colada, mientras que si se desea un modelo que sea utilizado frecuentemente y por mucho tiempo se recomienda el aluminio y el plástico.

Con el procedimiento descrito anteriormente se elaboró el manual de diseño de modelos para fundición de aleaciones de aluminio en moldes de arena este manual se encuentra en el Anexo A del presente trabajo de graduación.

En este capítulo se presentó el desarrollo de la elaboración de un manual de diseño de modelos para fundición de aluminio en moldes de arena, considerando las recomendaciones de diseño y las variables importantes para evitar defectos en las piezas fundidas; en este contexto, en el siguiente capítulo se contempla el diseño de un manual para la elaboración de moldes de arena.

### **3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ARENA PARA MOLDES**

El diseño y selección de los parámetros óptimos de la arena utilizada en el proceso de colada de fundiciones de aluminio garantiza que en la obtención de la pieza no se presenten defectos como: sopladuras, puntos de alfiler, desprendimientos de arena, costras, penetración de arena y grietas. Además, la importancia de desarrollar un buen diseño y selección de los parámetros adecuados radica en que estos son diferentes para cada metal a colar. Los moldes de arena brindan ventajas en cuanto a factores de construcción como tiempos cortos de preparación, bajo costo de fabricación y reutilización de la arena de los moldes. Un molde debe tener cualidades tales como: correcta refractariedad, buena cohesión entre los granos de arena, adecuada porosidad y permeabilidad que permitan que los gases producidos salgan sin problemas, también se debe tener en cuenta el índice de finura, la cantidad de arcilla utilizada como aglutinante y el porcentaje de humedad.

#### **3.1. ARENAS DE MOLDEO**

Los moldes utilizados en fundición están constituidos esencialmente por arena que contiene cierta cantidad de aglomerante que confiere la suficiente cohesión para la construcción del molde. La arena más empleada es la sílice debido a que cumple para la mayoría de los procesos de fundición y además tiene un precio accesible.

También, existen otros tipos de arenas de moldeo tales como: olivino, cromita, circonio, entre otras [17].

Las características granulométricas, la distribución del tamaño de los granos, su grado de redondez y la naturaleza de la superficie del grano, inciden directamente sobre el comportamiento que el molde desarrolle en el proceso de colada [17].

Las arenas sílices están compuestas de minerales de cuarzo, feldespatos, minerales arcillosos, minerales micáceos; elementos de carbón y de carbonato; y minerales pesados que tienen influencia en las propiedades de la arena. Aun teniendo la presencia de diferentes elementos en la arena, en su mayoría se componen de cuarzo, los efectos de los otros elementos sobre la arena se consideran despreciables [17].

Tabla 3.1. Temperatura de fusión de metales no ferrosos comunes.

Metal no ferroso	Temperatura de fusión, °C
Aluminio	660
Cobre	1083
Bronce	830 a 1020
Latón	930 a 980

La arena apropiada se selecciona de acuerdo al metal que ha sido especificado en los planos técnicos de la elaboración de los modelos. Así, de la Tabla 3.1 registre la temperatura de fusión para el metal a fundir, en el caso del soporte tubular expuesto en el capítulo 2 el cual ha sido hecho de un metal 90%Cu-10%Al, la temperatura de fusión es de 1,083 °C se debe considerar que la temperatura a la cual se entrará en la Tabla 3.2 es la temperatura de colada del metal la cual es ~50 °C mayor a la temperatura de fusión del metal, en el caso del soporte tubular sería una temperatura de 1,133 °C.

Tabla 3.2. Propiedades de las arenas de moldeo [17].

Propiedad	Arena de sílice	Arena de cromita	Arena de circonio	Arena de olivino
Dureza según Mohs	7	5.5	7.5	6.5 a 7
Densidad en g/cm <sup>3</sup>	2.65	~4.5	~4.5	~3.3
Densidad aparente a granel en g/cm <sup>3</sup>	1.3 a 1.5	2.4 a 2.8	2.7 a 2.9	1.6 a 2.0
Temperatura de fusión en °C	1760 a 1780	1800 a 1900	2200 a 2400	1750 a 1850
Dilatación lineal hasta 600 °C en %	1.25	0.4	0.2	0.6



Utilizando la Tabla 3.2 para el caso del ejemplo del soporte tubular expuesto en el capítulo 2, se decide seleccionar una arena sílice ya que cumple con la temperatura de colada del metal [17].

### **3.2. MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE MOLDES**

Los moldes desechables están formados por diversos materiales donde el elemento mayoritario es la arena compuesta por sílice a la que acompañan el polvo de carbón (hulla) y aglomerantes como la arcilla.

Los materiales con los que se fabrican los moldes deben cumplir con las siguientes características [17]:

- a) Alta resistencia a la compresión y a la flexión;
- b) Grado de finura de la arena la cual irá de acuerdo al acabado superficial que se necesite obtener en las piezas fundidas; y
- c) Permeabilidad de la arena adecuada según el metal que se fundirá para facilitar la salida de los gases.

La composición óptima de la arena para los procesos de moldeo se desarrolló a partir de pruebas experimentales realizadas en condiciones de trabajo específicas, hasta encontrar la composición óptima para cada material en particular [22].

Existen composiciones de arenas de moldeo para diferentes aleaciones, las cuales han sido determinadas tomando algunos parámetros empíricos combinados con el método científico [22].

Dichas composiciones pueden ser tomadas como un parámetro inicial, por lo que para que funcionen de forma óptima, deben cumplir con las condiciones de trabajo en que se desarrollaron, siendo esto el punto de partida para desarrollar una composición de arena en condiciones diferentes [22].

Según el metal a colar, la composición de la arena de moldeo es diversa (ver, Tabla 3.3) y depende del tipo de aleación, masa, espesor de la pared y configuración de la pieza [22].

Tabla 3.3. Características y propiedades de las arenas de moldeo en función de su aplicación [18].

Tipo de aleación	Humedad, %	Permeabilidad	Resistencia a la compresión, N/cm <sup>2</sup>	Arcilla y polvo, %	Índice de finura
Aluminio	6.5 a 8.5	7.0 a 13	4.56 a 5.27	12 a 18	225 a 160
Latón – Bronce	6.0 a 8.0	13 a 20	4.92 a 5.62	12 a 14	150 a 140
Cobre – Níquel	6.0 a 7.5	37 a 50	4.56 a 5.62	12 a 14	130 a 120
Fundición gris (Lastre <sup>a</sup> )	6.5 a 8.5	10 a 15	4.21 a 5.27	10 a 12	200 a 180
Fundición gris (complejas)	6.0 a 7.5	18 a 25	4.35 a 5.27	12 a 14	120 a 87
Piezas mediana de fundición gris (arena verde)	5.5 a 7.0	40 a 60	5.27 a 5.62	11 a 14	86 a 70
Piezas mediana de fundición gris (arena sintética)	4.0 a 6.0	20 a 30	5.27 a 5.97	4 a 10	75 a 55
Piezas pesadas de fundición gris (en verde y en seco)	4.0 a 6.5	80 a 120	3.15 a 5.27	8 a 13	61 a 50
Piezas ligeras de fundición maleable	6.0 a 8.0	20 a 30	4.56 a 5.27	8 a 13	120 a 92
Piezas pesadas de fundición maleable	5.5 a 7.5	40 a 60	4.56 a 5.27	8 a 13	85 a 70
Piezas ligeras de acero (arena verde)	2.0 a 4.0	125 a 120	4.56 a 5.27	4 a 10	56 a 45

<sup>a</sup> Fundición gris de baja calidad, de densidad irregular.

Para el ejemplo del capítulo 2 del soporte tubular (90%Cu-10%Al) utilizado en sistemas de tuberías de alta presión sujetos a vibraciones (ver, Fig. 2.1) y de acuerdo a la Tabla 3.3, se concluye que la arena tendrá un porcentaje de humedad de 6.0 a 7.5% y de arcilla con polvo de 12 a 14%.

### 3.3. GRANULOMETRÍA DE LA ARENA

La selección de una correcta granulometría de la arena con la que se fabrican los moldes es de gran importancia ya que esta incide directamente sobre la calidad superficial de la pieza obtenida del proceso de fundición. En las Tablas 3.4 y 3.5, se presentan el índice de finura según el tipo de material a fundir y el tamaño de la arena.

En el caso del soporte tubular (90%Cu-10%Al) de acuerdo a la Tabla 3.4 se selecciona el tipo de material a fundir, en este caso es una aleación ferrosa la cual indica un índice de finura de 70 a 110, mediante la Tabla 3.5 se busca estos valores y se observa que se puede utilizar una arena de granulometría muy fina o fina. Así, se determina usar arena de granulometría fina con un tamaño de grano de entre 0.25 a 0.14 mm, ya que las exigencias del acabado superficial no son tan grandes, y con el uso de esta granulometría se obtendrá una pieza con un acabado superficial liso, no obstante se debe tomar en cuenta el tipo de granulometría, ya que esto afecta el ángulo de salida de la pieza. Así, para una granulometría fina, el ángulo de salida debe ser menor que para una granulometría media o gruesa [19].

Tabla 3.4. Índice de finura según el metal a fundir.

Metales	Índice de finura (según AFS)
Acero	40 a 65
Fundiciones ferrosas	70 a 110
Aleaciones de cobre	100 a 120
Aleaciones ligeras	100 a 140

Tabla 3.5 Índice de finura de las arenas de moldeo.

Finura de la arena	Índice de finura (según AFS)	Grano medio, $\mu\text{m}$
Muy fina	110 a 140	0.14 a 0.11
Fina	70 a 110	0.25 a 0.14
Media	55 a 70	0.30 a 0.23
Gruesa	45 a 55	0.37 a 0.30
Muy gruesa	25 a 45	0.70 a 0.37

Este tamaño de grano se determina experimentalmente de la siguiente manera [19]:

- Determinar el porcentaje de arena (%Q) y de arcilla (%Ar) presente con respecto a la masa total de arena de moldeo.
- Obtener una fracción representativa de ~500 g (una palada).
- Realizar un cuarteo, es decir, luego de revolver bien la arena repartirla en 4 partes iguales, y seleccionar dos cuartos que estén situados en cuadrantes opuestos.
- Mezclar bien cada una de las fracciones, y extraer una muestra de 180 g de arena para realizar el ensayo.
- Ordenar de manera ascendente los tamices del diámetro de malla más fino al más grande (ver, Fig. 3.1).



Fig. 3.1. Forma correcta de colocar los tamices.

- Preparar una serie de 8 recipientes de plástico e identificarlos con los números de los tamices, pesarlas anotando la masa de cada una.

- g) Verter la muestra de arena seleccionada sobre el tamiz superior, procurando no llenar más del 70 % de su capacidad (ver, Fig. 3.2).



Fig. 3.2. Colocación de la arena en los tamices.

- h) Colocar el juego de mallas en la máquina tamizadora durante 15 minutos, el tamiz superior con arena en un 70 % de su capacidad (ver, Fig. 3.3).



Fig. 3.3. Vibrador mecánico o tamizadora.

- i) Luego de haber finalizado el tiempo, colocar las porciones retenidas en cada malla en recipientes teniendo el cuidado de dejar limpias las mallas, utilizar el cepillo y/o brocha (ver, Fig. 3.4).



Fig. 3.4. Limpieza de los tamices.

- j) Pesar las cantidades contenidas en los recipientes plásticos.
- k) Registrar los datos, por medio de la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Registro de datos obtenidos durante el ensayo.

Número de tamiz	Cantidad retenida (Q), kg	%Q	Multiplicador (M)	Q · M
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
Fondo				

Para el cálculo de resultados se realiza lo siguiente [19]:

Después de haber finalizado el proceso de tamizado, se toma del registro la cantidad de arena retenida en cada tamiz (q) (ver, Tabla 3.6), se efectúa la operación con relación al peso inicial ( $P_o$ ) de la arena mediante la Ec. 3.1. [19].

$$\%Q_1 = \frac{q_1}{P_o} \cdot 100, \quad \% Q_2 = \frac{q_2}{P_o} \cdot 100, \quad \%Q_n = \frac{q_n}{P_o} \cdot 100. \quad (3.1)$$

La Norma americana usa los números: 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270 y resto, que indican el número de hilos por pulgada lineal. Dicha norma le ha asignado para cada dimensión de malla un coeficiente multiplicador

(M): 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 y 300 para cada malla respectivamente por medio del cual se llega a un número convencional [19]:

Se realiza el producto de cada peso retenido por su correspondiente coeficiente multiplicador (M) correspondiente al tamiz en cuestión y se suman los resultados (Ec. 3.2), colocar estos valores en la Tabla 3.6:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (Q \cdot M)_i. \quad (3.2)$$

Luego se divide la suma de productos por el porcentaje total de la arena (Ec. 3.3) obteniéndose así el número de finura media de la arena examinada, que en este caso particular debe ser de 70 a 110:

$$f = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(Q \cdot M)_i}{(Q\%)_i}. \quad (3.3)$$

### 3.4. AGLOMERANTES PARA ARENAS DE MOLDEO

El molde debe cumplir dos características aparentemente contrapuestas que tiene que ver con los aglomerantes de la arena. Por un lado debe ser lo suficientemente rígido como para resistir el flujo del metal en su interior y por otro lado, lo suficientemente frágil como para que se fragmente una vez cumplida su función [17].

Algunos aglomerantes tales como las arcillas son las más empleadas, estas son roca generalmente plásticas, constituida esencialmente por silicatos de aluminio hidratados [17].

Existen tres tipos principales de arcillas que se emplean con las arenas de moldeo, las cuales son la bentonita, la cual resulta de residuos de erosión de cenizas volcánicas; estas se dividen en sódicas y cálcicas; la caolinítica que tiene propiedades variables de acuerdo a su arreglo estructural y presenta baja

capacidad de absorción de iones; y, las arcillas ílíticas: la cual es empleada como aglomerante de arenas de moldeo, mezcladas con otras arcillas las cuales presentan baja refractariedad y no siempre tienen propiedades aglomerantes [23].

La selección de un aglomerante se realiza según las necesidades que debe cumplir el molde, como por ejemplo la bentonita sódica la cual se utiliza en arenas de moldeo para metales de alto punto de fusión y alta tensión superficial (hierro fundido, acero y piezas grandes); la bentonita cálcica que se emplea para metales no ferrosos, hierros maleables y arenas de machos; y la caolinítica que se usa para metales de bajo punto de fusión y baja tensión superficial [23].

La función de las arcillas es dar al sistema arena-arcilla-agua las características plásticas de la mezcla, generalmente son escogidas de acuerdo a las propiedades que le confieren a las arenas de moldeo. Para la selección de las arcillas se procede de dos formas:

En un molde patrón se hace una mezcla de arena-arcilla-agua y se determina su resiliencia, el cual es un índice convencional que representa el límite de trabajo por deformación de la arena. Se obtiene durante el ensayo de deformación de la arena. A mayor resiliencia, corresponde una mejor arcilla.

La segunda forma es fijando una determinada resiliencia y por prueba se determina la arcilla mínima de la mezcla que supere el valor de resiliencia fijado [23].

Otros aglomerantes utilizados es el polvo de madera (aserrín) el cual es adicionado para atenuar efectos de expansión, mejorar la compactabilidad y facilitar el desmoldeo por disminución de la resistencia residual. Por otro lado, el polvo de carbón constituye uno de los elementos que el fundidor usa para mejorar el acabado superficial de las piezas fundidas y atenuar los defectos provenientes de la expansión térmica de la arena sílice; y el óxido de hierro el cual se utiliza para la confección de filtros de escorias (usado en el canal de colada para evitar la introducción de impurezas en la pieza) [23].



Para el ejemplo que se realiza se elige una bentonita cálcica porque se está trabajando con una fundición no ferrosa y porque se encontrará a temperaturas de colada por debajo de los 1,000 °C.

Una vez seleccionado el aglomerante, se debe realizar una prueba a la arena de moldeo para determinar la cantidad de aglomerante (bentonita) que está presente inicialmente, para luego, ajustar el valor del aglomerante hasta su valor indicado. El procedimiento experimental que se utiliza para determinar el contenido de arcilla en las arenas de moldeo es por medio del ensayo de azul de metileno, así:

Las etapas a considerar cuando se realiza este ensayo son las siguientes [25]:

A) Preparación de la muestra de ensayo: tome una muestra representativa de la arena que se quiere evaluar y séquela hasta masa constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C y se tamiza por la malla de 75  $\mu\text{m}$  (Nº 200), el pasante se utiliza para la prueba obteniendo una masa superior a 10 g (ver, Fig. 3.5) y el retenido se descarta.



Fig. 3.5. Balanza de precisión donde se pesa la muestra de arena.

B) Preparación de la solución colorante azul de metileno: pese un gramo de azul de metileno y disuélvalo en 200 ml de agua destilada para producir la solución colorante, de tal manera que cada ml de solución contenga 5 mg de azul de metileno, una vez preparada la solución (ver, Fig. 3.6), deberá conservarse protegida de la luz y emplearse antes de 28 días.



Fig. 3.6. Solución de azul de metileno preparada.

- C) Determinación del azul de metileno: el procedimiento para determinar la cantidad de azul de metileno en la muestra de arena se hace mediante los siguientes pasos:
- Coloque un filtro de papel sin cenizas de tamaño de poro de  $8\ \mu\text{m}$  sobre el vaso de precipitados de 500 ml posicionado boca arriba.
  - Coloque la cantidad de  $10 \pm 0.05\ \text{g}$  de material pasante del tamiz  $75\ \mu\text{m}$  (Nº 200), secado hasta masa constante, en un segundo vaso de precipitado tipo griffin de 500 ml.
  - Adicionar 30 ml de agua destilada (ver, Fig. 3.7). y batir con la varilla de vidrio hasta tener una lechada (ver, Fig. 3.8).



Fig. 3.7. Procedimiento para la obtención de la lechada.

- Llene la bureta con la solución de colorante de azul de metileno, procurando previamente que la solución este bien mezclada, al finalizar el ensayo se coloca la parte sobrante en un frasco color café envuelto con papel de aluminio en un lugar alejado de la luz.



Fig. 3.8. Mezcla del agua destilada con la arena de muestra.

- e) Agregue con la bureta en cantidades de 0.5 ml de solución de azul de metileno al vaso que contiene la lechada y agitar durante un minuto (ver, Fig. 3.9).



Fig. 3.9. Mezcla de la solución de azul de metileno con la lechada.

- f) Transcurrido un minuto realice la prueba de coloración, mientras los sólidos están aún en suspensión, remueva una gota del líquido con la varilla de vidrio y coloque la gota sobre el papel filtro (ver, Fig. 3.10).

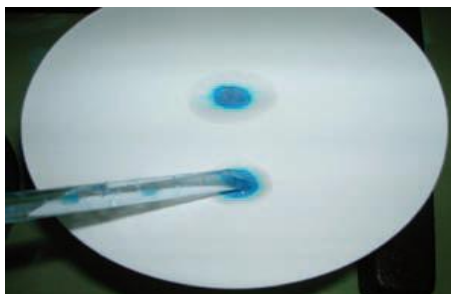


Fig. 3.10. Prueba de coloración.

- g) La prueba de coloración puede dar como resultado una mancha azul oscuro sobre el papel filtro, rodeada de una aureola incolora, Si ello ocurre, se continúa con el ensayo adicionando a la lechada incrementos de 0.5 ml de solución de azul de metileno, agitando durante un minuto para cada incremento y realizando de nuevo la prueba en el papel filtro hasta que se observe el aro azul alrededor de la gota (ver, Fig. 3.11).
- h) El ensayo se da por finalizado si la aureola formada permanece durante 5 min; es decir, si en el segundo hasta el quinto minuto desde la última adición de solución colorante continúa apareciendo la aureola azul claro con un espesor de ~1mm. Para ello, en el minuto 2 se efectúa una segunda prueba de coloración, en el minuto 3 se efectúa la tercera, etc.
- i) Puede ocurrir que la aureola desaparezca al efectuar la segunda, tercera o cuarta prueba de coloración (minutos 2, 3 o 4). En ese caso, es necesario volver a adicionar otros 5 ml, reiniciando el ensayo.
- j) Si la aureola aparece en la cuarta prueba pero desaparece en la quinta y última, entonces es necesario reiniciar el ensayo, pero con la salvedad de que se añaden 0.2 ml en lugar de 0.5 ml, puesto que si la aureola ha permanecido durante 4 min se debe a que la arena se encuentra casi en condiciones de saturación por absorción de solución colorante.
- k) El ensayo se da por finalizado si la prueba de coloración presenta una aureola de color azul más claro de ~1 mm de espesor durante los 5 min posteriores a la última adición de solución colorante, habiendo efectuado su comprobación en cada unidad de tiempo. Se anota el volumen de colorante añadido.

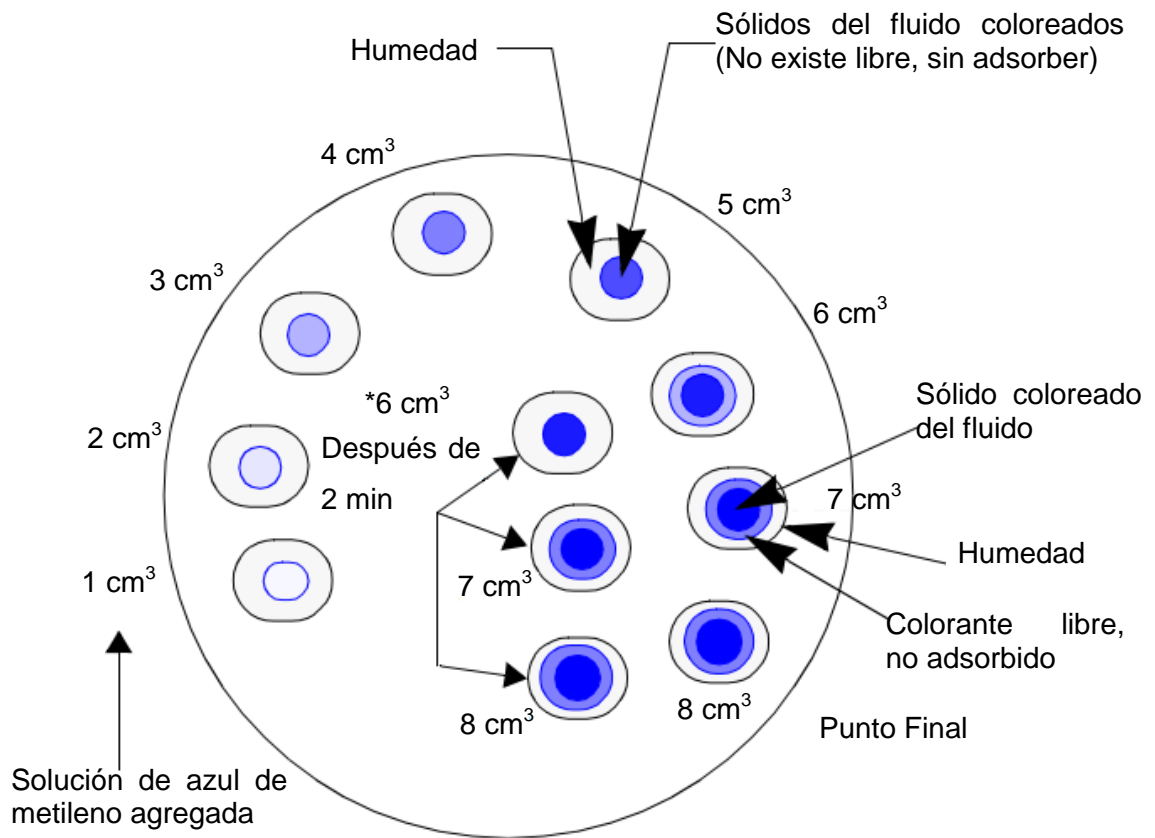


Fig. 3.11. Ensayos de titulación con azul de metileno, por gotas.

Para el cálculo de resultados

El valor de azul de metileno, se expresa en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica 0.2 mm y se calcula con la Ec 3.4 [25]:

$$CAM = \frac{AMT}{Q}. \quad (3.4)$$

Cálculo de Bentonita equivalente, lb/bbl.

$$B_{eq} = 5 \cdot \left( \frac{CAM}{Q} \right). \quad (3.5)$$

Cálculo de Bentonita equivalente, kg/m<sup>3</sup>.

$$B_{eq} = 2.85 \cdot (B_{eq}) \quad (3.6)$$

donde: CAM: Capacidad de azul de metileno,

AMT: Azul de metileno requerido para la titulación, ml;

Q: Muestra de arena ensayada, ml; y

B<sub>eq</sub>: Bentonita equivalente.

Cuando se realiza el molde de fundición por primera vez de manera general se utiliza un 93% en peso de arena nueva y un 7% en peso de bentonita en el momento cuando se reutiliza la arena de moldeo, ya que éste ha sido afectado por el calor del metal que se funde, se producen algunos fenómenos que no permiten que los materiales que componen la arena vuelvan a producir las mismas propiedades cuando se las recirculan para posteriores aplicaciones. Esta es la razón por la que se deben determinar cuáles son los aditivos necesarios que deben ser introducidos en la arena reutilizada para que ésta produzca las propiedades técnicas necesarias [24].

Considerando que los componentes básicos de una arena de moldeo son, arena de sílice, bentonita y agua, cuando la arena entra en contacto con el metal en estado líquido la bentonita sufre de degradación y la crepitación de algunos granos de sílice [24].

Mediante diferentes pruebas experimentales realizadas a varias muestras de arena se afirma que el índice de finura se incrementa de 63 a 70.56 para la arena que ha sido reutilizada, pasando del tamaño medio de la arena de 0.253 a 0.195 mm, esto es un 23% de disminución. Los finos se incrementan en 0.6% y la arcilla AFS sube en un 5.4%. La degradación de la arena alcanza un 9.6% en la primera reutilización [24]

Por lo tanto, para contrarrestar este efecto se utiliza a partir de la segunda colada un 20% en peso de arena reutilizada, un 78.3% en peso de arena nueva y de bentonita un 7% en peso con respecto a la arena nueva y un 0.50% en peso respecto a la arena reutilizada. También, se demostró que las propiedades de la arena se mantienen constantes después de la segunda reutilización por lo que la adición de arena reutilizada y nueva no cambian de acuerdo al número de veces que se ha utilizado la arena de moldeo [24].

### 3.5. HUMEDAD EN LA ARENA DE MOLDEO

La humedad en la arena de moldeo es de vital importancia ya que ésta le comunica a la arena la propiedad de la plasticidad; la humedad de una arena de moldeo es tan esencial como la sustancia arcillosa misma y existe en dos formas: la humedad libre y la humedad absorbida; la primera humedad que se ha mencionado es la que puede eliminarse por secado a 110 °C y la humedad absorbida es la que sólo puede desaparecer a temperaturas considerablemente más altas, y ésta depende de la naturaleza particular de la arcilla.

Si la arcilla pierde su humedad libre, se convierte en una masa dura y sin plasticidad, pero con solo humedecerla, esta puede recuperar las propiedades que ha perdido debido al aire del ambiente o al calentamiento que produce el metal caliente. Cuando, en cambio se calienta la arcilla a una temperatura mayor que 110 °C, pierde la humedad absorbida, ya que no vuelve a recuperar su plasticidad por humectación posterior; es decir, que la arcilla se ha quemado, esto ocurre en la arena que forma la cara de un molde cuando se vierte el metal fundido y éste hace contacto con la arena; el calor arrastra toda la humedad de la arcilla aglutinante y descompone cualquier materia orgánica de la arena, ya que la conducción del calor en el molde de arena es prácticamente nula, el efecto del metal líquido es la destrucción del poder aglutinante de la arcilla la cual solo alcanza un espesor muy pequeño, que depende del tamaño y sección de la pieza colada.

El porcentaje recomendado de humedad se obtiene de la Tabla 3.2 en donde se observa que este depende del tipo de aleación que se va a fundir; así, para una aleación de cobre su porcentaje de humedad debe ser del 6 a 7.5%. Si una arena de moldeo tiene bajo porcentaje de humedad esto conlleva a la posibilidad de arrastre de arena e inclusiones de esta en la pieza colada. Es de tener especial cuidado al moldear en arena verde ya que si el contenido de humedad es mayor, el volumen de vapor producido dentro del molde será más grande y mayor será el peligro de sopladuras o de mal acabado superficial de la pieza por oclusión de arena desprendida del molde.

El procedimiento para determinar el contenido de humedad, se listan a continuación [26]:

- a) Determinar y registrar la masa de un recipiente limpio, seco (ver, Fig. 3.12) y su tapa (esta última, se usará cuando el ambiente sea muy caluroso y se desee evitar que la mezcla pierda cierto contenido de humedad durante el proceso de preparación de las muestras).



Fig. 3.12. Registro del peso de la muestra con su recipiente.

- b) Se escoge una muestra de arena para el ensayo que sea representativa de acuerdo a la Tabla 3.7 [26]:

Tabla 3.7. Selección de la muestra de arena.

Tamaño máximo de partícula (pasando 100%), mm	Tamaño de tamiz estándar	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de humedad, reportado a $\pm 0.1\%$	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de humedad, reportado a $\pm 1\%$
2 mm o menos	Nº 10	20 g	20 g <sup>A</sup>
4.75	Nº 4	100 g	20 g <sup>A</sup>
9.50	3/8 pulg	500 g	50 g
19.00	3/4 pulg	2.5 kg	250 g
37.50	1 ½ pulg	10 kg	1 kg
75.00	3 pulg	50 kg	5 kg

<sup>A</sup> Para ser representativo, no se deben usar menos de 20 g.

Registre el peso de la muestra de arena, (ver, Fig. 3.13).

La cantidad mínima de masa usada, puede necesitar ser incrementada para poder obtener los dígitos mínimos necesarios para la masa de agua cuando se reporten contenidos de agua  $\sim 0.1\%$ .



Si la muestra de arena es tal que pueda ser manipulada y manejada sin pérdida significativa de su contenido de humedad y segregación, debe ser mezclado completamente, seleccionando luego una porción representativa según la Tabla 3.7, si la muestra no permite un fácil mezclado, se aconseja obtener 5 grupos aleatorios de la arena, mezclarlos bien.



Fig. 3.13. Peso de la muestra representativa.

- c) Se coloca la muestra de arena húmeda en un recipiente; se coloca la tapa firmemente, y se determina el peso del recipiente con la muestra, usando una balanza apropiada (ver, Fig. 3.14). Se registra este valor.



Fig. 3.14. Peso de la muestra húmeda junto con su recipiente.

- d) Se retira la tapa (si fue usada) y se coloca el recipiente con la muestra húmeda en el horno para secarla hasta obtener una masa constante. El horno secador se mantiene a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C (ver, Fig.

3.15). El tiempo requerido para obtener una masa constante puede variar dependiendo del tipo de muestra, tamaño del espécimen, tipo de horno y su capacidad, y otros factores. Para facilitar el secado al horno de muestras de ensayo muy grandes, éstas deben ser colocadas en recipientes que tengan un área superficial amplia (bandeja) y separada en pequeños grupos.



Fig. 3.15. Colocación de la muestra húmeda en el horno secador.

- e) Después que la muestra se haya secado a masa constante, se remueve el recipiente del horno y se coloca la tapa. Se deja que la muestra y el recipiente se enfríen a la temperatura ambiente, o hasta que el recipiente pueda ser manejado fácilmente con ambas manos y la operación de pesaje no esté afectada por corrientes convectivas. Se determina la masa del recipiente y de la muestra secada en el horno usando la misma balanza que se usó en las operaciones descritas en los literales a) y c). Se registra este valor.
- f) Si el recipiente no tiene tapa, la muestra se pesa inmediatamente para que la temperatura del recipiente sea tal que la operación del pesaje no sea afectada por corrientes convectivas o después de enfriarlo en un secador.

Con los datos obtenidos, se procede a determinar el contenido de humedad mediante la Ecuación 3.7 [26]:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \cdot 100 \quad (3.7)$$

donde: % de Humedad: porcentaje de agua presente en la muestra de arena o humedad;

$W_1$ : Masa del recipiente y del espécimen húmedo, g; y

$W_2$ : Masa del recipiente y del espécimen seco, g.

El proceso para obtener el porcentaje de humedad en la arena que se utiliza consiste en tomar una muestra de arena y determinar su porcentaje de humedad inicial, si el valor es menor al deseado, se agrega agua en pequeñas cantidades y luego se realizan pruebas para determinar el nuevo porcentaje de humedad, esto se realiza hasta llegar al valor deseado, en caso de tener un exceso de humedad, se debe secar la arena al sol hasta disminuir la humedad y luego se sigue con el procedimiento antes descrito.

### **3.6. ARENA PARA MACHOS**

Para el ejemplo del soporte tubular (90% Cu-10% Al) este requiere de un macho para generar la cavidad. Así, a continuación se presentan las características que deben tener las arenas para la fabricación de machos; de forma general esta decisión se toma en base al nivel de producción de las piezas. Se toma en consideración hacer el macho con el proceso llamado “al aceite”, esto debido a que servirá para fundir pocas piezas y requiere poca inversión, este macho al aceite tiene una gran facilidad de preparación, no adquieren mayor humedad después de fabricados, desprenden pocos gases durante la colada, además tienen una gran gama de posibilidades en cuanto a las propiedades mecánicas, ya que se puede variar fácilmente los porcentajes de aglutinantes y aglomerantes [20].

Este proceso de fabricación de los machos consiste en elaborar una mezcla de arena con aceite, con la cual se hacen los machos que son

desmoldados y apoyados en soportes para ser llevados a una estufa donde se les hace el curado o endurecido [20].

Generalmente para este proceso se utiliza con más frecuencia el aceite de lino o linaza, aunque se pueden utilizar casi toda clase de aceites vegetales como de maíz, soya y algodón; aceites animales, como el de pescado y sardina; y minerales, es decir, derivados del petróleo. Con el objetivo de minimizar los costos se tiene la costumbre de reemplazar parte del aceite de lino por otros aceites y actualmente se ha puesto en práctica combinarlo con resinas sintéticas (fenol-formol) y oxidantes (bióxido de manganeso) con el fin de dar mejores propiedades al macho [20].

De hecho es el aceite de lino el que mejor resistencia en seco proporciona en relación con el porcentaje utilizado por lo que se emplea del 2 al 4% (a mayor índice de finura de la arena, mayor porcentaje del aglomerante), en este caso como el índice de finura es alto se recomienda utilizar un 4%, en mezclas con 0.75 a 1.5% de dextrita y 1 a 2% de agua. Como el aceite produce una muy baja resistencia en verde, entonces se recurre a la dextrita, que si la produce permitiendo la manipulación del macho hasta cuando éste haya recibido el endurecimiento [20].

Es muy importante tener en consideración que el aceite y las arcillas (caso general con la bentonita) al unirse reaccionan produciendo una especie de jabón el cual no tiene poder aglutinante y que por lo tanto se hace necesario disponer de una arena sílice, lavada y exenta de arcillas con el fin de evitar pérdidas por el mismo desperdicio del aceite, ya que los machos tendrían bajas propiedades [20].

En la preparación de las mezclas de arena para machos se procede de forma semejante a la preparación de arenas sílico-arcillosas sintéticas para moldeo: inicialmente se agrega a la arena sílice, los productos secos (dextrita) dejando homogenizar la mezcla durante ~2 min, para proceder a introducir el aceite, dejar mezclar de 10 a 15 min y se cuida de no elevar la temperatura de la mezcla. Así, una vez que se ha preparado esta mezcla se debe depositar en

recipientes tapados o cubiertos con telas o plásticos para evitar que se sequen y comiencen a endurecerse [20].

Generalmente los machos elaborados al aceite de lino se cosen entre 185 a 210 °C hecho que acelera la oxidación para dar una buena resistencia “en seco”. La utilización de otros aceites o la necesidad de obtener otras propiedades en el macho hacen que ese cocido se haga a ~300 °C [20].

Teniendo la arena preparada, se debe elaborar un molde con la forma positiva de la cavidad de la pieza (ver, Fig. 3.16), para luego rellenar dicho molde de machos con la arena de machos, se extrae del molde, se coloca en el molde inferior hecho para la generación de la pieza (ver, Fig. 3.17), éste se cierra para luego proceder con la colada. El diseño del molde y modelo para la elaboración de machos, se desarrollará a mayor detalle en futuros trabajos de graduación.

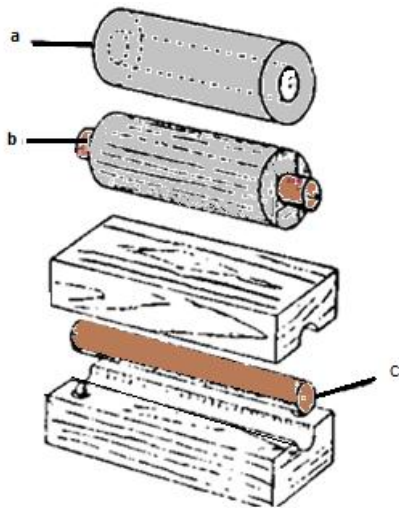


Fig. 3.16. Elaboración de macho.

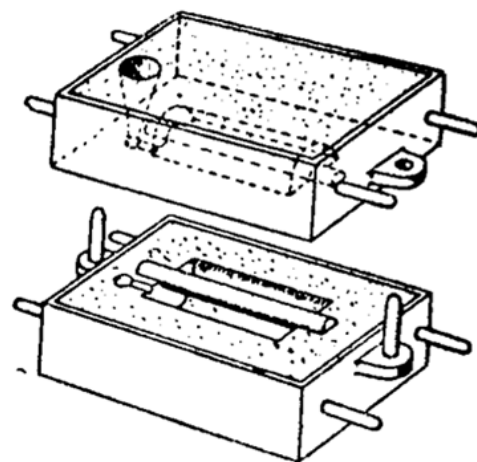


Fig. 3.17. Posición del macho en el molde de fundición.

En este capítulo se ha desarrollado un manual para la elaboración de moldes de arena, con lo cual se puede proceder con el capítulo siguiente, que contemple la implementación de los manuales de diseño de modelos y moldes de arena para fundición de aluminio, presentados en los anexos, los cuales han sido desarrollados en los capítulos 2 y 3, respectivamente.

## **4. IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE LOS MANUALES**

Este capítulo presenta el desarrollo de la metodología planteada en los manuales elaborados en este trabajo de graduación; así mismo, se describen los pasos que permitirán obtener distintos acabados superficiales, como parte de la investigación sobre la influencia de la granulometría y el acabado superficial en las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas por fundición en moldes de arena, estos manuales son para el Diseño de modelos y Manual de selección de arenas para fabricación de moldes de arena, los cuales se encuentran como Anexo A y Anexo B, respectivamente.

### **4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente se cuenta con un horno de crisol en condiciones operativas para fundición de metales y aleaciones de aluminio, en el cual se necesita disponer de manuales para el diseño de modelos y manuales para la fabricación de moldes. Además, recientemente el personal de la Escuela de Ingeniería Mecánica adquirió una máquina de ensayos de fatiga a flexión rotativa, con el objetivo de realizar investigaciones sobre las propiedades mecánicas de los materiales, lo cual brinda la oportunidad de realizar los ensayos a las piezas fundidas en moldes de arena y cuantificar la importancia de controlar la granulometría de la arena de moldeo en el proceso de fundición.

Es necesaria la elaboración de manuales de diseño para modelos y moldes de arena para la fundición de aleaciones de aluminio, que faciliten la información referente al diseño y construcción de modelos y moldes para que permitan obtener piezas mediante el proceso de fundición en arena de forma eficiente.

## 4.2. APLICACIÓN DE MANUALES PARA EL DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIÓN EN MOLDES DE ARENA

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el uso del manual: Diseño de modelos para fundición de aleaciones de aluminio en moldes de arena, el cual se encuentra en el Anexo A de este trabajo de graduación.

Paso 1: Elaboración de los dibujos técnicos de la piezas

Considerando el objetivo de generar probetas mediante fundición para su posterior ensayo en la máquina de fatiga a flexión rotativa, sus dimensiones se tomaron según las especificaciones del manual de la máquina de ensayo a flexión rotativa las cuales se presentan en la Fig. 4.1.

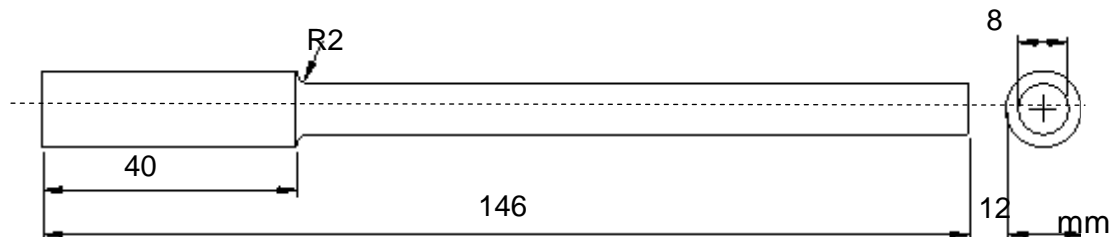


Fig. 4.1. Dimensiones de las probetas para el ensayo en la máquina de fatiga a flexión rotativa.

El material con el cual se construirán las probetas ha sido obtenido de los marcos de ventanas solares recicladas, el cual es una aleación de aluminio AA6061 que contiene un porcentaje de aluminio del 97.1%.

Paso 2: Evaluación de planos

La evaluación de los planos del modelo consiste en evaluar si las partes del mismo facilitan obtener piezas mediante el proceso de fundición en moldes de arena, asegurando que el metal fundido pueda llegar hasta las partes más alejadas del modelo, bajo esta premisa, se evalúa la geometría de las probetas y se concluye que éstas no contienen partes que requiera un rediseño, ya que el flujo del metal fundido no se ve obstruido, tampoco se generan turbulencias

que puedan dañar el molde, también no hay cambios bruscos de dirección del flujo del metal fundido.

### Paso 3: Ubicación de la línea de partición

Se aprovechó la simetría de las probetas para seleccionar la ubicación de la línea de partición de forma tal que la línea de partición sea a lo largo de la longitud de las probetas (ver, Fig. 4.2), de esta forma, se aprovecha la ventaja que proporcionan las figuras circulares las cuales al ser divididas simétricamente facilitan su extracción del molde, dicho de otra forma, colocar la línea de partición tal como se observa en la Fig. 4.2, hace que no sea necesario el uso de ángulos de extracción, la línea de partición para las probetas mostrada en la Fig. 4.2, divide a la pieza en dos partes iguales.

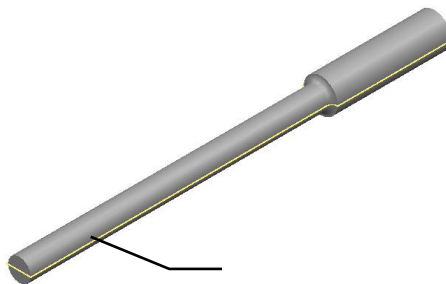


Fig. 4.2. Línea de partición para las probetas de aluminio AA6061.

### Paso 4: Diseño de sistemas de alimentación

Los elementos que forman parte de los sistemas de alimentación son: la mazarota, el bebedero, la copa de vaciado, la base del bebedero y los canales de alimentación. En la Fig. 4.3 se presenta la propuesta para la ubicación de los sistemas de alimentación, para esta disposición de los sistemas de alimentación se consideró la línea de partición definida en el paso anterior.



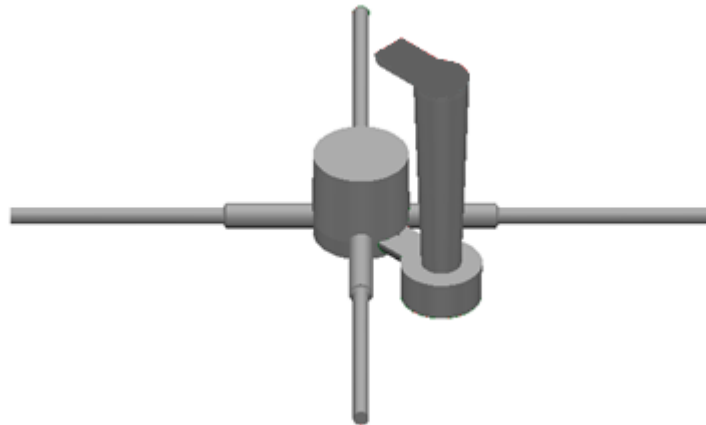


Fig. 4.3. Disposición de los sistemas de alimentación.

Las Figs. 4.4 y 4.5 representan la mitad superior e inferior respectivamente del modelo a partir de la línea de partición, estas partes se fijarán sobre una placa de moldeo, el número de modelos de las piezas que se presentan en las Figs. 4.3 a 4.5 solo son demostrativas, ya que el número preciso de piezas se calcularán posteriormente.

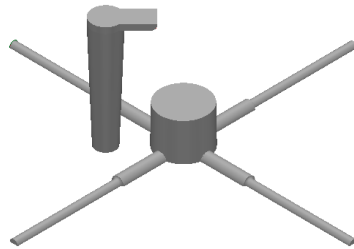


Fig. 4.4. Modelo superior.

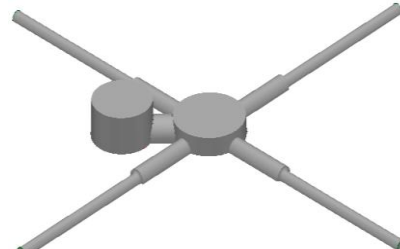


Fig. 4.5. Modelo inferior.

A continuación se presentan los resultados del diseño de las diferentes partes que forman el sistema de alimentación del molde.

#### Diseño de la mazarota

Para diseñar la mazarota de acuerdo al criterio del volumen o primer criterio, se determina el volumen de la pieza y luego el volumen mínimo de la mazarota de la siguiente manera:

$$V = \pi R_1^2 L + \pi R_2^2 L$$

$$V = 50,221.20 \text{ mm}^3$$

$$C = 7.1 \%$$

$$K = 2.$$

Sustituyendo los valores en la Ec A.2 del Manual A, se tiene el valor del volumen mínimo de la mazarota.

$$V_{\text{mazarota mín}} = 7,131.41 \text{ mm}^3$$

De acuerdo al segundo criterio o criterio del módulo, (ver, Ec. A.3), se debe determinar la superficie de contacto del modelo y el molde, tal como se presenta a continuación:

$$S_1 = \pi (8.56) + 113.53 (26.89) = 3,079.71 \text{ mm}$$

$$S_2 = \pi (12.85 - 8.56) + \pi (12.85) + 42.84 (40.37) = 1,783.29 \text{ mm}$$

$$S = S_1 + S_2 = 4,863 \text{ mm}$$

$$M_{\text{pieza}} = \frac{50,221.20}{4,863} = 10.33.$$

Según el criterio del volumen:

Como primer paso se debe definir el tipo de mazarota la cual en este caso será cilíndrica con una relación  $H = D$ , sustituyendo en la Ec. A.2, considerando que  $h = \emptyset = 2R$ .

$$M_{\text{mazarota teórico}} = \frac{\pi R^2 h}{2 \pi R + 2 \pi R h}$$

$$R = 25.29 \text{ mm.}$$

Según el criterio del módulo de enfriamiento, utilizando la Ec. A.5 y despejando para el radio de la mazarota, se tiene:

$$R = 10.43 \text{ mm.}$$

Como se explicó anteriormente se toma el R de mayor valor, es decir,  $R = 25.29 \text{ mm}$  por lo que  $D = 50.58 \text{ mm}$ ; ya que  $H = D$ ;  $H = 50.58 \text{ mm}$ , más

adelante, se presenta el dibujo técnico de la mazarota, considerando los ángulos de extracción apropiados a partir de la línea de partición.

#### Diseño del bebedero

El diseño del bebedero involucra tanto las dimensiones de la caja de moldeo y las condiciones óptimas de fluidez para el metal fundido.

Asumiendo un  $H_{\text{caja}}$  de molde de 120 mm y  $h_i$  de 5 mm (copa de vaciado), sustituyendo en Ec. A.11.

$$h = 120 - \frac{\left(\frac{12.85}{2}\right)^2}{2\left(\frac{6.43}{2}\right)} = 113.58 \text{ mm.}$$

El valor  $h = 113.58$  mm representa el valor de la altura del bebedero, este valor considera la altura máxima del modelo a partir de la línea de partición.

Para determinar el diámetro del bebedero (base), se considera que para el buen llenado de las cavidades del molde es necesario que el metal fundido ingrese a una velocidad suficientemente rápida, para evitar obstrucciones por la solidificación de metal fundido, para ello se usa el Número de Reynolds, (ver, Ec A.12), en el flujo turbulento con un valor de 10,000.

$$10,000 = \frac{60 \cdot d}{0.0127}$$

$$d = 21.2 \text{ mm.}$$

Teniendo en cuenta que el caudal en el punto 1 (punto superior) es igual en el punto 2 (punto inferior).

$$v_1 D_1^2 = v_2 D_2^2$$

$$v_1 = \sqrt{2 g h}$$

$$D_1^2 = \frac{600 (21.2^2)}{\sqrt{2 (9810) (5)}}$$

$$D_1 = 29.34 \text{ mm.}$$

En la Fig. 4.6 se presentan las dimensiones obtenidas del bebedero, junto a la copa de vaciado, la altura del bebedero se consideró asumiendo una altura apropiada de la caja de moldeo, asegurando que las piezas estén completamente cubiertas por la arena de moldeo.

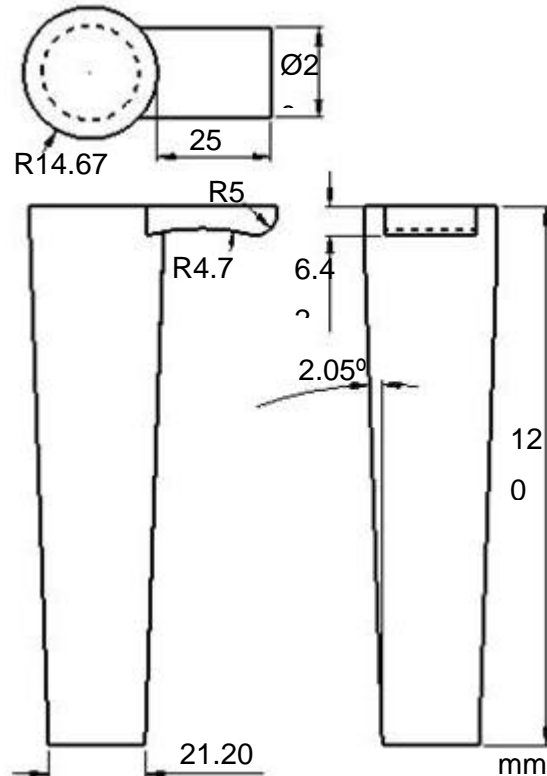


Fig. 4.6. Dimensiones del bebedero y copa de vaciado.

#### Diseño de los canales de alimentación

Para el diseño del canal de alimentación semicircular, se aprovechará su geometría, ya que de esta forma no se necesitan ángulos de extracción para el canal de alimentación. Para dimensionar los canales de ataque y canales de alimentación se utiliza la ecuación A.15 (ver, Anexo A diseño de sistemas de alimentación), así:

$$D_3 = 2 D_2 = 2 (21.2) = 42.40 \text{ mm}$$

$$A_{\text{base bebedero}} = 2 A_{\text{canal de alimentación}}$$

$$A_{\text{canal de alimentación}} = \frac{\pi \left( \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 \right)}{2} = 176.49 \text{ mm}^2$$

$$176.49 = \frac{\pi L^2}{2}$$

$$L = 10.60 \text{ mm.}$$

La dimensión del canal de alimentación (ver, Fig. A.7), es:

$$2L = 21.20 \text{ mm.}$$

#### Diseño de la base del bebedero

Para el dimensionamiento de la base del bebedero se utilizó la relación de la Fig. A.7, con el cual se asegura que el flujo del metal no sea turbulento severo ni que dañe las paredes internas del molde.

$$\text{Diámetro de la base del bebedero} = 42.40 \text{ mm}$$

$$\text{Altura de la base del bebedero} = 21.20 \text{ mm}$$

Más adelante, se presenta el dibujo técnico de la base del bebedero y el canal de alimentación, considerando los ángulos de extracción apropiados a partir de la línea de partición.

#### Diseño de machos

Para la geometría propuesta del modelo y sus sistemas de alimentación no es necesario el diseño de machos.

#### Paso 5: Selección del porcentaje de contracción volumétrica

De la Tabla A.3 (ver, Anexo A), se selecciona para el aluminio su correspondiente valor de contracción volumétrica por solidificación, con un valor de 7.1.

#### Paso 6: Redimensionamiento del modelo

Las probetas son las únicas partes que requieren redimensionamiento. La Fig. 4.7 presenta las dimensiones de la probeta considerando el porcentaje de contracción volumétrica por solidificación, obtenido en el paso anterior.

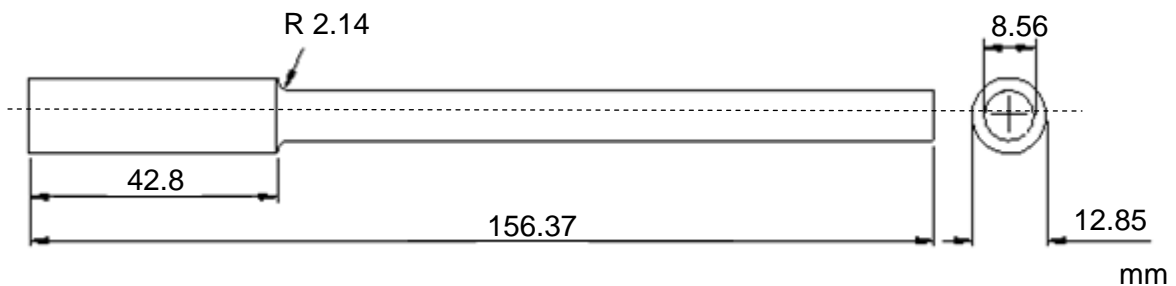


Fig. 4.7. Redimensionamiento de probetas, considerando el porcentaje de contracción volumétrica por solidificación del aluminio.

#### Paso 7: Ángulos de extracción del modelo

Los ángulos de extracción para las probetas no son necesarios ya que la geometría misma permite la fácil extracción del molde. Las partes que requieren el diseño de ángulos de extracción son: la mazarota, el bebedero y la base del bebedero. A continuación se presentan las partes con sus ángulos de extracción correspondiente según su altura medida desde la línea de partición (ver, Tabla A.4).

En las Figs. 4.8 y 4.9, se presentan la mitad superior e inferior de la mazarota con sus respectivos ángulos de extracción.

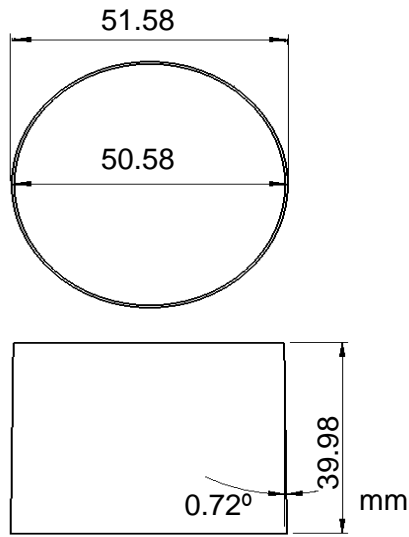


Fig. 4.8. Mazarota parte superior que es dividida por la línea de partición.

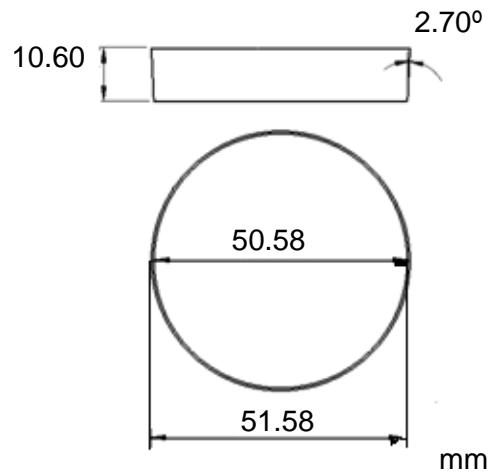


Fig. 4.9. Mazarota parte inferior que es dividida por la línea de partición.

En la Fig. 4.10, se presenta las dimensiones para la base del bebedero y su canal de alimentación, con sus respectivos ángulos de extracción.

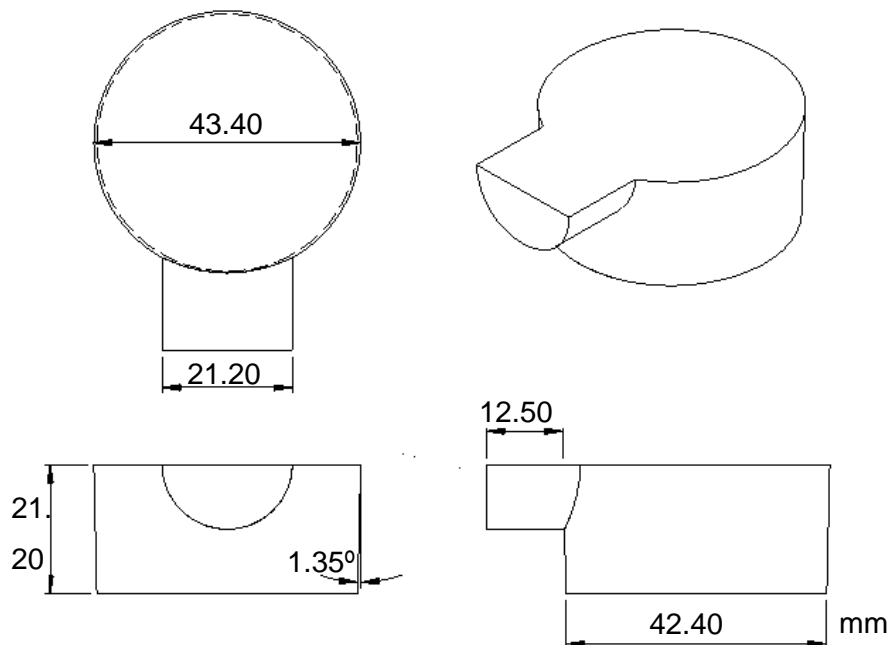


Fig. 4.10. Dimensiones de la base del bebedero y su canal de alimentación.

### Paso 8: Selección del material del modelo

El material para la construcción de las partes de los modelos se escoge de la Tabla A.5 (ver, Anexo A), se selecciona la madera, ya que presenta buenas características como: excelente maquinabilidad, la facilidad de reparación y la resistencia a la corrosión, considerando la disponibilidad que existe en el país se utilizará el cedro por ser una madera de mayor resistencia, también se puede utilizar madera de conacaste o madera de pino.

Luego del dimensionamiento de las diferentes partes que conforman el sistema de alimentación y de la pieza, se debe comprobar cuantas piezas se obtienen a partir del volumen de metal fundido que suministra el crisol, que representa el 90% del volumen total de éste, ya que esto forma una limitante al momento de realizar el proceso de colada.

Para determinar el número de piezas a fundir en una sola colada, mediante el uso de un software asistido por computadora se dibujaron las piezas con la geometría diseñada en el desarrollo del Anexo A del presente trabajo de graduación, el mismo programa brinda cuánto es el volumen de cada uno de los modelos, siendo así:

$$V_{\text{crisol total}} = 467,748.59 (0.90) \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{crisol}} = 420,973.43 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{mazarota}} = 101,631.04 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{pieza}} = 50,221.20 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{canal de alimentación}} = A_{\text{car}} (L) = 176.49 (20) = 3,529.80 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{bebedero}} = 57456.79 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{base del bebedero}} = 57333.17 \text{ mm}^3.$$



Tomando en cuenta el modelo, los canales de alimentación, la mazarota, el bebedero y su base:

$$420,973.43 = 219,950.80 + N^{\circ} (50,221.20)$$

$$N^{\circ} = 4.003 \approx 4 \text{ Piezas.}$$

Para finalizar, con los planos obtenidos en el desarrollo del Manual A, proceda con la construcción de las diferentes partes del sistema que conforma el modelo y los sistemas de alimentación, esto mediante un experto ebanista o un carpintero.

Con la posterior elaboración de las probetas, estas se devastan hasta su línea de partición por medio de lima basta y lija fina para su acabado final (ver, Fig. 4.11)



Fig. 4.11. Presentación del trabajo realizado a las probetas.

#### **4.3. APLICACIÓN DEL MANUAL PARA LA ELABORACIÓN DE MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO**

El siguiente apartado presenta los pasos para diseñar el molde de fundición siguiendo los pasos del Anexo B de este trabajo de graduación:

##### **Paso 1: Selección del tipo de arena de moldeo**

El material que se va a fundir es un aluminio AA6061, el cual fue definido en los planos que se obtienen del manual A, este material definirá las propiedades de la arena de moldeo, de esta manera, haciendo uso de la información de las Tablas B.1 y B.2, se observa que la arena que cumple con las condiciones para este material, debido a que la temperatura de colada está en su rango, el cual es de 710 °C, se selecciona una arena sílice.

Se decide utilizar arena de río con el objetivo de iniciar la investigación en sus propiedades para los moldes, la arena de río representa una alternativa viable, por su fácil obtención en los centros de suministro para construcción, su bajo costo la hace además una buena alternativa. Para el desarrollo de este trabajo de graduación se utilizó arena de río de los bancos de arena del río Acelhuate.

##### **Paso 2: Selección de propiedades de la arena de moldeo**

De la Tabla B.3 se obtiene que la arena de los moldes para fundir aluminio debe tener 7.5% peso de humedad, y un 12% en peso de bentonita (arcilla), de esta forma se evitarán defectos en las piezas coladas.

Se debe tomar en cuenta que el peso de la arena necesaria para llenar la caja de moldeo es de 39.4 kg.

##### **Paso 3: Determinación de la granulometría de la arena**

Para la selección de la granulometría de la arena, ya que se necesitan dos tipos diferentes de acabados superficiales en las probetas para lograr el objetivo de este trabajo de graduación, se tamizó arena procedente del río

Acelhuate, se siguió el procedimiento para la determinación de la granulometría de la arena descrita en el Anexo B de este trabajo de graduación, obteniendo los siguientes resultados:

El peso total de la arena es de 114.55 kg, en donde el 100% es arena y el contenido de arcilla es de 0%.

Los resultados obtenidos de la determinación experimental de la granulometría de la arena se presentan a continuación:

Tabla 4.1. Resultados obtenidos durante el ensayo de granulometría.

Número de tamiz (i)	Cantidad retenida (Q), kg	Q%	Multiplicador (M)	Q · M
1	13.40	11.70	20	268
2	41.50	36.23	30	1245
3	2.40	2.10	40	96
4	23.00	20.08	50	1150
5	16.40	14.32	70	1148
6	14.00	12.22	100	1400
7	0.30	0.26	140	42
Fondo	3.55	3.10	300	1065

Para el material retenido hasta el tamiz 5, usando la Ec. B.2, se tiene:

$$f = \frac{268 + 1245 + 96 + 1150 + 1148}{11.70 + 36.23 + 2.10 + 20.08 + 14.32} = 46.27.$$

Luego con el valor f se verifica que en la Tabla B.4 y B.5 la arena obtenida del proceso de tamizado es de granulometría gruesa hasta el tamiz 5.

Para obtener una arena de menor índice de finura se consideran todos los tamices, los resultados se obtienen por medio de la Ec B.2:

$$f = \frac{268 + 1245 + 96 + 1150 + 1148 + 1400 + 42 + 1065}{11.70 + 36.23 + 2.10 + 20.08 + 14.32 + 12.22 + 0.26 + 3.10} = 64.14.$$

Luego realizando el mismo procedimiento, con el valor f se determina que la segunda arena es de granulometría media.

#### Paso 4: Selección de aglomerante

El aglomerante se seleccionó en base a la temperatura necesaria para la fusión del aluminio, también un factor determinante fue su accesibilidad en el mercado local, dando como mejor opción la bentonita.

La arena de río recién tamizada se somete a la prueba de azul de metileno descrita en el Anexo B de este trabajo de graduación, para determinar la cantidad de arcilla (bentonita) que contiene, el resultado de la prueba da como resultado que la arena de río no contiene arcilla. Es de tomar en cuenta que al realizar la primera vez la fundición, ésta debe tener de forma general un equivalente a 12% del peso de la arena (Ec. 4.1) y a partir de la segunda utilización se agrega un 0.50% peso de la arena de moldeo (Ec. 4.2). Siendo las cantidades utilizadas las siguientes:

$$39.4 (12\%) = 4.73 \text{ kg} \quad (4.1)$$

$$39.4 (0.50\%) = 197 \text{ g.} \quad (4.2)$$

La cantidad de bentonita se mezcla junto a la arena de granulometría gruesa, luego se pesa la misma cantidad de bentonita y se prepara la mezcla para la arena de granulometría media, se identifica cada cantidad de arena para así evitar mezclar los dos grupos de granulometrías al finalizar el proceso de colada.

#### Paso 5: Determinación de la humedad de la arena de moldeo

Luego de tamizar la arena y haber obtenido la granulometría que se deseaba, se procede a realizar la prueba de humedad a la arena, esto con el fin de determinar su humedad y saber cuánta humedad le falta para completar el 7.5% peso que requiere (ver, Tabla B.3).

Realizada la prueba de humedad de la arena (ver, Anexo B), se obtuvieron los siguientes resultados (ver, Tabla 4.2):

Tabla 4.2. Datos obtenidos prueba de humedad.

Peso inicial, g	Tiempo, min
76.5	0
74.7	10
73.5	10
73.3	10
73.3	5

Por medio de la Ec. B.7, se determina cual es el contenido de humedad presente en la muestra de arena.

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{76.5 - 73.5}{73.5} \cdot 100$$

$$\% \text{ de Humedad} = 4.08.$$

Para obtener la humedad requerida en la arena de moldeo se suma el peso de la arcilla (bentonita) con el peso de la arena así:

$39.4 + 4.73 = 44.13$  (7.5%) = 3.31 kg, equivalentes de agua necesaria para la humedad

Por regla de tres simple, se calcula cuánto es el equivalente en peso que tiene de humedad la arena y cuánto es lo necesario por añadir.

$$4.08\% \text{ de humedad} \rightarrow X$$

$$7.5\% \text{ de humedad} \rightarrow 3.31 \text{ kg}$$

$$X = 1.80 \text{ kg}$$

$$\text{Humedad necesaria} = 3.31 - 1.80$$

$$\text{Humedad necesaria} = 1.51 \text{ kg de agua}$$

$$\text{Humedad necesaria} = 1.51 \text{ l de agua.}$$

La cantidad de agua necesaria para proporcionar a la arena la humedad requerida será agregada por medio de un beaker, por lo que se toma el peso del beaker (ver, Fig. 4.12a), y se mide la cantidad de agua necesaria (ver, Fig.4.12b y c), el agua se le agrega a la arena poco a poco mezclándola uniformemente para evitar la presencia de grumos (ver, Fig. 4.13). Es de especial cuidado este proceso ya que un exceso de humedad provocará que el metal fundido evapore ese exceso de humedad al entrar en contacto con el molde de arena. Esto genera un fenómeno de burbujeo dentro del molde en el momento de verter el metal fundido, generando así la pérdida o destrucción de las piezas (ver, Fig. 4.14).

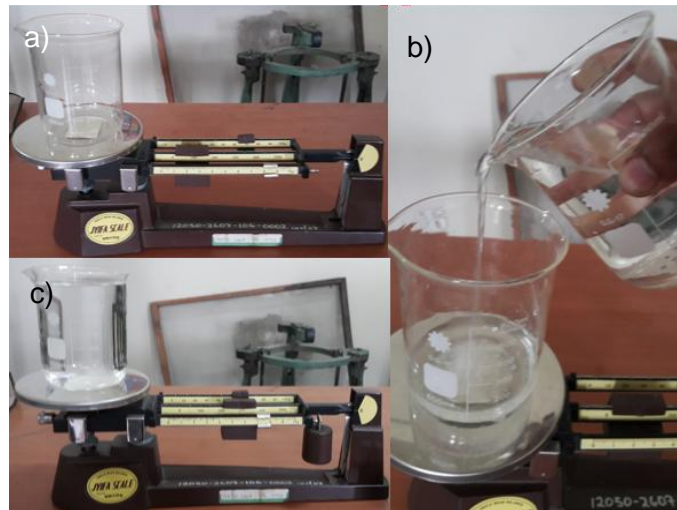


Fig.4.12. Procedimiento de pesaje de la cantidad adecuada de agua.



Fig. 4.13. Forma adecuada de mezclar la arena con su humedad correspondiente.



Fig. 4.14. Efectos del exceso de humedad a las piezas fundidas.

#### Paso 6: Diseño de la arena para machos

Debido a que la pieza no contiene agujeros ni superficies internas, no fue necesario el diseño de arena para machos.

#### Paso 7: Procedimiento para la construcción del molde

##### Diseño de la caja de moldeo.

La caja de moldeo se fabricó de madera de pino ya que es económico, de fácil compra y sus características son buenas para la construcción de la caja de moldeo, se diseñaron los soportes de las esquinas para asegurar que la caja mantenga sus dimensiones cada vez que se realice el proceso de compactación de la arena, la caja cuenta con tres agujeros que sirven de guía para fijarla junto a la placa de moldeo, En la Fig. 4.15 se presenta las dimensiones de la caja de moldeo.

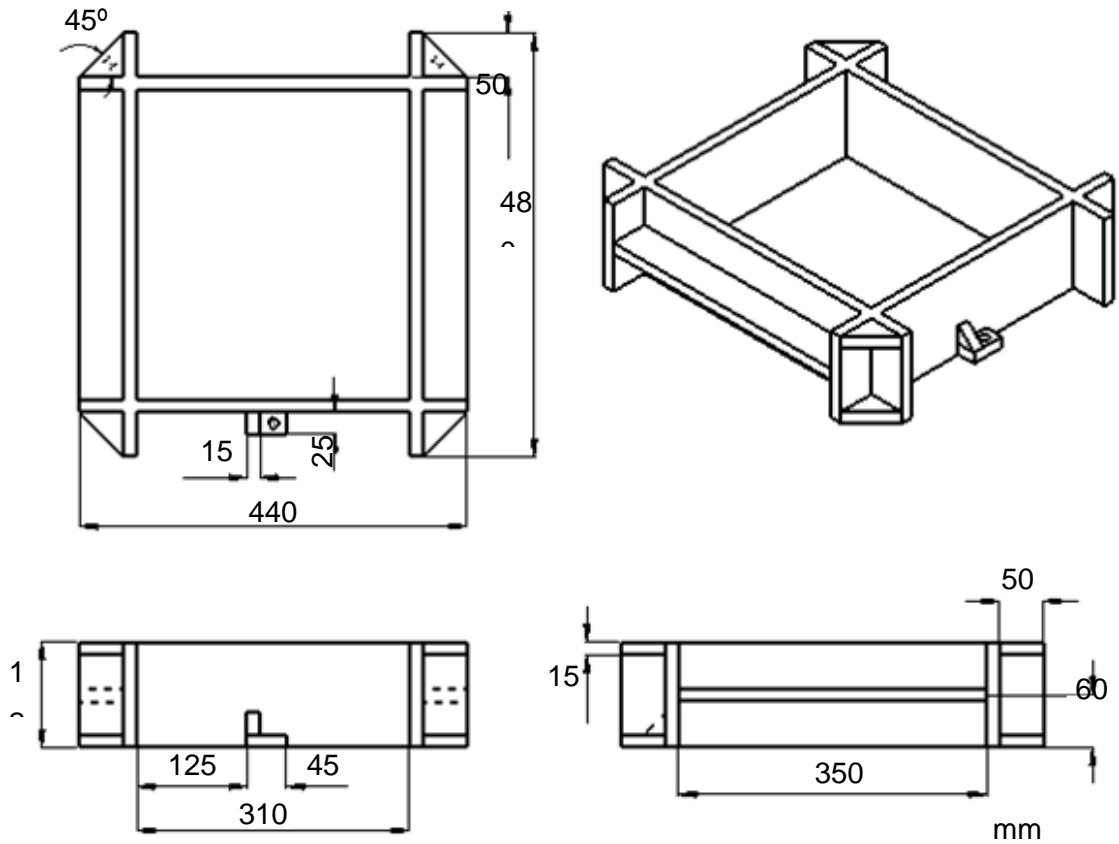


Fig. 4.15. Dimensiones de la caja del molde.

A continuación se lista el procedimiento a seguir para la elaboración del molde:

- A) Construcción de la caja de moldeo, implementación de modelos y construcción de placa de moldeo.

El modelo y los sistemas de alimentación se situaron fijamente sobre la placa de moldeo, según el espacio que se tenía dispuesto en la caja de moldeo (ver, Fig. 4.16). La disposición geométrica sería perpendicularmente ya que para esta disposición es necesaria una sola mazarota lateral y superior, y un solo canal de alimentación.



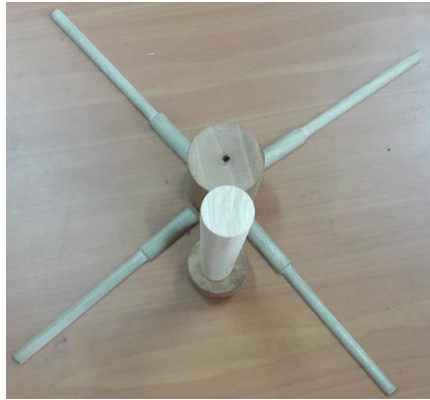


Fig. 4.16. Visualización del modelo en su forma final.

- B) Se esparce el polvo separador (talco) sobre el modelo y la placa de moldeo, para evitar que la arena se pegue al modelo, preparada la arena de moldeo y la caja de moldeo junto con los modelos de las piezas que lo componen, se le agrega talco a la superficie (Fig. 4.17), para evitar que la arena de moldeo por su humedad se adhiera a las paredes de los modelos.



Fig. 4.17. Forma correcta de expansir talco sobre el modelo.

- C) Se coloca la primera capa de arena sobre el modelo y la placa de moldeo para realizar la primera compactación (ver, Fig. 4.18), luego se va añadiendo la arena de moldeo lentamente para asegurar que cada capa sea apisonada uniformemente.



Fig. 4.18. Llenado de la caja de moldeo con arena.

- D) Se procede con la compactación de la arena de moldeo, este procedimiento se realiza compactando la arena desde los extremos del molde hacia el centro, procurando no dejar partes sin compactar y teniendo el cuidado de no dañar las partes del modelo que no están cubiertas por la arena (ver, Fig. 4.19).



Fig. 4.19. Compactando la arena de moldeo.

- E) Cuando se llena completamente la caja de moldeo con la arena (ver, Fig. 4.20a) con la regla de madera se retira el exceso de arena en la parte superior, se gira dejando la placa de moldeo como parte superior y se procede a desenroscar los pernos (ver, Fig. 4.20b).

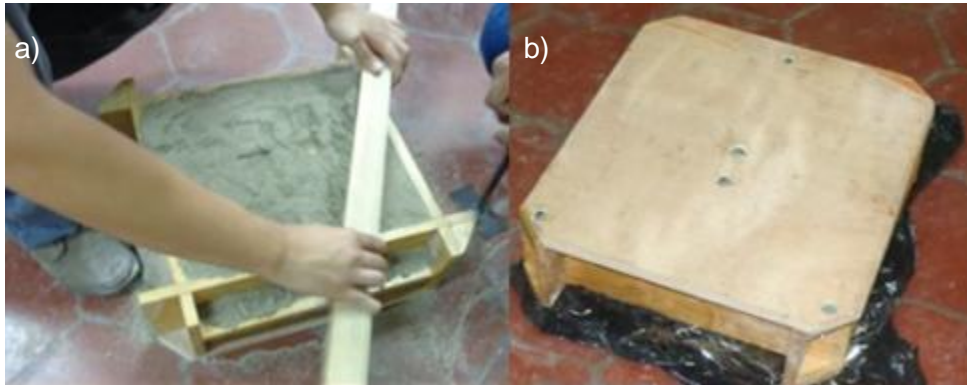


Fig. 4.20. Forma para remover el exceso de arena y giro de la caja de moldeo.

- F) Se retiran los pernos que sujetan la placa de moldeo con el molde y se extraen las partes del modelo y los sistemas de alimentación (ver, Fig. 4.21 a y b), extraer la mazarota inferior y base del bebedero con mucho cuidado sin dañar el modelo.

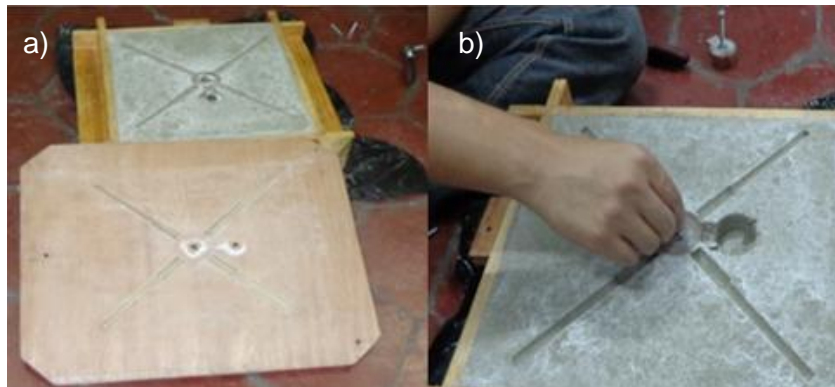


Fig. 4.21. Proceso de retiro de la placa de moldeo y el modelo.

Obtenidos los moldes superior e inferior, a las huellas de las probetas se les debe mejorar su acabado superficial debido a que al extraer el modelo la arena puede adherirse o por falta de una buena compactación desprenderse del modelo, esto puede provocar daños en la pieza final como rebabas en su contorno o un mal acabado superficial, ese proceso se realiza a mano colocando un duplicado del modelo de las probetas y llenando con el mismo tipo de arena los espacios faltantes o desniveles encontrados (ver, Fig. 4.22).



Fig. 4.22. Acabados realizados al molde antes de unir ambas partes de la caja de moldeo.

G) Antes de unir el molde superior e inferior, al molde superior se le harán orificios por medio de una aguja de 3 mm para el escape de los gases, estos se sitúan al final de la huella de cada probeta (ver, Fig. 4.23a).

Al finalizar este proceso los moldes se unen, estos quedan perfectamente alineados entre sí por medio de tres agujeros que se le hicieron a la caja de moldeo para coincidir la caja de moldeo superior e inferior. Al haberlos unido (ver, Fig. 4.23b) al molde superior se le hace manualmente la copa de vaciado (ver, Fig. 4.23a).



Fig. 4.23. Detalles finales del molde: a) copa del bebedero y respiraderos señalados y b) unión de los 2 moldes.

H) Con las dos partes del molde unidas, el molde está listo para el proceso de colada. Por lo que se procede al inicio del proceso de fundición: se precalienta el horno (ver, Fig. 4.24), durante 20 min con el crisol previamente limpio de excesos de materiales de fundiciones pasadas, se coloca dentro del horno y se enciende con las precauciones debidas.



Fig. 4.24. Precalentamiento del crisol.

Se retira la tapadera del horno (ver, Fig. 4.25a) y con el uso de la pinza con abrazadera se retira el crisol (ver, Fig. 4.25 b y c) para empezar a realizar las cargas de aluminio, para la fundición de las probetas de este trabajo de graduación en promedio se realizaron 4 cargas de aluminio, esto depende de cuan grandes sean las piezas a introducir y su forma (ver, Fig. 4.25d).

Cada 15 min se abre el horno de crisol para verificar la correcta fusión del material y para realizar cargas posteriores, esto hasta llenar el crisol dejando vacío ~10% del volumen total (ver, Fig. 4.26), preparar media cucharadita de desgasificador (carbonato de sodio).

Por medio del pincel de mango se retira la escoria la cual se encuentra en la superficie del metal fundido, verter esta escoria sobre un recipiente resistente a la temperatura de fusión del aluminio, en este caso el recipiente es de acero inoxidable, inmediatamente después se coloca el desgasificador, revolver para que quede uniformemente en el metal fundido utilizando el pincel de mango, ingresar el crisol 15 min más en el horno (ver, Fig. 4.27).





Fig. 4.25. Proceso de llenado del crisol.



Fig.4.26. Revisión y carga del material.



Fig. 4.27. Procedimiento antes de la colada con el aluminio, colocación del desgasificador.

Como último paso del proceso de fundición, se vierte el aluminio fundido por la copa de vaciado (ver, Fig. 4.28) teniendo en cuenta el tiempo de vertido calculado así.

$$\text{Siendo } \rho = 2.70 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$
$$m = V \cdot \rho$$

$$m = (50221.209) (2.70 \cdot 10^{-3})$$

$$m = 135.59 \text{ g}$$

$$m_{\text{mazarota}} = 2\pi R^3 \cdot \rho = 2\pi (25.29)^3 (2.70 \cdot 10^{-3})$$

$$m_{\text{mazarota}} = 274.40 \text{ g}$$

$$M = (135.59) (4) + 274.40$$

$$M = 816.70$$

De la Tabla 1.6,  $S = 2.2$

$$t = S \sqrt{M}$$

$$t = 2.2 \sqrt{816.70}$$

$$t = 62.87 \text{ s} = 1.01 \text{ min.}$$

Al finalizar la colada se procede a verter el metal sobrante del crisol sobre el recipiente de acero inoxidable (ver, Fig. 4.29). Con el uso del pincel de mango se procede a la limpieza del crisol quitando todo el exceso de material que ha quedado retenido en las paredes del mismo para evitar que se dañe.

Para las fundiciones realizadas en este trabajo de graduación se censó la temperatura del metal fundido y después de 1 h del vertido, la temperatura del aluminio era de 70 °C. Por lo que se recomienda esperar 5 h mínimo para poder retirar las probetas del molde, ya que con esto se evita que el aluminio sufra flexión, ya que la ductilidad de los metales es mayor a altas temperaturas.



Fig. 4.28. Colada del aluminio sobre la copa de vaciado.



Fig.4.29. Limpieza del crisol.

- I) Retirar los sistemas de alimentación, mazarotas, canales de alimentación y bebedero. Las piezas obtenidas se presentan en la Fig. 4.30 en las cuales se observa que el proceso de fundición se produjo de manera correcta ya que el metal llegó hasta los respiraderos.



Fig. 4.30. Piezas obtenidas en las fundiciones.

- J) Se cortaron las probetas de la mazarota para luego efectuar el proceso de remoción de rebabas a la pieza recién colada (ver, Fig. 4.31) en el molde de arena para su posterior análisis en la máquina de fatiga a flexión rotativa.





Fig. 4.31 Probeta obtenida de fundición de aluminio AA6061.

Al haber finalizado el proceso de fundición las probetas obtenidas utilizando arena de granulometría media se presentan en la Fig. 4.32 y las fundidas en granulometría gruesa en la Fig. 4.33.

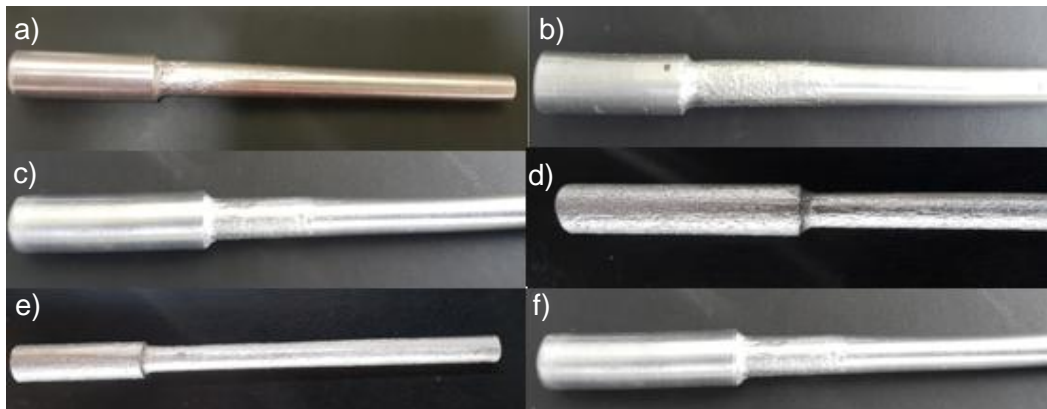


Fig. 4.32 a-f). Probetas obtenidas en moldes de arena de granulometría media.

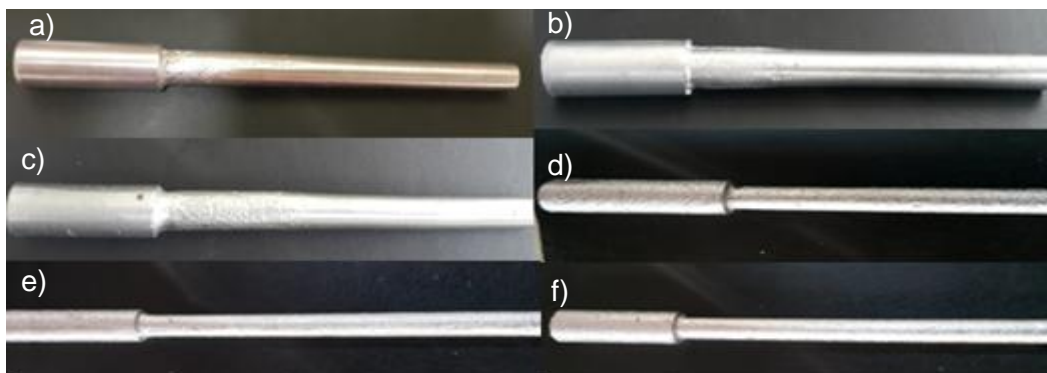


Fig. 4.33 a-f). Probetas obtenidas en moldes de arena de granulometría gruesa.

En este capítulo se han implementado los manuales de diseño de modelos y moldes de arena para fundición de aluminio, mediante la obtención de dos grupos de probetas para ensayos de fatiga flexión rotativa, utilizando arena gruesa y media; así, dado lo anterior en el capítulo siguiente se presentan los resultados y análisis de los mismos.

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROBETAS FUNDIDAS EN MOLDES DE ARENA**

Luego de haber aplicado los manuales de diseño de modelos y moldes de fundiciones de aleaciones de aluminio (anexos A y B) se ha caracterizado la macroestructura del material y se han realizado ensayos de fatiga a flexión rotativa con el fin de obtener la resistencia a la fatiga y su correspondiente estudio fractográfico a bajos aumentos, a dos grupos de probetas las cuales para su obtención se utilizaron dos tipos de granulometría diferentes de arena para la elaboración del molde. Recordar que la fundición se realizó de una aleación reciclada de aluminio AA6061, a partir de ventanas solares.

### **5.1. RESULTADOS**

A continuación se presenta la metalografía del aluminio AA6061, los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga flexión rotativa para dos tipos de finura de arena y las superficies de fractura por fatiga de las probetas ensayadas. Además para cada uno se expone la manera de cómo obtener dichos resultados.

#### **5.1.1. RESULTADO DEL ENSAYO METALOGRAFICO**

Para la obtención de una macrografía, se efectuó un ataque macroquímico a un corte transversal de una probeta de aleación de Aluminio AA6061 obtenida mediante fundición en molde de arena. Durante el proceso de lijado se le agrega agua a temperatura ambiente con el fin de no calentar la muestra y producir una remoción del material desprendido durante el proceso, el desbaste se realizó con lijas cada vez más finas desde la 180 hasta la 600, con el fin de eliminar las capas deformadas por la lija anterior y producir una

superficie plana y sin ralladuras de operaciones anteriores tales como las de corte, en cada lija se producen dos desbastes y en cada cambio de una lija a otra la muestra se gira  $90^\circ$ , luego de obtener una muestra conteniendo un mismo plano sin ralladuras, se limpia con un algodón y jabón líquido y se enjuaga con agua con el fin de remover cualquier partícula o grasa. Luego se realiza el ataque químico, el cual se efectúa utilizando una solución de ácido hidrofúrico compuesta de agua regia fluorada que contiene: 45 ml de ácido clorhídrico, (HCL); 15 ml de ácido hidrofúrico, (HF); 50 ml de ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$  y 25 ml de agua destilada, el cual se aplica con un algodón a la muestra durante 15 s, se enjuaga bien y se seca con aire caliente, esto con el propósito de no generar alguna ralladura en el proceso de secado, la observación de este tipo de ataque se realiza a simple vista. El resultado del ataque macroquímico se presenta en la Fig. 5.1 con un aumento 6x.

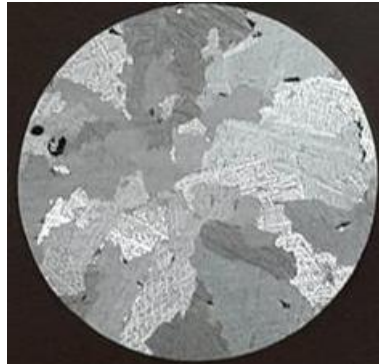


Fig. 5.1. Macrografía de probeta de aluminio AA6061.

### 5.1.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN ROTATIVA

A continuación se explica el ensayo de fatiga a flexión rotativa.

Cuando se ensaya una probeta en la máquina de fatiga a flexión rotativa, (ver, Fig. 5.2), su comportamiento es como se presenta en la Fig. 5.3, cuando se aplica una fuerza  $F$  en su extremo, se genera un momento máximo en el cambio de sección.

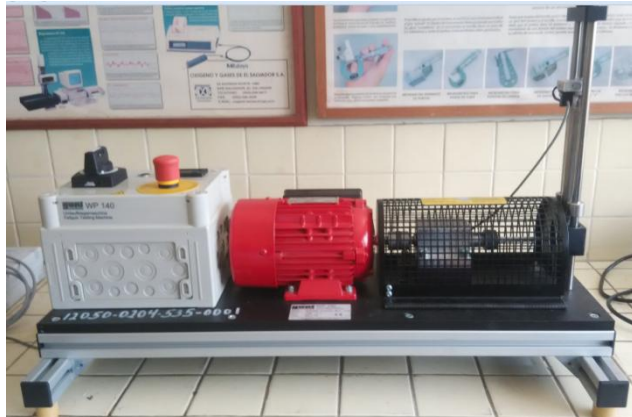


Fig. 5.2. Máquina de ensayo de fatiga a flexión rotativa.

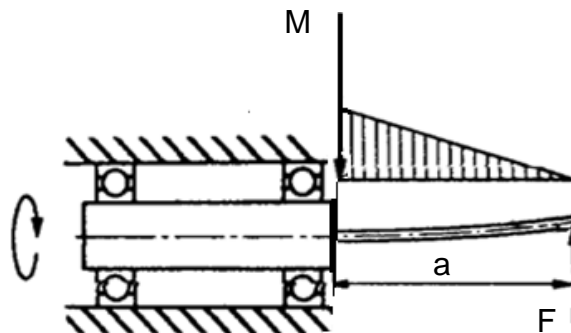


Fig. 5.3. Diagrama de momentos y fuerzas.

El momento ( $M_b$ ) que se genera en el concentrador de esfuerzo, a causa de la aplicación de la fuerza ( $F$ ) en el extremo de la probeta se determina mediante la Ec. 5.1.

$$M_b = F \cdot a. \quad (5.1)$$

Introduciendo el momento de resistencia ( $W_b$ ) del material de la probeta:

$$W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}. \quad (5.2)$$

Se puede calcular la amplitud de esfuerzo ( $\sigma_a$ ).

$$\sigma_a = \frac{M_b}{W_b} = \frac{32 \cdot a}{\pi \cdot d^3} \cdot F \quad (5.3)$$

$$\sigma_a = \frac{32 \cdot (100.5 \text{ mm})}{\pi \cdot (8.25)^3} \cdot F \quad (5.4)$$

$$\sigma_a = \frac{1.82}{\text{mm}^2} \cdot F. \quad (5.5)$$

Mediante la Ec. 5.5, se determinan las cargas a las cuales se realizarán los ensayos de fatiga a flexión rotativa, considerando que la máquina tiene una capacidad de 0 a 300 N, con una escala graduada cada 5 N, para lo cual se han tomado valores de carga múltiplos de 5 N, esto con el propósito de colocar valores precisos de cargas a las probetas.

El primer ensayo de fatiga a flexión rotativa se realiza sometiendo la probeta a una carga alrededor de 2/3 correspondiente al esfuerzo nominal a carga máxima; así, se registra el número de ciclos cuando la probeta sufre rotura, este procedimiento se repite en otras probetas a niveles de carga menores. El valor de la fuerza máxima con la que se comienza el ensayo de fatiga a flexión rotativa se toma entonces con el esfuerzo nominal a carga máxima del aluminio ( $\sigma_u = 125 \text{ MPa}$ ).

Con el uso de la Ec. 5.5 y considerando la resistencia nominal a carga máxima del material, se determinan las cargas a las cuales se ensayarán las probetas, sustituyendo de la Ec 5.5 el  $\sigma_a$  por el valor  $\sigma_u$  del esfuerzo nominal a carga máxima del aluminio, obteniendo así el valor de carga última que soporta el material y multiplicando por 2/3 se determina el valor de carga máxima con el cual se puede realizar el ensayo:

$$125 \text{ MPa} = 1.82F_u$$

$$F_u = 68.68 \text{ N}$$

$$F_{\text{máx}} = 68.68 \left( \frac{2}{3} \right)$$

$$F_{\text{máx}} = 45.78 \text{ N.}$$

Las pruebas se desarrollaron con un valor de esfuerzo de 45 N, luego para el segundo ensayo se realizó con un nivel de carga de 40 N y así

sucesivamente hasta que el número de ciclos sobrepasara los diez millones, esta consideración se toma en cuenta ya que para materiales dúctiles no existe un valor definido de vida infinita.

Los resultados de las pruebas de fatiga a flexión rotativa de las probetas de granulometría media y gruesa, se presentan en las Tablas 5.1 y 5.2, respectivamente. Cabe destacar que la probeta # 6 ensayada a un esfuerzo de 45.5 MPa no falló, tal como se indica en la Tabla 5.1 mediante la colocación de una flecha.

Tabla 5.1. Resultados de ensayo de fatiga a flexión rotativa a probetas de una aleación de aluminio AA6061 utilizando arena de moldeo con granulometría media.

Probeta #	Carga aplicada, N	Esfuerzo, MPa	Número de ciclos a la fractura, $N_f$
1	45	81.9	5,990
2	40	72.8	21,653
3	35	63.7	65,826
4	35	63.7	97,632
5	30	54.6	500,590
6	25	45.5	10150,189 →

Tabla 5.2. Resultados de ensayo de fatiga a flexión rotativa a probetas de una aleación de aluminio AA6061 utilizando arena de moldeo con granulometría gruesa.

Probeta #	Carga aplicada, N	Esfuerzo, MPa	Número de ciclos a la fractura, $N_f$
1	45	81.9	10,000
2	40	72.8	15,100
3	35	63.7	80,265
4	30	54.6	831,487
5	25	45.5	1 312,184
6	20	36.0	19 010,522

Con el objetivo de presentar en una gráfica los resultados para ambos grupos de probetas ensayadas a fatiga a flexión rotativa y luego de hacer una regresión lineal, los valores correspondientes al esfuerzo y al número de ciclos a la fractura (ver, Tablas 5.1 y 5.2), se presenta en la Fig. 5.4 dichos resultados.

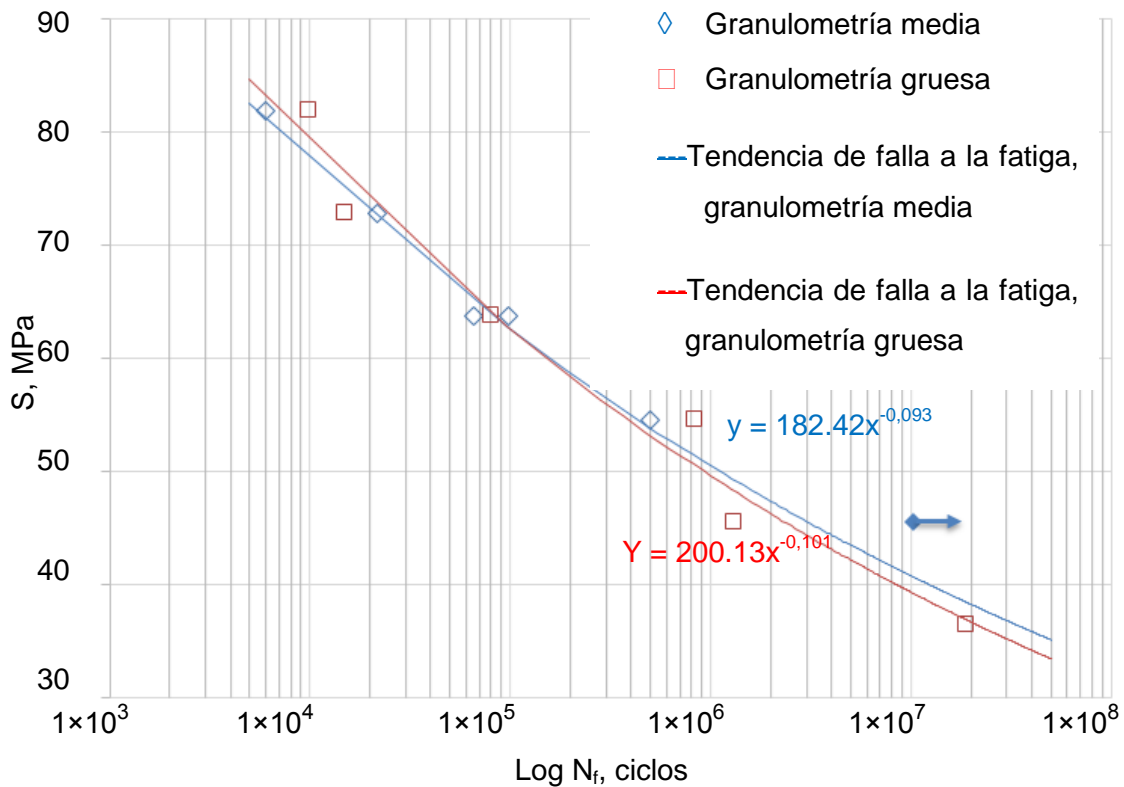


Fig. 5.4. Curvas semilogarítmicas de los ensayos de fatiga flexión rotativa para una aleación de aluminio AA6061 obtenida por fundición.

### 5.1.3. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS A FATIGA FLEXIÓN ROTATIVA

En las Tablas 5.3 y 5.4 se presentan las superficies de fractura de cada probeta que ha fallado por fatiga flexión rotativa, este estudio se realizó mediante un análisis de falla a cada una de ellas para posteriormente obtener un análisis fractográfico de las mismas. Además, cada fotografía ha sido escalada de tal manera que presenta un aumento 5x.

Tabla 5.3. Superficie de fractura de probetas de una aleación de aluminio AA6061, obtenidas por fundición en moldes de arena con granulometría media.




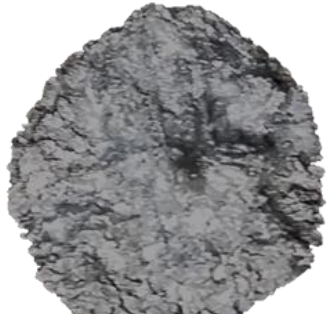
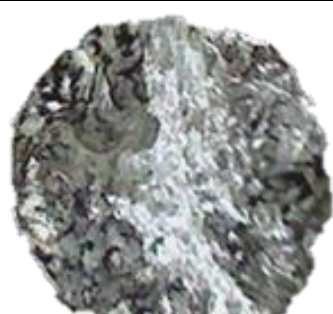





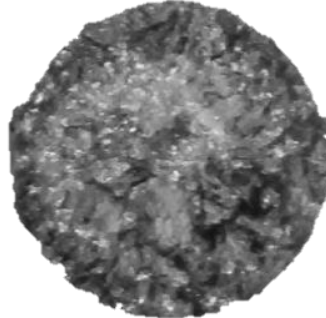
Probeta #	Superficie de fractura	Probeta #	Superficie de fractura
1		2	
3		4	
5		6	No presentó falla



Tabla 5.4. Superficie de fractura de probetas de una aleación de aluminio AA6061, obtenidas por fundición en moldes de arena con granulometría gruesa.

Probeta #	Superficie de fractura	Probeta #	Superficie de fractura
1		2	
3		4	
5		6	

## 5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los siguientes apartados se presentará el análisis de los resultados de la macrografía del material fundido, el análisis de las probetas ensayadas en la máquina de fatiga a flexión rotativa y su respectiva fractografía para las probetas fundidas mediante moldes de arena.

### **5.2.1. ANÁLISIS METALOGRÁFICO**

Del estudio macrográfico presentado en la Fig. 5.1, se observa una muestra propia de fundición directa sin tratamientos térmicos posteriores, en la cual se observa que el crecimiento de los granos del material inicia en la superficie y continúa hacia el centro de la pieza, los granos presentan una forma más ancha en la superficie y al crecer hacia el centro de las probetas su tamaño se reduce debido al choque entre ellos. Además, en el centro del material se observa la presencia de granos pequeños a consecuencia del choque entre los nuevos granos. Como también, en algunos granos de la superficie se observan dendritas, las cuales son típicas de materiales fundidos debido a que la velocidad de solidificación en estos puntos fue mayor. Así mismo, la muestra presenta poros e incrustaciones de granos de arena en el metal fundido, los cuales están distribuidos en la superficie del material.

### **5.2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS. GRÁFICA SEMILOGARÍTMICA DEL ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN ROTATIVA**

En las Fig. 5.4 se observa que la tendencia de las probetas con mayor rugosidad es a presentar menor vida a la fatiga con respecto a las probetas con menor rugosidad; es decir, que las propiedades mecánicas al fundir piezas en moldes de arena disminuyen al utilizar granulometría gruesa en comparación con moldes hechos de granulometría media, esto debido al aumento del tamaño de grano de la arena y por lo tanto de la rugosidad en la superficie de las mismas, ya que estos actúan como microconcentradores de esfuerzo.

También, se advierte que el entrecruzamiento de las curvas de resistencia a la fatiga es debido a que las probetas ensayadas para la granulometría media (muestras 1, 2 y 3), presentaron inclusiones de arena en el interior del material disminuyendo así su resistencia mecánica por lo que estas fallaron antes de lo previsto, de no haberse presentado este defecto en las

probetas de granulometría media, se esperaría que las tendencias de fundiciones realizadas con moldes de arena de distintos tipos de granulometría presentarían vidas a la fatiga paralelas una con respecto a la otra.

### **5.2.3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE PROBETAS SOMETIDAS A ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN ROTATIVA**

De las superficies de fractura presentadas en las Tablas 5.3 y 5.4 se observa que éstas tienen múltiples inicios de grieta en toda la periferia de las probetas, lo cual es debido a que toda la superficie presentó microconcentradores de esfuerzo, luego estas grietas de fatiga se propagan hacia el interior del material o transversal al eje de carga situado en el centro del material. Algunas muestras fundidas en moldes de arena de granulometría media (muestras 1, 2 y 3) presentaron inclusiones de arena, lo cual respalda el hecho que éstas fallaron antes de lo previsto.

De la Tabla 5.3 se concluye que la probeta # 4 presenta una zona de despegue por sobrecarga con un área menor que la probeta # 2, esto se debe a que para grandes niveles de esfuerzos la zona de despegue por sobrecarga es mayor que para bajos esfuerzos.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de graduación se concluye:

- ✓ Que mediante la teoría expuesta en el marco teórico se brindan las bases y criterios necesarios para la toma de decisiones al diseñar correctamente modelos para fundiciones de aleaciones de aluminio en moldes de arena.
- ✓ Que con el uso de los manuales para la elaboración de modelos y moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio y con el seguimiento de los pasos de forma ordenada y sistemática, junto al control de las variables involucradas en el proceso de diseño, dan como resultado piezas con acabados superficiales aceptables.
- ✓ Que se obtiene mayor resistencia a la fatiga en probetas construidas con moldes de arena de granulometría media, en comparación con probetas construidas en moldes de arena de granulometría gruesa.
- ✓ Que los múltiples inicios de las grietas por fatiga son causadas por la rugosidad de las probetas por las arenas de moldeo y por la presencia de arena, en las probetas debido al arrastre del metal fundido en el molde de arena.

## RECOMENDACIONES

Luego de poner en práctica los manuales de diseño de modelos y moldes para fundición de metales no ferrosos, se listan las recomendaciones siguientes:

- Para obtener resultados satisfactorios en el proceso de fundición de aleaciones de aluminio en moldes de arena, se tiene que desarrollar cada paso de los manuales de diseño de modelos y moldes de arena.
- Cuando se desarrollen los manuales de diseño para los modelos y la fabricación de moldes de arena, verificar el estado de los diferentes equipos como la tamizadora mecánica, tamices, el horno de crisol, las herramientas para el proceso de colada y el crisol. Al igual que la disponibilidad del suministro de gas, con ello se asegura que el desarrollo de los manuales no se vea afectado.
- Al finalizar el proceso de colada se debe realizar una minuciosa revisión de las herramientas y equipos utilizados, con el fin de mantenerlos en óptimas condiciones para futuros procesos de fundición en moldes de arena.
- La arena utilizada para la elaboración de moldes se tiene que proteger tanto de la humedad y de otras formas de contaminación como polvo, suciedad y de otras arenas con granulometrías distintas, como también identificar los recipientes que contengan la arena preparada especificando la granulometría y su contenido de arcilla.
- Cuando se tamice la arena, inicialmente ésta se debe de secar al sol para evitar que por su humedad se generen grumos o terrones que obstruyan los tamices.
- Para la extracción las piezas fundidas del molde de arena, se tiene que esperar a que ésta esté a una temperatura aceptable para su manipulación, idealmente a temperatura ambiente, extraer de forma cuidadosa y evitar doblar las partes delgadas de la pieza.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Troncoso, J. (2000). Historia de la fundición. Colombia: Universidad nacional de Medellín.
- [2] Howard, E. D., (1962). *Tratado práctico de fundición*. Madrid - España: Editorial Aguilar, S.A.
- [3] Avendaño H., Hernández M., León E. y Ramos R. (2008). Proyecto terminal *Diseño y fabricación de modelos para fundición*. Instituto politécnico nacional México.
- [4] Instituto de Investigación y Desarrollo de Educación Avanzada. (2003). *Procesos de fundición*, manual para el alumno. Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica (CONALEP).
- [5] *Especificaciones Técnicas y Procesos para la Definición de las Piezas de Fundición y su Industrialización*. (2001). INVEMA.
- [6] Kalpakjian, S. y Schmid, R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson educación.
- [7] Morral, F., Jimeno, E. y Molera, P. (2004). *Metalurgia general*. España: Reverté.
- [8] Rodríguez, J., Castro, L. y Real, J. (2009). *Procesos industriales para materiales metálicos*. España: Vision net.
- [9] Duponchelle, J. (1932). *Manual del fundidor*. Barcelona: Editor Gustavo Gili.
- [10] Hufnagel, W. (1992). *Manual del aluminio* vol. 1. Editorial Reverte, S.A.
- [11] *Aluminios PFK*. Catálogo de perfiles. (2013). Corporación Furukawa.
- [12] Sociedad pública de gestión ambiental. (1998). *Libro blanco de minimización de arenas en fundiciones férreas*. España: IHOBE, S.A.
- [13] Guía de clases 11. (2011). *Materiales de construcción*. Universidad centroamericana "José Simeón Cañas", UCA.
- [14] Rodríguez, J. (2011). Universidad politécnica de Cartagena, *Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación*.
- [15] DeGarmo, E., Black, J. y Kohser, R. (2002). *Materiales y procesos de fabricación*. España: Reverté.

- [16] E.J. Sikora. (1978). *Evaporative Casting Using Expandable Polystyrene Patterns and Unbonded Sand Casting Techniques*, Trans. AFS, Vol 86, 1978, pág. 65
- [17] Gobierno vasco. (1998). Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. *Arenas de moldeo en fundiciones férreas. País vasco*
- [18] Ordinola, J. (2011). *Caracterización de las tierras de moldeo del porvenir de la provincia de sullana* Universidad de Piura Piura Perú.
- [19] Grau, J. *Tecnología de la fundición.*
- [20] Broncoso, J. (1980). *Fabricación de noyos en arena.* Universidad Nacional de Medellín.
- [21] Facultad de ingeniería y arquitectura, Universidad centroamericana “José Simeón Cañas”. (2005). *Determinación de la composición óptima de arena de fundición.*
- [22] Erazo, C., Flores, S., Monroy, A. (2005). *Determinación de la composición óptima de la arena de fundición empleada para fabricar piezas de hierro y evaluación de sus propiedades.* Trabajo de graduación Universidad centroamericana “José Simeón cañas”. El Salvador.
- [23] Gregorutti, R., Álvarez G. (2007). *Arcillas.*
- [24] Verástegui, T. (2008). *Propuesta de una metodología para la implementación industrial de un circuito de arenas de moldeo en verde.* Universidad Mayor de San Andrés.
- [25] Norma INV E-235-07. (2007). *Valor de azul de metileno en agregados finos y llenante mineral.* Recuperado de:  
[ftp://ftp.ucauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-235-07.pdf](ftp://ftp.ucauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-235-07.pdf).
- [26] Norma INV E 122–07 (2007). *Determinación del contenido de humedad del suelo, roca y mezclas de suelo agregado.* Recuperado de:  
[http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-122-07\\_0.pdf](http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-122-07_0.pdf).

## **ANEXOS**

ANEXO A

MANUAL DE DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIÓN DE ALEACIONES  
DE ALUMINIO EN MOLDES DE ARENA





**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **MANUAL DE DISEÑO DE MODELOS PARA FUNDICIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO EN MOLDES DE ARENA**

### **1. INTRODUCCIÓN**

En este manual se presentan los pasos a seguir para el diseño de modelos para fundición de aleaciones de aluminio en moldes de arena, en cada paso se detalla los criterios que deben considerarse en el momento de realizar el diseño del modelo, en cuanto a los sistemas de alimentación del molde, seleccionando la forma y disposición de los canales de alimentación, el diseño del bebedero que permita el llenado del molde de forma segura y eficiente, el diseño de las mazarotas que permita que la pieza tenga el suficiente metal líquido y evitar así defectos como rechupes y porosidades a causa de la solidificación y enfriamiento de algunas zonas de la pieza. Un buen diseño del modelo permitirá que éste sea eficiente, económicamente viable y duradero.

### **2. OBJETIVO GENERAL**

Seleccionar los materiales, herramientas, variables y criterios de forma ordenada, dependiendo del tipo de aplicación, tamaño de las piezas a fundir, considerando la durabilidad del modelo, el material del cual se fundirán las piezas y obtener así los planos técnicos para la posterior fabricación del modelo.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

A continuación se listan los pasos para el desarrollo del diseño de modelos que se utilizan en el proceso de fundición en moldes de arena, considerando las diferentes variables que pueden existir y sus criterios de selección:

#### Paso 1: Elaboración de dibujos técnicos de la piezas

Es de gran importancia tener a disposición los dibujos técnicos de la pieza que se desea fabricar por fundición en el molde de arena, la pieza que se desea elaborar parte de suplir una necesidad, como la falta de una pieza en una máquina entre otras; los dibujos deben ser claros considerando en su información la aplicación a la cual será sometida: si la pieza estará expuesta a vibraciones, ambientes corrosivos, cargas fluctuantes o desgaste, como principal información debe tener la rugosidad, tolerancias y material de la pieza.

En el caso de que solo se tenga la pieza, se tienen que tener a disposición los planos de la misma con todas sus especificaciones y en el caso de no tenerlos se debe diseñar la pieza.

#### Paso 2: Evaluación de planos


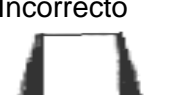




Este punto implica evaluar la geometría del modelo, los elementos de la pieza como costillas o cambios de sección, que deben permitir un buen flujo del metal fundido. Las consideraciones que se deben tomar como base para el desarrollo se encuentran especificadas en el cap. 1, sección 1.7 de este trabajo de graduación. Elabore los planos teniendo en cuenta los cambios que surgen de este paso evaluar.

#### Paso 3: Ubicación de la línea de partición

Es importante definir la ubicación de la línea de partición desde el concepto del diseño, porque afecta los ángulos de extracción, el espesor de las paredes, el acabado superficial y costo del molde.

La línea de partición debe ubicarse correctamente para facilitar la extracción de la pieza después que solidifique por lo que se recomienda tener la asesoría de un experto en fabricación de moldes de fundición para la toma de decisión. En la Tabla A.1 se presentan algunos principios, en donde se debe posicionar la línea de partición según algunos criterios de diseño.

Tabla A.1. Criterios de ubicación de línea de partición.

Criterio de diseño	Principios
Línea de partición simétrica, la línea de partición no está a la orilla de la parte.	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Correcto</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Incorrecto</p> </div> </div>
Línea de partición plana o recta.	<p>a) Línea de partición irregular</p>  <p>Diseño original</p> <p>Línea de partición plana</p> <p>b) Diseño mejorado</p> 
Línea de partición que facilita el flujo del material fundido.	<p>Deseable</p>  <p>No deseable</p> 

Una vez seleccionada la ubicación de la línea de partición en la pieza, realice el dibujo con las partes del modelo.

#### Paso 4: Diseño de sistemas de alimentación

En este paso se toma en cuenta las piezas que componen el sistema de alimentación las cuales son: la copa de vaciado, el bebedero, base del bebedero, canales de alimentación y las mazarotas; es importante el buen

diseño de cada una de las partes que componen el sistema de alimentación para poder realizar una colada eficiente y de buena calidad.

#### A) Ubicación de sistemas de alimentación

El diseño de los sistemas de alimentación consiste en dimensionar los distintos elementos que permiten el llenado del molde de forma eficiente (ver, Fig. A.1).

Iniciando con el diseño de la copa de vaciado la cual tiene como función permitir que el metal líquido no ingrese de forma precipitada al molde evitando así un flujo turbulento del metal fundido y el arrastre de partículas de arena de las paredes del bebedero, continuando con los sistemas de alimentación, se conoce que el diseño apropiado del bebedero asegura que el flujo del metal líquido sea de forma turbulento moderado, luego otro elemento del sistema de alimentación es el pozo, el cual su objetivo es evitar que el metal líquido cuando se vierta, destruya las paredes del molde cuando fluya en su interior y también como último elemento del sistema de alimentación se tiene que diseñar la mazarota el cual es uno de los elementos más importantes debido a que suministra metal fundido adicional a la pieza conforme ésta se contrae durante su enfriamiento y solidificación

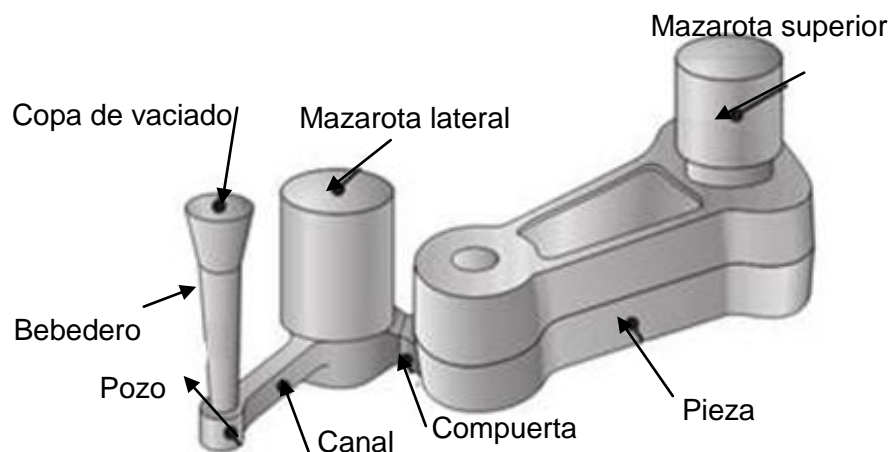


Fig. A.1. Esquema de una fundición y sus partes principales.

Al diseñar el sistema de alimentación se debe tener en cuenta que el metal fundido debe fluir de forma homogénea, no debe causar daños en el interior del molde ni erosionar las paredes internas. Además, de cumplir la función de suministrar el metal fundido, se debe asegurar una solidificación dirigida de la pieza hacia la mazarota, evitando la formación de rechupes y defectos ocasionados por la contracción metálica durante la solidificación. En la Fig. A.2 se presenta una vista esquemática del diseño de un molde. En donde:  $h_i$  es la profundidad del pozo de alimentación o de vertido del metal fundido;  $h$  la altura del bebedero hasta la línea de partición;  $P$ , la altura de la pieza medida desde la línea de partición, y  $C$ , la altura total de la pieza.

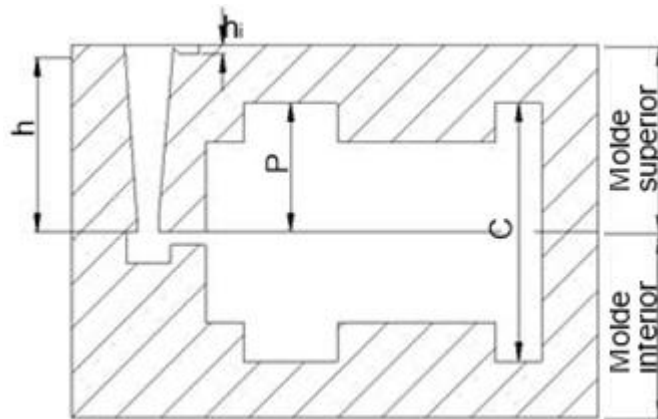


Fig. A.2. Vista lateral para el diseño de los componentes del molde.

#### B) Diseño de la mazarota

La contracción que los metales experimentan cuando solidifican y enfrían debe ser compensada, para evitar problemas como rechupes en las piezas, poros y el deficiente llenado del molde.

El volumen mínimo que debe tener una mazarota está determinado por la cantidad de metal requerido para compensar la contracción del metal solidificado. En general, el volumen de la mazarota debería ser superior al 3% del volumen de la pieza. Por otro lado, la geometría óptima de una mazarota deberá ser aquella que proporcione el máximo tiempo de solidificación. En la práctica, por razones constructivas, se suelen emplear mazarotas cilíndricas.

Los criterios para el cálculo de la mazarota son dos: de acuerdo a su volumen y al módulo de enfriamiento (Wlodawer).

De acuerdo al criterio del volumen primero se determina el diámetro,  $D_1$  correspondiente al volumen mínimo que debe tener la mazarota para cubrir la contracción de la pieza, Ec. A.1.

$$V_{\text{mazarota min}} = V_{\text{pieza (partes gruesas)}} \cdot c \cdot k. \quad (\text{A.1})$$

Las partes delgadas se consideran despreciables ya que se enfrían muy rápido y la mazarota no les puede suministrar metal fundido. El coeficiente “c” es el coeficiente de contracción volumétrica del metal (ver, Tabla A.3.), el coeficiente “k” representa el nivel de seguridad:

$$1 \leq k \leq 3$$

Si el camino de la mazarota a la pieza es muy largo se usa  $k = 3$ , normalmente  $k$  se toma con un valor igual a 2.

Con respecto al criterio de módulo de enfriamiento (Wlodawer), éste es un parámetro geométrico que representa la velocidad o el tiempo de enfriamiento de la pieza, suponiendo un valor uniforme del coeficiente de transmisión de calor en toda su superficie, el módulo se determina mediante la Ec. A.2.

$$M_{\text{pieza}} = \frac{V_{\text{pieza}}}{S_{\text{pieza}}} \quad (\text{A.2})$$

donde  $M_{\text{pieza}}$  es el módulo de la pieza,  $V_{\text{pieza}}$  es el volumen y  $S_{\text{pieza}}$  es la superficie en contacto del molde con la pieza. En el caso que el molde tenga machos, el cálculo del módulo de enfriamiento debe considerar la superficie del macho, debido a que ésta es una superficie más refractaria por no tener humedad y tener una capa de aceite, la superficie de la pieza con machos se determina según la Ec. A.3.

$$S_{\text{pieza}} = S_{\text{en contacto con la arena del molde}} + 0.5 \cdot S_{\text{en contacto con el macho}} \quad (\text{A.3})$$

El módulo de enfriamiento es máximo cuando la mazarota a calcular es una esfera ( $M = R/3$ ), entonces la mazarota ideal es la de una geometría esférica aunque presenta dificultades de construcción, por lo que se recomienda utilizar formas cilíndricas sencillas con relaciones que se pueden obtener en la Ec. A.1 como  $V/S$  o  $H/D \approx 1, 1.5, 2$ , etc.

El módulo  $M$ , es determinante para el cálculo de la mazarota, ya que ésta tiene que enfriar y por tanto solidificar más lentamente que la pieza a la cual suministra metal fundido, se trata de determinar el diámetro superior,  $D_2$  para que la mazarota solidifique después que la pieza, entre el diámetro inferior,  $D_1$  y el superior,  $D_2$  se escoge el de diámetro mayor (Fig. A.3).

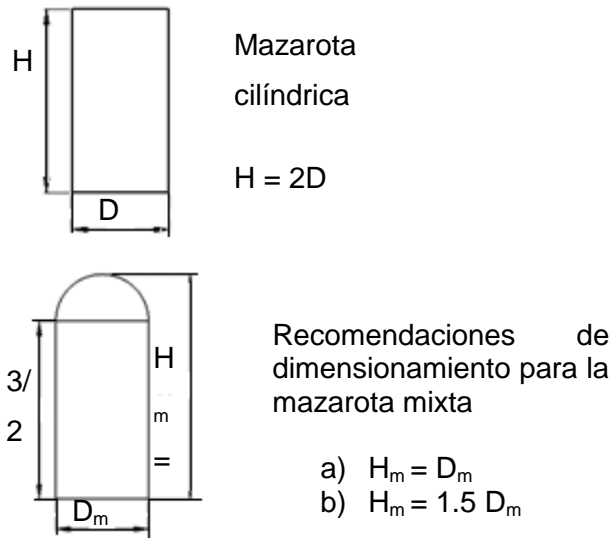


Fig. A.3. Formas de mazarotas.

Seleccione la mazarota bajo la hipótesis de que su módulo de enfriamiento  $M = V/S$ , debe ser 1.2 veces el de la pieza o sección a suministrar metal fundido Ec.A.4.

$$M_{\text{mazarota teórico}} = 1.2 M_{\text{pieza}} \quad (\text{A.4})$$

Determine la geometría de la mazarota mediante la expresión que relaciona el módulo de enfriamiento con su volumen, Ec. A.5.

$$V_{\text{mazarota teórico}} = M_{\text{mazarota teórico}} \cdot S_{\text{mazarota teórico}} = V_{\text{mazarota mínimo}} \quad (\text{A.5})$$

En cuanto a la altura de la mazarota ha de comprobarse que:

$$H_{\text{mazarota}} > H_{\text{pieza}}$$

$$H_{\text{mazarota}} < H_{\text{caja modelo.}}$$

El rendimiento de la mazarota puede mejorarse siendo recubierta con arena para macho, esto permite que el módulo aumente el doble o lo que es equivalente, la superficie de contacto con el macho valdría la mitad ya que el enfriamiento es menor (ver, Ec. A.6). Además, la mazarota puede alimentar varias piezas a la vez.

$$S_{\text{contacto}} = \frac{S_f}{2} \quad (\text{A.6})$$

El número de piezas que podría alimentar la mazarota, el volumen de los canales de distribución y el rendimiento de la mazarota se determinan mediante las Ecs. A.7, A.8 y A.9, respectivamente.

$$N^{\circ} \text{ piezas} = \frac{V_{\text{mazarota}}}{V_{\text{mazarota teórico}}} \quad (\text{A.7})$$

$$V_{\text{canales}} = 1/10 \cdot (N^{\circ} \text{ piezas} \cdot V_{\text{pieza entera}}) \quad (\text{A.8})$$

$$\eta = \frac{N^{\circ} \text{ piezas} \cdot V_{\text{pieza entera}}}{(N^{\circ} \text{ piezas} \cdot V_{\text{pieza entera}}) \cdot V_{\text{mazarota}} \cdot V_{\text{canales}}} \quad (\text{A.9})$$

Para la ubicación de la mazarota se debe considerar primero la disposición de los canales de alimentación ya que probablemente algunas



zonas de las piezas del molde presenten el riesgo de enfriar y solidificar antes de lo provisto.

Es por ello que en estas zonas se debe colocar una mazarota para evitar este problema. Una ventaja de ubicar la mazarota después del bebedero es que proporciona la ventaja de ser una trampa de escoria y restos de arena que se haya desprendido del bebedero en el proceso de colada. En la Fig. A.1 se presentan las disposiciones para la ubicación de la mazarota lateral y superior para que se tome un parámetro de su ubicación.

### C) Diseño del bebedero

Para este cálculo se determina que la altura de la mazarota debe cumplir lo siguiente:

$$H_{\text{mazarota}} > H_{\text{pieza}}$$

$$H_{\text{mazarota}} < H_{\text{caja modelo}}$$

Obtenga la altura  $H_{\text{caja modelo}}$ , en el caso de ya disponer de una caja de moldeo, en caso contrario de no disponer de una caja de moldeo se diseñara asumiendo su dimensión y diseñando así las demás partes del sistema de alimentación, como la altura del bebedero. Para determinar la dimensión del bebedero se hace uso de Ec. A.10.

$$h = H_{\text{caja modelo}} - \frac{P^2}{2C} \quad (\text{A.10})$$

donde:  $H_{\text{caja modelo}}$ , representa la altura total de la caja de molde que es la suma de la altura del bebedero más la altura de la copa de vaciado;  $P$ , la altura de la pieza medida desde la línea de partición; y  $C$ , la altura total de la pieza, al sustituir estos valores en la Ec. A.10 se encuentra la altura del bebedero que debe ser un poco menor que la altura del molde.

Para calcular el diámetro del bebedero se utiliza el Número de Reynolds, para asegurar un flujo laminar, con la Ec. A.11.

$$NR = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (A.11)$$

donde: NR es el Número de Reynolds; v, la velocidad del líquido; d, el diámetro del canal de alimentación; ρ, la densidad del metal líquido; y μ la viscosidad del fluido.

Tabla A.2. Viscosidades cinemáticas de metales.

Elemento	Viscosidad cinemática, cm <sup>2</sup> /s	Viscosidad cinemática, pulg <sup>2</sup> /s
Agua	0.0100	0.0016
Aluminio	0.0127	0.0020
Magnesio	0.0080	0.0012
Cobre	0.0040	0.0006

Se debe considerar que en las fundiciones de piezas metálicas, el NR es considerablemente más grande que 2,000 y por consiguiente presenta un flujo turbulento debido a las velocidades altas de vaciado del metal líquido en las aplicaciones reales, por lo tanto, asuma un NR = 10,000, para luego encontrar el diámetro que permita un flujo estable.

Estudios del flujo de metales fundidos en procesos de colada demuestran que la velocidad máxima del frente de metal no debe superar el intervalo de 0.4 a 0.6 m/s (400 a 600 mm/s) (Tabla A.2), esto por la generación de óxidos al romperse la capa protectora que viaja al frente del flujo.

$$d = \frac{NR \cdot \nu}{v} \quad (A.12)$$

Este es el diámetro final del bebedero (Ec. A.12), que regula el flujo del metal antes de ingresar en la cavidad del molde, para continuar calcule el diámetro final del bebedero. Si se toma un diámetro menor a éste, el flujo del metal puede que sea muy lento y quede obstruido por la solidificación del material en dicha zona.

Utilizando la ley de continuidad de masa (Ec. A.13), determine el diámetro del bebedero en la parte superior ( $D_2$ ):

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$V_1 \left( \frac{\pi D_1^2}{4} \right) = V_2 \left( \frac{\pi d_2^2}{4} \right). \quad (\text{A.13})$$

D) Dimensionamiento de canales de distribución y la base del bebedero

Para el dimensionamiento debe tomarse en consideración las siguientes recomendaciones. Presente en la Fig. A.4: en (A) no favorable y (B) favorable, para el flujo del metal fundido en el molde de arena.

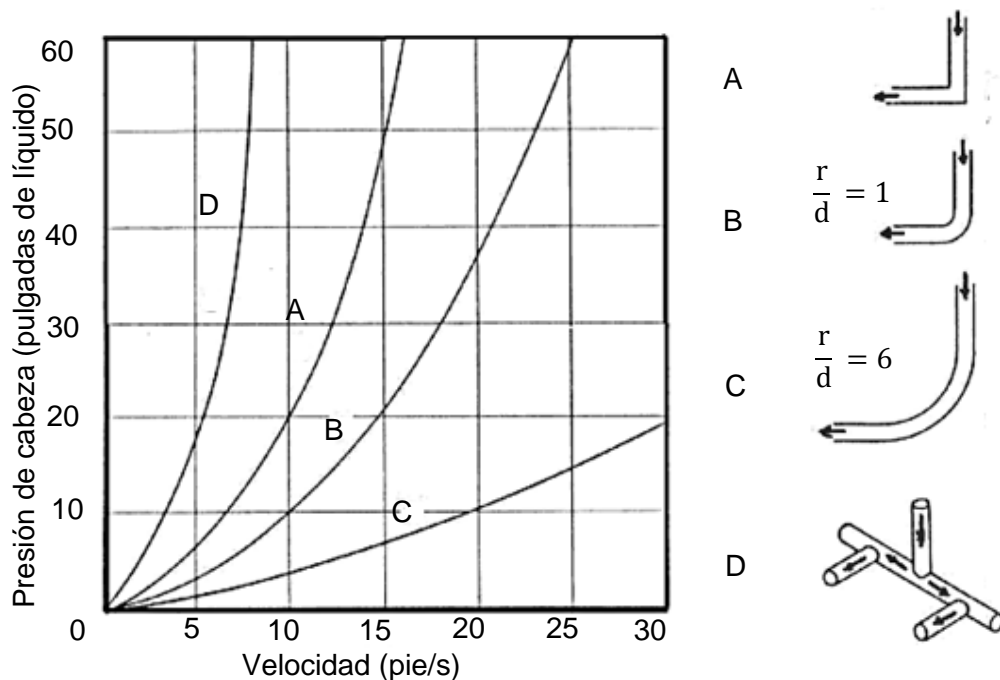


Fig. A.4. Efecto de la presión causada por los cambios bruscos de dirección del fluido.

Los cambios de dirección en ángulo cerrado del flujo del metal fundido en el modelo generan turbulencias que pueden causar rechupes o arrastre de material de las paredes internas del molde a causa de las presiones que se

generan, en la Fig. A.5 se presenta como se producen estos cambios de presión al variar la dirección del fluido, también los cambios de sección del flujo del metal fundido debe cambiar gradualmente, en la Fig. A.5a, se presenta una forma ineficiente y en la Fig. A.5b, un diseño mejorado como una recomendación para cambios de sección. En el caso que la pieza no tenga cambios de sección, no será necesario rediseñar los dibujos técnicos. Además, otra consideración que se debe considerar para el rediseño de la pieza se trata de cuando la pieza tenga paredes que se interceptan como en la Fig. A.6a, para la cual se debe realizar un rediseño y en lo posible evitar intersecciones que puedan generar rechupes por la solidificación, esta recomendación de diseño se presenta en la Fig. A.6b.

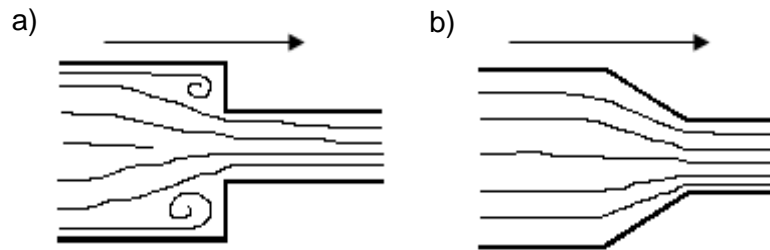


Fig. A.5. Recomendación para cambios de secciones: a) el flujo se vuelve turbulento en el cambio de sección y b) el flujo de metal fundido es correcto y evita turbulencias.

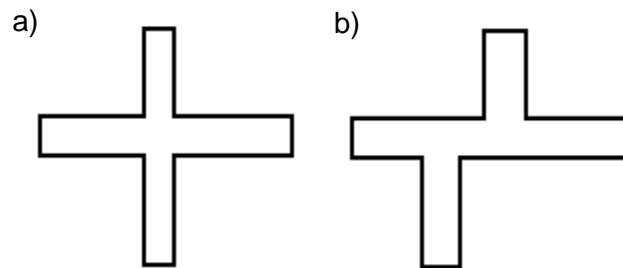


Fig. A.6. Recomendación de diseño para intersecciones de paredes: a) no recomendado y b) recomendado.

Para el diseño de los canales y sistemas de ataque se utilizará una relación entre las secciones transversal de bebedero ( $A_b$ ), canales de

distribución ( $A_c$ ) y canales de ataques ( $A_a$ ), así como se presenta en la Ec. A.14.

$$A_b > A_c > A_a. \quad (A.14)$$

Se debe asegurar que el flujo en cada punto de los sistemas de ataque del sistema de alimentación presente la misma velocidad y presión. Para ello se tiene en la Ec. A.15 la relación entre las áreas transversales de canales de ataque, canales de distribución y bebedero.

$$A_b = 2 A_c = 3 A_a. \quad (A.15)$$

Para la base del bebedero utilice la relación de la Fig. A.7 entre sus dimensiones, según su diámetro ( $D_b$ ) y el diámetro del canal de alimentación ( $D_c$ ), esta recomendación está dada para fundiciones de poca densidad y flujo turbulento.

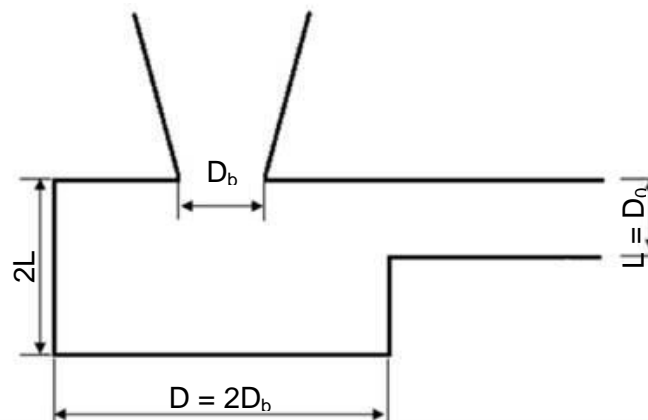


Fig. A.7. Recomendación de diseño para base del bebedero.

#### ➤ Diseño de machos

Cuando el modelo deba completarse con alguna caja de machos deberá presentar portadas o marcas. Es conveniente resaltar que las portadas de modelo y de las cajas de macho deben ser cónicas o piramidales cuando deban ser colocadas a lo largo del eje, y las del modelo unas décimas de milímetro

más largas que las de las cajas de macho para facilitar su colocación (Fig. A.8b).

Las marcas de portada deben de tener dimensiones adecuadas a los machos que deben sostener cuando se tienen que apoyar de modo horizontal (Fig. A.9a), ya que ayudan a evitar el desplazamiento del macho. Si la marca es larga o mayor que aquel (Fig. A.9b, con las marcas de cazuela) hace que el centro de gravedad caiga en la marca. Como se observa en la Fig. A.9c, se puede disponer en el molde de dos piezas unidas una a la otra por la parte superior de manera que puedan usar machos dobles.

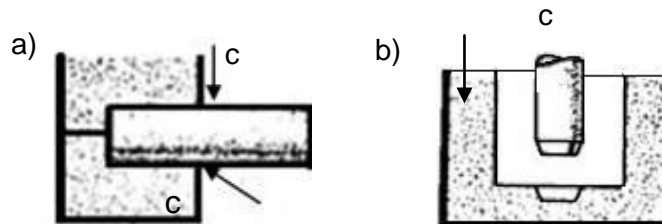


Fig. A.8. Forma correcta de colocar los machos:  
a) En voladizo y b) Portada de modelo cónica.

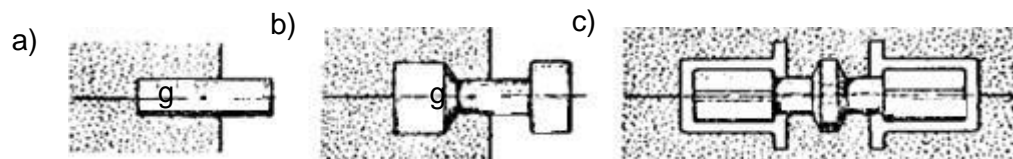


Fig. A.9. Manera para sostener los machos provistos de una sola portada: a) Macho simple horizontal, b) Macho con marcas de cazuela y c) Ejemplo de machos dobles.

También, se puede aplicar el modelo de la marca única, haciendo la aclaración de que no siempre es necesaria una doble marca. Así, se puede utilizar una marca inferior cuando al cerrar el molde no se tenga la probabilidad de un macho mal centrado que produzca un deterioro en el molde. En la Fig. A.8a, se puede observar la conveniencia de redondear el modelo en la raíz de las marcas (aristas) de forma que se prevea pérdidas de arena del molde al momento de colocar el macho.

La aplicación de las marcas de macho responden a la necesidad tanto de efectuar modelos complicados con medios sencillos, como también a la de

reforzar los modelos delicados, ya que sin estas precauciones resultarían los moldes débiles y deformables.

Las cajas de macho casi siempre pueden abrirse para extraer el macho y poseen un agujero que sirve para ser rellenos de arena.

Luego de haber diseñado los sistemas de alimentación que son necesarios se debe elaborar los nuevos planos en conjunto y en detalle de las piezas.

#### Paso 5: Selección del porcentaje de contracción volumétrica

Para el diseño del modelo se utiliza el porcentaje de contracción volumétrica del material. En la Tabla A.3 se presentan los metales más comunes para el proceso de fundición, con sus respectivos porcentajes de contracción volumétrica.

Existen dos tipos de contracción que influyen en las dimensiones de las piezas obtenidas por el proceso de fundición: el porcentaje de contracción volumétrica por solidificación y la contracción volumétrica debido al gradiente térmico, los modelistas toman en cuenta la contracción volumétrica por solidificación para sobredimensionar las cavidades de los moldes debido a que la contracción por el gradiente térmico se consideran despreciable.

Tabla A.3. Porcentaje de contracción volumétrica para metales y aleaciones comunes.

Metal o Aleación	Contracción volumétrica por solidificación, %
Aluminio	7.1
Al - 4.5% Cu	6.3
Al - 12% Si	3.8
Cobre	4.9
70% Cu-30% Zn	4.5
90% Cu-10% Al	4.0
Fundición de hierro gris	2.5
Magnesio	4.2
Zinc	6.5

Si en un laboratorio o taller de fundición se cuenta con un modelo, se debe tener en cuenta que este debe ser utilizado exclusivamente para el metal con el cual fue diseñado, ya que al utilizarlo para otro tipo de metal a fundir, las dimensiones finales no serán las previstas, lo cual se debe a que el porcentaje de contracción metálica es diferente para cada metal.

Seleccione según el material a fundir de la Tabla A.3, registre el valor correspondiente de la contracción volumétrica en la libreta de cálculos, ya que este valor será importante para el diseño del modelo.

#### Paso 6: Redimensionamiento del modelo

Para el nuevo diseño del modelo se debe realizar el redimensionamiento de la pieza utilizando el porcentaje de contracción volumétrica del material seleccionado en el paso 5, este valor representa la contracción en forma lineal de cada longitud de la pieza, el redimensionamiento de la pieza calcúlelo utilizando la Ec. A.16.

$$D_f = (D_o) + (D_o)(\% \text{ de contracción volumétrica}) \quad (\text{A.16})$$

donde:  $D_o$  representa la dimensión inicial y  $D_f$  la dimensión final del modelo. Así, esta fórmula se aplica para los diámetros y longitudes lineales.

Una consideración en cuanto al redimensionamiento de las piezas consiste en que para diámetros externos, la dimensión del diámetro en el modelo será mayor de acuerdo al porcentaje de contracción volumétrica del metal, mientras que para diámetros internos la dimensión para el modelo será menor de acuerdo al porcentaje de contracción volumétrica correspondiente al material seleccionado.

Utilice la Ec. A.16 y obtenga las nuevas dimensiones a partir de la pieza inicial, estas medidas corresponden a las dimensiones iniciales del modelo para realizar los primeros dibujos del modelo.

El redimensionamiento representa la primera etapa del diseño que tendrá el modelo, lo siguiente será considerar los correspondientes ángulos de



extracción del modelo del molde, se considera posibles excesos de material para el maquinado en caso de que aplique, pero antes de realizar esto analice la geometría de la pieza y evaluar un posible rediseño en los dibujos que faciliten la fabricación del modelo y su extracción del molde de arena, sin comprometer la función principal de la pieza por la cual ha sido diseñada.

#### Paso 7: Ángulos de extracción del modelo

Los ángulos de extracción permiten remover el modelo de forma segura del molde sin causar arrastre o destrucción de las paredes internas del molde, para eso es necesario hacer la selección apropiada de los ángulos para la extracción de los modelos según la línea de partición y la altura del mismo. En la Tabla A.4 se presentan los ángulos de extracción para modelos.

Tabla A.4. Valores aconsejables para ángulos de extracción según su altura.

Altura del modelo, mm	mm	%	Ángulo de extracción, °	Ángulo de salida, minutos y/o segundos
< 40	0.50	1.25	0.025	1'30"
40 a 60	0.75	1.80 a 1.20	0.016	1'
60 a 120	1.00	1.70 a 0.80	0.666	40"
120 a 160	1.50	1.25 a 0.90	0.666	40"
160 a 200	1.75	1.10 a 0.90	0.666	40"
200 a 250	2.00	1.00 a 0.80	0.5	30"
250 a 300	2.50	1.00 a 0.80	0.5	30"
300 a 400	3.00	1.00 a 0.75	0.5	30"
400 a 500	3.50	0.90 a 0.80	0.5	30"
>500	4.00	<0.8	0.5	30"

Con los valores de ángulos de extracción de la Tabla A.4 se elaboran los nuevos dibujos técnicos para las piezas que han sido diseñados con todas sus especificaciones como: sus dimensiones, acabado superficial, materiales de fabricación del modelo y de la pieza a fabricar, maquinado, etc.

#### Paso 8: Selección del material del modelo

Los modelos deben ser resistentes a la compresión, humedad y temperatura, esto de acuerdo con el proceso de moldeo seleccionado, en ocasiones pueden servir para la producción de una sola pieza, para estos casos

se utilizan modelos desechables, lo más usual es que el modelo sirva para varios procesos de moldeo; en este caso se emplean como materiales más comunes la madera, plásticos, hasta metales como el aluminio o el hierro fundido para una mayor vida útil al modelo.

Usualmente se fabrican dos semimodelos correspondientes a las diferentes partes del molde que es necesario fabricar.

El tamaño de los modelos deben contemplar los valores de contracción del metal y los excesos de material para procesos de maquinados posteriores.

La selección del material para el modelo dependerá de factores como: tamaño y forma de la fundición, precisión dimensional y la cantidad de veces que se requiera utilizar el modelo. En la Tabla A.5 se presentan las características de diferentes materiales para ser usados en la fabricación de modelos, seleccione el material conveniente según los requerimientos que necesite.

Tabla A.5. Características de los materiales de construcción de modelos.

Característica	Clasificación <sup>a</sup>				
	Madera	Aluminio	Acero	Plástico	Hierro fundido
Maquinabilidad	E	B	R	B	B
Costos	E	B	R	B	B
Resistencia al desgaste	P	B	E	R	E
Resistencia mecánica	R	B	E	B	B
Peso <sup>b</sup>	E	B	P	B	P
Facilidad de reparación	E	P	B	R	B
Resistencia a corrosión <sup>c</sup>	E	E	P	E	P
Resistencia a hinchamiento <sup>c</sup>	P	E	E	E	E

<sup>a</sup> E, excelente; B, bueno; R, regular; P, pobre.

<sup>b</sup> Como un factor en la fatiga del operador.

<sup>c</sup> Por agua

El factor de costos siempre forma parte de la evaluación de un proyecto por lo que se recomienda el uso de la madera para la fabricación de los modelos ya que representa una opción viable económicamente, con buenas propiedades y para pocos usos en colada, mientras que si se desea un modelo que sea utilizado frecuentemente se recomienda el aluminio o el plástico.

## ANEXO B

### MANUAL PARA LA ELABORACIÓN DE MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **MANUAL DE DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MOLDES DE ARENA PARA FUNDICIONES DE ALEACIONES DE ALUMINIO**

### **1. INTRODUCCIÓN**

En este manual se presenta los requerimientos para el diseño y elaboración de moldes de arena para la fundición de aleaciones de aluminio, se detallan algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta en la preparación de las arenas que se utilizan en la fabricación de los moldes de arena. Dado que el control de los parámetros de la arena utilizada para fabricar los moldes aseguran que en el proceso de colada no se generen defectos en la pieza como son: costras, sopladuras, puntos de alfiler, grietas, desprendimientos de arena en su interior y penetración de arena a la pieza fundida.

Un molde debe tener cualidades tales como: correcta refractariedad, buena cohesión entre los granos de arena, adecuada porosidad y permeabilidad que permita que los gases producidos salgan sin problemas, también se debe tener en cuenta el índice de finura, la cantidad de arcilla utilizada como aglutinante y el porcentaje de humedad en la arena.

### **2. OBJETIVO GENERAL**

Definir los pasos para la correcta preparación de la arena para moldes de fundiciones de aleaciones de aluminio, tales como: tipo de granulometría de la arena, aglutinantes, contenido de arcilla presente en la arena de moldeo, porcentaje de humedad, entre otras.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Los pasos para la elaboración de los moldes de arena, con el fin de evitar defectos en las piezas fundidas por un mal diseño del mismo, entre estos pasos se tienen:

#### Paso 1: Selección del tipo de arena de moldeo

Existen varias arenas que se utilizan para la fabricación de moldes, como la arena sílice, olivino, cromita y circonio. La arena apropiada se selecciona de acuerdo al metal que ha sido especificado en los planos técnicos. Así, de la Tabla B.1 obtenga la temperatura de fusión para el metal a fundir.

Tabla B.1. Temperatura de fusión de metales no ferrosos comunes.

Metal no ferroso	Temperatura de fusión, °C
Aluminio	660
Cobre	1083
Bronce	830 a 1020
Latón	930 a 980

Con el valor de la temperatura de fusión para el metal a fundir, se selecciona la arena que cumpla esta condición de temperatura mediante la Tabla B.2, se debe tener en consideración que, la temperatura de fusión del metal es menor a la temperatura de colada en el molde, generalmente esta diferencia de temperatura es de ~50 °C.

Tabla B.2. Propiedades de las arenas de moldeo.

Propiedad	Arena sílice	Arena cromita	Arena circonio	Arena olivino
Dureza según Mohs	7	5.5	7.5	6.5 a 7
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	2.65	~4.5	~4.5	~3.3
Densidad aparente a granel, g/cm <sup>3</sup>	1.3 a 1.5	2.4 a 2.8	2.7 a 2.9	1.6 a 2.0
Temperatura de fusión, °C	1760 a 1780	1800 a 1900	2200 a 2400	1750 a 1850
Dilatación lineal hasta 600 °C, %	1.25	0.4	0.2	0.6

La información que proporciona la Tabla B.2, representa valores óptimos de propiedades de las diferentes arenas con las cuales se fabrican los moldes de fundición, además se debe tener presente que estas arenas no suelen ser de fácil adquisición ya que los proveedores locales no la distribuyen debido a que no existe demanda de este tipo de arena; por lo que, al no disponer de las arenas mencionadas en la Tabla B.2, se recomienda hacer uso de la arena de río como una alternativa para solventar esta necesidad, ya que esta arena cumple con las características necesarias para su utilización en la construcción de moldes de fundición en arena.

#### Paso 2: Selección de propiedades de la arena de moldeo

La selección de las propiedades que debe tener la arena de moldeo se realiza tomando en cuenta el metal a fundir, el cual se ha definido en los planos técnicos de la pieza. Así, en la Tabla B.3 se presentan las propiedades de la arena de moldeo según el tipo de aleación que se fundirá.

Tabla B.3. Características y propiedades de las arenas de moldeo.

Tipo de aleación	Humedad, %	Permeabilidad	Resistencia a la compresión, N/cm <sup>2</sup>	Arcilla y polvo, %	Índice de finura
Aluminio	6.5 a 8.5	7.0 a 13	4.56 a 5.27	12 a 18	225 a 160
Latón y Bronce	6.0 a 8.0	13 a 20	4.92 a 5.62	12 a 14	150 a 140
Cobre y Níquel	6.0 a 7.5	37 a 50	4.56 a 5.62	12 a 14	130 a 120

<sup>a</sup> Fundición gris de baja calidad, de densidad irregular.

#### Paso 3: Determinación de la granulometría de la arena

La correcta selección de la granulometría de la arena [1] con la que se fabrican los moldes es de mucha importancia, ya que esta incide directamente sobre la calidad superficial de la pieza obtenida directamente del proceso de fundición.

Para determinar el valor de la granulometría apropiada de la arena, se utiliza la información de la Tabla B.4 y se selecciona el índice de finura recomendado para el tipo de aleación que se fundirá, luego, con este valor del índice de finura, ubique estos datos en la Tabla B.5 y se obtiene así la granulometría apropiada para la aleación en particular que se estará fundiendo.

Tabla B.4. Índice de finura según el metal a fundir.

Metales	Índice de finura según AFS
Acero	40 a 65
Aleaciones de cobre	100 a 120
Aleaciones ligeras	100 a 140

Tabla B.5. Índice de finura de las arenas de moldeo.

Finura de la arena	Índice de finura según AFS	Grano medio, $\mu\text{m}$
Muy fina	110 a 140	140 a 110
Fina	70 a 110	250 a 140
Media	55 a 70	300 a 230
Gruesa	45 a 55	370 a 300
Muy gruesa	25 a 45	700 a 370

Cuando el índice de finura esté ubicada entre dos rangos, la decisión de cual tomar se basa en la calidad superficial que se desea obtener en la pieza resultante. Es de recalcar que entre mayor sea el índice de finura, el acabado superficial de la pieza será mejor.

#### Determinación experimental de la granulometría de la arena

Los pasos para determinar experimentalmente la granulometría de la arena de moldeo se presentan a continuación:

- a) Determinar el porcentaje de arena (%Q) y de arcilla (%Ar) presente con respecto a la masa total de arena de moldeo.
- b) Obtener una fracción representativa de ~500 g (una palada).
- c) Realizar un cuarteo, es decir, luego de revolver bien la arena repartirla en 4 partes iguales, y seleccionar dos cuartos que estén situados en cuadrantes opuestos.

- d) Mezclar bien cada una de las fracciones, y extraer una muestra de 180 g de arena para realizar el ensayo.
- e) Ordenar de manera ascendente los tamices del diámetro de malla más fino al más grande (ver, Fig. B.1).



Fig. B.1. Forma correcta de colocar los tamices.

- f) Preparar una serie de 8 recipientes de plástico e identificarlos con los números de los tamices, pesar cada uno.
- g) Verter la muestra de arena seleccionada sobre el tamiz superior, procurando no llenar más del 70 % de su capacidad (ver, Fig. B.2).



Fig. B.2. Colocación de la arena en los tamices.

- h) Colocar el juego de mallas en la maquina tamizadora durante 15 minutos, el tamiz superior con arena en un 70 % de su capacidad (ver, Fig. B.3).





Fig. B.3. Vibrador mecánico o tamizadora.

- i) Luego de haber finalizado el tiempo, colocar las porciones retenidas en cada malla en recipientes teniendo el cuidado de dejar limpias las mallas, utilizar el cepillo y/o brocha (ver, Fig. B.4).



Fig. B.4. Limpieza de los tamices.

- j) Pesar las cantidades contenidas en los recipientes plásticos.
- k) Registrar los datos, en la Tabla B.6.

Tabla B.6. Registro de datos obtenidos durante el ensayo.

Número de tamiz	Cantidad retenida (Q), kg	%Q	Multiplicador (M)	Q · M
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
Fondo				

Cálculo de resultados:

Después de haber finalizado el proceso de tamizado, se toma del registro la cantidad de arena retenida en cada tamiz (q) (ver, Tabla B.6), se efectúa la operación con relación al peso inicial ( $P_o$ ) de la arena mediante la Ec. B.1.

$$\%Q_1 = \frac{q_1}{P_o} \cdot 100, \quad \%Q_2 = \frac{q_2}{P_o} \cdot 100, \quad \%Q_n = \frac{q_n}{P_o} \cdot 100. \quad (B.1)$$

En la norma americana se usa los números: 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270 y resto, que indican el número de hilos por pulgada lineal. En dicha norma se asigna un coeficiente multiplicador M: 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 y 300 para cada dimensión de malla respectivamente.

Efectué el producto de cada peso de arena retenida por el multiplicador M correspondiente al tamiz en cuestión y sume estas cantidades (Ec. B.2) colocar estos valores en la Tabla B.6:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (Q \cdot M)_i. \quad (B.2)$$

Divida el resultado de la Ec. B.2 por el porcentaje total de arena hasta el tamiz que ha analizado (Ec. B.3) obteniendo así el número de finura media de la arena examinada.

$$f = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(Q \cdot M)_i}{(Q\%)_i}. \quad (\text{B.3})$$

#### Paso 4: Selección de aglomerante

Existen tres tipos de arcillas que se emplean como aglomerantes con las arenas de moldeo, entre las cuales están: la bentonita, la cual resulta de residuos de erosión de cenizas volcánicas; la caolinítica que tiene baja capacidad de absorción de iones; y, las arcillas ílticas: la cual es empleada como aglomerante de arenas de moldeo, mezcladas con otras arcillas las cuales presentan baja refractariedad y no siempre tienen propiedades aglomerantes.

Seleccione el aglomerante apropiado para la arena de moldeo en base al punto de fusión del metal a fundir, según las siguientes consideraciones:

- La bentonita sódica se utiliza en arenas de moldeo para metales de alto punto de fusión y alta tensión superficial como el hierro fundido, acero y piezas grandes;
- La bentonita cálcica para metales no ferrosos, hierros maleables y arenas de machos, y
- La caolinítica para metales de bajo punto de fusión y baja tensión superficial.

Una vez seleccionado el aglomerante, se debe realizar una prueba a la arena de moldeo para determinar la cantidad de aglomerante (bentonita) que está presente inicialmente en ella, para luego, ajustar este valor hasta el valor indicado de la Tabla B.3:

El procedimiento para determinar experimentalmente el contenido de arcilla es por medio de la prueba de azul de metileno [2].

Las etapas a considerar cuando se realiza este ensayo son las siguientes [2]:

- A) Preparación de la muestra de ensayo: tome una muestra representativa de la arena que se quiere evaluar y séquela hasta masa constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C y se tamiza por la malla de 75  $\mu\text{m}$  (Nº 200), el

pasante se utiliza para la prueba obteniendo una masa superior a 10 g (ver, Fig. B.5) y el retenido se descarta.



Fig. B.5. Balanza de precisión donde se pesa la muestra de arena.

B) Preparación de la solución colorante azul de metileno: pese un gramo de azul de metileno y disuélvalo en 200 ml de agua destilada para producir la solución colorante, de tal manera que cada ml de solución contenga 5 mg de azul de metileno, una vez preparada la solución (ver, Fig. B.6), deberá conservarse protegida de la luz y emplearse antes de 28 días.



Fig. B.6. Solución de azul de metileno preparada.

C) Determinación del azul de metileno: el procedimiento para determinar la cantidad de azul de metileno en la muestra de arena se hace mediante los siguientes pasos:

- a) Coloque un filtro de papel sin cenizas de tamaño de poro de  $8\ \mu\text{m}$  sobre el vaso de precipitados de 500 ml posicionado boca arriba.
- b) Coloque la cantidad de  $10 \pm 0.05\ \text{g}$  de material pasante del tamiz  $75\ \mu\text{m}$  (Nº 200), secado hasta masa constante, en un segundo vaso de precipitado tipo griffin de 500 ml.

- c) Adicionar 30 ml de agua destilada (ver, Fig. B.7) y batir con la varilla de vidrio hasta tener una lechada (ver, Fig. B.8).



Fig. B.7. Procedimiento para la obtención de la lechada.

- d) Llene la bureta con la solución de colorante de azul de metileno, procurando previamente que la solución este bien mezclada, al finalizar el ensayo se coloca la parte sobrante en un frasco color café envuelto con papel de aluminio en un lugar alejado de la luz.



Fig. B.8. Mezcla del agua destilada con la arena de muestra.

- e) Agregue con la bureta en cantidades de 0.5 ml de solución de azul de metileno al vaso que contiene la lechada y agitar durante un minuto (ver, Fig. B.9).



Fig. B.9. Mezcla de la solución de azul de metileno con la lechada.

- f) Transcurrido un minuto realice la prueba de coloración, mientras los sólidos están aún en suspensión, remueva una gota del líquido con la varilla de vidrio y coloque la gota sobre el papel filtro (ver, Fig. B.10).

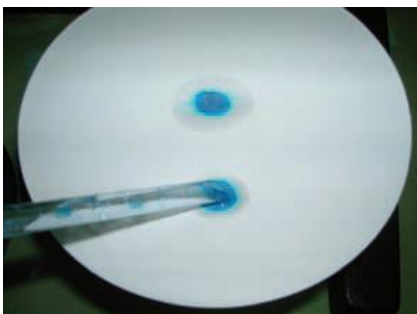


Fig. B.10. Prueba de coloración.

- g) La prueba de coloración puede dar como resultado una mancha azul oscuro sobre el papel filtro, rodeada de una aureola incolora, Si ello ocurre, se continúa con el ensayo adicionando a la lechada incrementos de 0.5 ml de solución de azul de metileno, agitando durante un minuto para cada incremento y realizando de nuevo la prueba en el papel filtro hasta que se observe el aro azul alrededor de la gota (ver, Fig. B.11).

- h) El ensayo se da por finalizado si la aureola formada permanece durante 5 min; es decir, si en el segundo, tercero, cuarto y quinto minuto desde la última adición de solución colorante continúa apareciendo la aureola azul claro con un espesor de ~1 mm. Para ello, en el minuto 2 se efectúa una segunda prueba de coloración, en el minuto 3 se efectúa una tercera prueba, etc.
- i) Puede ocurrir que la aureola desaparezca al efectuar la segunda, tercera o cuarta prueba de coloración (minutos 2, 3 o 4). En ese caso, es necesario volver a adicionar otros 5 ml, reiniciando el ensayo.
- j) Si la aureola aparece en la cuarta prueba pero desaparece en la quinta y última, entonces es necesario reiniciar el ensayo, pero con la salvedad de que se añaden 0.2 ml en lugar de 0.5 ml, puesto que si la aureola ha permanecido durante 4 min se debe a que la arena se encuentra casi en condiciones de saturación por absorción de solución colorante.
- k) El ensayo se da por finalizado si la prueba de coloración presenta una aureola de color azul más claro de ~1 mm de espesor durante los 5 minutos posteriores a la última adición de solución colorante, habiendo efectuado su comprobación en cada unidad de tiempo. Se anota el volumen de colorante añadido.

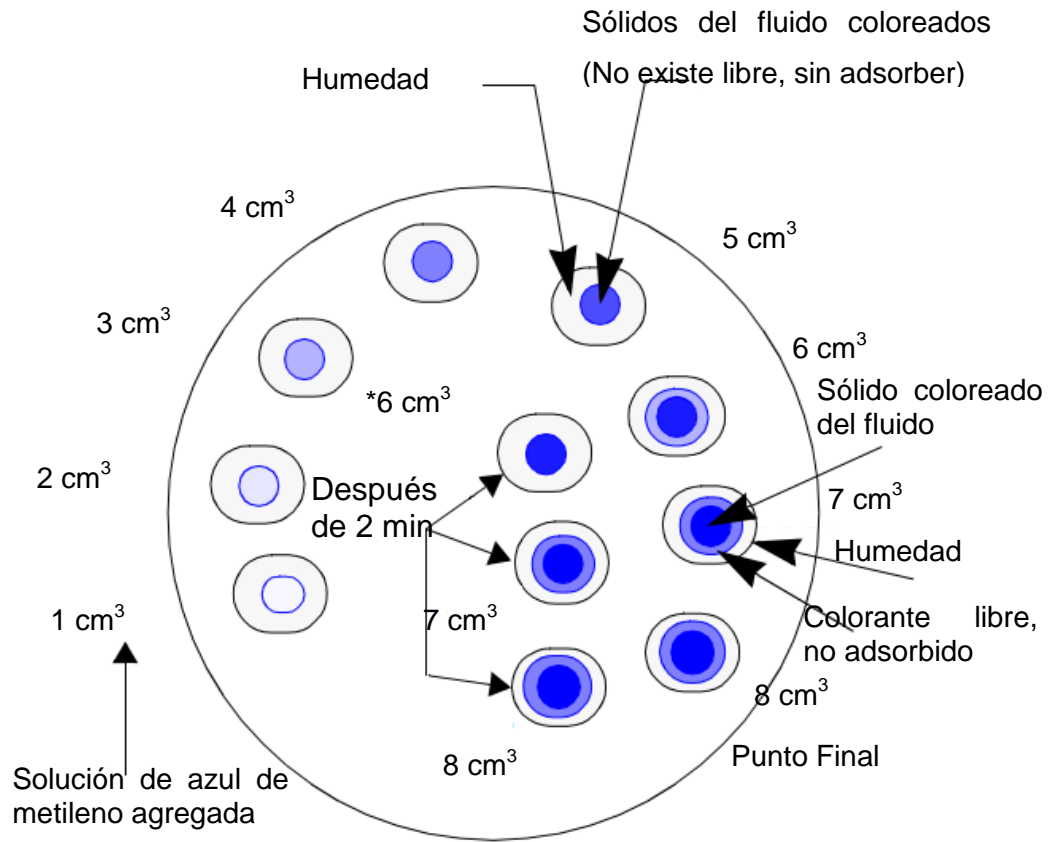


Fig. B.11. Ensayos de titulación con azul de metileno, por gotas.

#### CÁLCULO DE RESULTADOS

El valor de azul de metileno, se expresa en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica 0.2 mm y se calcula con la Ec B.4 [2]:

$$CAM = \frac{AMT}{Q}. \quad (B.4)$$

Cálculo de Bentonita equivalente, lb/bbl.

$$B_{eq} = 5 \cdot \left( \frac{CAM}{Q} \right). \quad (B.5)$$

Cálculo de Bentonita equivalente, kg/m³.

$$B_{eq} = 2.85 \cdot (B_{eq}) \quad (B.6)$$



donde: CAM: Capacidad de azul de metileno,

AMT: Azul de metileno requerido para la titulación, ml;

Q: Muestra de arena ensayada, ml; y

B<sub>eq</sub>: Bentonita equivalente.

Una vez obtenido el valor de aglomerante presente en la arena, ajústelo al valor indicado mostrado en la Tabla B.3, si la arena contiene más aglomerante que el requerido, será necesario lavar y posteriormente secar la arena, para así agregar la proporción correcta de aglomerante.

Cuando se construye el molde de fundición por primera vez de manera general se utiliza un 93% en peso de arena nueva y un 7% en peso de aglomerante, cuando se realiza la colada, la arena y el aglomerante experimentan ciertos cambios en sus propiedades debido a la elevada temperatura que están presentes en el proceso de colada, por lo que para contrarrestar este efecto a partir de la segunda colada se recomienda utilizar un 20% en peso de arena del primer molde, un 78.3% en peso de arena nueva y de aglomerante un 7% peso con respecto a la arena nueva y un 0.50% en peso respecto a la arena reutilizada.

#### Paso 5: Determinación de la humedad a la arena de moldeo

La determinación de la cantidad de humedad a la arena de moldeo es de gran importancia, ya que ésta le proporciona a la arena mediante el aglomerante la propiedad de la plasticidad. Para ello, por medio de la Tabla B.3 seleccione el porcentaje de humedad recomendado para la arena de moldeo, el cual es particular para cada tipo de aleación que se va a fundir.

Los pasos a seguir para determinar el contenido de humedad [3] se listan a continuación:

- a) Determinar y registrar la masa de un recipiente limpio, seco (ver, Fig. B.12) y su tapa (esta última, se usará cuando el ambiente sea muy caluroso y se desee evitar que la mezcla pierda cierto contenido de humedad durante el proceso de preparación de las muestras).



Fig. B.12. Registro del peso de la muestra con su recipiente.

- b) Se escoge una muestra de arena para el ensayo que sea representativa de acuerdo a la Tabla B.7 [3]:

Tabla B.7. Selección de la muestra de arena.

Tamaño máximo de partícula (pasando 100%), mm	Tamaño de tamiz estándar	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de humedad, reportado a $\pm 0.1\%$	Masa mínima de espécimen húmedo para prueba de contenido de humedad, reportado a $\pm 1\%$
$\leq 2$	Nº 10	20 g	20 g <sup>A</sup>
4.75	Nº 4	100 g	20 g <sup>A</sup>
9.50	3/8 pulg	500 g	50 g
19.00	3/4 pulg	2.5 kg	250 g
37.50	1 ½ pulg	10 kg	1 kg
75.00	3 pulg	50 kg	5 kg

<sup>A</sup> Para ser representativo, no se deben usar menos de 20 g.

- c) Registre el peso de la muestra de arena, (ver, Fig. B.13).

La cantidad mínima de masa usada, puede necesitar ser incrementada para poder obtener los dígitos mínimos necesarios para la masa de agua cuando se reporten contenidos de agua más cercano al 0.1% [3].

Si la muestra de arena es tal que pueda ser manipulada y manejada sin pérdida significativa de su contenido de humedad y segregación, debe ser mezclado completamente, seleccionando luego una porción representativa según la Tabla B.7, si la muestra no permite un fácil mezclado, se aconseja obtener 5 grupos aleatorios de la arena, mezclarlos bien.



Fig. B.13. Peso de la muestra representativa.

- d) Se coloca la muestra de arena húmeda en un recipiente; se coloca la tapa firmemente, y se determina el peso del recipiente con la muestra, usando una balanza apropiada (ver, Fig. B.14). Se registra este valor.



Fig. B.14. Peso de la muestra húmeda junto con su recipiente.

- e) Se retira la tapa (si fue usada) y se coloca el recipiente con la muestra húmeda en el horno para secarla hasta obtener una masa constante. El horno secador se mantiene a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C (ver, Fig. B.15). El tiempo requerido para obtener una masa constante puede variar dependiendo del tipo de muestra, tamaño del espécimen, tipo de horno y su capacidad, y otros factores. Para facilitar el secado al horno de muestras de ensayo muy grandes, éstas deben ser colocadas en recipientes que tengan un área superficial amplia (bandeja) y separada en pequeños grupos.



Fig. B.15. Colocación de la muestra húmeda en el horno secador.

- f) Después que la muestra se haya secado a masa constante, se remueve el recipiente del horno y se coloca la tapa. Se deja que la muestra y el recipiente se enfríen a la temperatura ambiente, o hasta que el recipiente pueda ser manejado fácilmente con ambas manos y la operación de pesaje no esté afectada por corrientes convectivas. Se determina la masa del recipiente y de la muestra secada en el horno usando la misma balanza que se usó en las operaciones descritas en los literales a) y c). Se registra este valor.
- g) Si el recipiente no tiene tapa, la muestra se pesa inmediatamente para que la temperatura del recipiente sea tal que la operación del pesaje no sea afectada por corrientes convectivas o después de enfriarlo en un secador.

Con los datos obtenidos, se procede a determinar el contenido de humedad mediante la Ecuación B.7 [3]:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \cdot 100 \quad (\text{B.7})$$

donde: % de Humedad: porcentaje de agua presente en la muestra de arena o humedad;

$W_1$ : Masa del recipiente y del espécimen húmedo, g; y

$W_2$ : Masa del recipiente y del espécimen seco, g.

Después de obtener el valor de la humedad presente en la muestra de arena, se debe adicionar o quitar humedad para llevar la arena de moldeo al valor indicado en la Tabla B.3, este proceso se realiza de la siguiente manera: si el valor de humedad es menor al indicado, agregue agua en pequeñas cantidades y luego realice la prueba para la determinación del porcentaje de humedad, este proceso se debe realizar hasta llegar al valor indicado de la Tabla B.3, en caso contrario, al tener un exceso de humedad el cual puede provocar sopladuras durante la colada, se debe secar la arena al sol hasta disminuir la humedad y luego se continúa con el procedimiento antes descrito hasta obtener el valor recomendado.

#### Paso 6: Diseño de la arena para machos

Cuando en el diseño de la pieza, ésta tiene una cavidad u orificio se necesita diseñar un macho, para generar dicha cavidad; la arena utilizada siempre es una mezcla de arena con sílice como la utilizada en la generación del molde pero con la adición de otros componentes debido al distinto comportamiento que el macho debe tener durante la colada, de forma general la decisión de que adicionarle a la arena sílice se toma sobre la base del nivel de producción de las piezas. Si el proceso de producción es menor de un ciento de piezas se toma en consideración hacer el macho con el proceso llamado “al aceite”, este macho al aceite tiene una gran facilidad de preparación, no retoman mayor humedad después de fabricados y desprenden pocos gases durante la colada.

Para este proceso utilice aceite de lino o linaza, aunque puede utilizar también casi toda clase de aceites vegetales como de maíz, soya y algodón; aceites animales, como el de pescado y sardina; y minerales, es decir, derivados el petróleo. Con el objetivo de minimizar los costos se tiene la costumbre de reemplazar parte del aceite de lino por otros aceites ya que mejora la resistencia en seco, el porcentaje utilizado es del 2 al 4% (a mayor índice de finura de la arena, mayor porcentaje del aglomerante).

Es muy importante tener en consideración que el aceite y las arcillas (caso general con la bentonita) al unirse reaccionan produciendo una especie de jabón el cual no tiene poder aglutinante y que por lo tanto se hace necesario disponer de una arena sílice, lavada y exenta de arcillas con el fin de evitar pérdidas por desperdicio del aceite y propiedades muy malas de los machos.

Para la preparación de las mezclas de arena para machos se procede de forma semejante a la preparación de arenas sílico-arcillosas sintéticas para moldeo: inicialmente agregue a la arena sílice, los productos secos (dextrita) dejando homogenizar la mezcla durante ~2 min, proceda a colocar el aceite, mezcle de 10 a 15 min y cuide de no elevar la temperatura de la mezcla.

Una vez que se ha preparado esta mezcla debe depositar ésta en recipientes tapados o cubiertos con telas o plásticos para evitar que se sequen y comiencen a endurecerse.

Calentar entre 185 a 210 °C para acelerar la oxidación y dar una buena resistencia “en seco”. Cuando se han utilizado otros aceites el cocido se realiza a 300 °C.

Teniendo la arena preparada, se debe elaborar un molde con la forma positiva de la cavidad de la pieza, para luego rellenar dicho molde de machos con la arena de machos, se extrae del molde, se coloca en el molde inferior hecho para la generación de la pieza, éste se cierra para luego proceder con la colada.

Paso 7: Procedimiento para la construcción del molde.

A continuación se lista el procedimiento a seguir para la elaboración del molde luego de definir sus características en los pasos anteriores.

A) Con los planos obtenidos y la implementación de los Manuales A y B, se deben fabricar las partes del modelo, los sistemas de alimentación y colocarlos en la placa de moldeo, como se observa en la Fig. B.16.

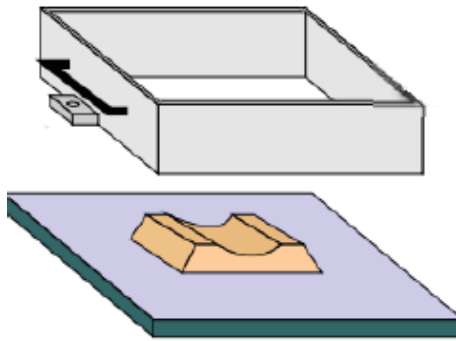


Fig. B.16. Placa de moldeo y caja de moldeo.

B) Colocar sobre la placa de moldeo inferior la caja del molde inferior, sujetándolo mediante los seguros y pernos guías de la placa de moldeo, se debe asegurar que la superficie de la placa de moldeo y del molde estén limpias y sin señales de daño, luego de unir ambas partes esparza uniformemente el polvo separador (talco o grafito) usando un colador fino o un pedazo de tela, para evitar que se generen grumos y así se cree una capa fina del polvo separador, esto evitará que la arena se pegue a la placa de moldeo y al modelo (ver, Fig. B.17).

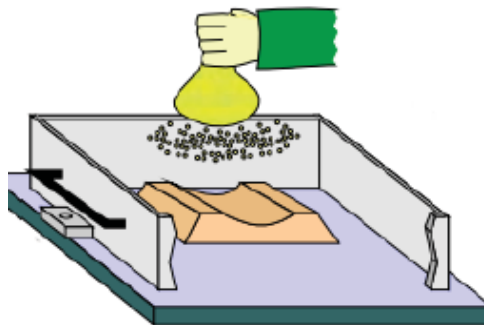


Fig. B.17. Forma de colocar el polvo separador en la placa de moldeo.

C) Colocar una primer capa de la arena de moldeo con las características obtenidas mediante este manual, se recomienda que la primer capa se coloque utilizando una malla estándar usada en albañilería, de esta forma se evitará que la arena se deposite formando grumos o terrones, la primera capa debe procurar no ser mayor a 3 cm de altura (ver, Fig. B.18).

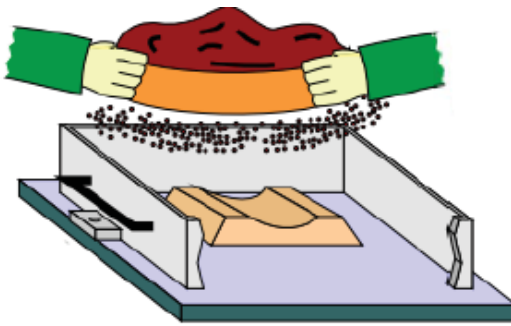


Fig. B.18. Forma para colocar la primera capa de arena de moldeo sobre el modelo y la placa de moldeo.

D) Compactar la arena de moldeo, la forma correcta de compactación de la arena sobre la placa de moldeo se realiza desde los extremos del molde hacia el centro, las partes del modelo con geometría compleja se puede compactar haciendo presión con herramientas pequeñas o manualmente, esto con el fin de no dañar el modelo con el proceso de compactación (ver, Fig. B.19).

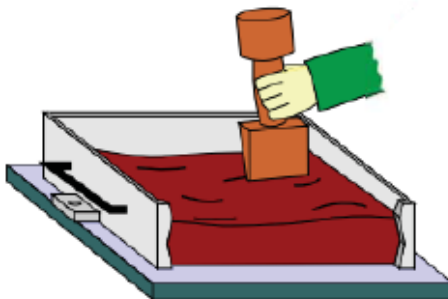


Fig. B.19. Procedimiento de compactación de arena.

E) Llenar el molde de arena, en este paso se coloca en mayor cantidad la arena de moldeo y se utiliza un apisonador de base plana para compactar, también se recomienda compactar con un apisonador de punta más pequeña y plana para las orillas del molde, se compacta hasta un nivel de 2 cm sobre la superficie superior de la caja de moldeo, luego con una regla de madera se remueve el exceso de arena, procurando no desperdiciar arena, después de remover el exceso de arena, se gira el molde de forma que la los puntos de



sujeción de la caja de moldeo estén en la parte superior, se retiran los seguros (ver, Fig. B.20).

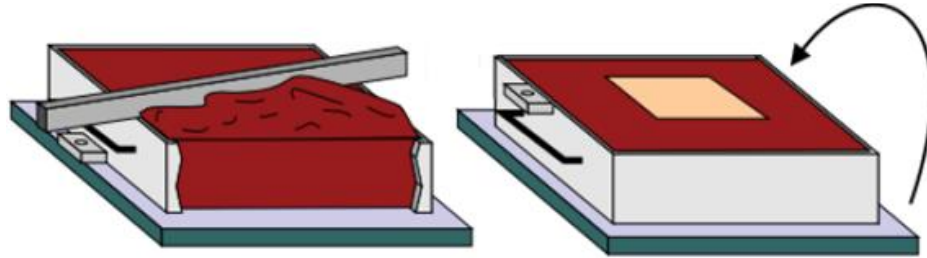


Fig. B.20. Forma para remover el exceso de arena y giro de la caja de moldeo.

F) Se retiran las partes del modelo y los sistemas de alimentación, procurando no dañar las paredes internas del molde, luego de retirar el modelo se verifica la calidad de la huella y de ser necesario se debe realizar las reparaciones al molde utilizando espátulas y brochas para remover con cuidado la arena que haya quedado al interior del molde (ver, Fig. B.21).

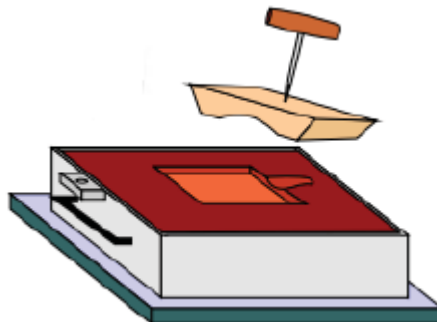


Fig. B.21. Proceso de retiro del modelo.

G) Para la fabricación del molde superior, seguir el procedimiento descrito en los pasos A) a F), al finalizar los dos moldes inferior y superior se procede a generar los respiraderos y la copa de vaciado en el molde superior para que permitan la salida de los gases producidos en la colada del metal en el molde de arena, luego se coloca con mucho cuidado el molde superior sobre el molde inferior, el molde inferior debe tener listos los pernos que servirán de guía para colocar el molde superior, para finalizar se sujetan ambos moldes por medio de pernos (ver, Fig. B.22).

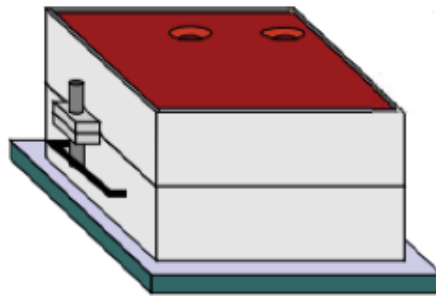


Fig. B.22. Unión de los moldes superior e inferior.

Hasta este punto el molde está construido, luego con las dos partes del molde unidas, el molde está listo para el proceso de colada, se debe colocar el molde en un lugar de fácil acceso con el crisol conteniendo el metal fundido, luego de colar el metal en el interior del molde se espera a que el metal se enfríe hasta temperatura ambiente, en este momento la pieza fundida se puede retirar del molde de arena, al extraer la pieza se debe realizar con mucho cuidado para no generar esfuerzos, también se debe reciclar la arena que no fue afectada por las altas temperaturas del metal, a esta arena se le deberá realizar las pruebas respectivas para determinar sus propiedades para su posterior reutilización. Luego, retirar los sistemas de alimentación, mazarotas, canales de alimentación y bebedero, limpiar cada elemento con un cepillo de cerdas blandas y colocarlos en un lugar seguro y libre de humedad. Efectuar el proceso de limpieza y remoción de rebabas a la pieza recién colada en el molde de arena para su posterior uso.

## REFERENCIAS

- [1] Grau, J. (2012). *Tecnología de la fundición*
- [2] Norma INV E-235-07. (2007). *Valor de azul de metileno en agregados finos y llenante mineral*. Recuperado de:  
[ftp://ftp.ucauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-235-07.pdf](ftp://ftp.ucauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-235-07.pdf)
- [3] Norma INV E 122–07 (2007). *Determinación del contenido de humedad del suelo, roca y mezclas de suelo agregado*. Recuperado de:  
[http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-122-07\\_0.pdf](http://labsueloscivil.upbbga.edu.co/sites/default/files/Norma%20INV%20E-122-07_0.pdf).