

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LABORATORIO  
PARA COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL”**

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

**DANILO EDUARDO BOADA RAMOS**

**d\_boada2012@hotmail.com**

**BERNARDO XAVIER RODRÍGUEZ REINOSO**

**xavier.rodriguez.reinoso@gmail.com**

**DIRECTOR: DR. VÍCTOR CÁRDENAS**

**victor.cardenas@epn.edu.ec**

**Quito, Agosto del 2009**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Danilo Eduardo Boada Ramos y Bernardo Xavier Rodríguez Reinoso, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

**Danilo Eduardo Boada Ramos**

---

**Bernardo Xavier Rodríguez Reinoso**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Danilo Eduardo Boada Ramos y Bernardo Xavier Rodríguez Reinoso, bajo mi supervisión.

---

**Dr. Víctor Cárdenas**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Fausto Oviedo**  
**COLABORADOR**

---

**Ing. Jaime Vargas**  
**COLABORADOR**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Dios porque aunque yo me he alejado de él, el nunca se alejado de mí, brindándome salud, una familia unida, y una preciosa sobrina.

A mis padres por su infinito amor, sacrificio y comprensión. Gracias viejitos por existir y estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, los adoro.

A mis hermanos Alejito y Robertito, porque gracias a sus sacrificios fueron abriendo y guiando mi camino.

Al Doctor Víctor Cárdenas, por su acertada dirección en el proyecto.

A mi compañero de tesis, por su sincera amistad y paciencia para elaborar la tesis.

A mis compañeros de promoción, que de una u otra manera contribuyeron en la formación de este proyecto. Los Huarohumas.

**Danilo Eduardo Boada Ramos**

Agradezco a Dios por guiar mi camino durante mi vida estudiantil, y por tener la fortuna de contar con mi familia y amigos.

A mis padres y hermanos por el apoyo que han sabido brindar durante mis estudios.

Al Doctor Víctor Cárdenas por su acertada dirección en el proyecto y por el apoyo brindado para el desarrollo del mismo.

Al personal del Laboratorio de Fundición, por toda la ayuda prestada y los conocimientos que han sabido compartir.

A mis compañeros de promoción, los HUAROHUMAS, gracias por su colaboración.

**Xavier Rodríguez Reinoso**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado con mucho amor para mi familia, pero especialmente es para una persona que desde el momento que nació cambio mi vida, y la de mi familia llenándole de amor y fortaleciéndole aún más. Si mi princesita este proyecto es para ti Joancita, gracias por existir y aunque solo te podamos ver un día a la semana, queremos decirte que te amamos y que llenas nuestro ser con tus lindos gestos y ganas de vivir.

**Danilo Eduardo Boada Ramos**

Dedicado a todos los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, con la esperanza que el presente trabajo sea de provecho.

**Xavier Rodríguez Reinoso**

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 .....   | 1  |
| 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....                                 | 1  |
| 1.1 ANTECEDENTE .....  | 1  |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                             | 1  |
| 1.3 INTERROGANTES DE LA INVESTIGACIÓN .....                      | 2  |
| 1.4 OBJETIVOS .....  | 2  |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL: .....                                    | 2  |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....                               | 2  |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN .....  | 2  |
| CAPÍTULO 2 .....   | 3  |
| 2. MARCO TEÓRICO .....   | 3  |
| 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....                      | 3  |
| 2.2. PRINCIPIOS DE MOLDEO .....                                  | 3  |
| 2.2.1 CONCEPTO DE MOLDEO .....                                   | 3  |
| 2.2.2 FENÓMENOS EN EL MOLDEO. ....                               | 4  |
| 2.3. PROCESOS DE FUNDICIÓN. ....                                 | 6  |
| 2.3.1 FUNDICIÓN EN MOLDES PERDIDOS .....                         | 6  |
| 2.3.1.1 Fundición en arena .....                                 | 6  |
| 2.3.1.2 Moldeo en cáscara o en concha. ....                      | 10 |
| 2.3.1.3 Proceso de moldeo con silicato de sodio .....            | 13 |
| 2.3.1.4 Moldeo con grafito compactado .....                      | 14 |
| 2.3.1.5 Fundición en modelo consumible (LOST FOAM) .....         | 14 |
| 2.3.1.6 Fundición en molde de yeso. ....                         | 16 |
| 2.3.1.7 Fundición en molde cerámico .....                        | 17 |
| 2.3.1.8 Fundición por revestimiento o cera perdida. ....         | 18 |
| 2.3.1.9 Fundición por revestimiento en cáscara de cerámica ..... | 20 |
| 2.3.1.10 Fundición al vacío. ....                                | 20 |
| 2.3.2 FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE .....                        | 21 |
| 2.3.2.1 Fundición a baja presión. ....                           | 22 |
| 2.3.2.2 Fundición hueca .....                                    | 23 |
| 2.3.2.3 Fundición por inyección en matriz o dado .....           | 24 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 2.3.2.4    | Fundición centrífuga.....                            | 27 |
| 2.3.2.5    | Procesos de fundición en dado impresor.....          | 28 |
| 2.4.       | GENERALIDADES DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.....        | 31 |
| 2.4.1      | CALIDAD DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.....              | 31 |
| 2.4.2      | PARTICULARIDADES DE LA FORMACIÓN DE LA MOLDURA. .... | 32 |
| 2.4.3      | CAMPOS DE APLICACIÓN DEL COLADO CENTRÍFUGO.....      | 33 |
| 2.4.4      | TIPOS DE FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.....                   | 34 |
| 2.4.4.1    | Colado Centrífugo Real o Verdadero.....              | 34 |
| 2.4.4.2    | Colado Semicentrífugo.....                           | 35 |
| 2.4.4.3    | Centrifugado.....                                    | 36 |
| 2.4.5      | MOLDES UTILIZADOS PARA COLADO CENTRÍFUGO.....        | 37 |
| 2.4.5.1    | Moldes Permanentes.....                              | 37 |
| 2.4.5.2    | Moldes Metálicos.....                                | 37 |
| 2.4.5.3    | Moldes de Acero.....                                 | 38 |
| 2.4.5.4    | Moldes Revestidos.....                               | 38 |
| 2.4.6      | MÁQUINAS PARA LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.....           | 38 |
| 2.4.6.1    | Máquina para Colado Centrífugo Horizontal.....       | 38 |
| 2.4.6.2    | Máquina para Colado Centrífugo Vertical.....         | 45 |
| CAPÍTULO 3 | .....  | 51 |
| 3.         | PREFACTIBILIDAD Y FACTIBILIDAD.....                  | 51 |
| 3.1.       | PREFACTIBILIDAD.....                                 | 51 |
| 3.1.1      | ESTUDIO DEL MERCADO.....                             | 51 |
| 3.1.1.1    | Análisis de la oferta.....                           | 51 |
| 3.1.1.2    | Análisis de la demanda.....                          | 51 |
| 3.1.2      | ESTUDIO DE RESTRICCIONES.....                        | 51 |
| 3.1.2.1    | Tecnología.....                                      | 51 |
| 3.1.2.2    | Disponibilidad de materiales.....                    | 51 |
| 3.1.2.3    | Facilidad de construcción.....                       | 52 |
| 3.1.2.4    | Mantenimiento.....                                   | 52 |
| 3.1.2.5    | Facilidad de operación.....                          | 52 |
| 3.1.2.6    | Suministro de energía.....                           | 52 |
| 3.1.2.7    | Accionamiento del equipo.....                        | 52 |
| 3.2.       | FACTIBILIDAD.....                                    | 53 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.2.1   | ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO A CONSTRUIRSE.....                             | 53 |
| 3.2.1.1 | Parámetros funcionales .....   | 53 |
| 3.2.1.2 | Condiciones ambientales de trabajo.....                                    | 53 |
| 3.2.1.3 | Vida útil y mantenimiento .....  | 53 |
| 3.2.1.4 | Costo estimado .....   | 53 |
| 3.2.1.5 | Apariencia .....   | 53 |
| 3.2.1.6 | Materiales.....  | 53 |
| 3.2.1.7 | Aspectos legales .....   | 54 |
| 3.2.1.8 | Normas.....  | 54 |
| 3.2.1.9 | Dimensiones .....  | 54 |
| 3.2.2   | SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE ACCIONAMIENTO DEL<br>EQUIPO .....             | 54 |
| 3.2.2.1 | Sistema de transmisión de movimiento al molde.....                         | 55 |
| 3.2.2.2 | Sistema de calentamiento del molde .....                                   | 62 |
| 3.2.3   | ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO Y<br>CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO ..... | 66 |
| 3.2.3.1 | Alternativa 1 .....  | 66 |
| 3.2.3.2 | Alternativa 2 .....  | 68 |
| 3.2.3.3 | Análisis y selección .....   | 69 |
|         | CAPÍTULO 4 .....   | 71 |
| 4.      | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO .....                                     | 71 |
| 4.1.    | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA .....                                 | 71 |
| 4.1.1   | CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA COQUILLA.....                      | 71 |
| 4.1.1.1 | Definiciones.....  | 71 |
| 4.1.1.2 | Criterios considerados para el diseño de las Piezas Fundidas.....          | 74 |
| 4.1.2   | ESTUDIO DE LA COQUILLA .....   | 82 |
| 4.1.2.1 | Selección del producto a elaborar.....                                     | 82 |
| 4.1.2.2 | Selección del material para la coquilla .....                              | 85 |
| 4.1.2.3 | Cálculo de la mazarota en la coquilla .....                                | 85 |
| 4.1.2.4 | Determinación del espesor de la pared del molde.....                       | 91 |
| 4.1.2.5 | Dimensiones generales de la coquilla.....                                  | 94 |
| 4.1.3   | CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA<br>COQUILLA.....            | 94 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.1.3.1 | Cálculo del calor en la coquilla.....   | 94  |
| 4.1.3.2 | Tiempo de solidificación de la coquilla.....  | 96  |
| 4.1.3.3 | Diseño de la caja de moldeo.....  | 96  |
| 4.1.3.4 | Diseño del alimentador para el colado de la coquilla.....                                       | 98  |
| 4.1.3.5 | Cálculo del canal de colado y sifón.....  | 101 |
| 4.1.3.6 | Cálculo de la mazarota para el colado de la coquilla.....                                       | 102 |
| 4.1.3.7 | Dimensiones de la caja de moldeo para la coquilla.....  | 106 |
| 4.1.4   | CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA.....  | 107 |
| 4.1.4.1 | Obtención del modelo de madera.....   | 107 |
| 4.1.4.2 | Pruebas de colado de la coquilla con aluminio, previo al<br>colado con hierro gris.....         | 107 |
| 4.1.4.3 | Moldeado de la coquilla para colado con hierro gris.....  | 110 |
| 4.1.4.4 | Colado de la coquilla con hierro gris.....  | 113 |
| 4.1.4.5 | Maquinado de la coquilla.....   | 116 |
| 4.1.4.6 | Sistema de cierre de la coquilla.....   | 117 |
| 4.2.    | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PARA COLADO<br>CENTRÍFUGO VERTICAL.....                        | 118 |
| 4.2.1   | DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....  | 118 |
| 4.2.1.1 | Diseño de la viga.....  | 118 |
| 4.2.1.2 | Diseño de columnas.....   | 122 |
| 4.2.2   | DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....  | 124 |
| 4.2.2.1 | Determinación de la potencia del motor.....   | 124 |
| 4.2.2.2 | Fuerzas generadas en el sistema.....  | 128 |
| 4.2.2.3 | Diseño del árbol de transmisión.....  | 135 |
| 4.2.2.4 | Selección de rodamientos para el árbol de transmisión.....                                      | 161 |
| 4.2.2.5 | Selección de pernos para el acople entre el sistema rotatorio<br>del plato y la estructura..... | 165 |
| 4.2.3   | SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....   | 173 |
| 4.2.4   | SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....  | 175 |
| 4.2.5   | CONSTRUCCIÓN DEL EMBUDO ENVASADOR.....  | 176 |
|         | CAPÍTULO 5.....   | 178 |
| 5.      | ANÁLISIS DE COSTOS.....   | 178 |
| 5.1.    | COSTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA.....   | 178 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE COLADO        |     |
| CENTRÍFUGO VERTICAL .....                              | 179 |
| 5.2.1 COSTOS DIRECTOS .....                            | 180 |
| 5.2.1.1 Costos de materiales .....                     | 180 |
| 5.2.1.2. Costos de fabricación.....                    | 183 |
| 5.2.1.3. Costos de diseño .....                        | 185 |
| 5.2.2 COSTOS INDIRECTOS .....                          | 186 |
| 5.2.2.1 Costos de Pruebas.....                         | 186 |
| 5.2.2.2 Costos Varios.....                             | 186 |
| 5.2.2.3 Costos por imprevistos.....                    | 186 |
| 5.2.3 COSTO TOTAL DEL EQUIPO .....                     | 187 |
| CAPÍTULO 6 .....                                       | 188 |
| 6. PROTOCOLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... | 188 |
| 6.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS .....                        | 188 |
| 6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                      | 190 |
| CAPÍTULO 7 .....                                       | 193 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                | 193 |
| 7.1. CONCLUSIONES .....                                | 193 |
| 7.2. RECOMENDACIONES.....                              | 194 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1 MOLDE DE ARENA, CON VARIAS CARACTERÍSTICAS .....  | 7  |
| FIGURA 2.2 FABRICACIÓN DE MOLDES POR EL PROCEDIMIENTO CRONING.....   | 11 |
| FIGURA 2.3 ESQUEMA DE LOS MOLDES COMPUESTOS .....  | 13 |
| FIGURA 2.4 FUNDICIÓN EN MODELO CONSUMIBLE.....   | 15 |
| FIGURA 2.5 FUNDICIÓN EN MOLDE CERÁMICO .....   | 17 |
| FIGURA 2.6 PROCESO SHAW PARA FUNDICIÓN EN MOLDE CERÁMICO .....   | 18 |
| FIGURA 2.7 PROCESO DE FUNDICIÓN POR REVESTIMIENTO .....  | 19 |
| FIGURA 2.8 FUNDICIÓN EN COQUILLA POR GRAVEDAD .....  | 22 |
| FIGURA 2.9 FUNDICIÓN EN COQUILLA A BAJA PRESIÓN .....  | 23 |
| FIGURA 2.10 ESQUEMA DE UNA MÁQUINA PARA PROCESO DE CÁMARA<br>CALIENTE .....  | 25 |
| FIGURA 2.11 PROCESO DE CÁMARA CALIENTE.....  | 26 |
| FIGURA 2.12 ESQUEMA DE UNA MÁQUINA PARA PROCESO DE CÁMARA FRÍA .....   | 26 |
| FIGURA 2.13 PROCESO DE CÁMARA FRÍA .....   | 27 |
| FIGURA 2.14 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA VERDADERA, A) VERTICAL Y B)<br>HORIZONTAL .....   | 28 |
| FIGURA 2.15 FUNDICIÓN POR DADO IMPRESOR.....   | 29 |
| FIGURA 2.16 APLICACIONES DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.....   | 34 |
| FIGURA 2.17 COLADO CENTRÍFUGO REAL O VERDADERO .....   | 35 |
| FIGURA 2.18 MÉTODO DE FUNDICIÓN CENTRÍFUGA REAL, PARA CILINDROS DE<br>MOTOR RADIAL .....   | 36 |
| FIGURA 2.19 MÉTODO DE FUNDICIÓN CENTRIFUGADA.....  | 37 |
| FIGURA 2.20 MÁQUINA PARA COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL .....  | 39 |
| FIGURA 2.21 VELOCIDAD DE ROTACIÓN VS TIEMPO DESPUÉS DE COLADO .....  | 41 |
| FIGURA 2.22 APLICACIONES INDUSTRIA DE HIERRO Y ACERO: A) RODILLO DE<br>FUNDICIÓN CONTINUA, B) CARRETES DE BOBINADO, C)<br>RODILLOS PARA HORNO ENDURECIDOS POR CALOR..... | 44 |
| FIGURA 2.23 APLICACIONES EN POZOS PETROLEROS: A) POSTES<br>EXTENSIBLES, B) TUBERÍA ASCENDENTE, C) ABRAZADERAS<br>PARA DETENER FISURAS .....                              | 44 |
| FIGURA 2.24 OTRAS APLICACIONES (A) CILINDROS HIDRÁULICOS (B) RODILLOS<br>FLOTANTES DE VIDRIO Y (C) COLUMNAS EXTERIORES DE<br>CONSTRUCCIÓN.....                           | 45 |
| FIGURA 2.25 MÁQUINA PARA COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL.....   | 46 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 2.26 EJEMPLOS DE APLICACIONES: A) ENGRANAJES B) DISCOS DE ROTORES DE TURBINA C) BOCINES D) BRIDAS Y E) VOLANTES DE MANIOBRA .....  | 50  |
| FIGURA 2.27 EJEMPLOS DE APLICACIONES: A) ENGRANAJES B) DISCOS DE ROTORES DE TURBINA C) BOCINES D) BRIDAS Y E) VOLANTES .....  | 50  |
| FIGURA 3.1 TRANSMISIÓN POR BANDAS: A) ÁRBOLES PARALELOS CON IGUAL SENTIDO; B) ÁRBOLES PARALELOS CON SENTIDOS DE ROTACIÓN OPUESTOS; C) ÁRBOLES CRUZADOS, LA TRANSMISIÓN ES POSIBLE SÓLO EN UN SENTIDO DE ROTACIÓN..... | 55  |
| FIGURA 3.2 TRANSMISIONES POR ENGRANES .....   | 56  |
| FIGURA 3.3 TRANSMISIÓN POR MEDIO DE CADENAS Y CATALINAS.....  | 57  |
| FIGURA 3.4 PARTES BÁSICAS DE LA CADENA.....   | 58  |
| FIGURA 3.5 ALTERNATIVA 1 .....  | 66  |
| FIGURA 3.6 ALTERNATIVA 2 .....  | 68  |
| FIGURA 3.7 ACERCAMIENTO DE PARTES (8), (10) Y (11) DE LA ALTERNATIVA 2.....   | 69  |
| FIGURA 4.1 MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR A) CONDUCCIÓN B) CONVECCIÓN Y C) RADIACIÓN .....   | 73  |
| FIGURA 4.2 SECUENCIA DE SOLIDIFICACIÓN .....  | 74  |
| FIGURA 4.3 ESPESOR MÍNIMO DE CADA ALEACIÓN .....  | 78  |
| FIGURA 4.4 DIMENSIONES GENERALES DEL VOLANTE .....  | 82  |
| FIGURA 4.5 VOLANTES A) CATÁLOGO Y B) GRÁFICO REALIZADO EN EL ORDENADOR.....   | 83  |
| FIGURA 4.6 NOMOGRAMA $V_m/V_p$ vs $FF$ .....  | 89  |
| FIGURA 4.7 CURVA ESPESOR DE PARED VS DIÁMETRO INTERIOR DEL MOLDE ....   | 91  |
| FIGURA 4.8 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE PARED DEL MOLDE .....   | 91  |
| FIGURA 4.9 SECCIÓN DE LA COQUILLA DE HIERRO GRIS PARA ELABORACIÓN DE VOLANTES .....   | 92  |
| FIGURA 4.10 NOMOGRAMA DEL FACTOR DE FORMA.....  | 103 |
| FIGURA 4.11 MODELO DE MADERA DE LA COQUILLA .....   | 107 |
| FIGURA 4.12 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO PARA LA PRIMERA PRUEBA DE COLADO.....  | 108 |
| FIGURA 4.14 IMAGEN AUMENTADA DEL DEFECTO DE FUNDICIÓN DE LA PRUEBA  | 109 |
| FIGURA 4.15 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO PARA LA SEGUNDA PRUEBA DE COLADO.....  | 109 |
| FIGURA 4.16 RESULTADO DE LA SEGUNDA PRUEBA DE COLADO CON ALUMINIO   | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.17 MOLDEO DE LA COQUILLA (A) CON ARENA EN VERDE, (B) ARENA<br>CON RESINA FENÓLICA ..... | 110 |
| FIGURA 4.18 A) PRODUCTOS DE MOLDEO EN MEZCLADORA, B) CAJA DE<br>MOLDEO CON ARENA MEZCLADA .....  | 111 |
| FIGURA 4.19 PINTADO DE LOS MOLDES .....  | 112 |
| FIGURA 4.20 HORNO DE INDUCCIÓN PARA EL COLADO DE LA COQUILLA .....                               | 113 |
| FIGURA 4.21 MOLDES COLOCADOS EN LA CAMA DE ARENA CALENTADOS CON<br>LLAMA.....                    | 114 |
| FIGURA 4.22 PESOS COLOCADOS SOBRE LOS MOLDES .....   | 114 |
| FIGURA 4.23 CALENTAMIENTO DE LA CAYANA .....   | 115 |
| FIGURA 4.24 COLADO DE LA COQUILLA.....   | 115 |
| FIGURA 4.25 PARTES DE LA COQUILLA OBTENIDAS EN MOLDE DE ARENA<br>AGLOMERADA CON RESINA.....      | 116 |
| FIGURA 4.26 COQUILLA MAQUINADA.....  | 117 |
| FIGURA 4.27 SEGUROS AXIALES DE LA COQUILLA .....   | 117 |
| FIGURA 4.28 FUERZA APLICADA EN LA VIGA.....  | 118 |
| FIGURA 4.29 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA VIGA.....   | 118 |
| FIGURA 4.30 FUERZAS APLICADAS EN LA VIGA.....  | 119 |
| FIGURA 4.31 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA VIGA.....   | 121 |
| FIGURA 4.32 DIAGRAMA DE CORTANTE DE LA VIGA .....  | 121 |
| FIGURA 4.33 DIAGRAMA DE MOMENTO DE LA VIGA .....   | 121 |
| FIGURA 4.34 ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA.....  | 124 |
| FIGURA 4.35 ESQUEMA DE REDUCCIÓN DE REVOLUCIONES DEL MOTOR .....                                 | 127 |
| FIGURA 4.36 RELACIÓN DE TENSIONES EN LA BANDA .....  | 128 |
| FIGURA 4.37 ÁNGULO DE CONTACTO .....   | 129 |
| FIGURA 4.38 SELECCIÓN DEL PERFIL DE LA CORREA.....   | 134 |
| FIGURA 4.39 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN .....                              | 135 |
| FIGURA 4.40 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE CONCLUIDO .....   | 137 |
| FIGURA 4.41 DCL DIAGRAMA CORTANTE.....   | 137 |
| FIGURA 4.42 DCL DIAGRAMA DEL MOMENTO FLECTOR.....  | 139 |
| FIGURA 4.43 DCL CONCLUIDO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN .....   | 141 |
| FIGURA 4.44 DIAGRAMA CORTANTE.....   | 141 |
| FIGURA 4.45 DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR.....   | 142 |
| FIGURA 4.46 DIAGRAMA DE MOMENTO TORSOR .....   | 142 |
| FIGURA 4.47 DIAGRAMA DE CARGA AXIAL.....   | 142 |
| FIGURA 4.48 DETERMINACIÓN DEL PUNTO CRÍTICO .....  | 143 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 4.49 ESFUERZOS EN EL PUNTO CRÍTICO .....   | 144 |
| FIGURA 4.50 DISEÑO ESTÁTICO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN. ....  | 147 |
| FIGURA 4.51 TEORÍA DE LA ENERGÍA DE DISTORSIÓN.....   | 148 |
| FIGURA 4.52 DISEÑO DINÁMICO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN .....  | 151 |
| FIGURA 4.53 DIAGRAMA DE FATIGA.....   | 154 |
| FIGURA 4.54 FACTORES DE MODIFICACIÓN DE ACABADO SUPERFICIAL PARA<br>EL ACERO. ....  | 154 |
| FIGURA 4.55 FACTOR $K_T$ PARA FLEXIÓN .....   | 156 |
| FIGURA 4.56 FACTOR $K_{TS}$ PARA TORSIÓN.....   | 157 |
| FIGURA 4.57 DIAGRAMA DE SENSIBILIDAD A LAS RANURAS PARA ACEROS Y<br>ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO UNS A92024-T, SOMETIDOS<br>A CARGAS FLEXIONANTES O AXIALES INVERTIDAS..... | 157 |
| FIGURA 4.58 DIAGRAMA DE SENSIBILIDAD A LAS RANURAS PARA MATERIALES<br>EN TORSIÓN INVERTIDA ALTERNATIVAMENTE. ....   | 158 |
| FIGURA 4.59 DCL DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN PARA LA SELECCIÓN DE<br>RODAMIENTOS.....   | 161 |
| FIGURA 4.60 ACOUPLE ENTRE EL SISTEMA ROTATORIO DEL PLATO Y LA<br>ESTRUCTURA.....  | 165 |
| FIGURA 4.60 CORTE PURO.....   | 171 |
| FIGURA 4.61 APLASTAMIENTO.....  | 171 |
| FIGURA 4.623 FLEXIÓN .....  | 172 |
| FIGURA 4.64 PARTES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO .....   | 173 |
| FIGURA4. 65 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LLAMAS .....  | 174 |
| FIGURA 4.67 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO FUNCIONADO.....   | 176 |
| FIGURA 4.68 ESQUEMA DEL SISTEMA DE ENVASADO PARA LA COQUILLA.....   | 176 |
| FIGURA 6.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ROTACIÓN DEL MOLDE.....  | 188 |
| FIGURA 6.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LLAMAS .....   | 189 |
| FIGURA 6.3 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO .....   | 189 |
| FIGURA 6.4 PIEZA INCOMPLETA POR MALA OPERACIÓN DE COLADO.....   | 190 |
| FIGURA 6.5 VOLANTE CENTRIFUGADO A ALTAS REVOLUCIONES .....  | 191 |
| FIGURA 6.6 VOLANTE COLADO CON MOLDE ESTÁTICO .....  | 191 |
| FIGURA 6.7 VOLANTE CENTRIFUGADO CORRECTAMENTE ELABORADO .....   | 192 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| TABLA 3.1 DIMENSIONES APROXIMADAS DEL EQUIPO.....                            | 54  |
| TABLA 3.2 LISTADO DE ALTERNATIVAS PARA LA TRANSMISIÓN DE<br>MOVIMIENTO ..... | 58  |
| TABLA 3.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LA TRANSMISIÓN.....                    | 59  |
| TABLA 3.4 ESCALA DE CALIFICACIÓN .....                                       | 59  |
| TABLA 3.5 CALIFICACIÓN CRITERIOS VS ALTERNATIVAS.....                        | 59  |
| TABLA 3.6 PORCENTAJES DE CRITERIOS DE SELECCIÓN .....                        | 60  |
| TABLA 3.7 RESULTADOS DE ALTERNATIVAS .....                                   | 60  |
| TABLA 3.8 LISTA DE ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA DE<br>CALENTAMIENTO .....    | 64  |
| TABLA 3.9 CRITERIOS DE SELECCIÓN .....                                       | 64  |
| TABLA 3.10 CALIFICACIÓN DE CRITERIOS VS ALTERNATIVAS.....                    | 65  |
| TABLA 3.11 PONDERACIÓN DE LA CALIFICACIÓN .....                              | 65  |
| TABLA 3.12 RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS .....                              | 65  |
| TABLA 3.13 ESCALA DE CALIFICACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE<br>ALTERNATIVAS ..... | 69  |
| TABLA 3.14 CALIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA GANADORA .....                     | 70  |
| TABLA 4.1 ESPECIFICACIONES DEL VOLANTE .....                                 | 82  |
| TABLA 4.2 ACABADOS DEL VOLANTE.....  | 83  |
| TABLA 4.3 VOLUMEN DE RECHUPE DE ALGUNOS METALES .....                        | 87  |
| TABLA 4.4 PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN EN LA MAZAROTA .....                     | 87  |
| TABLA 4.5 DIMENSIONES GENERALES EN LA COQUILLA .....                         | 94  |
| TABLA 4.6 TEMPERATURAS DE COLADA PARA HIERRO FUNDIDO .....                   | 95  |
| TABLA 4.7 TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE LA COQUILLA.....                       | 96  |
| TABLA 4.8 DISTANCIAS PIEZA - CONDUCTOS DE ALIMENTACIÓN.....                  | 97  |
| TABLA 4.9 DISTANCIAS PERMISIBLES ENTRE PIEZAS Y ELEMENTOS DEL<br>MOLDE ..... | 97  |
| TABLA 4.10 VALORES DE S .....  | 100 |
| TABLA 4.11 DIMENSIONES DE MOLDEO PARA LA COQUILLA.....                       | 106 |
| TABLA 4.12 DATOS PARA LA SELECCIÓN DEL MOTOR .....                           | 127 |
| TABLA 4.13 DATOS PARA LA SELECCIÓN DE LA BANDA.....                          | 135 |

|   |     |
|---|-----|
| TABLA 4.14 DATOS PARA EL DISEÑO .....   | 145 |
| TABLA 4.15 FACTOR DE SEGURIDAD CALCULADO CON ESFUERZOS<br>PRINCIPALES PARA DIFERENTES ACEROS .....              | 146 |
| TABLA 4.16 RESULTADOS DEL DISEÑO ESTÁTICO .....   | 150 |
| TABLA 4.17 FACTOR DE SEGURIDAD ESTÁTICO PARA DIFERENTES<br>ACEROS PARA EL DISEÑO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN ..... | 151 |
| TABLA 4.18 FACTOR DE CONFIABILIDAD .....  | 155 |
| TABLA 4.19 RESULTADOS DE $S_E'$ PARA DISEÑO DINÁMICO DEL ÁRBOL<br>DE TRANSMISIÓN .....                          | 158 |
| TABLA 4.20 FACTORES QUE MODIFICAN $S_E'$ DE DISEÑO DINÁMICO DEL<br>ÁRBOL DE TRANSMISIÓN.....                    | 159 |
| TABLA 4.21 VALORES DE $S_E$ PARA DISEÑO DINÁMICO DEL ÁRBOL DE<br>TRANSMISIÓN .....                              | 159 |
| TABLA 4.22 FACTOR DE SEGURIDAD DINÁMICO PARA DIFERENTES<br>ACEROS PARA EL DISEÑO DEL ÁRBOL DE TRANSMISIÓN ..... | 160 |
| TABLA 4.23 TABLA DE HORAS DE SERVICIO PARA DIFERENTES CLASES<br>DE MÁQUINAS.....                                | 162 |
| TABLA 4.24 DIMENSIONES DE LOS RODAMIENTOS PARA EL ÁRBOL DE<br>TRANSMISIÓN .....                                 | 165 |
| TABLA 5.1 COSTOS DE LA COQUILLA.....  | 178 |
| TABLA 5.2 COSTOS DE MATERIALES A SER PROCESADOS.....  | 181 |
| TABLA 5.3 COSTOS DE MATERIALES PREFABRICADOS .....  | 182 |
| TABLA 5.4 COSTOS DE MANO DE OBRA Y USO DE MÁQUINA.....  | 183 |
| TABLA 5.5 COSTOS DE FABRICACIÓN.....  | 185 |
| TABLA 5.6 COSTOS DE DISEÑO .....  | 185 |
| TABLA 5.7 COSTOS DE PRUEBAS .....   | 186 |
| TABLA 5.8 COSTOS VARIOS.....  | 186 |
| TABLA 5.9 COSTO TOTAL DEL EQUIPO.....   | 187 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO
- ANEXO B. VELOCIDAD DE ROTACIÓN PARA MÁQUINAS DE COLADO  
CENTRÍFUGO VERTICAL
- ANEXO C. DIMENSIONES APLICABLES PARA LA CAJA DE MOLDEO
- ANEXO D. PROPIEDADES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES SEGÚN  
CATALOGO DIPAC
- ANEXO E. ESPECIFICACIONES Y MARCAS DE IDENTIFICACIÓN PARA  
PERNOS TORNILLOS, ESPÁRRAGOS SEMS/ Y PERNOS U.
- ANEXO F. PLANOS

## SIMBOLOGÍA

### Abreviatura empleada para determinar el espesor de pared del molde.

$K_{\text{acero}}$  Conductividad térmica del acero  $\left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$

$K_{\text{hierro gris}}$  Conductividad térmica del Hierro Gris  $\left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$

$e_{\text{acero}}$  Espesor del molde de acero (mm)

$e_{\text{Hierro gris}}$  Espesor del molde de hierro gris (mm)

### Abreviatura para el cálculo de la mazarota del volante

$M_m$  Módulo de la mazarota

$M_p$  Módulo de la pieza

$V_m$  Volumen de la mazarota

$V_p$  Volumen de la pieza

U Porcentaje de utilización del metal

RE Rechupe específico del metal en la mazarota (%)

H Altura de la mazarota

R Radio de la mazarota (m)

L Longitud (m)

W Ancho (m)

T Espesor (m)

### Abreviatura para el cálculo y diseño de la coquilla.

- Q Calor que debe receptor por la arena (Joules = J)
- M Masa del metal fundido (Kg)
- L Calor de solidificación (J/Kg)
- $C_p$  Calor específico en estado líquido (J/Kg $^{\circ}$ K)
- $T_v$  Temperatura de vertido del hierro gris ( $^{\circ}$ C)
- $T_m$  Temperatura de desmoldeo ( $^{\circ}$ C)

### Abreviatura para el diseño del alimentador

- $L_{cm}$  Longitud de la caja de moldeo (m)
- KI Distancia del modelo al conducto (m)
- K Distancia de la superficie del conducto a la superficie interior de la caja moldeo (m)
- C Espesor del conducto de alimentación (m)
- $L_c$  Longitud de la coquilla (m)
- $m_h$  Masa de la mitad de la coquilla (Kg)
- $\rho_h$  Densidad del hierro fundido gris (Kg/m $^3$ )
- $t_h$  Tiempo de la colada de hierro fundido (s)
- u Coeficiente de resistencia (0,88)
- g Aceleración de la gravedad (9,8 m/s $^2$ )
- $H_{calh}$  Altura estática de cálculo desde la superficie superior de la caja de moldeo al plano de separación de la caja de moldeo.
- $H_{cm}$  Altura de la caja de moldeo (cm)
- $e_c$  Espesor de la mitad de la coquilla (m)

- $H_{cm}$  Altura de la caja de moldeo (m)
- $e_c$  Espesor de la mitad de la coquilla (m)
- $S$  Coeficiente de espesor
- $G$  Masa de metal que circula (Kg)
- $\delta$  Espesor predominante (cm)

### **Abreviatura para el cálculo del canal de colado y sifón**

- $r_a$  Radio de colado para la coquilla (cm)
- $r_{cc}$  Radio de canal para el colado de la coquilla
- $r_{ce}$  Radio del escoriador
- $r_a$  Radio de colado para la coquilla (m)

### **Abreviatura para el diseño y cálculo de la mazarota**

- $L$  Longitud de la coquilla (m)
- $W$  Ancho de la coquilla (m)
- $E$  Espesor de la mitad de la coquilla (m)
- $V_h$  Volumen de la mitad de la coquilla (m<sup>3</sup>)
- $V_{MC}$  Volumen de la mazarota para la mitad de la coquilla (m<sup>3</sup>)
- $V_{MC}$  Volumen de la mazarota para la mitad de la coquilla
- $r_c^2$  Radio del cilindro de la mazarota
- $h_c$  Altura de la mazarota
- $e_c$  Espesor de la mitad de la coquilla (m)
- $H_{cm}$  Altura de la caja de moldeo (m)
- $D$  Diámetro del cilindro (2 radios m)
- $H$  Altura de la mazarota (m)

**Abreviatura para el diseño de columnas**

|                     |  |
|---------------------|--|
| F                   | Fuerza en (Kg)                         |
| $W_{\text{Colum.}}$ | Peso de la columna en (Kg)             |
| A                   | Área de la sección en ( $\text{m}^2$ ) |
| $M_{\text{max}}$    | Momento máximo en [Kg-m]               |
| $I_x$               | Momento de inercia en [ $\text{m}^3$ ] |

**Abreviatura para el diseño del sistema de transmisión**

|         |   |
|---------|---|
| N       | Velocidad en rpm  |
| T       | Torque en N-m   |
| Pot     | Potencia en Watios  |
| $P_1$   | Tensión en el lado tirante  |
| $P_2$   | Tensión en el lado flojo  |
| $\mu$   | Coeficiente de fricción entre la banda y la polea, que puede estar comprendido entre 0,3 y 0,7 para bandas de cuero, hule y caucho sobre acero. |
| $\beta$ | Angulo de contacto  |
| $D_p$   | Diámetro primitivo de la polea mayor (m)  |
| $d_p$   | Diámetro primitivo de la polea menor (m)  |
| C       | Distancia entre centros (m)   |
| V       | Velocidad lineal en la polea  |
| H       | Potencia transmitida por el motor   |

**Abreviatura empleada en la selección de pernos.**

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| Az         | Fuerza de compresión                  |
| $\sigma_p$ | Esfuerzo de empuje                    |
| P          | Fuerza de empuje                      |
| A          | Área de la sección                    |
| kb         | Constante de rigidez del perno        |
| D          | Diámetro mayor                        |
| L          | Longitud de agarre del perno          |
| km         | Constante de rigidez de los elementos |
| E          | Módulo de elasticidad                 |
| Fp         | Carga de prueba                       |
| Sp         | Resistencia a la tensión              |
| At         | Área de tensión                       |

**Abreviatura para el cálculo del calor contenido en la coquilla.**

|                |   |
|----------------|---|
| Q              | Calor que se debe disipar por la coquilla (Joule = J)                     |
| m              | Masa del metal fundido ( 0,241 Kg)  |
| L              | Calor de solidificación (aluminio 397822 J/Kg)                            |
| C <sub>p</sub> | Calor específico en estado líquido (aluminio 1088,78 J/Kg <sup>°K</sup> ) |
| T <sub>v</sub> | Temperatura de vertido del aluminio (710 <sup>°C</sup> )                  |
| T <sub>m</sub> | Temperatura de desmoldeo (250 <sup>°C</sup> )                             |

## “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL”

- Autores: Danilo Eduardo Boada Ramos  
Bernardo Xavier Rodríguez Reinoso
- Tutor: Dr. Víctor Cárdenas
- Fecha: Agosto / 2009

### RESUMEN

Se diseña y construye un equipo con el cual se demuestra el principio del colado centrífugo vertical, obteniendo buenos resultados en el producto final. La metodología utilizada fue la investigación y experimentación, tanto en los procesos de construcción del equipo como en las pruebas de colado. Las conclusiones a las que se llegan son: se obtienen productos de mejor calidad que los producidos por métodos convencionales de moldeo. La utilización del equipo permite optimizar tiempo, recurso humano, material, financiero y espacio físico. Por ser un proceso poco conocido a nivel industrial en el país podría ser adoptado por el sector industrial, debido a las bondades que éste presenta. Los materiales y procesos de fabricación para la construcción del equipo no han requerido de mayor adelanto tecnológico, puesto que se dispone de ellos en el mercado nacional. Se hace un aporte al estudiantado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional que se halla inmerso en la rama de la fundición, para el desarrollo de nuevas investigaciones sobre el tema.

DESCRIPTORES DE TESIS: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, FUNDICIÓN, CENTRÍFUGA, COQUILLA, MATERIALES.

## INTRODUCCIÓN

Las transformaciones que se experimentan en el mundo actual, en todos los órdenes, tienen una incidencia directa sobre la vida de los pueblos, paralelamente a ellos se incrementan las necesidades de la población que exige productos y servicios eficaces y eficientes por parte de las instituciones públicas y privadas en lo que concierne a resultados óptimos de los bienes que adquiere. Esta premisa conlleva a la búsqueda de nuevos procesos que contribuyan a estos fines, siendo el trabajo que se presenta a continuación un aporte a estos requerimientos.

En el capítulo primero se abarca la definición del problema, lo cual implica un estudio de antecedentes, planteamiento del problema, interrogantes de la investigación, objetivos y justificación.

En el capítulo segundo se hace referencia al marco teórico, donde se encuentran las definiciones necesarias para desarrollar la investigación. Se abarcan los temas referidos al moldeo: fenómenos, tipos, procesos de moldeo.

Se hace una breve descripción de los procesos de fundición más utilizados en la industria a nivel mundial, específicamente aquellos que tienen relación con el trabajo que se presenta, tales como: fundición en arena, moldeo en cáscara o en concha, fundición con modelo consumible, fundición en molde de yeso, con molde cerámico, por revestimiento o cera perdida, al vacío, con molde permanente, a baja presión, fundición hueca, por inyección en matriz o dado, en cámara fría y cámara caliente, centrífuga, en dado impresor.

En este capítulo se tratan los principios de la fundición centrífuga, calidad de este tipo de fundición, descripción del proceso como tal, campos de aplicación, tipos de fundición centrífuga, moldes utilizados para el colado centrífugo, máquinas utilizadas para colado centrífugo horizontal y vertical con sus respectivas aplicaciones.

En el capítulo tercero se hace un estudio prefactibilidad y factibilidad. En la prefactibilidad se contempla el estudio de mercado y restricciones. En la factibilidad se estudia la selección de alternativas para el accionamiento del equipo y la selección de alternativas para el diseño y configuración del mismo.

En el capítulo cuarto se referencia al diseño y construcción del equipo de colado centrífugo. Se indican todas las consideraciones de diseño, materiales, especificaciones para la construcción y selección de cada componente del equipo.

En el capítulo quinto se hace un análisis de los costos del equipo, se detallan los costos directos e indirectos de la coquilla y del equipo, con lo que se obtiene el costo total del proyecto.

En el capítulo sexto se dan los detalles del protocolo de pruebas, y se realizan los respectivos análisis de resultados.

En el capítulo séptimo se dan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

En los anexos se adjuntan los planos del equipo, su manual de operación y mantenimiento, tablas con datos necesarios para el diseño.

# CAPÍTULO 1

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 ANTECEDENTE

En el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional se ensayan pocos procesos de fundición (fundición en arena en verde, fundición con modelo consumible, y últimamente fundición con molde permanente), por lo que se hace necesario que profesores y alumnos, ensayen un nuevo proceso, con el cual se puedan obtener piezas con buena calidad y acabado superficial.

No se tienen datos de alguna empresa de fundición ecuatoriana que utilice la técnica del colado centrífugo, por lo que no se ha podido observar directamente el proceso por medio de una visita técnica.

El equipo planteado no es muy conocido a nivel estudiantil, lo cual no debe ocurrir debido a que la fundición ocupa un lugar importante dentro del estudio de los procesos de producción, y es necesario que en el laboratorio de fundición se estudien nuevas técnicas.

### 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- El Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional no cuenta con nuevos procesos de fundición para las prácticas de laboratorio de los estudiantes, y el aparato productivo nacional no aporta para investigaciones en este campo.
- Existe poco contacto de las autoridades de la facultad con el campo industrial, por lo que no ha existido suficiente intercambio tecnológico, y tampoco no se han podido determinar las necesidades de la industria.

### **1.3 INTERROGANTES DE LA INVESTIGACIÓN**

¿Cuáles son los limitantes existentes para la obtención de piezas de buena calidad durante las prácticas de laboratorio?

¿Cuántas técnicas de moldeo se practican en el laboratorio de fundición que permiten obtener piezas de buena calidad?

¿Existe la posibilidad de construir los equipos que la facultad necesita?

¿Cuántas empresas conocen del proceso de colado centrífugo y cuántas de ellas disponen de algún equipo para dicho proceso?

¿Existe una alternativa de solución a los problemas planteados anteriormente?

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL:**

Dar a conocer a las futuras generaciones de estudiantes que utilizan el laboratorio de fundición, un proceso que permite obtener piezas fundidas de buena calidad superficial y dimensional.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Diseñar y construir un equipo de colado centrífugo vertical para laboratorio.
- Determinar los parámetros que rigen el proceso y observar la influencia que tiene sobre el producto final la variación de éstos.
- Establecer prácticas en el laboratorio de fundición para demostrar el proceso de colado centrífugo.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

- Se dispone de los conocimientos mínimos requeridos, para diseñar equipos de esta naturaleza.
- Se cuenta con recursos tecnológicos suficientes, para desarrollo de este proyecto.
- Existe la apertura, interés y experiencia del tutor para asesorar el tema.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La primera patente del proceso de fundición centrífuga fue obtenida en Inglaterra en 1809. El primer uso industrial del proceso fue en Baltimore en 1848, cuando la fundición centrífuga fue utilizada para producir tubos de hierro. Los principios anteriormente conocidos y probados para líquidos en rotación sobre un eje fueron extendidos a los metales líquidos, y la teoría matemática de la fundición centrífuga fue desarrollada alrededor de la década de 1920.

En la actualidad, existen varias empresas europeas que utilizan la fundición centrífuga para producir rodillos de laminación de fundición blanca, utilizados en la trituración de granos para obtención de aceites. También se dedican a Fundición de tubos centrifugados, bocines de bronce, y una amplia gama de productos.

En Norteamérica se conoce de la existencia de la empresa Centrifugal Casting Machine Company, Inc, la cual es líder en proceso de fundición centrífuga vertical. En América del Sur se sabe de algunas empresas que han implantado este proceso, en Argentina y Brasil se tienen las más importantes.

#### 2.2. PRINCIPIOS DE MOLDEO

##### 2.2.1 CONCEPTO DE MOLDEO

Existen muchos procedimientos para conformar a los materiales y obtener volúmenes de figuras geométricas concretas. Para dar forma a un material en estado líquido basta con introducirlo en una cavidad, de manera que llenando el volumen en el proceso de solidificación adopte su configuración interna.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Revista FUNDICIÓN N° 209; EDITECNIA; enero/1978; España

En el **moldeo** se introduce el material por la cavidad denominada molde por colada de aquél, bajo la acción de la gravedad (vertido) o de otras fuerzas (por presión) que hagan la operación más perfecta. Se distinguen dos etapas:

- a) Sustitución.- En la que el cuerpo que antes llenaba la cavidad (generalmente aire) es desplazado por el nuevo.
- b) Solidificación.- En la que el material adquiere características mecánicas, entre otras, formando un conjunto permanente.

El moldeo de metales partiendo de su estado líquido, se caracteriza por los siguientes conceptos:

- Se trata de fluidos generalmente muy densos.
- A veces, el metal está en forma pastosa de gran viscosidad y hay que ayudarlo a llenar el molde.
- El producto utilizado está a altas temperaturas, y paralelamente presenta varios fenómenos físico-químicos.
- La solidificación del metal se logra eliminando el calor de fusión.
- El molde ha de resistir altas temperaturas y poder disipar el calor.

### **2.2.2 FENÓMENOS EN EL MOLDEO.**

Pueden distinguirse los siguientes fenómenos:

- Mecánico: Todos los relacionados con el llenado del molde, y las acciones mecánicas que tengan lugar en el enfriamiento.
- Térmico: Los involucrados en el enfriamiento del metal por el medio refrigerante.
- Metalúrgico: Que tienen relación con la estructura del metal y las transformaciones internas que se encuentra sometido.
- Químico: Reacciones en las interfaces del metal con el molde y la atmósfera.

La solidificación no es simplemente un cambio de estado de líquido a sólido, sino que significa también:

- a) La coexistencia de dos fases con las distintas propiedades de cada una
- b) Una velocidad de solidificación variable y localizada en ciertas zonas
- c) Una serie de fenómenos inherentes que acompañan al cambio de fases.

Por otra parte, el interés del estudio del moldeo reside en la obtención de piezas de buena calidad. Teóricamente se entendería por **piezas de calidad**, aquellas que reproducen exactamente el molde, tienen una masa perfectamente maciza y homogénea, no tienen tensiones internas y la estructura del material es la prevista teóricamente.

En la práctica, una pieza se considera de buena calidad cuando están reproducidas las formas esenciales del molde, no descubren vacíos, discontinuidades ni heterogeneidades importantes y la resistencia del material se halla comprendida dentro de las normas.

Un moldeo se acercará más a la perfección o existirá mayor probabilidad de producir piezas de calidad, cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El molde se encuentre lo más caliente para que el metal tenga fluidez.
- El metal que se vierta debe estar a una temperatura adecuada, que permita llenar el molde.
- El llenado y enfriamiento se verifican de forma controlada.
- El molde esté isotérmico.
- La cantidad de metal fundido debe estar en concordancia con el volumen de vaciado de la coquilla para que no exista desperdicio de metal.
- El desmoldeo se lo realice lo más pronto posible, siempre que no existan riesgos de deformaciones.

## **2.3. PROCESOS DE FUNDICIÓN.**

En el proceso de fabricación mediante la técnica de fusión-solidificación se consideran dos elementos fundamentalmente; el metal líquido y el molde que lo va a recibir. Desde este punto de vista, la problemática del molde absorbe por lo menos la mitad de la tecnología necesaria para la obtención piezas sanas de fundición. Los sistemas de moldeo son las técnicas utilizadas para la realización del molde.

### **2.3.1 FUNDICIÓN EN MOLDES PERDIDOS.**

#### **2.3.1.1 Fundición en arena**

Las técnicas de fundición con molde perdido son aquellas en las cuales el molde se utiliza una sola vez. Realizada la colada y posterior desmoldeo, las piezas se obtienen con destrucción del molde. Proceso similar se sigue con los machos, hoyos, que son elementos insertados en el molde con objeto de conseguir orificios en zonas de difícil ejecución directa en el molde.

En el caso de los sistemas de moldeo con molde perdido debe contemplarse no solo la facilidad y rapidez para realizar el molde sino también la facilidad para destruirlo. Por esta razón la mayor parte de sistemas de moldeo utilizan como elemento base la arena.

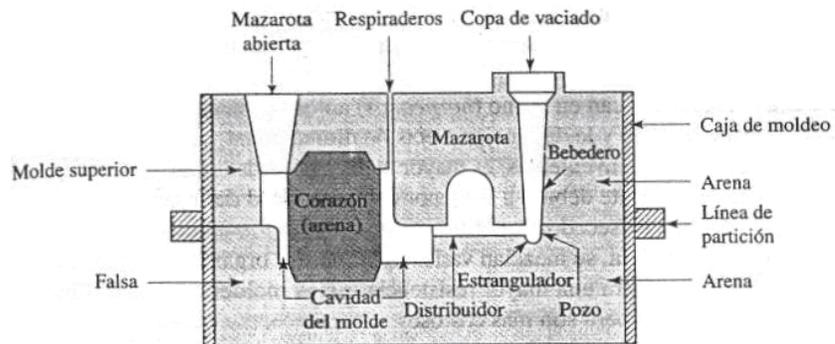
Los parámetros más importantes a considerar en los moldes de arena son:

- La resistencia a la compresión y a la flexión
- El grado de finura de la arena sílice que va a proporcionar a la superficie de la pieza un grado de acabado superficial;
- La permeabilidad, que va a permitir una mejor o peor salida de gases, ya que el gas atrapado en la cavidad producirá poros en las piezas.

La resistencia es importante desde el punto de vista de la estabilidad del molde en el momento de la colada. Debe garantizar que el molde no se rompa o agriete en su

interior puesto que cualquier fisura o desmoronamiento del molde se va a traducir en un defecto de la pieza<sup>2</sup>.

Este proceso consiste en colocar un modelo en arena, luego retirar el modelo para que quede su forma vacía, después incorporar un sistema de alimentación, llenar la cavidad resultante con metal fundido, esperar que el material se enfríe hasta que se solidifique, y por último romper el molde de arena y retirar la fundición. Tras el desmoldeo y limpieza de la pieza deben realizarse operaciones finales de mecanizado.



**Figura 2.1 Molde de arena, con varias características**

Fuente: KALPAKJIAN, S: *Manufactura Ingeniería y Tecnología*; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.

#### 2.3.1.1.1 Arenas de moldeo.

Los moldes de arena están conformados por la arena propiamente dicha y un aglomerante que confiere a la mezcla la cohesión suficiente para la ejecución del molde.

En fundición, la arena más utilizada es la que se formó por la desintegración de las rocas a largos períodos de tiempo, es la arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Existen dos tipos de arena: La arena naturalmente unida (arena en blanco) y la arena sintética (arena de

<sup>2</sup> LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

lago), de las cuales se utiliza más la arena sintética debido a su composición que se la puede controlar con mayor precisión.

El uso de otros tipos de arenas tales como la de olivino, cromita, circonio, etc., no representan más de un 5% y tienen sentido en aplicaciones donde sea necesario afrontar altas temperaturas, contracciones mínimas, etc.

#### *2.3.1.1.2 Aglomerantes para arenas de moldeo y noyos.*

El molde debe cumplir dos características aparentemente contrapuestas que tienen que ver con los aglomerantes de la arena. Debe ser lo suficientemente rígido como para aguantar el flujo de metal por su interior y , lo suficientemente frágil como para que se fragmente una vez cumplida su función, solidificada la pieza e iniciada la operación de desmoldeo.<sup>3</sup>

Los aglomerantes tales como las arcillas (caolinita, glaucomita, bentonita, etc.) y los hidratos de carbono (almidón) se les denomina *mecánicos* porque se aglomeran con ayuda de sistemas mecánicos, y se emplean en la fabricación de moldes.

Los aglomerantes *orgánicos* son compuestos tipo resina, que mediante transformaciones químicas en frío o en caliente, endurecen o “curan” las arenas en combinación de catalizadores, que pueden ser rápidos o lentos dependiendo de la velocidad de endurecimiento.

#### *2.3.1.1.3 Tipos de moldes de arena*

Los moldes de arena se clasifican según los tipos de arena y los métodos utilizados para su producción, existen tres tipos y son:

***Arena de moldeo verde.***- Se denomina de arena en verde porque es una mezcla de arena, arcilla y agua. Estas arenas están constituidas por arena de sílice a las

---

<sup>3</sup> LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

que se les añade bentonita y agua con el fin de que la mezcla sea lo suficiente débil como para fluir y adaptarse rígidamente al modelo y lo bastante fuerte como para mantener su forma durante el desmoldeado y posterior colada. El moldeo con arena verde es el método más económico de fabricación de moldes.

**Molde de caja fría.-** El proceso consiste en mezclar varios aglutinantes orgánicos e inorgánicos en la arena para químicamente unir los granos y de esta manera obtener mayor resistencia. Los moldes de caja fría son dimensionalmente más precisos que los moldes de arena verde pero son más costosos.

**Molde no cocido.-** El proceso consiste en mezclar una resina sintética líquida con la arena, la mezcla se endurece a la temperatura ambiente y a estos procesos se los conoce como curado en frío. El endurecimiento de la mezcla cuando se usan resinas se consigue por polimerización en presencia de un catalizador. Durante este proceso se reticulan las moléculas envolviendo los granos de arena y manteniéndolos firmemente unidos. Las resinas que se usan en este proceso son las siguientes:

- a) Resinas Fenólicas.- Se encuentran en polvo o en forma líquida, pueden ser de alta viscosidad. El endurecimiento se obtiene por adición de un ácido moderadamente fuerte, como el ácido p-toluensulfónico (PTS), mezclas de PTS y ácido fosfórico, y ácido fosfórico puro.
- b) Resinas Furánicas.- Las resinas furánicas se suministran en forma de líquido. A través del porcentaje de urea puede influirse sobre las propiedades de las resinas (fragilidad, tiempo de endurecimiento, resistencia, contenido de agua). Las resinas furánicas puras no suelen emplearse como aglomerante, debido a su alto grado de fragilidad.
- c) Resinas alquílicas.- Las resinas alquílicas, de uso preferente en la fundición de acero, se elaboran a partir de aceites (por ejemplo: aceites de linaza, de madera) y de polialcoholes (por ejemplo: glicerina, pentaeritrina). Antes de endurecer son bastante fluidas.

#### *2.3.1.1.4 Modelos para fundición en arena*

Los modelos se utilizan para moldear la mezcla de arena a la forma de la fundición y pueden estar hechos de madera, plástico o metal, la selección del material del modelo depende de la forma y tamaño de la fundición, la precisión dimensional, la cantidad de coladas requeridas y del proceso del moldeo.

Existen varios tipos de modelos para fundición, entre los más importantes se tienen:

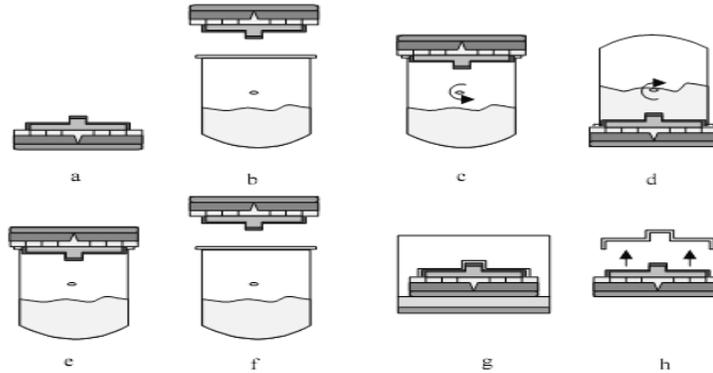
**Los modelos de una sola pieza.-** Se utilizan para formas simples, producción de bajo volumen y son generalmente de madera.

**Los modelos divididos de dos o más piezas.-** Fabricados de manera que cada parte forme una porción de la cavidad para la fundición, de esta manera se pueden producir piezas de forma compleja.

**Los modelos de placa bipartidos.-** Son un tipo popular de modelo montado, en el cuál se forman los modelos de dos piezas fijando cada mitad de uno o más modelos divididos a los lados opuestos de una placa. El sistema de alimentación se puede montar del lado del molde inferior. Este tipo de moldeo se usa más en conjunto con máquinas moldeadoras y en grandes series de producción para la fabricación de piezas fundidas pequeñas.

#### **2.3.1.2 Moldeo en cáscara o en concha.**

Es una técnica que también se utiliza tanto para la fabricación de moldes como de noyos. El material de moldeo es una mezcla granulada compuesta de arena muy fina y un aglomerante de resina sintética. A esta técnica se la conoce habitualmente con el nombre de procedimiento CRONING.



**Figura 2.2 Fabricación de moldes por el procedimiento croning**

Fuente: LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

La técnica sigue el siguiente procedimiento:

- a.- Rociar el modelo (modelo hecho en un metal ferroso o de aluminio) con líquido antiadherente
- b.- Modelo precalentado sobre el recipiente de arena.
- c.- Colocar el modelo sobre el recipiente de arena y girar.
- d.- Arena sobre el modelo caliente, una pequeña capa queda adherida, de esta manera se obtiene un primer curado de una capa fina de entre 4 mm. y 8 mm. El modelo debe presentar una temperatura homogénea, de lo contrario no se obtiene un endurecimiento uniforme del semimolde con el peligro de rotura del mismo durante la colada.
- e.- Girar a la posición inicial el modelo con la cáscara adherida, la arena no endurecida cae al recipiente de arena.
- f.- Levantar del recipiente de arena el modelo con la cáscara.
- g.- Endurecimiento de la cáscara adherida al modelo por calentamiento en el horno túnel.
- h.- Retirar la cáscara con espigas o manualmente.

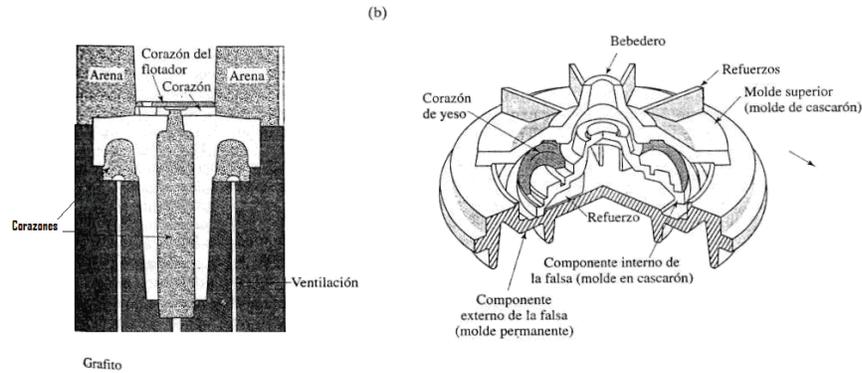
Una vez endurecido suficientemente el molde, se extrae el semimolde del modelo, se obtienen los dos semimoldes y se unen mediante abrazaderas o pegamento. En caso de que peligre la estabilidad del molde durante la colada, se rodea con arena de cuarzo o granalla de acero, esta medida mejora la evacuación del calor de la pieza de fundición.

El material que más se utiliza es la arena de sílice con un tamaño granular medio de 0.15 – 0.20 mm acompañándole con aglomerante tipo resina fenólica (termoestable), el porcentaje de aglomerante oscila entre 1.5 y 4 %.

Ésta técnica se adapta a todos los materiales de fundición, se aplica también en aquellas ocasiones en que, por razones tecnológicas, no es posible el moldeo a presión. Se pueden producir varias piezas con buenas tolerancias, dimensiones y buen acabado superficial, incluyendo pequeñas piezas mecánicas que requieren alta precisión como alojamientos para engranes, cabezas de cilindros y bielas. Los modelos metálicos son bastante caros, por lo que la serie deberá ser lo suficientemente grande (varios miles de piezas) con objeto de asegurar su rentabilidad. La producción es fácil de automatizar.

#### *2.3.1.2.1 Moldes compuestos.*

Los moldes compuestos están hechos de dos o más materiales diferentes y se utilizan en el moldeo en cáscara y en otros procesos de fundición. Generalmente se emplean en la fundición de formas complejas como impulsores para turbinas, los materiales de moldeo son cascarones fabricados de yeso, arena con aglutinante, metal, y grafito.



**Figura 2.3 Esquema de los moldes compuestos**

Fuente: KALPAKJIAN, S: Manufactura Ingeniería y Tecnología; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.

### 2.3.1.3 Proceso de moldeo con silicato de sodio

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

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

#### **2.3.1.4 Moldeo con grafito compactado**

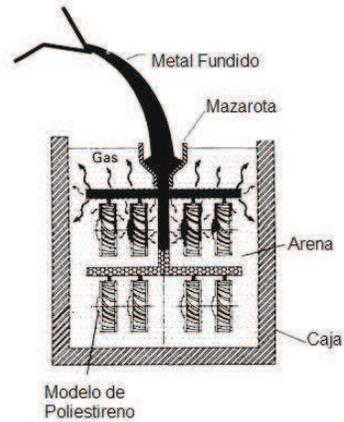
Este proceso utiliza grafito compactado para fabricar moldes para colar metales reactivos como el titanio y el zirconio, no se puede utilizar arena porque estos metales reaccionan fuertemente con la sílice. Los moldes se secan al aire se hornean a 175°C se queman a 870°C y después se almacenan a humedad y temperaturas controladas. Los procedimientos de fundición son similares a los de los moldes en arena.

#### **2.3.1.5 Fundición en modelo consumible (LOST FOAM)**

El procedimiento de fundición lost-foam se inicia produciendo un modelo en espuma (FOAM) cuyo material de partida puede consistir en poliestireno expandido y productos similares como el polimetilmetacrilato. El proceso de fundición en modelo consumible se ha convertido en el más importante para materiales ferrosos y no ferrosos, y también se lo conoce como fundición de modelo evaporado, de modelo perdido o de molde lleno.

El modelo es una réplica exacta de la pieza a conseguir y se puede alcanzar de una sola vez o en varios trozos que se pegarán posteriormente. Al tratarse de modelos evaporables, son destruidos durante la colada y por tanto, cada pieza que deseemos fundir requerirá su correspondiente réplica en poliestireno.

Dado que el polímero requiere de una considerable energía para degradarse se presentan grandes gradientes térmicos, es decir, el metal fundido se enfría más aprisa de lo que haría si se vaciara en una cavidad. En conclusión, la fluidez es inferior a la fundición en arena, esto tiene efectos importantes en la microestructura de toda la fundición y también conduce a una solidificación direccional del metal.



**Figura 2.4 Fundición en modelo consumible**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992

El proceso presenta ventajas sobre otros métodos de fundición:

- Es relativamente simple, porque no existen líneas de partición, hoyos o sistemas de alimentación; por lo tanto el diseño tiene flexibilidad.
- Solo bastan cajas de moldeo de bajo costo.
- El poliestireno es económico y se puede procesar con facilidad en modelos con formas complejas, tamaños varios y un fino detalle superficial.
- La fundición requiere un mínimo de operaciones de acabado y limpieza.
- El proceso puede ser automatizado y es económico para grandes lotes de producción. Un factor principal es el costo de producir el dado utilizando para la expansión de perlas de poliestireno a fin de hacer el modelo.

Las aplicaciones típicas para este proceso son las cabezas de cilindro, cigüeñales, componentes de frenos y los múltiples para automóvil. Mediante este proceso fabrican motores de aluminio y otros componentes de automóvil.

### **2.3.1.6 Fundición en molde de yeso.**

El molde se hace de yeso con adición de talco y harina de sílice para mejorar la resistencia y controlar el tiempo requerido para el curado del yeso. Estos componentes se mezclan con agua y el barro resultante es vaciado sobre el modelo. Una vez curado el yeso después de 15 minutos se retira el patrón y se deja secar el molde a (120-260) °C para eliminar la humedad. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad del mismo y se precalientan hasta aproximadamente 120°C, luego el metal fundido es vaciado en el molde. Dado que el metal fundido tiene una baja permeabilidad, los gases que se forman durante la solidificación del metal no pueden escaparse y, por tanto, el metal fundido es colado en vacío o a presión.

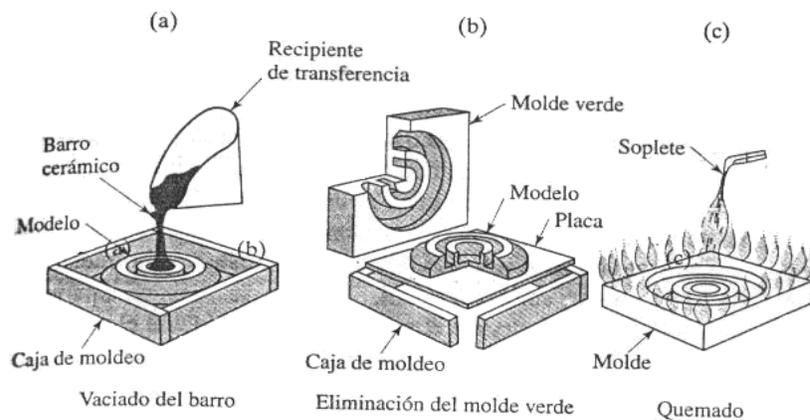
Se puede incrementar sustancialmente la permeabilidad del molde utilizando el proceso de Antioch en el cual los moldes se deshidratan en un horno durante 6-12 horas y después se rehidratan en aire durante 14 horas. Otro método de incrementar la permeabilidad es utilizando yeso espumoso que contenga burbujas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

Los modelos para el colado en yeso se fabrican por lo general de aleaciones de aluminio, plásticos termoestables, de latón o aleaciones de zinc. Las piezas fundidas tienen detalles finos con buen acabado superficial, dado que los moldes de yeso tienen menor conductividad térmica en comparación con otros, las fundiciones se enfrían lentamente y se obtiene una estructura de grano más uniforme, con menos deformación.

Este proceso y los procesos de fundición de moldes en moldes cerámicos y con recubrimiento se conocen como fundiciones de precisión en razón a la elevada precisión dimensional y buen acabado superficial, y por medio de estos procesos se puede obtener componentes para cerraduras, engranes, válvulas, acoplamientos, herramientas y piezas de ornato.

### 2.3.1.7 Fundición en molde cerámico

El proceso de fundición de molde cerámico es similar al proceso de molde de yeso, con la excepción de que se utilizan materiales refractarios adecuados para aplicaciones a altas temperaturas. El barro consta de una mezcla de zirconio de grano fino, óxido de aluminio y sílice fundido, que se mezcla con aglutinantes y se vacían sobre el modelo en una caja de moldeo. El modelo puede estar hecho de madera o metal. Después del endurecimiento los moldes (caras de cerámica) se retiran, se secan, se queman para eliminar toda la materia volátil y se hornean.



**Figura 2.5 Fundición en molde cerámico**

Fuente: KALPAKJIAN, S: Manufactura Ingeniería y Tecnología; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.

En el proceso Shaw, las caras de cerámica son recubiertas de arcilla refractaria (arcilla usada en la fabricación de ladrillos refractarios que resisten altas temperaturas), para impartir resistencia al molde. Las caras se ensamblan después formando un molde completo listo para su vaciado.

La resistencia a las altas temperaturas de los materiales refractarios usados permite que estos moldes se utilicen en el colado de aleaciones ferrosas y otras de alta temperatura de fusión, de aceros inoxidable y de aceros para herramienta. Las piezas fundidas tienen buena precisión dimensional y buen acabado superficial en una amplia variedad de tamaños y formas complejas.

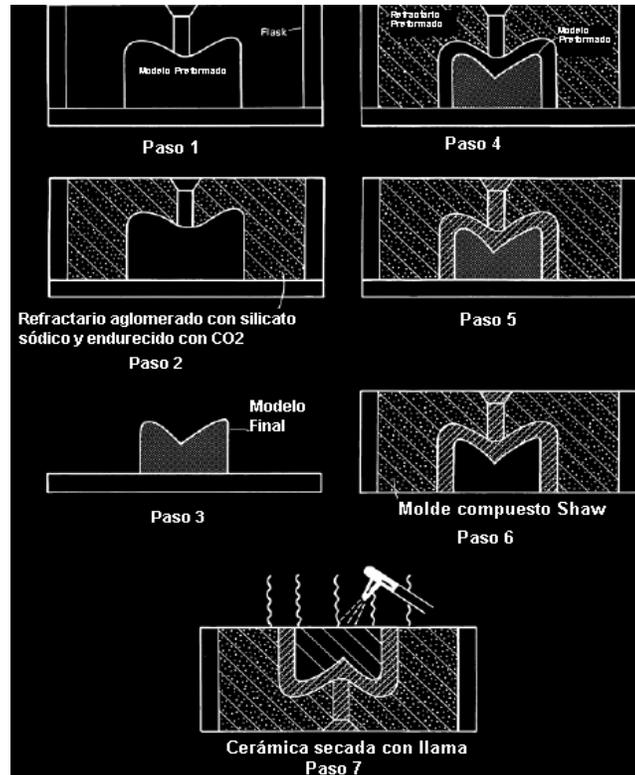


Figura 2.6 Proceso Shaw para fundición en molde cerámico

Fuente: LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

### 2.3.1.8 Fundición por revestimiento o cera perdida.

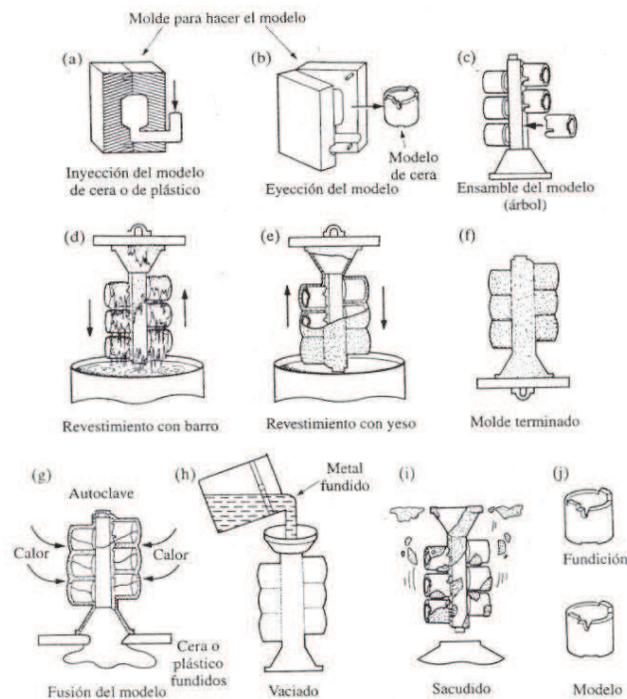
El modelo se hace en cera o en plástico (como poliestireno) utilizando técnicas de moldeo o de prototipo rápido. Éste se sumerge después en un barro de material refractario como, por ejemplo sílice fina y aglutinantes, incluyendo agua, silicato de etilo y ácidos. Una vez seco este recubrimiento inicial, el patrón se recubre repetidas veces a fin de incrementar su espesor. Los modelos de cera requieren de un manejo cuidadoso, porque no son lo suficientemente resistentes para soportar las fuerzas involucradas durante la manufactura del molde, sin embargo, a diferencia de los patrones de plástico, la cera puede ser recuperada y reutilizada.

El molde de una pieza se seca al aire y se calienta a una temperatura de 90-175°C. Se deja en posición invertida durante aproximadamente 12 horas para fundir la cera.

El molde se quema entonces a 650-1050 °C por aproximadamente 4 horas, dependiendo del metal que se va a fundir, a fin de eliminar el agua de cristalización (agua químicamente combinada) y quemar cualquier cera residual. Una vez vaciado el metal y solidificado, se rompe el molde y se retira la fundición. Se puede unir un conjunto de patrones para formar un molde llamado un árbol, y de esta manera incrementar la tasa de producción.

Con este proceso se puede producir formas complejas, con piezas que pesan desde 1g hasta 35 Kg (0,035oz a 75lb), de una diversidad de metales ferrosos y no ferrosos y sus respectivas aleaciones. Las piezas típicas que se fabrican son componentes para equipos de oficina así como componentes mecánicos como engranes, levas, válvulas y trinquetes.

El término revestimiento proviene del hecho de que el modelo es revestido con el material refractario.



**Figura 2.7 Proceso de fundición por revestimiento**

Fuente: KALPAKJIAN, S: Manufactura Ingeniería y Tecnología; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.

### **2.3.1.9 Fundición por revestimiento en cáscara de cerámica**

Una variante del proceso de fundición por revestimiento es la fundición en cáscara de cerámica. Utiliza el mismo tipo de modelo de cera o plástico, pero se introduce primero en un gel de silicato de etilo y posteriormente en una cama fluida de sílice fundido de grano fino o de arena de zirconio. El modelo se recubre después con sílice de grano más grueso para acumular capas adicionales y un espesor adecuado para que el modelo pueda soportar el choque térmico del vaciado, el resto del procedimiento es similar al de la fundición por revestimiento.

### **2.3.1.10 Fundición al vacío.**

En la fundición al vacío se moldea una mezcla de arena fina y de uretano sobre dados de metal que se cura con vapores de amina. El molde es sujeto después con un brazo robótico y se sumerge parcialmente en el metal fundido que se encuentra en un horno de inducción. El metal se puede fundir al aire (proceso CLA) o en vacío (proceso CLV). El vacío reduce la presión del aire en el interior del molde aproximadamente dos terceras partes de la presión atmosférica, succionando por tanto el metal fundido en las cavidades del molde a través un canal de alimentación en la parte inferior del molde. El metal fundido en el horno empieza a solidificarse dentro de una fracción de segundo y una vez lleno el molde se retira el metal fundido. Este proceso es adecuado para formas complejas de pared delgada (0,75mm) con propiedades uniformes.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> KALPAKJIAN, S: Manufactura Ingeniería y Tecnología; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002; pág: 281

### 2.3.2 FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE.

También se conoce como fundición en molde duro. Son técnicas de una utilización mucho más restringida que las de los moldes perdidos debido a que no pueden utilizarse para todas las aplicaciones, se emplean también hoyos que pueden ser de metal o arena.

Los materiales empleados para la fabricación de los moldes deben cumplir una serie de características entre las que cabe destacar: buena maquinabilidad, máxima resistencia al desgaste, elevada resistencia al impacto, baja dilatación y buena conductividad térmica. En general suele utilizarse fundición gris en la fabricación de coquillas y aceros de alta aleación en la fabricación de moldes de colada a presión, pero también se fabrican en grafito o aleaciones de metal refractario. Su fabricación y mantenimiento son muy caros y sólo se justifican en grandes series.

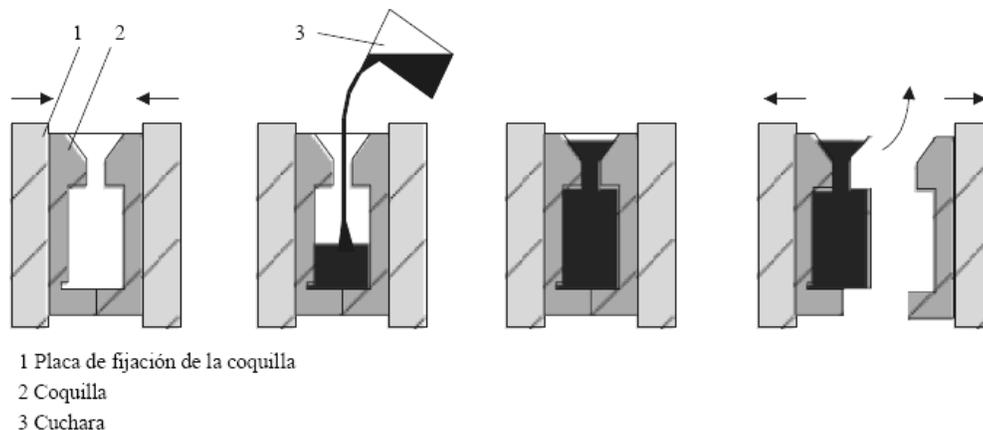
Las superficies de la cavidad del molde en general están recubiertas con barro refractario (como silicato de sodio y arcilla) y sirven como agentes de separación, controlando la velocidad de enfriamiento de la fundición. La fundición en coquillas se caracteriza por un enfriamiento extraordinariamente rápido de la fundición en el molde metálico permanente.

Los moldes se sujetan por medios mecánicos y se calientan aproximadamente a 150°C para facilitar el flujo de metal, el cual se vacía a través de canales de alimentación y después de solidificarse se abren los moldes para extraer la pieza colada. Para enfriar el molde se emplean métodos especiales, incluyendo agua o el uso de aletas similares a los que se encuentran en los motores de motocicleta o cortadoras de césped para enfriar el motor.

En estos moldes pueden realizarse largas series de piezas que estarán en función del grado de sollicitación de los moldes y de las exigencias de precisión dimensional, las aplicaciones del proceso son para aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, hierro gris, sirven especialmente para hacer pistones automotrices, cabezas del cilindro, bielas, discos en bruto, etc.

La fundición en coquillas puede ser por gravedad o a baja presión.

**Fundición por gravedad.**- En este caso fluye la colada de metal a la coquilla por la fuerza de gravedad. El gas contenido dentro de la cavidad del molde escapa a través de los canales de aire o respiraderos.



**Figura 2.8 Fundición en coquilla por gravedad**

Fuente: LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

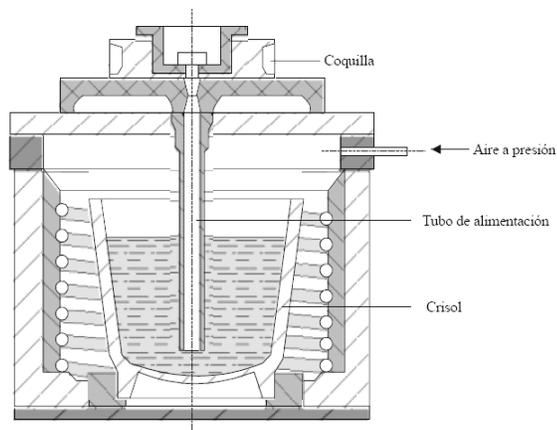
### 2.3.2.1 Fundición a baja presión.

En el proceso de fundición de baja presión, el metal fundido es obligado a fluir hacia arriba por presión de un molde de grafito o de metal. La presión se mantiene hasta que el metal se haya solidificado totalmente dentro del molde. El metal fundido también puede ser obligado a fluir hacia arriba mediante un vacío, que elimina los gases disueltos y produce una fundición con menor porosidad.

Las ventajas de la fundición a baja presión son:

- Flujo pausado del metal a la cavidad del molde.
- Fácil salida de los gases hacia arriba.
- Muy buena alimentación, ya que la colada se solidifica de arriba hacia abajo.

- Bajas cantidades de material de circulación (3 a 10%) ya que no son necesarios canales de alimentación.
- Condiciones metalúrgicas favorables, ya que el metal se halla dentro de un sistema cerrado.
- El proceso puede hacerse automático.



**Figura 2.9 Fundición en coquilla a baja presión**

Fuente: LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008

### 2.3.2.2 Fundición hueca.

La fundición se desarrolla en primer término una película solidificada, y esta película con el tiempo se hace más gruesa. Se pueden fabricar fundiciones huecas con paredes delgadas mediante fundición en molde permanente utilizando este principio, un proceso como fundición en cáscara.

El metal fundido se vacía en el molde del metal, una vez obtenido el espesor deseado de película solidificada, se invierte el molde y el metal líquido restante se extrae, se abren las dos mitades del molde y se retira la fundición. La fundición en cáscara se utiliza para la elaboración de objetos de ornato y decorativos, como por ejemplo bases y postes para lámpara.

### **2.3.2.3 Fundición por inyección en matriz o dado.**

En el proceso de inyección en matriz o dado, o fundición a alta presión, el metal fundido es forzado dentro de la cavidad de la matriz o dado a presiones que van de 0,7 a 700 MPa a gran velocidad. Un horno de conservación del calor almacena el metal fundido. En un cilindro se dosifica la cantidad a colar y a continuación actúa el émbolo de una bomba directamente sobre el metal fundido.

El tiempo de vaciado depende de diferentes factores, tales como el volumen de la fundición, grosor del bebedero, espesor de pared de la fundición, longitud de flujo de la colada dentro del molde. Mientras se solidifica el material de fundición, se mantiene constante la alta presión. A continuación se suprime la presión, se abre el molde, se expulsa la fundición y se prepara el molde para la siguiente colada.

La preparación implica la aplicación del agente de desmoldeo, así como el cierre y el precalentamiento del molde. El desmoldante que se aplica sobre la superficie interna del molde, mejora la movilidad de los semimoldes, impide la adherencia del metal y facilita la rápida separación de la fundición y el molde. Es necesario precalentar el molde a fin de evitar tensiones térmicas y las consiguientes fisuras.

Es preciso disponer de cilindros hidráulicos capaces de generar grandes fuerzas para mantener cerrado el molde durante la colada. El tamaño de las fundiciones depende de las fuerzas de sujeción disponibles. En la fundición en dado no se utilizan noyos de arena.

Las piezas típicas que se fabrican mediante la inyección en matriz son componentes para motores, máquinas para oficina y enseres domésticos, herramientas de mano y juguetes. Las matrices o dados a presión pueden ser de una cavidad, de múltiples cavidades (con varias cavidades idénticas) o dados unitarios, pequeños dados simples que se puedan combinar en una o más unidades en un dado maestro de sujeción.

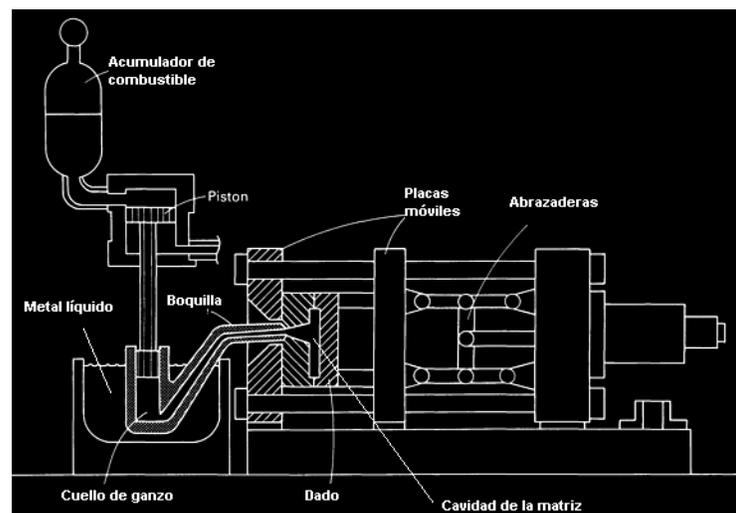
Las ventajas de la fundición a presión son unas tolerancias generales bastante ajustadas, superficies lisas, contornos precisos, bajas sobremedidas para el

mecanizado, economía de materiales (relación de peso entre la pieza final y los materiales empleados) y alta productividad, así como la posibilidad de elaborar fundiciones complicadas y de pared delgada con insertos de elementos de otros materiales (p.ej. pernos, casquillos, tubos de refrigeración).

La fundición a presión de cámara caliente y la fundición a presión de cámara fría, dos tecnologías aplicadas en la fundición en dado, se diferencian por la posición de la bomba de émbolo.

#### 2.3.2.3.1 *Proceso de cámara caliente*

En la fundición de cámara caliente la bomba se encuentra en posición vertical dentro del baño de metal fundido. El peligro de esta tecnología es que la colada ataque el material de la bomba.



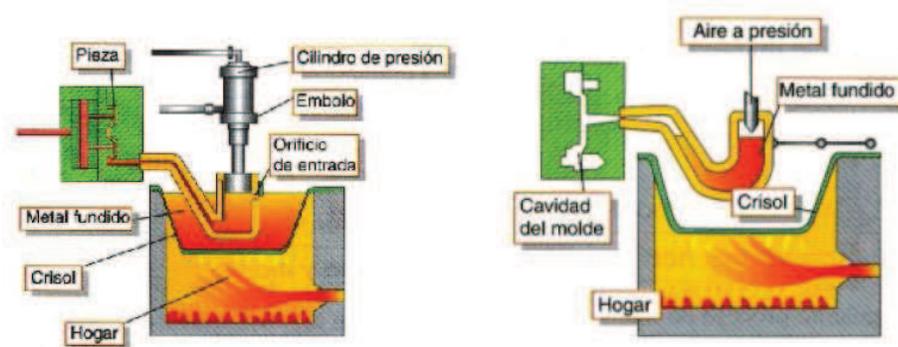
**Figura 2.10 Esquema de una máquina para proceso de cámara caliente**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág

Las presiones de inyección son hasta de 5000 psi, con un promedio de hasta aproximadamente 2000 psi. El metal se mantiene a presión hasta que se solidifica. Para mejorar la vida de la matriz y ayudar con un rápido enfriamiento del metal

(reduciendo por tanto el tiempo de ciclo de colada), las matrices de vaciado usualmente son enfriadas por agua o aceite en circulación a través de varios canales en el interior de la matriz de la colada.

Mediante este proceso usualmente se funden aleaciones de bajo punto de fusión como zinc, magnesio, estaño y plomo.

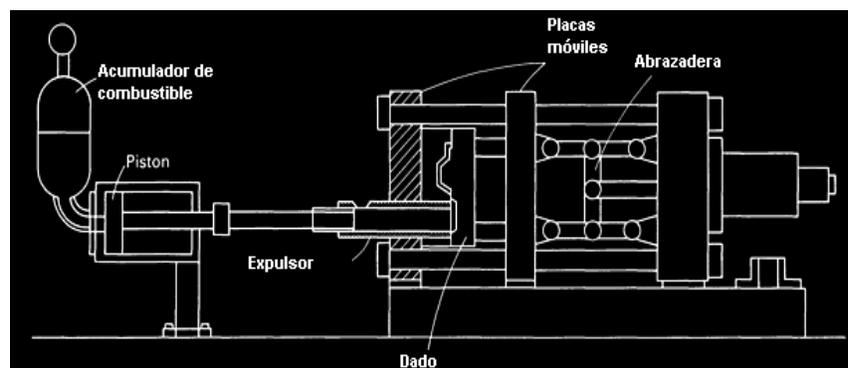


**Figura 2.11 Proceso de cámara caliente**

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

#### 2.3.2.3.2 Proceso de cámara fría

La bomba de émbolo de las máquinas de fundición a presión de cámara fría se halla fuera del horno de conservación del calor, es decir, la cámara de inyección no es calentada por eso el nombre de cámara fría.



**Figura 2.12 Esquema de una máquina para proceso de cámara fría**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág

Su posición puede ser vertical u horizontal. El metal fundido es forzado en la cavidad de la matriz de vaciado a presiones en un rango usualmente de (20 a 70) MPa, aunque pueden ser altas como 150 MPa.

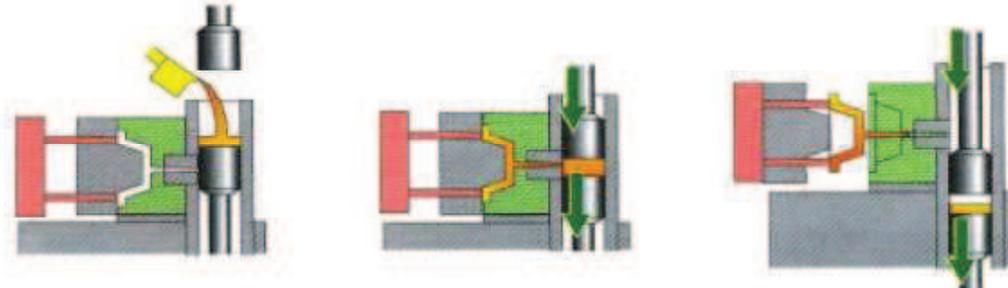


Figura 2.13 Proceso de cámara fría

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

#### 2.3.2.4 Fundición centrífuga.

La fundición centrífuga utiliza la fuerza de inercia causada por la rotación para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde. Existen tres tipos de fundición centrífuga: la fundición centrífuga verdadera, la fundición semicentrífuga, y el centrifugado.

- **Fundición Centrífuga Verdadera.**- Donde se producen piezas cilíndricas tales como tuberías, cañones de armas, y postes telefónicos, mediante las técnicas donde el metal fundido es vaciado en un molde rotativo. El eje de rotación es por lo general horizontal, pero puede ser vertical para piezas cortas.

Los moldes están hechos de acero, hierro o grafito y pueden estar recubiertos con una capa refractaria para incrementar la vida del molde. Las superficies del molde se pueden modificar de tal manera que se puedan fundir tuberías con formas exteriores diversas, incluyendo cuadradas y poligonales. La superficie interna de la colada se conserva cilíndrica porque el metal fundido es distribuido de manera uniforme por las fuerzas centrífugas.

Sin embargo, debido a diferencias en la densidad, los elementos más ligeros como escoria, impurezas y partes del revestimiento refractario tienden a acumularse en la superficie interna de la pieza fundida. La presión generada por la fuerza centrífuga es elevada y es necesaria para la fundición de piezas de pared gruesa. Mediante este método se obtienen fundiciones de buena calidad, precisión dimensional y buen acabado superficial.

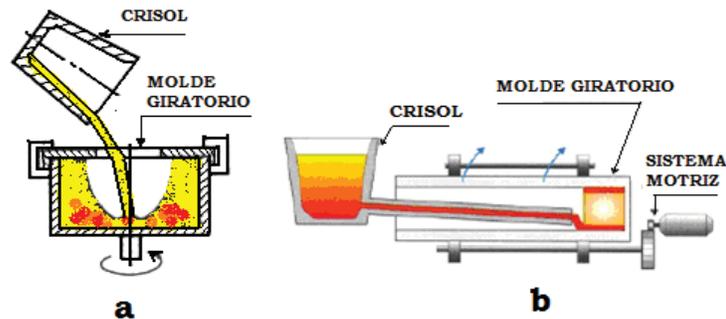


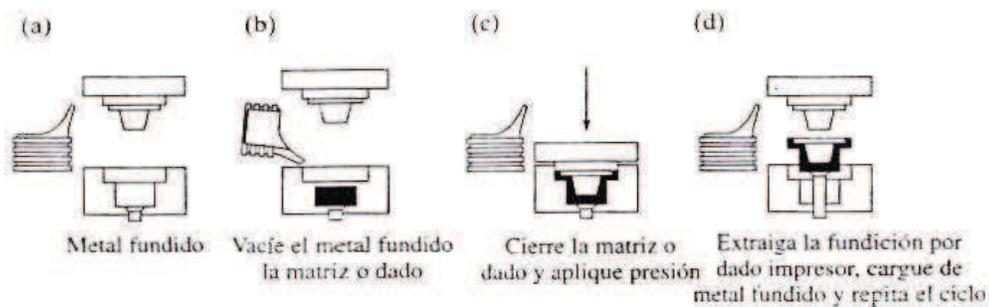
Figura 2.14 Fundición centrífuga verdadera, a) vertical y b) horizontal

Fuente: TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981, Pág.

- **Fundición semicentrífuga.**- Este método se utiliza para colar piezas con simetría rotacional como por ejemplo una rueda con sus rayos.
- **Centrifugado.**- El centrifugado es la fundición centrífuga, el proceso consiste en que las cavidades del molde de cualquier forma se colocan a una cierta distancia del eje de rotación. El metal fundido se vacía por el centro y es obligado a pasar al molde debido a la fuerza centrífuga. Las propiedades de las fundiciones varían en función de la distancia del eje de rotación.

### 2.3.2.5 Procesos de fundición en dado impresor.

Existen dos procesos de fundición que son básicamente la combinación de la fundición y la forja es decir la fundición por dado impresor y el formado de metal pastoso.



**Figura 2.15 Fundición por dado impresor**

Fuente: KALPAKJIAN, S: *Manufactura Ingeniería y Tecnología*; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.

#### 2.3.2.5.1 *Fundición por dado impresor*

También conocido por forja de metal líquido involucra la solidificación del metal fundido a alta presión. La maquinaria incluye un dado matriz, un punzón y un buje eyector. La presión aplicada por el punzón mantiene los gases atrapados en sólido y el contacto a alta presión en la interfaz dado-metal promueve una rápida transferencia de calor resultante en una fina microestructura con buenas propiedades mecánicas.

La aplicación de presión también resuelve problemas de alimentación que se pueden presentar al fundir metales con un rango de congelación grande. Las presiones que se requieren en la fundición por dado impresora son inferiores a la forja en caliente o en frío correspondientes. Las piezas se pueden fabricar a una forma casi final, con formas complejas y un fino detalle superficial tanto de aleaciones no ferrosas como ferrosas. Los productos obtenidos son componentes automotrices y cuerpos de mortero (un cañón roto)<sup>5</sup>

<sup>5</sup> KALPAKJIAN, S: *Manufactura Ingeniería y Tecnología*; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002. pág.288

#### *2.3.2.5.2 Fundición formada de metal semisólido*

El metal o aleación tiene una estructura de grano fino no dendrítica, casi esférica, al entrar a la matriz del molde. La aleación exhibe un comportamiento tixotrópico lo que significa que su viscosidad se reduce al ser agitado. La aleación tiene una consistencia de mantequilla de mesa, pero al ser agitado violentamente su consistencia se parece más a la de los aceites lubricantes para motor.

Este comportamiento se ha utilizado en el desarrollo de las tecnologías que combinan la fundición y forjado de piezas, utilizando lingotes de fundición que se forjan cuando están a 30 a 40% líquidos. Piezas de magnesio que por ejemplo se han hecho en máquinas que combinan los procesos de fundición por inyección a presión y de moldeado por inyección de los plásticos con tornillos recíprocos.

Otra técnica para el formado en estado semisólido es la **reofundición**, en el cuál se produce un “barro” en un mezclador mismo que se vacía al molde o troquel. Este proceso, sin embargo, aún no ha sido un éxito comercial.

## **2.4. GENERALIDADES DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA**

La fundición centrífuga consiste en mantener el molde en rotación mientras se solidifica el metal. La masa fundida se acomoda en el interior de la cavidad utilizando la fuerza centrífuga, la cual surge en el interior del metal líquido al momento de vaciarse en el molde rotatorio; éste a su vez puede girar en un eje vertical, horizontal o inclinado.<sup>6</sup>

Con cualquier proceso de fundición centrífuga, se obtienen buenos acabados superficiales en las piezas, y la estructura densa del metal adquiere propiedades físicas superiores, además se producen particularmente molduras con formas simétricas, aun cuando se pueden producir otros tipos de piezas fundidas.

La fundición centrífuga es un medio comprobado para fabricar prototipos de componentes funcionales y decorativos.

### **2.4.1 CALIDAD DE LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA**

El método de colado centrífugo trabaja con magnitudes de presión inferiores a las del proceso de inyección, por esta razón, la calidad de la fundición centrífuga es inferior que la de inyección en moldes metálicos.

El eje horizontal o inclinado de rotación del molde se emplea para la mayoría de las molduras (tubos, bujes, aros, coronas), el vertical, cuando se quiere obtener molduras sin el orificio central, artículos perfilados que se llenan a través del canal vertical.

---

<sup>6</sup> TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981, Pág. 414

Las principales ventajas de este procedimiento de fundición son las siguientes:<sup>7</sup>

- Al fundir cilindros huecos no se requiere machos para formar el orificio, ya que la masa fundida bajo la acción de la fuerza centrífuga se distribuye en las paredes del molde.
- Un gasto mínimo de metal para bebederos.
- La solidificación del metal bajo la acción de las fuerzas centrífugas contribuye a obtener molduras compactas, sin rechupes de contracción y sin porosidades.

El procedimiento de fundición centrífuga presenta las siguientes desventajas:

- Durante el llenado del molde, bajo la acción de la fuerza centrífuga, se intensifica la segregación de los componentes de la aleación, por eso no todas las aleaciones se pueden colar por este procedimiento.
- La acumulación de suciedades en la superficie interior de segregados e inclusiones no metálicas, causan un elevado sobre-espesor en las superficies interiores.
- Si la coquilla tiene fallas, las molduras también las tendrán, es decir que el producto final (moldura), depende directamente de la calidad del molde.

#### **2.4.2 PARTICULARIDADES DE LA FORMACIÓN DE LA MOLDURA.**

Como ya se mencionó, durante la colada centrífuga la moldura se solidifica y se enfría en el instante de formación de la fuerza centrífuga tanto por el lado exterior del molde como por el lado interior de la superficie libre, formando radiación y convección del aire.

La masa fundida más fría, y por tanto más densa, se mueve desde la superficie libre hacia la pared del molde, esto contribuye a la solidificación de la moldura. Sin embargo, el enfriamiento intensivo de la masa fundida por la presencia de la

---

<sup>7</sup> TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981, Pág. 415

radiación y convección desde la superficie libre provoca la creación de cristales, los cuales bajo la acción de las fuerzas centrífugas se dirigen hacia la pared del molde.

Los cristales que crecen desde la pared del molde se alimentan constantemente con la masa fundida, por eso estos crecen en dirección perpendicular al movimiento de la masa fundida o cercana a ella y es por esta razón que se obtienen molduras compactas.

Las partículas livianas (escorias, partículas no metálicas, burbujas de gas), que tienen menor densidad que la masa fundida, se dirigen hacia la superficie libre de la moldura (mazarota). Esto también contribuye al aumento de la densidad de la moldura y al mejoramiento de su calidad.

Al mismo tiempo las fuerzas centrífugas provocan segregación, por la densidad que tienen los elementos como los bronce de plomo, aluminio, carbono, fósforo y azufre. Por lo tanto, esto influye negativamente en las características mecánicas y otras propiedades del metal en la moldura.

#### **2.4.3 CAMPOS DE APLICACIÓN DEL COLADO CENTRÍFUGO**

Por medio de la fundición centrífuga se obtienen piezas más económicas que por otros métodos, tienen una estructura de metal denso y las impurezas que van de la parte posterior al centro de la pieza frecuentemente se maquinan en un proceso posterior.

Por lo tanto es importante dejar el espacio necesario en el molde, para la formación de una mazarota, la misma que evita la formación de porosidades y rechupes en la moldura, al momento de salificarse. De la geometría de la mazarota depende, que esta sea la última en solidificar, y que exista a lo largo del proceso la cantidad adecuada de metal en estado líquido.

En la fundición centrífuga hay limitaciones en el tamaño y forma de piezas fundidas, se pueden hacer desde anillos de pistón de pocos gramos de peso, como blocks de

máquinas en aluminio y rodillos para papel que pesen arriba de 40 toneladas. A continuación se muestran algunas aplicaciones de fundición centrífuga.



**Figura 2.16 Aplicaciones de la fundición centrífuga**

Fuente: TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981

#### **2.4.4 TIPOS DE FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.**

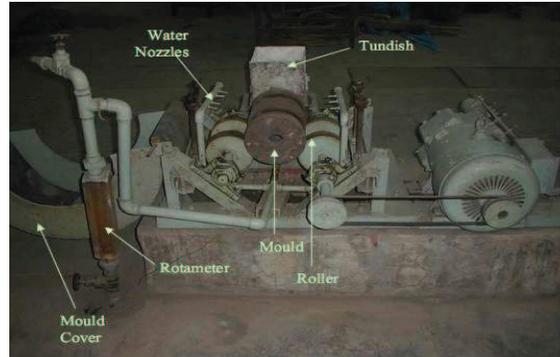
Existen tres modalidades para colado centrífugo:

- Colado centrífugo real o verdadero.
- Colado semicentrífugo.
- Colado por centrifugado.

##### **2.4.4.1 Colado Centrífugo Real o Verdadero.**

Este procedimiento se utiliza en la producción de fundiciones cilíndricas o tubulares, por ejemplo en la fabricación de tubos sin costura, camisas y objetos simétricos. El proceso consiste en llenar de material fundido al molde de manera uniforme, y hacerle girar sobre su eje de rotación. El eje de rotación de la pieza es el mismo que el eje de rotación del molde.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág 641



**Figura 2.17 Colado centrífugo real o verdadero**

Fuente: AMIT M JOSHI, Fragment of an Investigation of Centrifugal Casting, Indian Institute of Technology – Bombay, India, 2008

El proceso puede ser vertical u horizontal y no se necesita de un noyo para el centro. Las fundiciones producidas con este método siempre tienen un cilindro al interior del diámetro, independientemente de la forma o configuración del molde. El interior de la fundición va a ser recta o fina, dependiendo de la rotación del eje horizontal o vertical.

#### **2.4.4.2 Colado Semicentrífugo.**

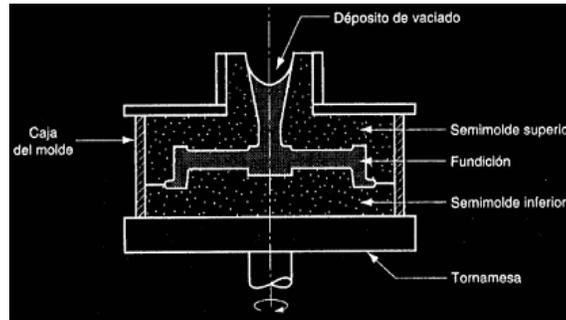
Es un método en el que el material fundido llega a los extremos de los moldes, por la fuerza centrífuga generada cuando estos giran, los extremos se llenan del metal fundido, con buena densidad y uniformidad, el centro tiene poco material y poca densidad, por lo que a futuro es maquinado.<sup>9</sup>

Este proceso se usa en fundiciones con configuraciones determinadas, girando la colada y el molde en el eje. La solidificación es similar a la sucedida en la fundición estática, solo que en el molde giratorio la presión es mayor debido a las fuerzas centrífugas.

Los noyos podrían ser necesarios en el colado si se tienen algunas secciones. Los mejoramientos en el colado significan un rendimiento del 85 al 95% y se obtiene

<sup>9</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág 641

modelos de alta calidad, libre de huecos y porosidades. Por medio de este procedimiento se pueden fundir engranajes, ruedas, poleas acanaladas, rodetes, volantes y rotores de motor eléctrico.



**Figura 2.18 Método de fundición centrífuga real, para cilindros de motor radial**

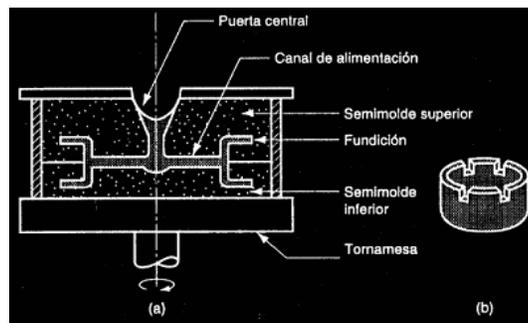
Fuente: TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981

#### 2.4.4.3 Centrifugado.

En este método la colada gira alrededor del eje de rotación, las piezas están colocadas simétricamente en la periferia del eje permitiendo la producción de múltiples fundiciones. Al girar el sistema se generan fuerzas centrífugas, las que son utilizadas para aumentar la uniformidad del metal que llena las cavidades de los moldes.

La fuerza centrífuga provee la necesaria presión en el metal líquido de la misma manera que en el colado semicentrífugo. El campo de aplicación es amplio, este método de fundición se usa para producir cuerpos y cuerpos de válvula, tapones, yunta, llaves, y amplias variedades en fundiciones industriales.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág 641



**Figura 2.19 Método de fundición centrífuga**

Fuente: TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981

## 2.4.5 MOLDES UTILIZADOS PARA COLADO CENTRÍFUGO

Los moldes en fundición centrífuga se dividen en metálicos y revestidos con diferentes composiciones. El molde se elige en dependencia de las dimensiones geométricas de la moldura, producción y al tipo de material. A continuación tenemos los siguientes:

### 2.4.5.1 Moldes Permanentes

Existen dos tipos básicos de moldes permanentes que son: Moldes metálicos y moldes al carbón, la extracción de moldes permanentes es más rápido en caliente, hay usualmente un incremento en la calidad (propiedades especiales) de la fundición producida por éste tipo de moldeo.

Los materiales más comunes para moldes permanentes son acero, cobre, y grafito.

### 2.4.5.2 Moldes Metálicos

Un gran número de fundiciones en moldes de hierro son usadas para la fundición centrífuga. Se usan sistemas de agua fría en el exterior del diámetro proporcionando alta velocidad al lanzar el agua para incrementar la porción de solidificación. Al enfriar con agua, siempre se origina un riesgo de agrietamiento o ruptura.

### **2.4.5.3 Moldes de Acero.**

Son utilizados para producciones a gran escala y para algunas aleaciones que requieren una condición específica de solidificación. Son sensibles al choque térmico y son los más comunes y seguros.

Los moldes rociados con base de alúmina o zirconio, son usados para disminuir el choque térmico y mejorar la superficie del molde. El recubrimiento es importante en el control de la tasa de solidificación de algunos materiales de fundición. El enfriamiento es rápido.

### **2.4.5.4 Moldes Revestidos.**

Los moldes revestidos se elaboran compactando la mezcla de arena en la superficie del molde en una máquina de punzón-tornillo transportador, se cubren con mezcla de moldeo común, con mezcla para machos especiales. Los moldes secos se usan para fundir tubos y piezas perfiladas.

## **2.4.6 MÁQUINAS PARA LA FUNDICIÓN CENTRÍFUGA.**

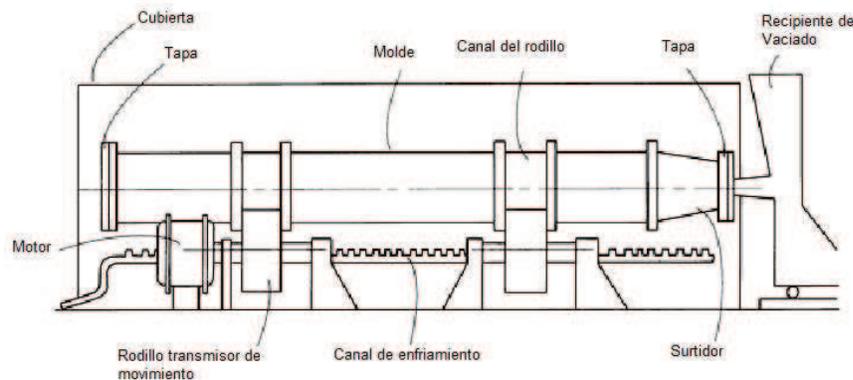
Las máquinas para la colada centrífuga de cuerpos de revolución pueden ser de husillo y de rodillos. Para la fundición de bujes cortos, camisas, aros, se emplean máquinas de husillo con eje de rotación horizontal, y para la fabricación de molduras perfiladas, se elaboran con eje de rotación vertical. Existen esencialmente dos tipos de máquinas para el colado centrífugo: El tipo horizontal que gira en el eje horizontal, y el tipo vertical que gira en el eje vertical.

### **2.4.6.1 Máquina para Colado Centrífugo Horizontal.**

El colado centrífugo horizontal se utiliza principalmente para la fabricación de elementos de pared delgada de hierro gris, hierro dúctil, y tubos de bronce. Mejoras hechas en el equipo y en las aleaciones han hecho posible el desarrollo de un proceso confiable, el cual es económico y competente frente a estrictos requerimientos dimensionales y metalúrgicos.

Una máquina para colado centrífugo horizontal debe ser capaz de ejecutar cuatro operaciones correcta y repetidamente: <sup>11</sup>

- El molde debe rotar a una velocidad angular predeterminada.
- Debe haber una manera de verter el metal líquido dentro del molde rotatorio.
- Una vez colado el metal, debe ser establecida la velocidad adecuada de solidificación en el molde.
- Debe existir una manera de extraer la pieza solidificada desde el molde.



**Figura 2.20 Máquina para colado centrífugo horizontal.**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992,

El metal líquido puede ser introducido en el molde por un extremo, por ambos o por medio de un canal de longitud variable.

La velocidad de colado varía ampliamente de acuerdo al tamaño de la pieza fundida y al metal que se está colando; si el vertido del metal líquido es muy lento puede resultar en la formación de grietas y porosidades por gases atrapados, mientras que, si es excesivamente elevado disminuye la solidificación y es una de las causas de rotura longitudinal.

<sup>11</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, Pág 632

#### 2.4.6.1.1 Parámetros

##### 2.4.6.1.1.1 Temperatura de colado

El grado de sobrecalentamiento para producir una pieza fundida es función:

- Del metal o aleación que se está colando,
- Del tamaño del molde, y
- De las propiedades físicas del material del molde.

La siguiente fórmula empírica ha sido sugerida como una guía general para determinar el grado de sobrecalentamiento necesario:

$$L = 2.4 \Delta T + 110 \qquad \text{Ec. 2-1}$$

Donde L es la longitud de espiral de fluido de metal (en milímetros) y  $\Delta T$  es el grado de sobrecalentamiento (en grados centígrados). El uso de la ecuación 2-1 para aleaciones ferrosas resulta en temperaturas de colado de 50 a 100°C por encima de la temperatura de líquidus. En la práctica, la temperatura de colado es mantenida tan bajo como sea posible sin permitir la formación de defectos por una temperatura muy baja de la colada.

##### 2.4.6.1.1.2 Temperatura del molde

Numerosos investigadores han estudiado la relación entre la temperatura inicial del molde y la estructura de la fundición resultante. La temperatura inicial del molde varía en un amplio rango de acuerdo al metal que se esté fundiendo, el espesor del molde, y el espesor de la pared del tubo que está siendo fundido.

La temperatura inicial del molde no afecta a la estructura de la fundición resultante tan directamente como otros parámetros del proceso.<sup>12</sup>

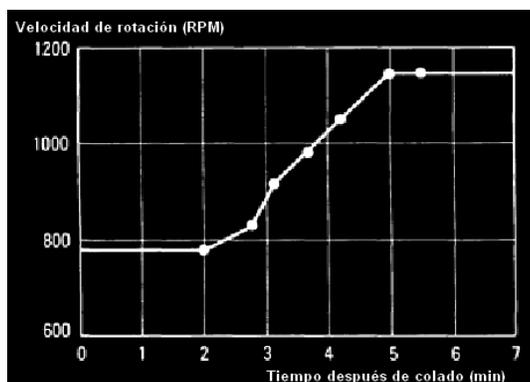
---

<sup>12</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, Pág 634

### 2.4.6.1.1.3 Velocidad de rotación

Un ciclo de rotación del molde puede ser dividido en tres partes:

- En el tiempo de vertido, el molde gira a una velocidad suficiente para lanzar el metal líquido contra las paredes del mismo.
- Cuando el metal alcanza el extremo opuesto del molde, la velocidad de rotación es incrementada.
- Finalmente, la velocidad de rotación se mantiene constante por un intervalo de tiempo después del vertido, éste intervalo varía con el tipo de molde, el metal que se está fundiendo y el espesor de pared requerido.



**Figura 2.21 Velocidad de rotación vs tiempo después de colado**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992

La velocidad ideal de rotación causa una rápida adhesión del metal líquido a las paredes del molde con una vibración mínima. Tal condición tiende a resultar en una fundición con estructura uniforme. Cuando el metal entra en el molde se establece un gradiente de presión a través del espesor del tubo debido a la aceleración centrífuga, causando la separación de los constituyentes de la aleación por su diferencia de densidad. Las partículas más livianas, tales como impurezas no metálicas, se agrupan en el diámetro interno del tubo, y son fácilmente removidas con maquinado posterior.

Una baja velocidad de rotación puede causar deslizamiento y un mal acabado superficial, en cambio las altas velocidades generan vibraciones, crecimiento de la segregación circunferencial, resquebrajaduras y grietas circulares.<sup>13</sup>

#### *2.4.6.1.1.4 Solidificación*

En el colado centrífugo horizontal, el calor es removido cuando se solidifica la colada solamente a través de un molde enfriado con agua fría en las paredes. La solidificación empieza en el exterior del diámetro de la colada, cuando esté en contacto con el molde, y continúa hacia el interior. Algunos parámetros que influyen la solidificación son:<sup>14</sup>

- El molde, inclusive el material con el que está construido, su espesor y su temperatura inicial.
- Los espesores y la conductividad térmica del molde
- Las condiciones de colado, incluyendo el grado de sobrecalentamiento, la velocidad de colado y la velocidad de rotación.
- Algunas vibraciones presentes en el sistema de colado.

En el aspecto térmico de la solidificación, los parámetros con efectos más evidentes son el grado de sobrecalentamiento del metal líquido y el espesor del baño de enfriamiento del molde. Ambas variables de éste proceso afectan las condiciones de solidificación del molde y, por lo tanto, modifican la estructura de la fundición.

#### *2.4.6.1.1.5 Ventajas del proceso*

El alto grado de control microestructural con colado centrífugo horizontal, tiene como resultado una gran flexibilidad en la selección de propiedades para aplicaciones específicas. Los tubos pueden ser elaborados con resistencia a las altas

---

<sup>13</sup> y <sup>14</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, Pág 635

temperaturas, resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga térmica, ductilidad a bajas temperaturas y otras más.

Algunas partes de la fundición centrífuga tienen un alto grado de limpieza metalúrgica y microestructuras homogéneas, y ello no exhibe anisotropía en las propiedades mecánicas evidentes en los tubos rolados, soldados o forjados.<sup>15</sup>

#### *2.4.6.1.1.6 Materiales*

Los materiales que comúnmente se procesan por este método incluyen aceros de baja aleación y alta resistencia, aceros inoxidable, aleaciones de acero al cromo-molibdeno, tubos bimetálicos y aluminio.

#### *2.4.6.1.1.7 Aplicaciones del colado centrífugo horizontal*

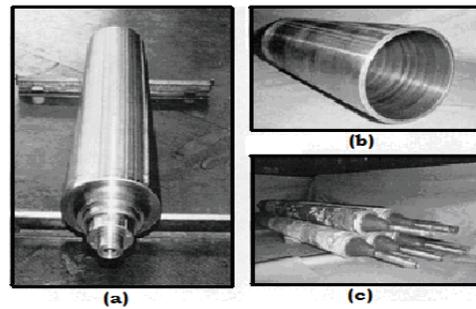
El colado centrífugo horizontal permite la elaboración de elementos tubulares, bujes, camisas y fundiciones cilíndricas. Se pueden obtener tuberías de un tamaño hasta 1600 mm con un espesor de pared de 200 mm, la tolerancia dimensional depende del tipo de molde utilizado.

La flexibilidad del proceso y la gran variedad de tamaños que se pueden producir, han guiado a la aplicación de la fundición centrífuga en muchas industrias que se exponen a continuación:

**Industria del hierro y del acero.**- Partes fundidas centrífugamente son usadas en la producción de hierro y acero para rodillos de fundición continua, trenes de laminación, tuberías especiales, rodillos para hornos, carretes para bobinado, y otras aplicaciones.

---

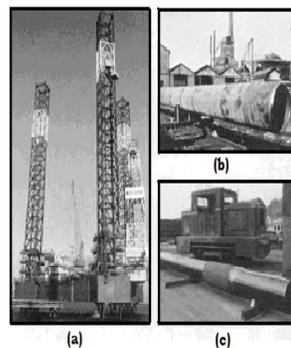
<sup>15</sup> D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, Pág 639



**Figura 2.22 Aplicaciones industria de hierro y acero: a) rodillo de fundición continua, b) carretes de bobinado, c) rodillos para horno endurecidos por calor**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

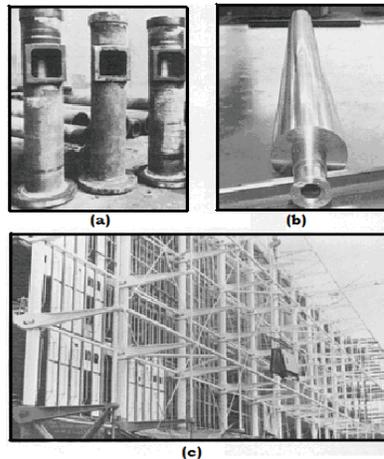
**Producción de Petróleo.-** En las plataformas de la industria del gas y petróleo a las orillas de la costa utilizan tubos fundidos centrífugamente en varias aplicaciones.



**Figura 2.23 Aplicaciones en pozos petroleros: a) Postes extensibles, b) Tubería ascendente, c) Abrazaderas para detener fisuras**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

También existen otras aplicaciones de los tubos centrifugados, tales como la producción de cilindros hidráulicos, rodillos para la producción de vidrio, tuberías para el transporte de materiales abrasivos, rodillos en la industria de la pulpa y el papel, tubos para la industria de procesamiento químico, columnas de construcción.



**Figura 2.24 Otras aplicaciones (a) cilindros hidráulicos (b) rodillos flotantes de vidrio y (c) columnas exteriores de construcción**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

#### **2.4.6.2 Máquina para Colado Centrífugo Vertical**

El colado centrífugo vertical es producido vertiendo el metal líquido en el interior del molde rotatorio. La fuerza centrífuga producida por la rotación del molde impulsa al metal contra las paredes internas de la cavidad del molde bajo presión constante hasta cuando el metal se haya solidificado.

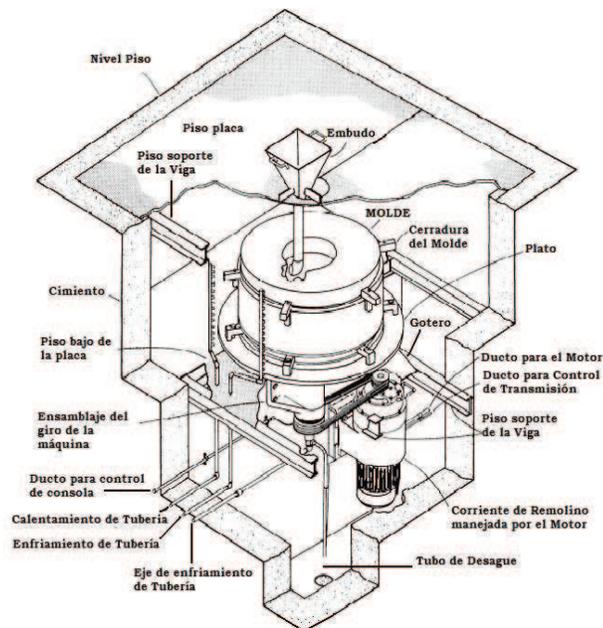
Las fundiciones tubulares con moldes permanentes producidas por fundición centrífuga poseen propiedades mecánicas más elevadas respecto a las realizadas con procesos estáticos de fundición.

La fundición centrífuga vertical puede ser definida como isotrópica, es decir, que tiene iguales propiedades en todas las direcciones. Con la aparición de la fuerza centrífuga en los moldes rotatorios, una fundición de alta calidad se puede producir por una alta densidad, por liberación de óxidos, gases, y otras inclusiones no metálicas.

Todos los metales sin excepción se pueden colar con el proceso de fundición centrífuga, incluyendo aceros y aleaciones al carbono con alta corrosión y gran resistencia, como hierro gris, hierro dúctil y nodular, altas aleaciones de hierro, aceros inoxidable, aceros niquelados, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, aleaciones de magnesio, aleaciones de base de níquel-cobalto, y aleaciones de titanio.

La selección del tipo de molde para el proceso de colado centrífugo vertical es determinado por la forma de la fundición, el grado de calidad necesitado, y la producción requerida, se puede escoger entre moldes de arena, moldes semipermanentes, y moldes permanentes.

A continuación se presenta un esquema de una máquina para colado centrífugo vertical:



**Figura 2.25 Máquina para colado centrífugo vertical**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

#### *2.4.6.2.1 Parámetros*

##### *2.4.6.2.1.1 Temperatura de colado*

Cuando el metal alcanza la temperatura de líquidus, comienza la solidificación, la temperatura de colado es la que se encuentra sobre la temperatura de líquidus y es necesario mantenerla con cierto sobrecalentamiento, ya que favorecerá a la fluidez y mejorará la capacidad de llenado del molde.

También se debe tener en cuenta que altas temperaturas de vertido propician una mayor oxidación del metal y una mayor absorción de gases. La temperatura de colado para cualquier aleación depende del punto de fusión.

En el caso del presente proyecto se trabaja con aluminio, por lo que la temperatura de colado viene a ser la temperatura de fusión del aluminio (660 °C) más un sobrecalentamiento de 50°C, es decir, la temperatura de colado es de 710°C aproximadamente.

##### *2.4.6.2.1.2 Temperatura del molde*

Es la temperatura a la que debe mantenerse el molde hasta que se produzca la solidificación de la moldura.

La temperatura del molde afecta directamente en la estructura del colado resultante, debido al cambio de estado que se produce por la solidificación y a las fuerzas centrífugas que en el molde se generan.

##### *2.4.6.2.1.3 Velocidad de rotación*

La velocidad de rotación del molde depende de la resistencia, la estructura, la distribución de las inclusiones de escoria, la porosidad, contracción y los segregados en la moldura. La frecuencia de rotación del molde depende de la disposición del eje de rotación, las propiedades de la masa fundida y el diámetro de la moldura.

En el proceso de colado centrífugo vertical, la velocidad de giro se incrementa para prevenir o reducir la erosión en las cavidades del molde. Los moldes deben girar poco tiempo, esto garantiza la correcta distribución del metal (caliente o frío), logrando de esta manera, perfeccionar la alimentación.

Para determinar la velocidad de rotación en el proceso de colado centrífugo vertical, existen valores recomendados por medio de nomogramas. En el anexo A se muestra un nomograma que permite obtener la velocidad angular de la coquilla en función del diámetro interno de la misma.

El valor de la fuerza centrífuga se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$g = 0,0000142 \times D \times n \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde:

- $g$  Fuerza centrífuga o el número de veces que se incrementa la gravedad
- $D$  Diámetro interno de la fundición
- $n$  Velocidad de rotación

#### 2.4.6.2.1.4 Solidificación

Al introducir el metal líquido en el molde comienza el proceso de transferencia de calor que provoca la solidificación del metal, el cual se efectúa en régimen no estacionario, es decir, que el gradiente de temperatura, las propiedades termofísicas del metal fundido y el molde cambian continuamente con el tiempo.

La solidificación en un molde rotatorio es homogénea casi en su totalidad pero todavía existe en ciertos puntos solidificación heterogénea por la causa de anisotermia de unas zonas respecto a otras.

Existen una serie de fenómenos inherentes que acompañan al cambio de fase. Por ejemplo la solubilidad del gas hidrógeno disuelto, se disminuye con el enfriamiento que se crea al hacer girar el molde y es posible que se elimine.

La solidificación del metal comienza, desde las paredes del molde, hacia el interior del mismo, lo que hace que exista un frente de solidificación radial, que avanza por medio de las fuerzas centrífugas hacia el interior del molde, en función de la disminución de la temperatura con el tiempo.<sup>16</sup>

Dentro de la solidificación, si el sobrecalentamiento es suficiente, el tiempo mínimo es consecuencia de la fluidinámica del llenado. La aptitud del flujo del metal será:

- a) Función directa de la fuerza impulsora, de la fluidez del metal, del tiempo disponible.
- b) Función inversa de la superficie de metal y de la resistencia al movimiento superficial.

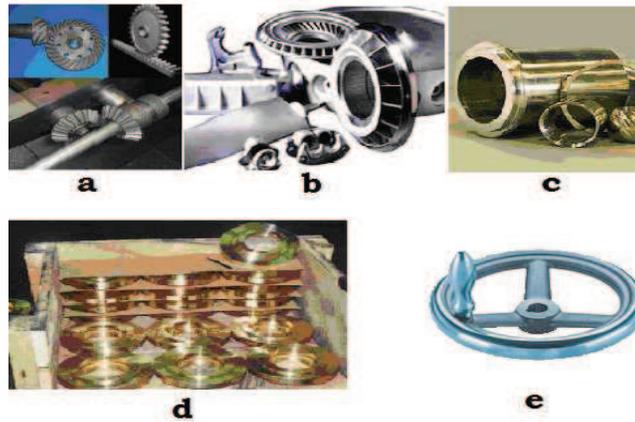
#### *2.4.6.2.1.5 Aplicaciones*

El rango de aplicación de la máquina de colado centrífugo vertical, es considerablemente más amplio que las de colado centrífugo horizontal. La máxima eficacia técnico-económica de la utilización del procedimiento de fundición centrífuga, se logra al elaborar molduras que tienen formas de cuerpo de revolución, y de una serie de casos para emplearlos en molduras perfiladas, como engranajes, discos de rotores de turbina con paletas, bocines, bridas, volantes, etc.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 97

<sup>17</sup> TITOV STEPANOV, Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981, Pág. 415



**Figura 2.26 Ejemplos de aplicaciones: a) engranajes b) discos de rotores de turbina c) bocines d) bridas y e) volantes de maniobra**

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Fundiciones no cilíndricas simétricas pueden ser usadas en el colado centrífugo vertical, es decir por medio de este procedimiento se pueden hacer las mismas piezas que se logran por una fundición estática en arena en verde.

Por medio del proceso de colado centrífugo vertical se pueden realizar, cualquier tipo de elementos cilíndricos, como los que se presentan a continuación:



**Figura 2.27 Ejemplos de aplicaciones: a) engranajes b) discos de rotores de turbina c) bocines d) bridas y e) volantes**

Fuente: RAJSHI ENTERPRISE, Industrial Metal Casting

## **CAPÍTULO 3**

### **3. PREFACTIBILIDAD Y FACTIBILIDAD**

#### **3.1. PREFACTIBILIDAD**

##### **3.1.1 ESTUDIO DEL MERCADO**

###### **3.1.1.1 Análisis de la oferta**

Luego de investigaciones en el mercado local, no se ha podido conocer ninguna empresa dedicada a la construcción y/o distribución de esta clase de equipos.

###### **3.1.1.2 Análisis de la demanda**

Tampoco se conocen empresas que adquieran este tipo de equipos, por lo que se vuelve necesario diseñar la máquina en cuestión.

##### **3.1.2 ESTUDIO DE RESTRICCIONES**

###### **3.1.2.1 Tecnología**

La tecnología disponible en el país, permite el desarrollo de un proyecto de esta naturaleza, debido a que la construcción de sus componentes no necesita de maquinaria compleja.

###### **3.1.2.2 Disponibilidad de materiales**

Los materiales con los cuales se va a diseñar este sistema, se los puede encontrar con facilidad en el mercado local y nacional.

### **3.1.2.3 Facilidad de construcción**

El diseño que se propone contiene piezas que no tienen geometrías complicadas, lo cual facilita su diseño y construcción. Los procesos de fabricación más comunes podrán ser utilizados en la construcción del bastidor y del molde, lo cual es favorable por el tiempo de construcción.

### **3.1.2.4 Mantenimiento**

Para la frecuencia de mantenimiento en el diseño de este sistema debe considerarse que la mayoría de partes son mecánicas, por lo que pueden necesitar de lubricación en sus partes móviles. Dependiendo del tipo de accionamiento que se utilice, se realizará una planificación del mantenimiento del sistema.

### **3.1.2.5 Facilidad de operación**

Como se trata de un equipo para el Laboratorio de Fundición, es decir, será utilizado por estudiantes en la mayor parte del tiempo, éste debe ser de fácil manejo.

### **3.1.2.6 Suministro de energía**

El Laboratorio de Fundición cuenta con suficientes tomas de energía eléctrica.

### **3.1.2.7 Accionamiento del equipo**

Deberá seleccionarse de manera adecuada, los mecanismos para la transmisión de movimiento del motor al molde rotatorio, además del sistema de calentamiento del molde.

## **3.2. FACTIBILIDAD**

De acuerdo a los estudios realizados, la construcción es factible por lo que se vuelve necesario seleccionar de diferentes alternativas de accionamiento los elementos del equipo.

### **3.2.1 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO A CONSTRUIRSE**

#### **3.2.1.1 Parámetros funcionales**

El equipo será utilizado por los estudiantes y personal del Laboratorio de Fundición, en el cual se fabricarán elementos de revolución (en este caso, volantes de maniobra).

#### **3.2.1.2 Condiciones ambientales de trabajo**

Considerando que el equipo permanecerá como parte integral del laboratorio, éste tendrá que soportar las mismas condiciones de trabajo (operación a la intemperie).

#### **3.2.1.3 Vida útil y mantenimiento**

El equipo debe ser diseñado para una vida útil de 15 años, teniendo en cuenta su mantenimiento regular y la condición de uso.

Se anexará el respectivo manual de mantenimiento y operación, para garantizar una mayor vida útil.

#### **3.2.1.4 Costo estimado**

Con respecto al costo del equipo debe ser aproximadamente de 3000 USD, tomando en cuenta precios internacionales.

#### **3.2.1.5 Apariencia**

Es importante que tenga un acabado superficial con pintura, y que el aspecto del equipo sea agradable a la vista del usuario, para un buen ambiente de trabajo.

#### **3.2.1.6 Materiales**

Los materiales utilizados se enfocarán directamente en su peso (perfiles, ejes, barras, motor, etc.), los mismos que existen en el mercado.

### 3.2.1.7 Aspectos legales

Al no existir la máquina en el mercado nacional, no existen problemas de patentes en la actualidad de máquinas realizadas anteriormente.

### 3.2.1.8 Normas

El equipo estará regido por las normas de selección y diseño de los elementos mecánicos, entre las cuales se pueden citar AWS, ASME, entre otras.

### 3.2.1.9 Dimensiones

La máquina para colado centrífugo vertical, tendrá como dimensiones generales las siguientes:

|       |        |
|-------|--------|
| Largo | 100 cm |
| Alto  | 120 cm |
| Ancho | 120 cm |

**Tabla 3.1 Dimensiones aproximadas del equipo**

## 3.2.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE ACCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Como ya se mencionó, el equipo a diseñarse no es muy conocido a nivel local y nacional, por esta razón la selección de alternativas de accionamiento se basa en equipos similares al requerido, los cuales están ilustrados en textos de fundición que se encuentran en las bibliotecas de la universidad y en internet.

En el análisis de las alternativas se realiza un estudio de los parámetros económicos, ambientales, tecnológicos, ergonómicos, y por tal motivo se han planteado los siguientes aspectos de selección: la transmisión de movimiento al molde y el sistema de calentamiento del molde.

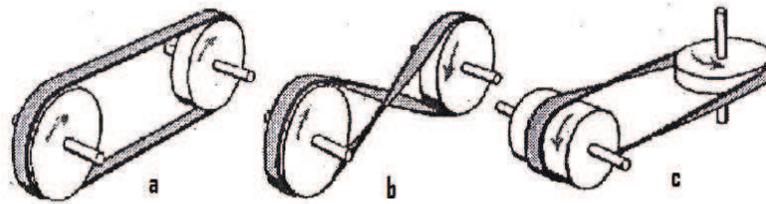
### 3.2.2.1 Sistema de transmisión de movimiento al molde

A continuación se hace una breve descripción de los elementos a considerarse para la transmisión de movimiento.

#### 3.2.2.1.1 Poleas y bandas

**Poleas.-** Se juntan con las bandas y se emplean para transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes distantes; permitiendo aumentar, disminuir o mantener la velocidad de giro del eje conductor, al mismo tiempo conservan o invierten el sentido de giro de los ejes.

Normalmente los ejes tienen que ser paralelos, pero el sistema también puede emplearse con ejes que se cruzan en ángulos inferiores o iguales a  $90^\circ$ . A continuación se muestran algunos ejemplos de transmisión por bandas:



**Figura 3.1 Transmisión por bandas: a) árboles paralelos con igual sentido; b) árboles paralelos con sentidos de rotación opuestos; c) árboles cruzados, la transmisión es posible sólo en un sentido de rotación**

Fuente: VARGAS T, J., 2004, "Producción por Virutaje - Fundamentos y Componentes de las Máquinas Herramientas", Quito - Ecuador, pág. 15

**Bandas.-** Las bandas se utilizan para la transmisión de potencia a distancias comparativamente grandes. Cuando se emplean por lo general sustituyen a grupos de engranes, ejes y sus cojinetes a dispositivos de transmisión similares.

Por lo tanto, simplifican mucho a una máquina o instalación mecánica y son, así, un elemento importante para reducir costos.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> SHIGLEY, J. E., "MANUAL DE DISEÑO MECÁNICO –TOMO 4", Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 1989; pág. 797

Además son elásticos y generalmente de gran longitud, de modo que tienen una función importante en la absorción de cargas de choque y en el amortiguamiento de los efectos de fuerza vibrantes. Entre poleas y bandas se establece un esfuerzo de fricción que tiene como consecuencia, por un lado, que la polea arrastre a la banda y, por otro, la banda sea la que arrastre la polea conducida.<sup>19</sup>

### 3.2.2.1.2 Engranajes

En casi todas las máquinas hay transmisión de movimiento de rotación de un eje a otro. Los engranajes o ruedas dentadas constituyen uno de los mejores medios disponibles para hacerlo.

La principal ventaja que tienen las transmisiones por engranaje respecto de la transmisión por poleas es que no patinan, con lo que se obtiene exactitud en la relación de transmisión, como desventaja se puede citar el costo de fabricación y/o adquisición.<sup>20</sup>



**Figura 3.2 Transmisiones por engranes**

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

<sup>19</sup> VARGAS T, J., 2004, "Producción por Virutaje - Fundamentos y Componentes de las Máquinas Herramientas", Quito - Ecuador, pág. 15

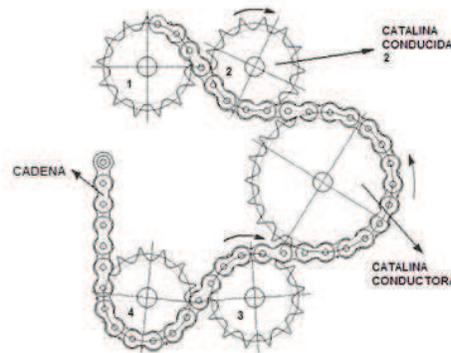
<sup>20</sup> SHIGLEY, J.E. "MANUAL DE DISEÑO MECÁNICO – TOMO 3", Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México 1989, pág. 602

### 3.2.2.1.3 Cadenas y Catalinas

Permiten transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes paralelos, logrando modificar la velocidad pero no el sentido de giro (no es posible hacer que un eje gire en sentido horario y el otro en el sentido contrario). Este mecanismo es empleado en bicicletas, motos, motores de automóvil y apertura automática de puertas.

El sistema consta de una cadena sin fin (cerrada) cuyos eslabones engranan con ruedas dentadas (piñones) que están unidas a los ejes de los mecanismos conductor y conducido, los cuales tienen que mantenerse en posición fija uno respecto de otro.

Las ruedas dentadas suelen ser una placa de acero sin cubo o, también las hay de plástico.



**Figura 3.3 Transmisión por medio de cadenas y catalinas**

Fuente: AIMACAÑA. X., ALBARRACÍN. D, 2008, "Diseño y Construcción de una Máquina Peladora de Chochos Hidratados", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, EPN, Quito, Ecuador.

Las cadenas empleadas en esta transmisión, suelen tener libertad de movimiento, solo en una dirección y engranan de manera muy precisa con los dientes de los piñones.

Las partes básicas de las cadenas son: placa lateral, rodillo y pasador.

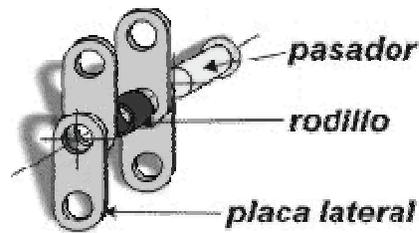


Figura 3.4 Partes básicas de la cadena

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Al emplear cadenas que engranan en los dientes de los piñones, se evita el deslizamiento que se produciría si se utilizan bandas y poleas, también se presenta la ventaja de mantener la relación de transmisión constante, incluso transmitiendo grandes potencias entre los ejes, lo que se traduce en mayor eficiencia mecánica. No necesita estar tan tensa como las correas, lo que produce menores averías en los rodamientos de los piñones.

Las cadenas y las catalinas presentan el inconveniente de ser sistemas más costosos, más ruidosos y de funcionamiento menos flexible, no permiten la inversión del sentido de giro ni la transmisión entre ejes cruzados; además necesita lubricación adecuada.

#### 3.2.2.1.4 Selección del sistema de transmisión de movimiento

Después de la descripción anterior se procede a la selección del medio de transmisión de movimiento, el cual se escoge de la siguiente manera:

Se enlistan las opciones para transmisión de movimiento:

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| A | TRANSMISIÓN POR BANDAS              |
| B | TRANSMISIÓN POR CADENAS Y CATALINAS |
| C | TRANSMISIÓN POR ENGRANES            |

Tabla 3.2 Listado de alternativas para la transmisión de movimiento

Luego se establecen los criterios de selección:

|     |                             |
|-----|-----------------------------|
| I   | COSTO                       |
| II  | RELACIÓN DE TRANSMISIÓN     |
| III | DURABILIDAD Y MANTENIMIENTO |
| IV  | SEGURIDAD Y RUIDO           |
| V   | FACILIDAD DE ADQUISICIÓN    |

**Tabla 3.3 Criterios de selección para la transmisión**

Una vez establecidos los criterios de selección, se procede a ponderar cada uno de ellos de acuerdo a su importancia, para posteriormente calificar cada una de las alternativas con respecto a los respectivos criterios. La calificación es realizada de acuerdo a la descripción descrita anteriormente con los elementos a seleccionar, asignado valores como indica en la siguiente escala de calificación:

|        |                                |
|--------|--------------------------------|
| 1 - 2  | NO TAN IMPORTANTE, MUY MALO    |
| 3 - 4  | POCO IMPORTANTE, MALO          |
| 5 - 6  | IMPORTANTE, BUENO              |
| 7 - 8  | MUY IMPORTANTE, MUY BUENO      |
| 9 - 10 | DE GRAN IMPORTANCIA, EXCELENTE |

**Tabla 3.4 Escala de calificación**

Para luego obtener la siguiente tabla de calificaciones:

| ALTERNATIVAS | CRITERIOS |    |     |    |    | Ponderación |
|--------------|-----------|----|-----|----|----|-------------|
|              | I         | II | III | IV | V  |             |
| A            | 10        | 7  | 9   | 8  | 10 | I = 25%     |
| B            | 6         | 8  | 5   | 4  | 8  | II = 20%    |
| C            | 4         | 10 | 9   | 8  | 5  | III = 20%   |
| Suma         | 20        | 25 | 23  | 20 | 23 | IV = 15%    |
|              |           |    |     |    |    | V = 20%     |
|              |           |    |     |    |    | 100%        |

**Tabla 3.5 Calificación criterios vs alternativas**

Realizada la calificación de cada alternativa se procede a sumar los valores en cada columna de criterio, para posteriormente dividir para dicho resultado cada celda en la respectiva columna, por ejemplo:

Tomando la alternativa A y el criterio II

$$\frac{\text{Calificación de Alternativa A en criterio II}}{\text{Suma de calificaciones del criterio II}} = \frac{7}{25} = 0,28$$

Obteniendo la tabla siguiente:

| ALTERNATIVAS | CRITERIOS |      |      |      |      | Ponderación |
|--------------|-----------|------|------|------|------|-------------|
|              | I         | II   | III  | IV   | V    | 0,25        |
| A            | 0,50      | 0,28 | 0,39 | 0,40 | 0,43 | 0,2         |
| B            | 0,30      | 0,32 | 0,22 | 0,20 | 0,35 | 0,15        |
| C            | 0,20      | 0,40 | 0,39 | 0,40 | 0,22 | 0,2         |
| <b>Suma</b>  | 1         | 1    | 1    | 1    | 1    | 1           |

**Tabla 3.6 Porcentajes de criterios de selección**

Para después multiplicar la fila de cada alternativa con la columna “ponderación”, de donde se obtendrá un solo valor para cada alternativa. El valor más alto que resulte del producto de la multiplicación será el que defina la alternativa ganadora:

|   |                |
|---|----------------|
| A | <b>0,40622</b> |
| B | 0,28204        |
| C | 0,31174        |

**Tabla 3.7 Resultados de alternativas**

## CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Con el análisis anterior se determina que la alternativa **A, transmisión por medio de poleas y bandas** es la más idónea para el diseño del proyecto en cuanto a la transmisión de movimiento.

### *3.2.2.1.4.1 Análisis de la calificación del sistema de transmisión*

Se ha calificado con 10 al criterio de **costo** debido a que, los equipos accionados con bandas son de bajo costo con respecto a los de engranes y catalinas.

La “**relación de transmisión**” recibe la calificación de siete (7) por las desventajas mencionadas.

Es necesario recordar que el diseño del equipo es destinado para un laboratorio, por lo que las bandas se vuelven la mejor opción: son durables, no requieren de mayor atención en lo que se refiere a mantenimiento, son de fácil intercambio, la potencia transmitida no es muy alta y la producción es a pequeña escala. Por tal motivo, el criterio de “**Durabilidad y Mantenimiento**” recibe una calificación de nueve (9). Sin embargo, debe considerarse que el rendimiento de las bandas puede verse afectado por la presencia de altas temperaturas, razón por la que recibe ésta calificación.

Estos elementos no son ruidosos, y son seguros porque están instalados fuera del alcance del operador durante el funcionamiento, por ello en el criterio “**Seguridad y Ruido**” se califica con ocho (8).

En el criterio “**Facilidad de Adquisición**” recibe una calificación de diez (10), puesto que estos elementos se consiguen en el mercado sin mayor dificultad.

### 3.2.2.2 Sistema de calentamiento del molde

Para el estudio de este sistema se analizan los tipos de calentamiento que pueden darse en el molde, los cuales son:

- **Calentamiento de Forma Directa sobre las piezas.-** El cual viene dado por inducción, pérdidas dieléctricas y resistencia propia.
- **Calentamiento de Forma Indirecta por transmisión de calor de otros elementos.-** El cual viene dado por el uso de resistencias eléctricas, tubos radiantes eléctricos o de combustión, hornos de llamas, etc. La transmisión de calor de calor puede realizarse por llamas, convección y radiación.

La energía calorífica requerida para el calentamiento puede proceder de:

- Gases calientes producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de tubos radiantes o intercambiadores en general.
- Energía eléctrica en diversas formas:
  - Arco voltaico de corriente alterna o continua.
  - Inducción electromagnética.
  - Alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas.
  - Resistencia óhmica directa de las piezas.
  - Resistencias eléctricas colocadas adecuadamente que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transferencia de calor.
  - Otras, menos utilizadas actualmente en la industria, tales como haz de electrones, plasma, láser.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> ASTIGARRAGA U, J; Hornos industriales de resistencias, , Mc-Graw Hill, ESPAÑA, 1995, Sexta Edición

Para el presente trabajo se ha decidido que el calentamiento será de forma indirecta por transmisión de calor de otros elementos, pues el calentamiento directo tiene más aplicación cuando se desean alcanzar altas temperaturas para fusión de metales y/o se desea conseguir la deformación plástica de los mismos.

De lo mencionado anteriormente, se han considerado tres alternativas para el sistema de calentamiento del molde: Calentamiento con resistencias eléctricas, Calentamiento con combustión de Diesel y Calentamiento con combustión de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

#### *3.2.2.2.1 Calentamiento con resistencias eléctricas*

Con este tipo de calentamiento se genera calor haciendo pasar una corriente eléctrica por un elemento resistivo, a lo que se le conoce como efecto Joule. El calentamiento por resistencia es especialmente útil en aplicaciones en las que se necesita un pequeño calefactor, cuya temperatura pueda controlarse de forma precisa. En este caso, el calor se transfiere al molde por radiación del elemento resistivo.

#### *3.2.2.2.2 Calentamiento con combustión*

Es la combinación de un comburente con los distintos elementos que constituyen el combustible, originándose un desprendimiento de calor.<sup>22</sup>

En fin, todo material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. Estos combustibles existen en todas las fases, por citar algunos ejemplos se tiene el carbón, la gasolina y el gas natural.<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> DISEÑO PRELIMINAR Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA CRISOL QUE PERMITA FUNDIR HIERROS COLADOS UTILIZANDO DIESEL; Tesis de Ingeniería Mecánica; EPN, Quito, Ecuador, 1992

<sup>23</sup> CENGEL, YUNUS; Termodinámica; Boles, Michael; Cuarta Edición; Mc Graw Hill, 2004, México; Pág 682

La combustión tiene como efecto, el desprendimiento de energía calorífica y luminosa, a lo que se le conoce como “llama”, la cual se define como el medio gaseoso en el que se desarrollan las reacciones de combustión; aquí es donde el combustible y el comburente se encuentran mezclados y en reacción.

Una llama puede adoptar diferentes formas dependiendo del quemador, debido a que es allí donde se pulveriza el combustible, para que entre en contacto con el comburente a fin de provocar la combustión eficiente y lograr de ese modo el efecto térmico buscado.

### 3.2.2.2.3 Selección del sistema de calentamiento del molde

Después de la descripción anterior se procede a la selección del sistema de calentamiento, el procedimiento es el mismo al utilizado para seleccionar el mecanismo de transmisión de movimiento.

Se enlistan los posibles sistemas de calentamiento que son:

|   |  |
|---|--|
| A | CALENTAMIENTO POR LLAMA CON COMBUSTIÓN DE GAS    |
| B | CALENTAMIENTO POR LLAMA CON COMBUSTIÓN DE DIESEL |
| C | CALENTAMIENTO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS        |

**Tabla 3.8 Lista de alternativas para el sistema de calentamiento**

Luego se establecen los criterios de selección:

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| I   | COSTO                          |
| II  | FACILIDAD DE MANEJO DEL EQUIPO |
| III | FACILIDAD DE MONTAJE           |
| IV  | SEGURIDAD                      |
| V   | FACILIDAD DE MANTENIMIENTO     |

**Tabla 3.9 Criterios de selección**

La calificación se realiza de acuerdo a la tabla (3-3), con la cual se tiene los siguientes valores:

| ALTERNATIVAS | CRITERIOS DE SELECCIÓN |    |     |    |    | Ponderación |
|--------------|------------------------|----|-----|----|----|-------------|
|              | I                      | II | III | IV | V  | I = 20%     |
| A            | 9                      | 10 | 9   | 9  | 10 | II = 10%    |
| B            | 7                      | 8  | 6   | 10 | 8  | III = 10%   |
| C            | 8                      | 10 | 7   | 10 | 9  | IV = 15%    |
| Suma         | 24                     | 28 | 22  | 29 | 27 | V = 10%     |
|              |                        |    |     |    |    | 100%        |

**Tabla 3.10 Calificación de criterios vs alternativas**

El procedimiento de ponderación es el mismo que se realizó en la selección del mecanismo de transmisión. Con lo cual se obtiene la siguiente tabla:

| ALTERNATIVAS | CRITERIOS DE SELECCIÓN |      |      |      |      | Ponderación |
|--------------|------------------------|------|------|------|------|-------------|
|              | I                      | II   | III  | IV   | V    | 0,2         |
| A            | 0,38                   | 0,36 | 0,41 | 0,31 | 0,37 | 0,25        |
| B            | 0,29                   | 0,29 | 0,27 | 0,34 | 0,30 | 0,2         |
| C            | 0,33                   | 0,36 | 0,32 | 0,34 | 0,33 | 0,15        |
| Suma         | 1                      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1           |

**Tabla 3.11 Ponderación de la calificación**

| RESULTADOS |      |
|------------|------|
| A          | 0,36 |
| B          | 0,30 |
| C          | 0,34 |

**Tabla 3.12 Resultados de las alternativas**

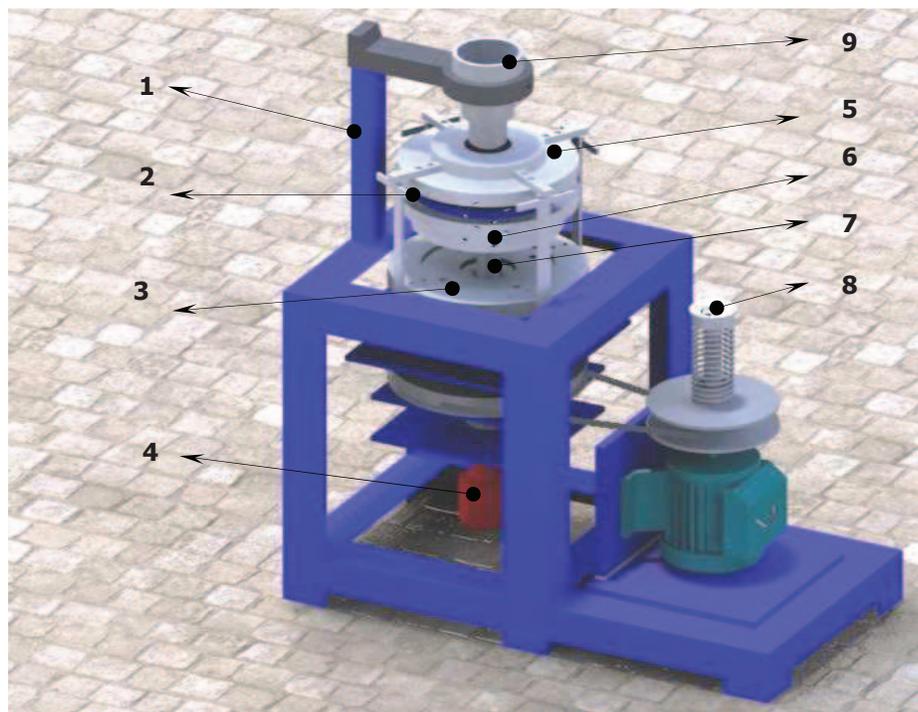
## CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

De lo analizado anteriormente, se puede observar que la alternativa ganadora para el sistema de calentamiento es la de combustión con gas licuado de petróleo, pero debe notarse que el resultado es ligeramente mayor que para el sistema de calentamiento con resistencias eléctricas.

### 3.2.3 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA EL DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

Para el diseño y construcción del equipo, se parte de la premisa que no existe a nivel local; motivo por el cual se han planteado dos alternativas teóricas (en base a no existir antecedentes de máquinas similares), las cuales se las detallan a continuación:

#### 3.2.3.1 Alternativa 1



**Figura 3.5 Alternativa 1**

Fuente: SANZ, M., 1993, "Diseño y Construcción de una Máquina para Colado Centrifugo", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, EPN, Quito, Ecuador.

En la figura (3-5) se observa la representación de un equipo de colado centrifugo que fue concebido como proyecto de titulación de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

### 3.2.3.1.1 *Funcionamiento de la alternativa 1*

La propuesta consiste, básicamente, en la rotación del molde (2) en conjunto con la tornamesa (3), nótese que dicha rotación se realiza en la parte superior del equipo.

Se dispone de una tapa inferior (6) en donde se coloca el molde, los cuales pueden desplazarse verticalmente con ayuda de un eje (7) que se encuentra acoplado a la tapa inferior (6). Existe también una tapa superior (5) que permanece fija y que ayuda al cierre del molde (2). Para mantener unidas las dos mitades del molde en el momento del colado se requiere que el cilindro hidráulico (4) empuje el eje (7), con lo que se consigue el desplazamiento de la tapa inferior (6) hasta conseguir que ésta se conjugue con la tapa superior (5), garantizando así el cierre del molde.

El colado del metal fundido se lo realiza a través del bebedero (9), el cual es concéntrico con la tapa superior (5).

Para conseguir la velocidad de rotación del molde, para completar el procedimiento de la fundición centrífuga, se utiliza un sistema de fricción (8), compuesto por un resorte y un tornillo de potencia, con el cual se puede aumentar o disminuir la fricción entre la polea conductora y la banda, con lo que se consigue el incremento o la disminución de la velocidad de rotación del molde.

El diseño del equipo que se está considerando utiliza un molde de caucho silicónico curado al calor y sirve para colar aleaciones de zamag (metales de bajo punto de fusión), con lo cual se han obtenido productos para orfebrería tales como aretes y accesorios para collares. Para elaborar piezas de aluminio se debería utilizar un molde de un material que resista temperaturas mayores.

Finalmente, la presente máquina presenta un ligero juego en su rotación. Este inconveniente se da debido a la imposibilidad física de apoyar superiormente el eje central, lo que ocasiona un pequeño desbalance en las partes móviles. Un rediseño sería recomendable, en lo que respecta a una mejor implantación de apoyos en el eje de giro.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> SANZ, M., 1993, "Diseño y Construcción de una Máquina para Colado Centrífugo", Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, EPN, Quito, Ecuador.

### 3.2.3.2 Alternativa 2

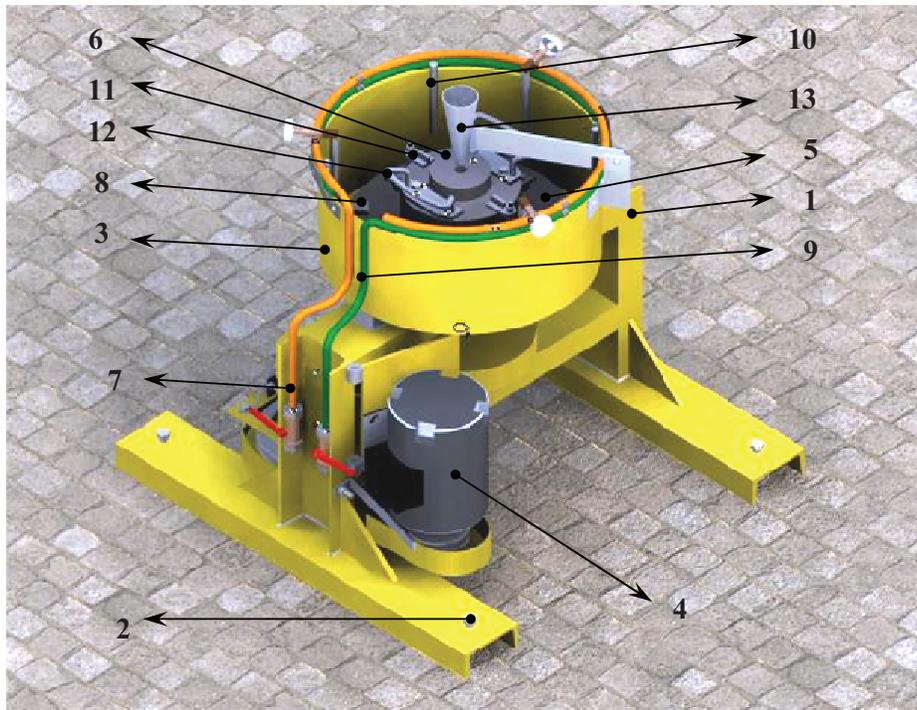


Figura 3.6 Alternativa 2

Fuente: Propia

En la figura 3-6 se observa la representación de una máquina de colado centrífugo que se propone como alternativa a la propuesta anteriormente mencionada.

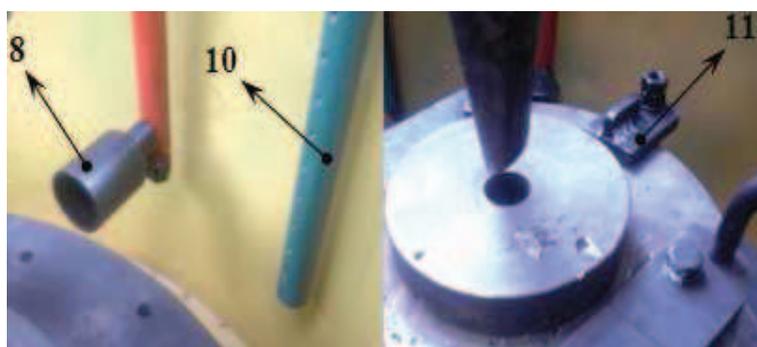
#### 3.2.3.2.1 Funcionamiento de la alternativa 2

En este caso, sobre el bastidor (1) se ubican todas las partes que conforman el equipo. Dispone de patas niveladoras (2) en caso de que el suelo tenga imperfecciones, lo cual produciría un desbalanceo del equipo provocando vibraciones no deseadas. La canastilla (3) protege al operario y las personas que circulan por los alrededores durante el proceso de colado.

El motor eléctrico (4) transmite, por medio de un sistema de poleas, el movimiento de rotación al plato (5) en donde se asienta el molde (6).

A diferencia del sistema anterior, se dispone de cañerías para gas (7) y agua (9) con sus respectivas boquillas (8) y (10), que sirven para el calentamiento y enfriamiento del molde.

El molde cuenta con un sistema de seguros axiales (11) que no permiten la apertura del mismo durante el colado por consecuencia de la presión metalostática. La apertura del molde es manual y se lo hace levantando la tapa superior del molde (6) con las manijas (12) que son acopladas al molde.



**Figura 3.7 Acercamiento de partes (8), (10) y (11) de la Alternativa 2**

Fuente: Propia

Para el llenado se cuenta con un envasador (13) que conduce el metal hacia el interior del molde, dispone de un pivote para facilitar la extracción de la pieza terminada.

### 3.2.3.3 Análisis y selección

Las alternativas se califican de acuerdo a los siguientes parámetros:

|        |                                |
|--------|--------------------------------|
| 1 - 2  | NO TAN IMPORTANTE, MUY MALO    |
| 3 - 4  | POCO IMPORTANTE, MALO          |
| 5 - 6  | IMPORTANTE, BUENO              |
| 7 - 8  | MUY IMPORTANTE, MUY BUENO      |
| 9 - 10 | DE GRAN IMPORTANCIA, EXCELENTE |

**Tabla 3.13 Escala de calificación para la selección de alternativas**

La escala de calificación es de 1 a 10. Donde 1 es el valor más bajo y 10 es el ideal. A continuación se procede a calificar cada alternativa, de acuerdo a los factores, con los que se obtienen los siguientes resultados:

| <b>Factores</b>              | <b>Alternativa 1</b> | <b>Alternativa 2</b> | <b>Ideal</b> |
|------------------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| Costos de los elementos      | 8                    | 9                    | 10           |
| Facilidad de construcción    | 7                    | 8                    | 10           |
| Facilidad de montaje         | 6                    | 6                    | 10           |
| Mantenimiento                | 7                    | 7                    | 10           |
| Disponibilidad de materiales | 8                    | 9                    | 10           |
| Seguridad                    | 8                    | 10                   | 10           |
| Estética                     | 8                    | 10                   | 10           |
| Transportación               | 8                    | 8                    | 10           |
| Facilidad de operación       | 7                    | 7                    | 10           |
| TOTAL                        | 67                   | 74                   | 90           |
| Porcentaje                   | 74,4                 | 82,2                 | 100%         |

**Tabla 3.14 Calificación de la alternativa ganadora**

## **CONCLUSIÓN**

Con los resultados obtenidos, la alternativa seleccionada es la alternativa 2 por presentar la mejor calificación.

## CAPÍTULO 4

### 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

#### 4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA

##### 4.1.1 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LA COQUILLA

Para el diseño de la coquilla, se analizan los diferentes parámetros que se originan por distintos fenómenos físicos como son: La transferencia de calor y los esfuerzos a los que son sometidos los materiales. Previo al diseño es necesario conocer algunos términos que permitirán entender, en cierta forma, los cálculos que se realizarán en el presente capítulo.

##### 4.1.1.1 Definiciones.

###### 4.1.1.1.1 *Transferencia de calor*

La transferencia de calor, es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. A los diferentes tipos de proceso de transferencia de calor se le conoce como modos, los cuales son: Conducción, Convección y Radiación.

###### 4.1.1.1.2 *Conducción*

La conducción se produce cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido. La conducción se considera como la transferencia de calor de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.<sup>25</sup>

###### 4.1.1.1.3 *Convección*

La convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá a través de una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas, se

---

<sup>25</sup> FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de la Transferencia de Calor, Cuarta Edición, México 1999, Pág 3

sustenta tanto en el movimiento molecular aleatorio como en el movimiento volumétrico del fluido en la capa límite.

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos, además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento macroscópico del fluido.<sup>26</sup>

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo y se tiene:

- Convección Libre o Natural
- Convección Forzada

#### *4.1.1.1.3.1 Convección libre o natural*

El flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido.

#### *4.1.1.1.3.2 Convección forzada*

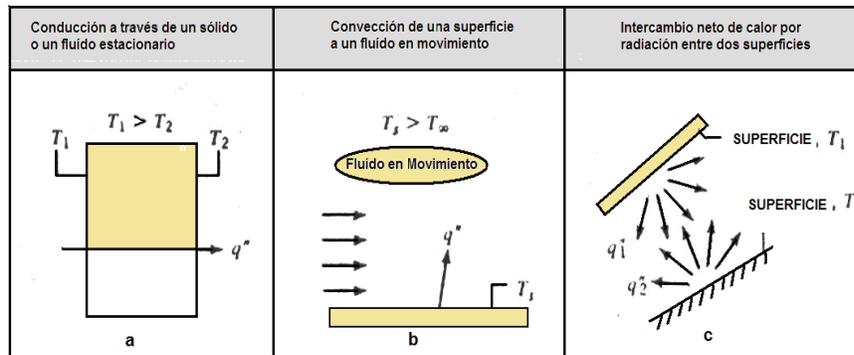
Se considera convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos.

#### *4.1.1.1.4 Radiación*

Transferencia de calor por radiación térmica. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas. La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a temperatura finita.<sup>27</sup>

---

<sup>26 y 28</sup> FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de la Transferencia de Calor , Cuarta Edición, México 1999 , Pág. 5 y Pág. 8



**Figura 4.1 Modos de transferencia de calor a) conducción b) convección y c) radiación**

Fuente: FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de la Transferencia de Calor, Cuarta Edición, México 1999, Pág. 8

#### 4.1.1.1.5 Coquilla

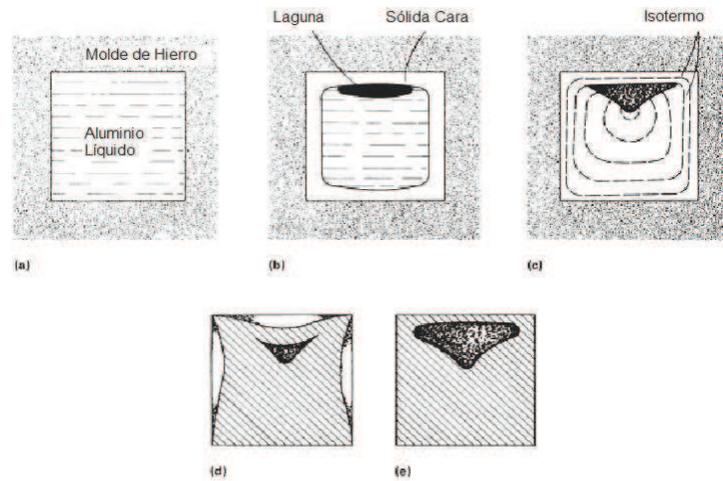
Una coquilla es el molde encargado de recibir el metal fundido para reproducir un negativo de la pieza fundida que se desea obtener, cabe destacar que la pieza a obtener es un volante de aluminio.

#### 4.1.1.1.6 Mazarota

Las mazarotas se utilizan durante la solidificación en la elaboración de las molduras, sirven para compensar las contracciones del metal, evitar la formación de rechupes y porosidades en las piezas. Son las últimas en solidificar.

Cuando los metales se solidifican y se enfrían para formar una fundición, generalmente experimentan tres etapas bien definidas de contracción de volumen, o de encogimiento.

Estas etapas, se muestran a continuación:



**Figura 4.2 Secuencia de solidificación**

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

Debe tenerse en cuenta que las mazarotas hay que eliminarlas después de obtener la moldura.

#### 4.1.1.2 Criterios considerados para el diseño de las Piezas Fundidas

##### 4.1.1.2.1 Elección del tipo y lugar de colocación de la mazarota.

- Los rechupes se forman en los puntos de la pieza que se enfrían último, como son: Partes más densas, engrosamientos locales, nudos, articulación de las paredes y también ciertos puntos en los que se dificulta la extracción de calor.
- Los rechupes tienden a formarse en la parte superior de la pieza.
- Las mazarotas que se colocan en la pieza realizan diferentes funciones entre ellas; actuar como reserva de metal líquido para las diferentes partes de la pieza hasta el fin de la solidificación, propiciar la evacuación de gases y recolectar las inclusiones no metálicas que se penetran en el molde.

- Para una acción efectiva de la mazarota, es necesario garantizar el principio de solidificación dirigida, es decir, cuando el metal más caliente y la temperatura aumentan en el sentido de la mazarota.
- Si la pieza posee, varios nudos térmicos separados por paredes finas, cada una de ellas debe tener su propia mazarota, sin embargo debe tratarse de alimentar con una mazarota el máximo de nudos posibles.

#### *4.1.1.2.2 Características del metal en la mazarota*

Además de las condiciones de diseño y posición de las mazarotas, existen características propias del metal fundido (aluminio) que dificultan o favorecen la alimentación o contracción del metal, en estado de solidificación.

En el presente proyecto, se va a fabricar volantes de aluminio con una masa pequeña, por lo tanto se encuentra un intervalo estrecho de solidificación. La solidificación en un frente plano columnar facilita la alimentación, y el procedimiento que se sigue es alimentar las partes más gruesas de la pieza, para lograr la solidificación dirigida, es decir, se busca que la solidificación transcurra de las partes más finas de pieza a las más gruesas, y las mazarotas se ubican en las partes más gruesas.

#### *4.1.1.2.3 Condiciones de diseño de la pieza fundida*

En algunos casos el diseño de una pieza se determina según las condiciones de trabajo y no puede ser variado. En este proceso el fundidor debe utilizar los medios técnicos de fundición para obtener la pieza solicitada, aunque desde el punto de vista de fundición tenga como consecuencia, complicaciones en el proceso tecnológico y su encarecimiento<sup>28</sup>

Sin embargo, el trabajo común del diseñador y del técnico fundidor, permiten mejorar la construcción de la pieza y corregir su tecnicidad.

---

<sup>28</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 18

Para obtener piezas de calidad es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos durante su elaboración:<sup>29</sup>

- Las particularidades del método de fundición según el cual, se va a fabricar la pieza (moldes de arena-arcilla hechos manualmente o a máquina, en coquilla, por cera perdida, a presión, moldeo en cáscara, y otros). La elección correcta del método de fundición tiene gran efecto técnico y económico.
- La forma exterior de la pieza fundida, se realiza con el método de fundición elegido, el mínimo grosor de las paredes de la pieza y cuantos orificios se obtendrán por fundición.
- Las inclinaciones constructivas serán obtenidas por diseño, para que el modelo se pueda extraer del molde sin que se rompa.
- Las curvaturas adecuadas para la unión de las diferentes partes de la pieza fundida y de esta manera asegurar una buena resistencia en la unión.
- Las dimensiones de los listones, salientes, nervios, así como las tolerancias mínimas, pero suficientes para las superficies de la pieza que no se elaboran. Se tendrá en cuenta la contracción de la aleación y también la posibilidad de cambio en el diseño de la pieza, al determinar las sobremedidas para las superficies a maquinar con el objeto de disminuir los gastos de metal y de elaboración mecánica.
- Las mejores condiciones de llenado en el molde para garantizar una solidificación dirigida.
- La simplicidad de la fabricación del modelo, también la posibilidad de usar una mínima cantidad de machos, ya que se disminuye el costo del proceso tecnológico.
- La construcción de la pieza debe garantizar un método simple de desmoldeo, corte y limpieza.

---

<sup>29</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 18

#### 4.1.1.2.4 *Espesores mínimos de las piezas*

El primer paso que se realiza para saber si una pieza se puede obtener por fundición, será conocer si sus espesores mínimos se pueden lograr por el método de fundición escogido.

El espesor de pared de las piezas fundidas se determina en dependencia del tipo de aleación, de sus propiedades mecánicas y tecnológicas, de su configuración, de las dimensiones máximas de la pieza fundida y del método de fundición elegido. Debe tenerse en cuenta que el espesor excesivo de las paredes aumenta el peso de la pieza fundida, provocando la aparición de porosidades por contracción y otros aspectos.<sup>30</sup>

La rigidez necesaria de la pieza fundida se puede alcanzar en el caso de las paredes delgadas, mediante la utilización de nervios de rigidez, sin necesidad de aumentar los espesores. El espesor mínimo de las paredes debe asegurar la resistencia nominal que se exige y satisfacer las exigencias de la tecnología de fundición. Para las piezas obtenidas en moldes de arena pueden usarse diferentes gráficos y tablas para determinar los espesores mínimos. En los gráficos se trabajará de acuerdo con el tipo de aleación y según la dimensión equivalente N que se determina según la fórmula siguiente.<sup>31</sup>

$$N = \frac{2 \times l + b + h}{3} \quad (\text{m}) \quad (\text{Pieza hueca}) \quad \text{Ec. 4-1}$$

Donde:

- l Longitud de la pieza
- b Ancho de la pieza
- h Altura de la pieza
- N Dimensión equivalente de la pieza

---

<sup>30</sup> y <sup>32</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 20, 21

Estas dimensiones de la pieza fundida se dan en metros. La dimensión N para las piezas fundidas en forma cúbica (maciza) se recomienda determinar según la fórmula:

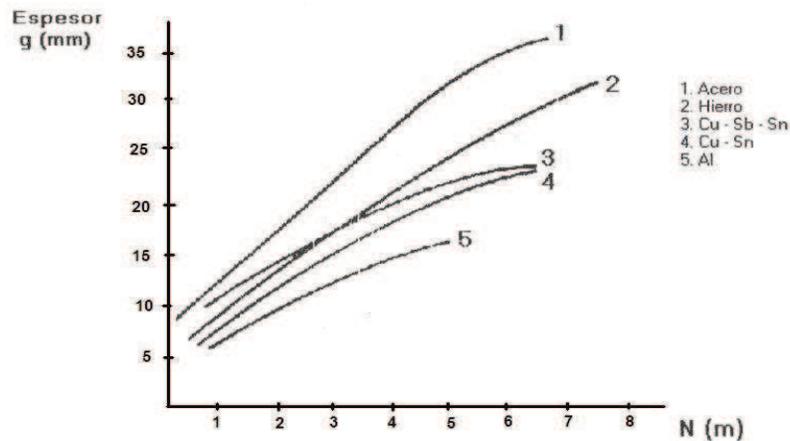
$$N = \frac{2 \times l + b + h}{4} \quad (\text{m}) \quad (\text{Pieza maciza}) \quad \text{Ec. 4-2}$$

Una vez determinado el valor del parámetro N se busca en el gráfico de la figura 4-3, el espesor mínimo correspondiente a la aleación dada.

Algunas recomendaciones para espesores mínimos de diferentes aleaciones se dan a continuación:

Hierro Fundido Gris: Para las piezas con  $N < 0,5$  m, el espesor de las paredes puede ser de 1,5 a 2 mm. Para  $N > 8$  m se tomará 30 mm.

El espesor de paredes interiores debe ser menor en un (10 – 20 %) que el espesor de las paredes exteriores.



**Figura 4.3** Espesor mínimo de cada aleación

Fuente: GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 22

En el caso que las piezas fundidas de hierro gris, deben ser en un (20 a 30) % más delgadas que lo tecnológicamente admisible, hay que emplear la elaboración mecánica de las paredes más delgadas, o emplear nervios en la parte inferior para mejorar las condiciones de llenado en las paredes.<sup>32</sup>

Aleaciones de aluminio y magnesio: Para piezas fundidas donde la dimensión equivalente  $N < 0,1$  m se pueden usar espesores mínimos de 2 mm.

Para las piezas de magnesio los espesores de las paredes mínimas se deben aumentar en un (18 a 20) % con respecto a las del aluminio.

En las piezas fundidas de cualquier aleación es recomendable igualar los espesores para disminuir las tensiones.

#### 4.1.1.2.5 Criterio de los agujeros por fundición

Para fundiciones y aleaciones no ferrosas se tiene el siguiente criterio:

$$d \leq 0,3 h + 10$$

Ec. 4-3

Donde:

d = diámetro del agujero obtenido por fundición (mm)

h = profundidad del agujero obtenido por fundición (mm)

#### 4.1.1.2.6 Tensiones residuales en la coquilla.

Es un fenómeno que presentan las piezas fundidas, ya sea durante su proceso de fabricación o cuando éstas están terminadas, que tiene como efecto la deformación y/o agrietamiento de las piezas sin la presencia de cargas externas aplicadas.

---

<sup>32</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 22

Las tensiones residuales tienen su origen en el proceso de fabricación, y sus causas son las siguientes:

- a. El enfriamiento no uniforme de la pieza dentro del molde:
  - Las partes gruesas se enfrían más despacio que las delgadas;
  - El exterior de cualquier sección de la pieza se enfría más despacio que su centro;
  - Los bordes enfrían más deprisa que el resto.
- b. El choque térmico que sufre la pieza al momento de ser extraída de la arena y entrar en contacto con el aire del ambiente.
- c. Las dificultades que encuentra la pieza para contraerse durante la solidificación y el enfriamiento, debido a la resistencia que opone la arena del molde y los noyos.
- d. La composición química de la aleación también es un estimulante de las tres causas anteriores, es decir, una pieza será más susceptible a las tensiones residuales cuanto mayores sean sus propiedades mecánicas, mayores porcentajes de aleantes, especialmente Mn y Cr.

Las medidas preventivas que se pueden citar son las siguientes:

- Diseño adecuado de la pieza: igualdad de espesores, radios de acuerdo grandes, evitar las cavidades casi cerradas, entre otras.
- El modelo debe permitir una alimentación racional. Ataques en las partes más delgadas, distribución equilibrada de dichos ataques.
- El tiempo de enfriamiento de la pieza dentro del molde debe ser lo mayor posible.

#### *4.1.1.2.7 Fenómeno del Creep*

Al aumentar la temperatura del metal para eliminar las tensiones residuales se corre el riesgo de la formación del Creep, el cual es un fenómeno que se origina con la deformación bajo una carga específica y a una cierta temperatura constante y crece con el tiempo de actuación de dicha carga. El flujo plástico tiene lugar bajo tensiones muy inferiores al límite de elasticidad.

Idealmente, todas estas tensiones deberían reducirse por igual hasta alcanzar un equilibrio más estable sin cambio alguno en las dimensiones de la pieza; pero esto no siempre ocurre debido a que en muchas ocasiones el nuevo equilibrio se logra por la deformación de la pieza.

## 4.1.2 ESTUDIO DE LA COQUILLA

### 4.1.2.1 Selección del producto a elaborar

Se selecciona la elaboración de volantes de maniobra debido a que su fabricación por métodos tradicionales es compleja y sus acabados son poco aceptables, por lo que se hace necesario un excesivo maquinado posterior que encarece sus costo de producción.

#### 4.1.2.1.1 Datos de la pieza a obtener con el proceso de fundición centrífuga

Para el presente proyecto se han tomado en cuenta las dimensiones generales de un volante perteneciente al catálogo Halder, en donde se obtienen los siguientes resultados:

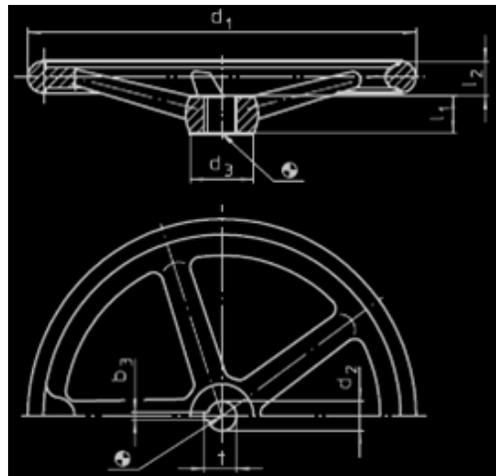


Figura 4.4 Dimensiones generales del volante

Fuente: Catálogo Halder

| Ref N°<br>d2<br>pequeño | Ref N°<br>d2 largo | Acabado        | d1  | d2<br>H7<br>pequeño | d2<br>H7<br>largo | d3 | l1 | l2 | Número<br>de<br>Brazos | Corresponde a<br>manija de máquina<br>DIN 39/ DIN 98 | g   |
|-------------------------|--------------------|----------------|-----|---------------------|-------------------|----|----|----|------------------------|--|-----|
| 2459,130                | 2459,031           | Sin<br>acabado | 125 | 12                  | 14                | 28 | 18 | 18 | 3                      | -  | 250 |

Tabla 4.1 Especificaciones del volante

|          |           |
|----------|-----------|
| Material | Aluminio  |
| Centro   | Maquinado |
| Aro      | Pulido    |

**Tabla 4.2 Acabados del volante**

(a) Grafico del Catálogo Halder



(b) Gráfico elaborado en Ordenador



**Figura 4.5 Volantes a) catálogo y b) gráfico realizado en el ordenador**

Fuente: Propia

Para determinar si la pieza en cuestión puede obtenerse con agujero directamente desde la fundición se procede a utilizar el siguiente criterio (Ec. 4-3):

Siendo:

$$h = 36\text{mm}$$

$$d \leq 0,3 h + 10$$

$$d \leq 0,3 (36) + 10$$

$$d \leq 20,8 \text{ mm}$$

Por tanto, según el criterio indicado anteriormente, los diámetros menores a 20,8 mm no se pueden obtener por fundición. Lo cual indica que el orificio denominado  $d_2$  en el catálogo deberá obtenerse por maquinado.

Por otra parte, los espesores mínimos que se pueden obtener en la pieza por medio de fundición se determinan haciendo las siguientes consideraciones:

*Volante hueco:*

Reemplazando los valores de la ecuación 4-1, se tiene:

$$N = \frac{2 \times 0,125 + 0,125 + 0,036}{3} = 0,137 \text{ (m)}, \text{ El espesor mínimo podrá ser de 2 mm.}$$

*Volante macizo*

Reemplazando los valores de la ecuación 4-2, se tiene:

$$N = \frac{2 \times 0,125 + 0,125 + 0,036}{4} = 0,10275 \text{ (m)}, \text{ El espesor mínimo podrá ser de 2 mm.}$$

En el catálogo se observan que las dimensiones generales son mayores a 2mm, sin embargo no se encuentra el espesor de los brazos, por tanto se asumirá un espesor de 5 mm aproximadamente el cual es adecuado y comparable con otros productos similares.

Salvo ciertas modificaciones en la sección del aro del volante, las dimensiones generales son respetadas.

Con la geometría obtenida se determina, aproximadamente, algunas propiedades físicas que serán útiles en futuros cálculos, entonces:

|                    |                                   |
|--------------------|-----------------------------------|
| Masa               | 0,241 Kg                          |
| Volumen            | $8,91 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ |
| Área de superficie | 0,027 m <sup>2</sup>              |

#### 4.1.2.2 Selección del material para la coquilla

Para seleccionar el material adecuado, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Facilidad de obtener en el mercado la materia prima para la construcción de la coquilla.
- Las coquillas, generalmente, se construyen de fundiciones de hierro. Para la presente máquina se escoge el hierro gris ASTM número 30, el cual generalmente se produce en los cubilotes de nuestro país a partir de chatarra, además, este material presenta buena resistencia al desgaste, a la abrasión, y gran resistencia a la compresión.<sup>33</sup>

#### 4.1.2.3 Cálculo de la mazarota en la coquilla

El diseño de la mazarota se analiza por medio del método de factor de forma y por el método de los módulos, para comparar los resultados y seleccionar el más adecuado.

##### 4.1.2.3.1 Método de los módulos

El método es desarrollado por Robert Wlodawer y consiste en determinar el módulo de enfriamiento, M, dado por la relación:

$$M = \frac{\text{Volumen}}{\text{Área superficial de extracción de calor}}$$

La pieza se divide en tantas formas básicas como sean necesarias, a las cuales se les determina sus módulos de enfriamiento, teniendo cuidado de no considerar áreas comunes entre secciones donde no se extrae el calor. Para los aceros, la cavidad máxima de rechupe es de aproximadamente 14%, y se toma  $M_m = 1,2 \times M_p$ , siendo  $M_m$  el módulo de la mazarota y  $M_p$  el módulo de la pieza.

---

<sup>33</sup> DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA COLADO EN MOLDE PERMANENTE; Arias, W, Tesis de Ingeniería Mecánica; EPN, Quito, Ecuador, 2007

Se parte del principio de que dos piezas con igual valor del módulo, solidifican en el mismo tiempo, independiente de la forma geométrica que ellas tengan.

$$\text{Módulo de la pieza} = \frac{\text{Volumen (Pieza)}}{\text{Superficie (Pieza)}}$$

Una vez que se calcula el módulo de la pieza hay que cumplir con dos requerimientos de la solidificación requerida, para esto se debe cumplir que el módulo de la mazarota sea mayor que el módulo de la pieza, para compensar la contracción en estado líquido, y la expansión del molde.

Para efectuar su trabajo correctamente, debe mantenerse el mayor tiempo posible la pieza en estado líquido, o por lo menos una parte de ella, debido a que la mazarota es la última en solidificar.

$$M_m = 1,2 \times M_p$$

$$V_m = \frac{V_p \times RE}{(U-RE)}$$

Ec. 4-4<sup>34</sup>

Donde:

$M_m$  Módulo de la mazarota

$M_p$  Módulo de la pieza

$V_m$  Volumen de la mazarota

$V_p$  Volumen de la pieza

$U$  Porcentaje de utilización del metal

$RE$  Rechupe específico del metal en la mazarota (%)

---

<sup>34</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 115; Pág 106

Para obtener el valor del rechupe específico del metal se escoge de la tabla que se muestra a continuación:

| Aleación        | Rechupe (%) | Aleación | Rechupe (%) |
|-----------------|-------------|----------|-------------|
| Hierro          | 3,5         | Magnesio | 4,1         |
| Níquel          | 4,5         | Zinc     | 4,7         |
| Cobre           | 4,2         | Plomo    | 3,5         |
| <b>Aluminio</b> | <b>6,5</b>  | Estaño   | 2,3         |

**Tabla 4.3 Volumen de rechupe de algunos metales<sup>35</sup>**

El rechupe del aluminio  $RE = 0,065$

El porcentaje de utilización del metal depende de su forma y toma valores de:<sup>36</sup>

| Forma de Mazarotas         | Porcentaje (%) |
|----------------------------|----------------|
| Rectangulares              | 13             |
| <b>Cilíndricas y ovals</b> | <b>14</b>      |
| Esféricas y semiesféricas  | 20             |
| Exotérmicas                | 67             |

**Tabla 4.4 Porcentaje de utilización en la mazarota**

Se obtiene que el porcentaje de utilización del metal  $U = 14\%$ . Reemplazando estos valores en la ecuación 4.4; se tiene:

$$V_m = \frac{8,91 \times 10^{-5} \times 0,065}{(0,14 - 0,065)}$$

$$V_m = 77,22 \text{ cm}^3$$

---

<sup>36 y 36</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 106 y 116

Se conoce que la mazarota es cilíndrica. Por lo tanto su volumen es:

$$V_m = \pi \times r^2 \times h$$

$$h = \frac{V_m}{\pi \times r^2} \quad \text{Ec. 4-5}$$

Donde:

h Altura de la mazarota

r Radio de la mazarota = 1,4cm

Reemplazando los valores en la ecuación (4.5), se tiene:

$$h = \frac{77,22}{\pi \times 1,4^2}$$

$$h = 12,54 \text{ cm}$$

#### 4.1.2.3.2 Método del factor de forma

Fue desarrollado en el Naval Research Laboratory, para obtener el mínimo tamaño de la mazarota cilíndrica, capaz de alimentar piezas cuyas geometrías son cubos, barras, y placas, manufacturadas en aceros.

Usa el concepto de factor de forma  $F_F$ , para sustituir la relación (Área Superficial/ Volumen) desarrollado por Caine en el método anterior. El método de factor de forma viene dado por la siguiente ecuación:

$$F_F = \frac{L+W}{T} \quad \text{Ec. 4-6}^{37}$$

<sup>37</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 119

Donde:

L Longitud (12,5 cm)

W Ancho (12,5 cm)

T Espesor (3,6 cm)

Reemplazando los valores del volante en la ecuación (4.6); se tiene:

$$F_F = \frac{12,5+12,5}{3,6}$$

$$F_F = 6,94$$

Con el valor del factor de forma, se procede a ir a la gráfica  $\frac{V_m}{V_p}$  vs  $F_F$ , que se muestra a continuación:<sup>38</sup>

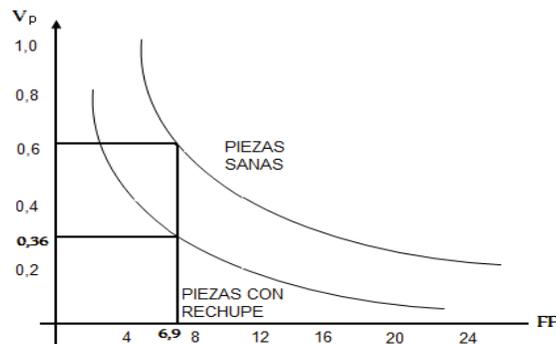


Figura 4.6 Nomograma  $\frac{V_m}{V_p}$  vs  $F_F$

Fuente: GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 120

<sup>38</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 120

Se escoge la curva de abajo (piezas con rechupe). De donde se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{V_m}{V_p} = 0,36$$

$$V_m = 0,36 \times V_p$$

$$V_m = 0,36 \times 89,1$$

$$V_m = 32,1 \text{ cm}^3$$

De la ecuación (4.5), se tiene:

$$h = \frac{3,21 \times 10^{-5}}{\pi \times 0,014^2}$$

$$h = 5 \text{ cm}$$

### **CONCLUSIÓN DEL CÁLCULO DE LA MAZAROTA DEL VOLANTE**

Se escoge el método de factor de forma con la altura de mazarota de 5 cm, que es un valor proporcional a las dimensiones generales de la pieza a elaborar (volante).

#### 4.1.2.4 Determinación del espesor de la pared del molde

Para determinar el espesor apropiado de la pared del molde se ha recurrido a un nomograma diseñado por expertos, el cual en base a varios experimentos realizados entrega valores recomendados de espesores para moldes de acero enfriados con agua.

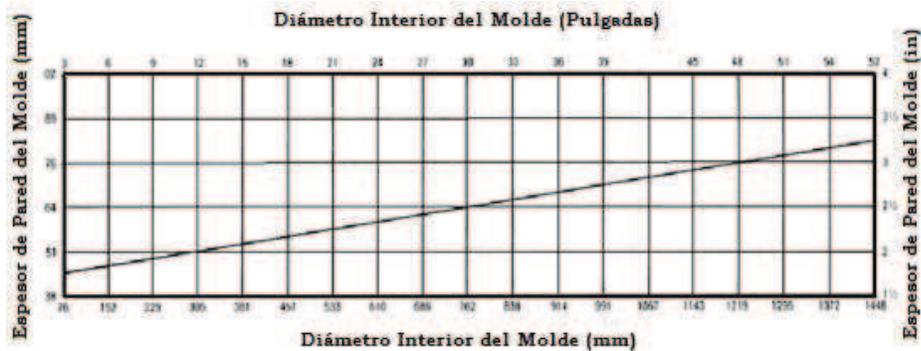


Figura 4.7 Curva espesor de pared vs diámetro interior del molde

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

Se conoce que el diámetro interior del molde, corresponde al diámetro mayor de la pieza a elaborar (125 mm). Con este valor se obtienen los siguientes resultados:

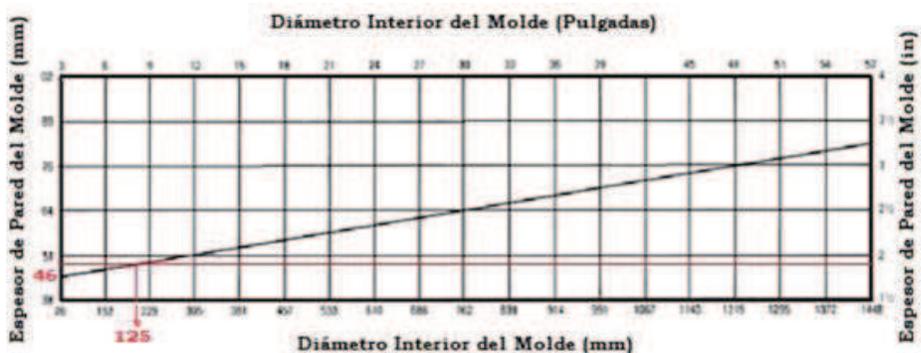
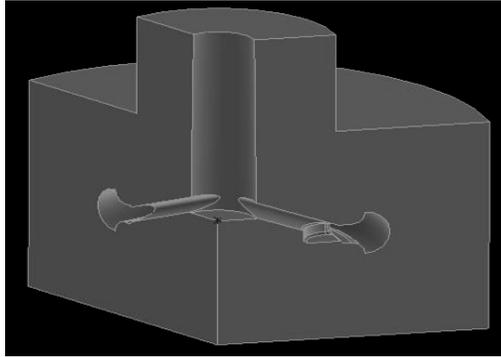


Figura 4.8 Determinación del espesor de pared del molde

Fuente: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook

Con el diámetro interno de 125 mm, se encuentra que el espesor de pared del molde es 46 mm. Si se dibuja el molde en ordenador considerando el espesor de pared, la altura de la mazarota y las propiedades físicas del material, se tiene como resultado que la masa aproximada de la coquilla es 26,29 Kg.



**Figura 4.9 Sección de la coquilla de hierro gris para elaboración de volantes**

Fuente: Propia

Debido a que las propiedades físicas del hierro gris y del acero son diferentes, se establece una relación entre las conductividades térmicas y los espesores de la coquilla. La relación es la siguiente:

$$\frac{K_{\text{acero}}}{K_{\text{hierro gris}}} = \frac{e_{\text{acero}}}{e_{\text{hierro gris}}} \quad \text{Ec. 4-7}$$

Donde:

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $K_{\text{acero}}$       | Conductividad térmica del acero = 58 $\left[ \frac{W}{m^{\circ}K} \right]$       |
| $K_{\text{Hierro gris}}$ | Conductividad térmica del Hierro Gris = 46 $\left[ \frac{W}{m^{\circ}K} \right]$ |
| $e_{\text{acero}}$       | Espesor de la pared del molde en acero = 46 mm                                   |
| $e_{\text{Hierro gris}}$ | Espesor de la pared del molde en hierro gris (mm)                                |

Se reemplazan los datos en la ecuación 4-7 y se obtiene:

$$e_{\text{hierro gris}} = \frac{e_{\text{acero}} \times K_{\text{hierro gris}}}{K_{\text{acero}}}$$

$$e_{\text{hierro gris}} = \frac{46 \times 10^{-3} \times 46}{58}$$

$$e_{\text{hierro gris}} = 36 \text{ mm}$$

Al disminuir el espesor de la pared de la coquilla, también disminuye el peso de la misma, con lo que se obtiene una masa total aproximada de 22,46 Kg.

El comportamiento térmico también mejorará, puesto que si se utiliza el espesor calculado para un molde de acero en un molde de hierro gris (espesor de pared del molde de acero es mayor que el espesor de pared del hierro, verificar el cálculo de la ecuación 4-7), se incrementa el tiempo en el cual la coquilla alcanza la temperatura ideal para receptor el metal líquido; además que el tiempo de extracción de la pieza terminada se prolonga por tener una excesiva dilatación, consecuencia de una mala evacuación de calor del molde.

### **CONCLUSIÓN PARA LA DEFINICIÓN DEL ESPESOR DE PARED DE LA COQUILLA.**

Se puede apreciar que el espesor de pared calculado con transferencia de calor es muy elevado en comparación con otros valores para moldes destinados a procesos similares. Por lo tanto, la mejor opción es el valor encontrado en el nomograma proporcionado los fabricantes de moldes de acero enfriados con agua.

#### 4.1.2.5 Dimensiones generales de la coquilla

Según los cálculos anteriores, se tienen los siguientes datos:

| Especificaciones   | Dimensiones             |
|--------------------|-------------------------|
| Material           | Hierro gris # 30        |
| Volumen            | 3120,53 cm <sup>3</sup> |
| Espesor            | 3,6 cm                  |
| Masa               | 22,46 Kg                |
| Altura de Mazarota | 5 cm                    |

**Tabla 4.5 Dimensiones generales en la coquilla**

### 4.1.3 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA COQUILLA

Para el colado de la coquilla, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Diseñar el sistema de alimentación, por donde va entrar el metal fundido (hierro gris), a las cajas metálicas o de madera con arena.
- Diseñar la mazarota para evitar los rechupes que se producen en la solidificación de la coquilla
- Seleccionar el material con el que se va a construir (Hierro fundido gris # 30)
- Diseñar el sifón o colector de la escoria
- Diseñar el sistema de salida de gases, entre otros.

#### 4.1.3.1 Cálculo del calor en la coquilla

La arena verde es la encargada de recibir el calor contenido en el metal fundido (hierro gris #30). Se utiliza la ecuación (4.9), con los datos de la coquilla siguientes:

- Q Calor que debe recibir por la arena (Joules = J)
- m Masa del metal fundido ( 22,46 Kg)
- L Calor de solidificación (hierro gris 186080 J/Kg)

$C_p$  Calor específico en estado líquido (hierro gris 473 J/Kg $^{\circ}$ K)

$T_v$  Temperatura de vertido del hierro gris (1340 $^{\circ}$ C)

$T_m$  Temperatura de desmoldeo (23  $^{\circ}$ C)

La temperatura de vertido del hierro fundido gris viene dado por la siguiente tabla:

| Características       | Espesor (mm)   | Tc ( $^{\circ}$ C) |
|-----------------------|----------------|--------------------|
| Hierro gris y nodular | Hasta 4        | 1450 – 1360        |
|                       | 4 – 10         | 1430 – 1340        |
|                       | 10 – 20        | 1400 – 1320        |
|                       | <b>20 – 50</b> | <b>1380 – 1300</b> |
|                       | 50 – 100       | 1340 – 1230        |
|                       | 100 - 150      | 1280 – 1180        |
|                       | Más de 150     |                    |
| Hierro maleable       | Hasta 4        | 1280 – 1240        |
|                       | 4 – 10         | 1450 – 1360        |
|                       | 10 - 20        | 1430 – 1350        |
| Hierro al silicio     |                | 1300 – 1270        |
| Hierro al cromo       |                | 1450 – 1400        |
| Hierro al manganeso   |                | 1350 - 1280        |

**Tabla 4.6 Temperaturas de colada para hierro fundido**<sup>39</sup>

El espesor de coquilla está en el rango de 20 a 50 mm. Por lo tanto la temperatura de colado del hierro gris está en el rango de (1380 a 1300)  $^{\circ}$ C. Se procede a sacar una media y se obtiene que la temperatura del hierro gris es 1340  $^{\circ}$ C.

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (4.9); se tiene:

$$Q = 22,46 \text{ Kg} \times 186080 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} + 22,46 \text{ Kg} \times 473 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ} \text{K}} \times (1340 - 23)^{\circ} \text{K}$$

$$Q = 18170611,66 \text{ J} \cong 18170,61 \text{ KJ}$$

<sup>39</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 196 y 211

#### 4.1.3.2 Tiempo de solidificación de la coquilla.

El tiempo de solidificación del hierro fundido gris se toma de la siguiente tabla:<sup>40</sup>

| Masa de la pieza (Kg) | Espesor (mm)   | Tiempo  |                |
|-----------------------|----------------|---------|----------------|
|                       |                | Horas   | Minutos        |
| Hasta 5               | 5 – 8          |         | 15 – 20        |
| 5 – 10                | 10 – 12        |         | 20 – 30        |
| <b>10 – 30</b>        | <b>12 – 18</b> |         | <b>30 – 40</b> |
| 30 – 50               | 15 – 25        |         | 45 – 60        |
| 50 – 100              | 20 – 30        |         | 50 – 75        |
| 100 – 250             | 25 – 40        |         | 60 – 90        |
| 250 – 500             | 30 – 50        | 2 – 5   |                |
| 500 – 2000            | 40 – 60        | 6 – 8   |                |
| 2000 – 5000           | 50 - 70        | 12 - 16 |                |

**Tabla 4.7 Tiempo de solidificación de la coquilla**

#### CONCLUSIÓN DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE LA COQUILLA

Si la masa de la coquilla es de 22,46 Kg y está en el rango de 10 a 30 Kg de la tabla anterior. Por lo tanto, el tiempo de solidificación de la coquilla está en el rango de 30 a 40 minutos.

#### 4.1.3.3 Diseño de la caja de moldeo

Para determinar las dimensiones de la caja de moldeo, se requiere determinar la distancia entre los diferentes elementos del molde.

Por lo tanto puede plantearse que las dimensiones de la caja de moldeo, se determinan después de la elaboración de la tecnología de la pieza fundida. Se debe tomar en cuenta, que las dimensiones de la caja de moldeo no deben ser excesivas porque aumenta la laboriosidad de la producción del molde y el consumo de mezcla de moldeo.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> y <sup>41</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 237

El método más común para determinar las distancias mínimas entre las diferentes partes de la cavidad del molde y de la caja de moldeo se suministran en las tablas a continuación: <sup>42</sup>

| Distancias pieza-pieza y pieza-molde       |         |         |         |  |  |
|--|---------|---------|---------|--|--|
| Tipo de pieza                              | A       | B       | B       | S                                      | d                                      |
| Pequeñas                                   | 20-30   | 35-60   | 50-75   | 0,3 de la<br>altura de la<br>plantilla | 0,5 de la<br>altura de la<br>plantilla |
| Medianas                                   | 50-75   | 75-100  | 100-125 |  |  |
| Grandes                                    | 125-175 | 150-200 | 175-200 |  |  |
| Distancias Pieza-Conductos de alimentación |         |         |         |  |  |

**Tabla 4.8 Distancias pieza - conductos de alimentación**

| Base del<br>Conducto C (mm) | Tipo de Molde | Masa de la pieza (Kg) |    |        |      |     |    |      |      |     |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|----|--------|------|-----|----|------|------|-----|
|                             |               | De                    | 0  | 51     | 251  |     | 0  | 51   | 251  |     |
|                             |               | A                     | 50 | 250    | 500  | 501 | 50 | 250  | 500  | 501 |
| K I (mm)                    |               |                       |    | K (mm) |      |     |    |      |      |     |
| 0-25                        | Seco          | 30                    | 35 | ....   | .... | 30  | 35 | .... | .... |     |
|                             | Verde         | 50                    | 60 | ....   | .... | 30  | 35 | .... | .... |     |
| 26-50                       | Seco          | 40                    | 40 | 45     | 50   | 40  | 40 | 45   | 50   |     |
|                             | Verde         | 50                    | 55 | 60     | 70   | 45  | 50 | 55   | 60   |     |
| 51-Adelante                 | Seco          | 50                    | 50 | 55     | 60   | 50  | 50 | 55   | 60   |     |
|                             | Verde         | 60                    | 65 | 70     | 90   | 60  | 60 | 65   | 70   |     |

**Tabla 4.9 Distancias permisibles entre piezas y elementos del molde**

Para calcular las dimensiones de la caja de moldeo se tiene la siguiente expresión:

$$L_{cm} = 2 \times (KI + K + C) + L_c \quad \text{Ec. 4-10}$$

Donde:

$L_{cm}$  Longitud de la caja de moldeo (mm)

KI Distancia del modelo al conducto (5 cm)

<sup>42</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 61

K Distancia de la superficie del conducto a la superficie interior de la caja moldeo (3 cm)

C Espesor del conducto de alimentación (2,5 m)

$L_c$  Longitud de la coquilla (10,2 cm)

Reemplazando valores en la ecuación (4.10), se tiene:

$$L_{cm} = 2 \times (5 + 3 + 2,5) + 10,2$$

$$L_{cm} = 31,2 \text{ cm}$$

En el anexo B, se muestra una tabla con dimensiones recomendadas para obtener la altura de la caja de moldeo.

Por lo tanto, según las tablas, se tiene que la altura de la caja de moldeo es:

$$H_{cm} = 17,5 \text{ cm}$$

Para el presente proyecto, se elige el plano de separación del molde, debido a que se facilita el moldeo, la coquilla va a ser colada en arena verde. Se escoge un alimentador sin estrangulamiento por la facilidad de moldeo.

Sin tomar en cuenta los alimentadores, canales de alimentación y sifón. La coquilla se compone de dos moldes. El diseño de la coquilla se realiza para uno de ellos. Por lo tanto, se procede a obtener la masa de la mitad de la coquilla, que es 11,23 Kg.

#### **4.1.3.4 Diseño del alimentador para el colado de la coquilla**

Para diseñar el alimentador se debe tomar en cuenta el tipo de material que se va a fundir, que en este caso es hierro fundido. Son importantes las dimensiones de la caja de moldeo.

Para el cálculo de las dimensiones del alimentador se toma en cuenta el procedimiento de Ozann-Dittet, el cual indica que la sección total del alimentador se define por la siguiente ecuación:

$$A_{bc} = \frac{m_h}{\rho_h \times t_h \times u \times \sqrt{2 \times g \times H_{calh}}} \quad \text{Ec. 4-11}$$

Donde:

$m_h$  Masa de la mitad de la coquilla (11,23 Kg)

$\rho_h$  Densidad del hierro fundido gris (0,0072 Kg/cm<sup>3</sup>)

$t_h$  Tiempo de la colada de hierro fundido (s)

$u$  Coeficiente de resistencia (0,88)

$g$  Aceleración de la gravedad (980 cm/s<sup>2</sup>)

$H_{calh}$  Altura estática de cálculo desde la superficie superior de la caja de moldeo al plano de separación de la caja de moldeo.

La altura estática sigue la siguiente ecuación:

$$H_{calh} = H_{cm} + \frac{e_c}{2} \quad \text{Ec. 4-12}$$

Donde:

$H_{cm}$  Altura de la caja de moldeo (17,5 cm)

$e_c$  Espesor de la mitad de la coquilla (3,6 cm)

Por lo tanto reemplazando valores en la ecuación (4.12), se tiene:

$$H_{calh} = 17,5 + \frac{3,6}{2}$$

$$H_{calh} = 19,3 \text{ cm}$$

El tiempo de colado de la coquilla (hierro gris) está definido por la siguiente ecuación.<sup>43</sup>

$$t=1,11 \times S \times \sqrt{G} \text{ [s]} \quad \text{Ec. 4-13}$$

Donde:

S Coeficiente de espesor

G Masa de metal que circula (11,23 Kg)

δ Espesor predominante (3,6 cm)

Los valores de S se toman de la tabla que se muestra a continuación:

|        |      |         |         |      |
|--------|------|---------|---------|------|
| δ (mm) | < 10 | 11 - 20 | 21 - 40 | > 40 |
| S      | 1,0  | 1,3     | 1,5     | 1,7  |

**Tabla 4.10 Valores de S**

Reemplazando los valores en la ecuación (4.13), se tiene:

$$t=1,11 \times 1,5 \times \sqrt{11,23}$$

$$t=5,58 \text{ (s)}$$

Reemplazando los valores en la ecuación (4.11) se tiene:

$$A_{bc} = \frac{11,23}{0,0072 \times 5,58 \times 0,88 \times \sqrt{2 \times 980 \times 19,3}}$$

$$A_{bc} = 1,63 \text{ cm}^2$$

Se considera que el alimentador va a ser un cilindro y la sección de alimentación está dada por:

$$A_{bc} = \pi \times r_a^2 \quad \text{Ec. 4-14}$$

<sup>43</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 150

Donde:

$A_{bc}$  Sección de alimentador (1,633 cm<sup>2</sup>)

$r_a$  Radio de colado para la coquilla

Reemplazando valores en la ecuación (4.14), se tiene:

$$r_a = \sqrt{\frac{1,633}{\pi}}$$

$$r_a = 0,721 \text{ cm}$$

#### 4.1.3.5 Cálculo del canal de colado y sifón

Para este caso se considera, que la coquilla que se va a colar tiene dimensiones medianas y grandes. El canal y el sifón van a considerarse como cilindros.

Con el radio del alimentador se obtienen los radios del canal y sifón

$$r_{cc} = 2 \times r_a \quad \text{Ec. 4-15}$$

Donde:

$r_a$  Radio de colado para la coquilla (3mm)

$r_{cc}$  Radio de canal para el colado de la coquilla

Reemplazando valores en la ecuación (4.15), se tiene:

$$r_{cc} = 2 \times 0,3$$

$$r_{cc} = 0,6 \text{ cm}$$

El radio del escoriador está por:

$$r_{ce} = 1,5 \times r_a \quad \text{Ec. 4-16}$$

Donde:

$r_{ce}$  Radio del escoriador

$r_a$  Radio de colado para la coquilla 0,3 cm

Reemplazando valores en la ecuación (4.16), se tiene:

$$r_{ce}=1,5 \times 0,3$$

$$r_{ce}=0,45 \text{ cm}$$

#### 4.1.3.6 Cálculo de la mazarota para el colado de la coquilla

Para el diseño de la mazarota, se debe cumplir las siguientes condiciones:

- Debe existir la cantidad necesaria de metal líquido.
- El metal líquido debe llegar a las cavidades del rechupe, originadas por la contracción que se genera en el enfriamiento del hierro fundido gris ASTM numero 30.

La coquilla va a ser colada, con la cavidad hacia abajo. El diseño de la mazarota se llevará a cabo por medio del factor de forma, método que fue investigado por Bishop, Jhonson y Pellini.<sup>44</sup>

El factor de forma está regido a la ecuación (4.6), mostrada anteriormente:

Donde:

L Longitud de la coquilla (19,7cm)

W Ancho de la coquilla (19,7cm)

e Espesor de la mitad de la coquilla (3,6cm)

---

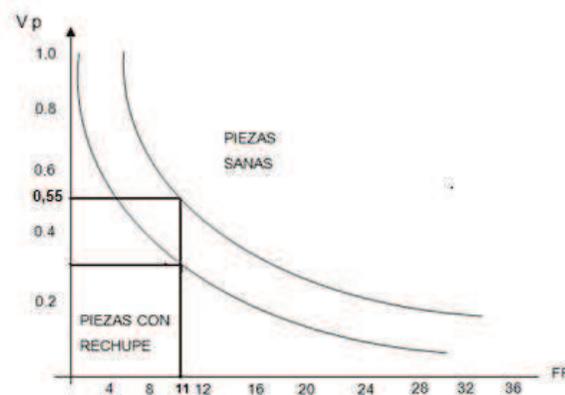
<sup>44</sup> GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 118

Reemplazando valores en la ecuación (4.6), se tiene:

$$F_F = \frac{19,7+19,7}{3,6}$$

$$F_F = 11$$

Mediante el trabajo experimental de estos dos investigadores, se llega a establecer que para un factor de forma dado, el volumen de la mazarota que satisface la alimentación, se obtiene en el nomograma, mostrado a continuación, donde aparecen tres campos: El de las piezas sanas, piezas defectuosas, y el de los resultados dudosos.



**Figura 4.10 Nomograma del factor de forma**

Fuente: GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, Pág. 120

Los resultados dudosos se encuentran entre las dos curvas, por lo tanto para el presente proyecto se tomará la curva superior, debido a que en la coquilla no pueden existir defectos de fundición. En la mazarota se tiene que formar el rechupe, acumular los gases y porosidades (defectos de la fundición), de esta manera se garantiza que la fundición se encuentra en buen estado, por lo tanto la coquilla sana.

Para saber el volumen de la mazarota, de la figura (4.10), se tiene la siguiente relación:

$$\frac{V_{MC}}{V_h} = 0,55 \quad \text{Ec. 4-17}$$

Donde:

$V_h$  Volumen de la mitad de la coquilla (1560,265 cm<sup>3</sup>)

$V_{MC}$  Volumen de la mazarota para la mitad de la coquilla (cm<sup>3</sup>)

Reemplazando valores en la ecuación (4.17), se tiene:

$$V_{MC} = 0,55 \times 1560,265$$

$$V_{MC} = 858,15 \text{ cm}^3$$

La mazarota será cilíndrica por lo tanto la fórmula es:

$$V_{MC} = \pi \times r_c^2 \times h_c \quad \text{Ec. 4-18}$$

Donde:

$V_{MC}$  Volumen de la mazarota para la mitad de la coquilla

$r_c^2$  Radio del cilindro de la mazarota

$h_c$  Altura de la mazarota

La altura de la mazarota está dada por:

$$h_c = H_{cm} - e_c \quad \text{Ec. 4-19}$$

Donde:

$e_c$  Espesor de la mitad de la coquilla (3,6cm)

$H_{cm}$  Altura de la caja de moldeo (17,5cm)

Reemplazando valores en la ecuación (4.18), se tiene:

$$h_c = 17,5 - 3,6$$

$$h_c = 13,9 \text{ cm}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (4.18), se tiene:

$$r_c = \sqrt{\frac{858,15}{\pi \times 13,9}}$$

$$r_c = 4,43 \text{ cm}$$

La relación para el método está dado por:

$$\frac{h}{d} = 0,5 \text{ a } 1,5$$

Ec. 4-20

Donde:

d Diámetro del cilindro (2 radios = 8,86 cm)

h Altura de la mazarota (13,9 cm)

Reemplazando valores en la ecuación (4.20), se tiene:

$$\frac{h}{d} = 1,5$$

## CONCLUSIÓN

Del resultado anterior se analiza que el método de factor de forma es válido porque la relación h/d está en el rango 0,5 a 1,5.

**4.1.3.7 Dimensiones de la caja de moldeo para la coquilla.**

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| Longitud caja de moldeo          | 31,2 cm |
| Altura caja de moldeo            | 17,5 cm |
| Radio de colada para la coquilla | 0,3 cm  |
| Radio del canal para la coquilla | 0,6 cm  |
| Radio del escoriador             | 0,45 cm |

**Tabla 4.11 Dimensiones de moldeo para la coquilla**

#### 4.1.4 CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA

Para la construcción de la coquilla se realizó el siguiente proceso:

##### 4.1.4.1 Obtención del modelo de madera

Dimensionada la coquilla, se elaboran los planos de la misma y se encarga la construcción del modelo de madera. El estudio de las contracciones, plano divisor y otros parámetros quedan a cargo del modelista.

El trabajo entregado por el encargado de confeccionar el modelo consta de 3 partes: (1) tapa superior, (2) tapa inferior y (3) el producto (volante).



Figura 4.11 Modelo de madera de la coquilla

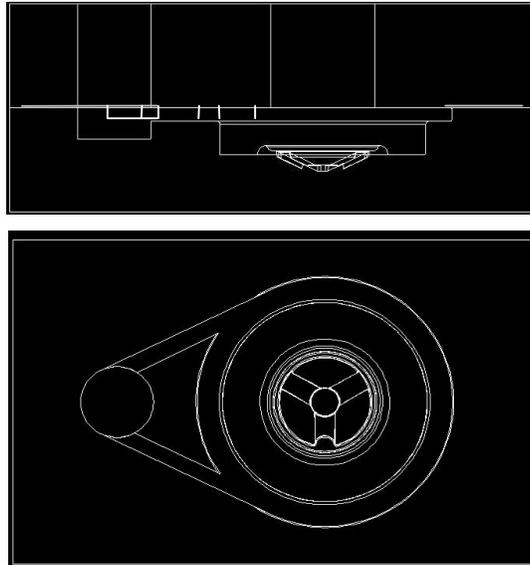
Fuente: Propia

##### 4.1.4.2 Pruebas de colado de la coquilla con aluminio, previo al colado con hierro gris.

Se moldeó la tapa inferior de la coquilla, por ser la que presenta más detalles, con arena en verde y se procedió a realizar las pruebas con las que se pretende encontrar el mejor sistema de llenado del molde.

#### 4.1.4.2.1 Primera prueba de colado con aluminio.

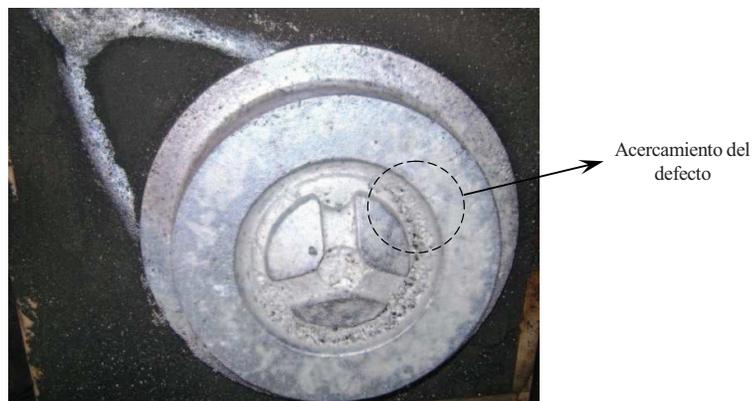
Para este caso se tiene la siguiente configuración de sistema de llenado del molde:



**Figura 4.12 Configuración del sistema de llenado para la primera prueba de colado**

Fuente: Propia

Como resultado se observan porosidades en el detalle de la coquilla de aluminio, justamente donde se formará el aro del volante (obsérvese la figura).



**Figura 4.13 Resultado de la primera prueba de colado con aluminio**

Fuente: Propia



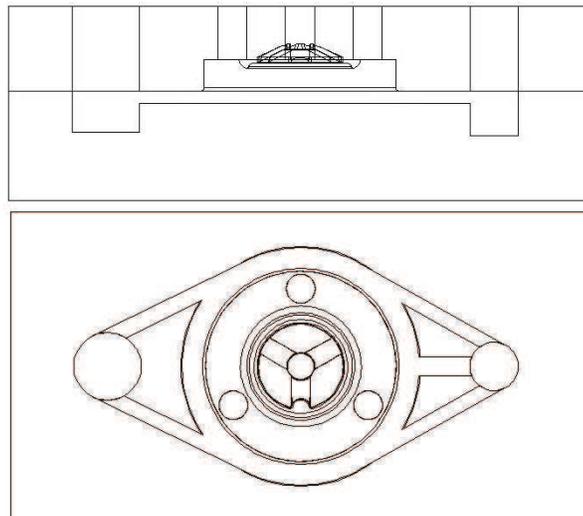
**Figura 4.14** Imagen aumentada del defecto de fundición de la prueba

Fuente: Propia

El defecto se produce donde se encontraba la mazarota, por lo que se recomendó buscar otro sistema de alimentación o en su defecto poner una mazarota de mayor diámetro en la salida de gases.

#### *4.1.4.2.2 Segunda prueba de colado con aluminio*

Con la siguiente configuración se realiza la segunda prueba de colado:



**Figura 4.15** Configuración del sistema de llenado para la segunda prueba de colado

Fuente: Propia

Con este sistema de llenado no se obtuvo un buen resultado, por tanto, la mejor opción es la configuración de la primera prueba, aplicando la recomendación de utilizar una mazarota de mayor diámetro.



**Figura 4.16** Resultado de la segunda prueba de colado con aluminio

Fuente: Propia

#### 4.1.4.3 Moldeado de la coquilla para colado con hierro gris

Con los resultados obtenidos de las pruebas de colado con aluminio se procede a moldear las piezas que conforman la coquilla de dos maneras diferentes:

- a) con arena en verde y
- b) con arena aglomerada con resinas fenólicas



**Figura 4.17** Moldeo de la coquilla (a) con arena en verde, (b) arena con resina fenólica

Fuente: Propia

El moldeo en verde es común en la fundición, por lo que no es necesario detallarlo.

En el moldeo con resina fenólica se procede de la siguiente manera:

- Determinar la cantidad de arena sílice para elaborar el molde;
- Calcular la cantidad de resinas fenólicas en proporción a la sílice utilizada, de acuerdo a como se indica en la lista:

Resina A = 5% de la masa de arena sílice

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

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

Se mezclan los materiales citados anteriormente (fig 4.18 a), considerando que la caja de moldeo no se llenará en su totalidad con la mezcla, sino mas bien se formará una capa con un espesor de aproximadamente 2 cm (fig 4.18 b). Se debe mencionar que el volumen restante de la caja se completa con arena verde apisonada.



**Figura 4.18 a) Productos de moldeo en mezcladora, b) caja de moldeo con arena mezclada**

Fuente: Propia

En este caso, para el moldeo de las partes de la coquilla se utilizaron 7 Kg de arena sílice; a partir de este valor se calcula la cantidad de resinas para la mezcla de moldeo:

Resina A = 350g

Resina B = 70g

Resina C = 35g

Finalizado el moldeo en ambas modalidades, se pintan los moldes con un preparado especial de alcohol y plumbagina, con el objeto de tener un mejor acabado superficial.

Es importante dejar que los moldes dispongan de un tiempo suficiente de secado (puede ser una semana antes del colado).



**Figura 4.19 Pintado de los moldes**

Fuente: Propia

#### 4.1.4.4 Colado de la coquilla con hierro gris.

En el colado de la coquilla con hierro gris se realizaron las siguientes actividades:

- Contar con todos los recursos necesarios para esta operación, es decir: personal calificado, equipos adecuados, maquinaria (horno de inducción), herramientas y materiales.



Figura 4.20 Horno de inducción para el colado de la coquilla

Fuente: Propia

- Ubicar de manera estratégica todas las herramientas y equipos.
- Preparar en el piso una especie de cama de arena, en donde se colocan los moldes, con el objeto de formar un aislante entre el suelo y el molde para evitar fugas de calor.
- Colocados los moldes sin cerrar en la cama de arena, se calientan con un soplete de gas por aproximadamente un lapso de 30 minutos, para eliminar cualquier residuo de humedad y evitar el choque térmico entre el molde y el metal líquido.



**Figura 4.21 Moldes colocados en la cama de arena calentados con llama**

Fuente: Propia

- Se cierran los moldes y se colocan sobre ellos pesos para que soporten la presión metalostática y no se abran al momento de colar.



**Figura 4.22 Pesos colocados sobre los moldes**

Fuente: Propia

- Mientras el metal se funde, se calienta el recipiente (cayana) con el que se llenarán los moldes.



**Figura 4.23 Calentamiento de la cayana**

Fuente: Propia

- Previo a la indicación del operario del horno, 10 minutos antes del colado, se calientan nuevamente los moldes.
- Finalmente se cola el metal.



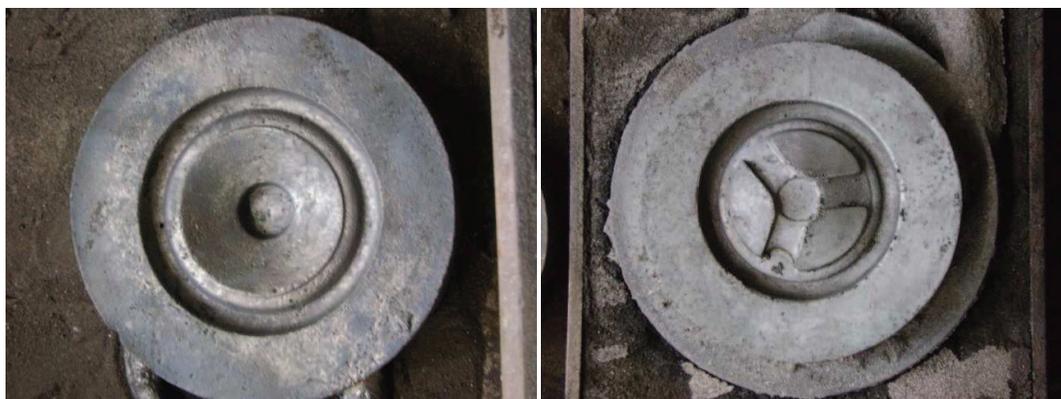
**Figura 4.24 Colado de la coquilla**

Fuente: Propia

#### 4.1.4.4.1 Resultados del colado de la coquilla.

El resultado obtenido con los moldes de arena en verde es poco satisfactorio, debido a que las superficies presentan defectos de fundición como rechupes y porosidades. Se comprueba que el sistema de alimentación no es el adecuado, se utilizó el de la segunda prueba de colado con aluminio.

Los moldes de arena aglomerados con resina proporcionan mejores resultados, los detalles y formas básicas de las piezas presentan buena calidad, no se tiene rechupes y la porosidad es mínima, comprobándose que el sistema de alimentación utilizado fue el adecuado. Se utilizó el sistema de alimentación de la primera prueba de colado con aluminio con una mazarota de mayor diámetro.



**Figura 4.25 Partes de la coquilla obtenidas en molde de arena aglomerada con resina**

Fuente: Propia

#### 4.1.4.5 Maquinado de la coquilla

Obtenidas las piezas fundidas se procede al maquinado para retirar los excesos y darle la forma correspondiente, con lo que se consiguen las dimensiones requeridas.

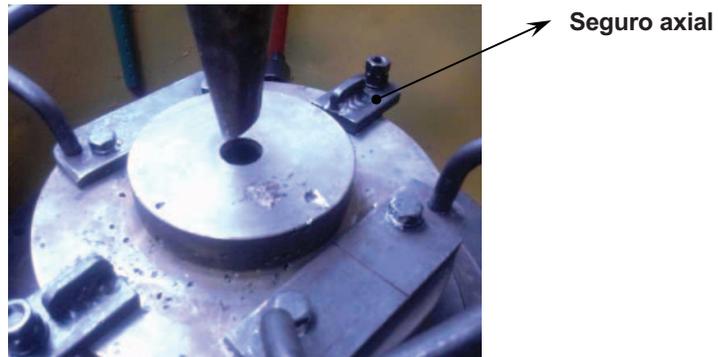


**Figura 4.26 Coquilla maquinada**

Fuente: Propia.

#### **4.1.4.6 Sistema de cierre de la coquilla**

Por seguridad, para evitar que el molde se abra durante el colado se opta por colocar dos seguros solidarios con el molde, de manera que se evite el desplazamiento axial de la tapa superior de la coquilla por efecto de la presión metalostática en el momento del llenado.



**Figura 4.27 Seguros axiales de la coquilla**

Fuente: Propia.

## 4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PARA COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL

### 4.2.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Para la estructura del equipo se han considerado los elementos que soportan las cargas más representativas del sistema. Se utilizó un perfil laminado de acero UPN 120 que es un material idóneo para la construcción y se encontraba disponible en el mercado nacional.

#### 4.2.1.1 Diseño de la viga

Como la viga está formando un sistema con rigidizadores, estos dan la impresión de que la viga esta empotrada en sus dos extremos por lo que el análisis es el siguiente:

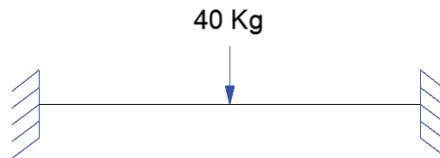


Figura 4.28 Fuerza aplicada en la viga

Fuente: Propia.

Para poder resolver las incógnitas que se presentan se debe emplear el método de los tres momentos, en donde la viga quedará de la siguiente manera:

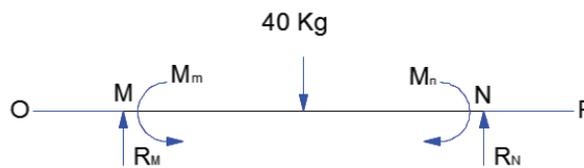


Figura 4.29 Diagrama de cuerpo libre de la viga

Fuente: Propia.

El diagrama de los 3 momentos está dado por la siguiente ecuación:

$$I_o M_o + 2(I_o + I_m)M_m + I_m M_n = -6(\alpha_{oi} + \alpha_{od}) \quad \text{Ec. 4-21}$$

Donde:

$$I_o = 0$$

$$M_o = 0$$

$$\alpha_{oi} = 0$$

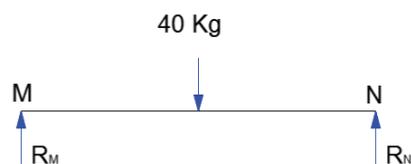
Reemplazando la ecuación (4.21) en el apoyo OMN, se tiene:

$$\begin{aligned} 2(0,6)M_m + 0,6M_n &= -6(\alpha_{oi} + \alpha_{od}) \\ 1,2M_m + 0,6M_n &= -6(\alpha_{od}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4-22}$$

Reemplazando la ecuación (4.21) en el apoyo MNP, se tiene:

$$\begin{aligned} 0,6M_m + 2(0,6)M_n &= -6(\alpha_{oi} + \alpha_{od}) \\ 0,6M_m + 1,2M_n &= -6(\alpha_{oi}) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4-23}$$

Análisis de los giros.



**Figura 4.30 Fuerzas aplicadas en la viga**

Fuente: Propia.

Aplicando la sumatoria de momentos en M y N, se tiene:

$$\sum M_M = 0$$

$$R_N \times 0,6 - 40 \times 0,3 = 0$$

$$R_N = \frac{40 \times 0,3}{0,6}$$

$$R_N = 20 \text{ Kg}$$

$$\sum M_N = 0$$

$$R_M \times 0,6 - 40 \times 0,3 = 0$$

$$R_M = \frac{40 \times 0,3}{0,6}$$

$$R_M = 20 \text{ Kg}$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = R_M X - 40(X-0,3)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{R_M X^2}{2} - \frac{40(X-0,3)^2}{2} + A$$

$$EI Y = \frac{R_M X^3}{6} - \frac{40(X-0,3)^3}{6} + AX + B$$

Donde:  $R_N$ ,  $R_M$  Son las reacciones en las esquinas de la estructura  
 $A$ ,  $B$  son las constantes del teorema

$$B = 0$$

Si  $Y(x) = 0$ ,

Entonces  $X = 0,6 \text{ m}$

$$0 = R_M \frac{(0,6)^3}{6} - \frac{40(0,6-0,3)^3}{6} + A(0,6)$$

$$A = -0,9$$

Si  $x = 0$

$$EI \frac{dy}{dx} = \theta$$

$$\alpha_{oi} = -0,9$$

Si  $x = 0,6$

$$EI \frac{dy}{dx} = \theta = \alpha_{od} = \frac{20 \times (0,6)^2}{2} - 40 \times \frac{(0,3)^2}{2} - 0,9$$

$$\alpha_{od} = 0,9$$

Reemplazando valores en las ecuaciones (4.22 y 4.23), se tiene:

$$1,2M_m + 0,6M_n = -5,4$$

$$0,6M_m + 1,2M_n = -5,4$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos:

$$M_M = -3 \text{ Kg-m}$$

$$M_N = -3 \text{ Kg-m}$$

De ahí que el diagrama de cuerpo libre del elemento B es:

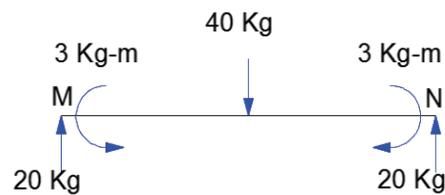


Figura 4.31 Diagrama de cuerpo libre de la viga

Fuente: Propia.

Y con esta figura, se puede determinar los diagramas de cortante y momento flector que son:

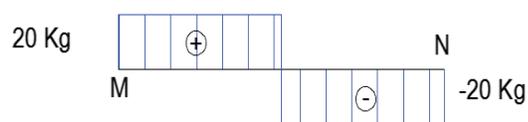


Figura 4.32 Diagrama de cortante de la viga

Fuente: Propia.

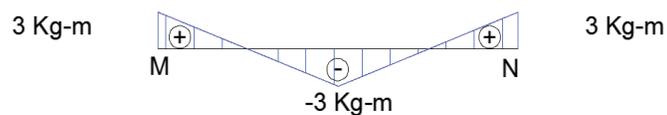


Figura 4.33 Diagrama de momento de la viga

Fuente: Propia.

Con los datos del ANEXO C (Propiedades de los perfiles estructurales catalogo DIPAC). Se encuentra que el módulo de inercia es:  $S_{xx}=0,0000607 \text{ m}^3$  con la ecuación se determina el factor de seguridad:

$$\frac{M_{\max}}{S_{xx}} = [\sigma]_{\text{adm}} = \frac{S_Y}{n} \quad \text{Ec. 4-24}$$

El perfil es de acero A-36. Donde  $S_Y=32 \text{ Kpsi}$ . Reemplazando los valores en la ecuación (4.24), se tiene:

$$\frac{3 \text{ Kg-m}}{0,0000607 \text{ m}^3} = [\sigma]_{\text{adm}} = \frac{22505600 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}}{n}$$

$$n = \frac{22505600 \times 0,0000607}{3}$$

$$n=455,36$$

Por tanto el perfil UPN-120 soporta las cargas aplicadas en la estructura.

#### 4.2.1.2 Diseño de columnas

Para el cálculo de las columnas o perfiles verticales, se debe tomar en cuenta que las dos columnas están sometidas a los mismos esfuerzos por lo que se realizará un solo análisis.

Para el cálculo del factor de seguridad del perfil utilizado en las columnas, se emplea el esfuerzo de flexión máxima con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{x \max} = \frac{F + W_{\text{Colum.}}}{A} + \frac{M_{\max}}{I_x} \quad \text{Ec. 4-25}$$

Donde:

- F Fuerza en Kg  
 $W_{\text{Colum.}}$  Peso de la columna en 6,7Kg  
 A Área de la sección en 0,0017m<sup>2</sup>  
 $M_{\text{max}}$  Momento máximo en 3[Kg-m]  
 $I_x$  Momento de inercia en 0,0000607[m<sup>3</sup>]

Reemplazando los valores en la ecuación (4.25), se tiene:

$$\sigma_{x \text{ max}} = \frac{40\text{Kg} + 6,7\text{Kg}}{0,0017\text{m}^2} + \frac{3[\text{Kg-m}]}{0,0000607[\text{m}^3]}$$

$$\sigma_{x \text{ max}} = 76893,97 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

Para calcular el factor de seguridad se tiene:

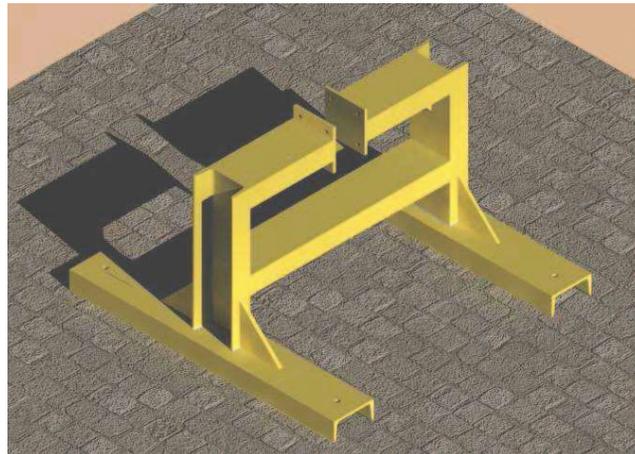
$$n = \frac{S_y}{\sigma_{x \text{ max}}}$$

$$n = \frac{22505600}{76893,97}$$

$$n = 292,6$$

Con este resultado se demuestra que el perfil seleccionado es adecuado para la construcción del equipo.

La estructura quedaría ensamblada de la siguiente manera:



**Figura 4.34 Esquema de la estructura**

Fuente: Propia.

## 4.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

### 4.2.2.1 Determinación de la potencia del motor

Para tener una estimación de la potencia que se necesitaría para la rotación del molde, el plato y los accesorios de fijación se realiza el siguiente análisis:

Sea:

$$M = I \times \alpha \quad \text{Ec. 4.26}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad \text{Ec. 4.27}$$

Donde:

- M = torque mínimo necesario que debe generarse para provocar la rotación del molde a la velocidad angular solicitada,
- I = momento de inercia del molde y su sistema de sujeción,
- $\alpha$  = aceleración angular del molde.

Considerando que el motor gira a 1750 rpm, y se prevé una relación de transmisión de 3 a 1, la velocidad angular tiene un valor  $\omega = \frac{1750}{3} \text{ rpm} = 61,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ . Esta consideración se justifica más adelante. También se asume un intervalo de tiempo de 2 segundos para que el molde alcance el valor de  $\omega$ .

Entonces, reemplazando los valores indicados anteriormente en la ecuación (4.27), se tiene:

$$\alpha = \frac{61,1}{2} = 30,54 \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right)$$

Por otro lado, el momento de inercia del molde, del plato y del volante fundido cuando está dentro del molde, tienen los siguientes valores:

$$I_{\text{PLATO}} = 0,124669599 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$$

$$I_{\text{MOLDE}} = 0,08039074619 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$$

$$I_{\text{VOLANTE}} = 0,00031472 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$$

El momento de inercia total es:

$$I_{\text{TOTAL}} = 0,205375065 \text{ [Kg-m}^2\text{]}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.26), se tiene:

$$M = 0,205375065 \times 30,54$$

$$M = 6,2722 \text{ [N-m]}$$

Del resultado anterior se concluye que par generado por el motor debe ser mayor a 6,2722 N-m para que se pueda iniciar el movimiento de rotación del molde. Por tanto, la potencia requerida para obtener ese torque es la siguiente:

$$\text{Pot} \geq \frac{2 \pi n T}{60} \quad \text{Ec. 4-28}^{45}$$

Donde:

n Velocidad en rpm

T Torque en N-m

Pot Potencia en Watios

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.28), se tiene:

$$\text{Pot} \geq \frac{2 \pi \times \left(\frac{1750}{3}\right) \times 6,2722}{60}$$

$$\text{Pot} \geq 383,15 \text{ W}$$

$$\text{Pot} \geq 0,5 \text{ HP}$$

Para los próximos cálculos se asumirá una potencia de 1 HP, ya que es un valor encontrado en los datos de placa de algunas máquinas que son utilizadas con propósitos afines al presente proyecto, tales como mezcladoras de arena, lavadoras de ropa, máquinas herramientas como tornos, fresadoras entre otras.

Por otra parte, para las condiciones de potencia y velocidad angular anteriormente mencionadas, se determina que se utilizará una banda tipo A, para este tipo de bandas el diámetro primitivo mínimo corresponde a 63 mm en la polea conductora. Como se prevé una relación de transmisión de 3 a 1, el diámetro de la polea conducida es 189 mm.

---

<sup>45</sup> TIMOSHENKO, Resistencia de Materiales; Editorial Thomson; 5ta Edición; 1978, Pág 222

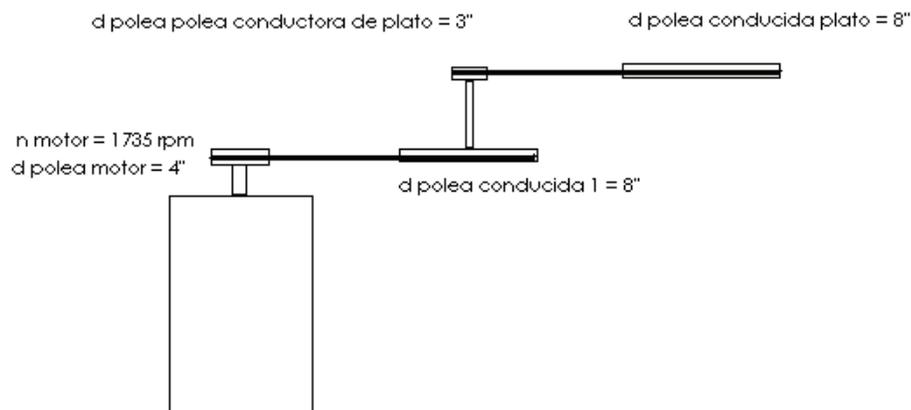
Resumiendo:

|   |          |
|---|----------|
| Potencia del motor eléctrico              | 1 HP     |
| Revoluciones del motor                    | 1750 rpm |
| Sección de la banda                       | Tipo A   |
| Relación de transmisión                   | 3:1      |
| Diámetro primitivo de la polea conductora | 63 mm    |
| Diámetro primitivo de la polea conducida  | 189 mm   |

**Tabla 4.12 Datos para la selección del motor**

#### 4.2.2.1.1 Sistema de poleas para la reducción de revoluciones

Se necesita que el plato gire a un régimen de aproximadamente de 300 rpm, por lo que la reducción con las poleas queda de la siguiente manera:



**Figura 4.35 Esquema de reducción de revoluciones del motor**

Fuente: Propia.

De acuerdo al esquema anterior, se calculan las revoluciones de salida al plato giratorio con las siguientes relaciones:

$$\frac{n_{motor}}{n_1} = \frac{d_{polea\ 1}}{d_{motor}}$$

$$\frac{1735\ rpm}{n_1} = \frac{8''}{4''}$$

De donde  $n_1 = 867,5\ RPM$ .

La salida al plato giratorio es la siguiente:

$$\frac{n_1}{n_{plato}} = \frac{d_{polea\ conducida\ plato}}{d_{polea\ conductora\ plato}}$$

$$\frac{867,5\ rpm}{n_{plato}} = \frac{8''}{3''}$$

De donde  $n_{plato} = 325,31\ RPM$

#### 4.2.2.2 Fuerzas generadas en el sistema

##### 4.2.2.2.1 Relación de tensiones en la banda

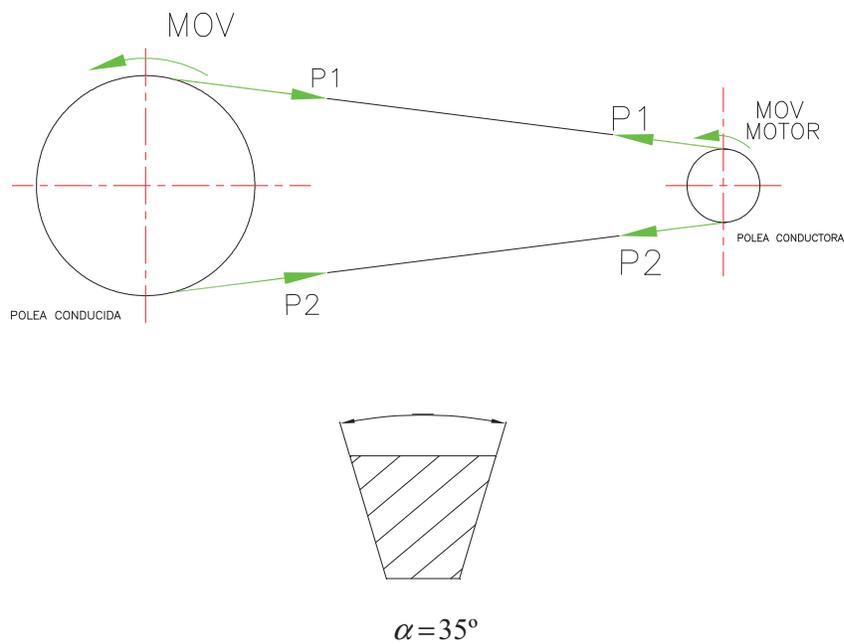


Figura 4.36 Relación de tensiones en la banda

La expresión que define la relación de tensiones en la banda es la siguiente:

$$P_1 = P_2 \times e^{\mu\beta} \quad \text{Ec. 4-29}$$

Donde:

$P_1$  Tensión en el lado tirante

$P_2$  Tensión en el lado flojo

$\mu$  Coeficiente de fricción entre la banda y la polea, que puede estar comprendido entre 0,3 y 0,7 para bandas de cuero, hule y caucho sobre acero.

$\beta$  Angulo de contacto

#### 4.2.2.2.2 Cálculo del ángulo de contacto<sup>46</sup>

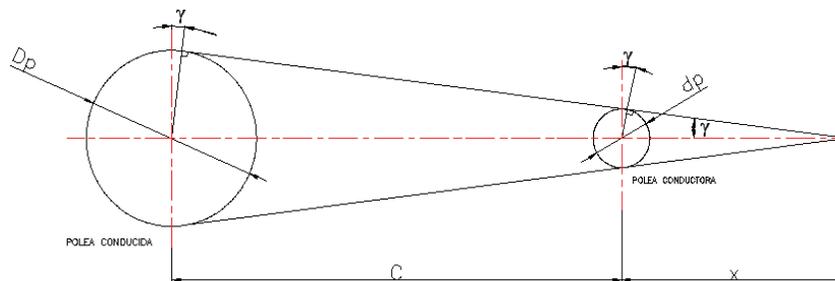


Figura 4.37 Ángulo de contacto

Donde:

$D_P$  Diámetro primitivo de la polea mayor (0,189 m)

$d_P$  Diámetro primitivo de la polea menor (0,063 m)

$C$  Distancia entre centros (0,5 m)

<sup>46</sup> J. L. MERIAM; Estática; Editorial Reverté; Barcelona España; Pág. 314

Haciendo la siguiente relación de triángulos, se tiene:

$$\frac{D_p}{d_p} = \frac{C + x}{x} \quad \text{Ec. 4-30}$$

$$D_p x = d_p C + d_p x$$

$$(D_p - d_p)x = d_p C$$

Se encuentra la siguiente expresión para completar los cálculos del ángulo de contacto:

$$x = \frac{d_p C}{(D_p - d_p)} \quad \text{Ec. 4-31}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.31), se tiene:

$$x = \frac{0,063 \times 0,5}{(0,189 - 0,063)}$$

$$x = 0,25 \text{ m}$$

El ángulo de contacto, se define por la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{\beta}{\text{sen} \left( \frac{\alpha}{2} \right)} \quad \text{Ec. 4-32}$$

Donde  $\alpha = 35^\circ$  es el ángulo de entre las caras de la banda trapezoidal

Además, se tiene:

$$\text{sen } \gamma = \frac{\frac{d_p}{2}}{x} \quad \text{Ec. 4-33}$$

Y:

$$\beta = 180 - 2(\gamma^\circ) \quad \text{Ec. 4-34}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.33), se tiene:

$$\text{sen } \gamma = \frac{0,063}{0,25}$$

$$\gamma = 7,24^\circ$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.34), se tiene:

$$\beta = 165,52^\circ = 2,89 \text{ rad}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.32), se tiene:

$$\beta' = \frac{2,89}{\text{sen} \left( \frac{35}{2} \right)}$$

$$\beta' = 9,61 \text{ rad}$$

#### 4.2.2.2.3 Cálculo de la Relación de Tensiones

Por otro lado, se tiene que:

$$H = (P_1 - P_2) \times V \quad \text{Ec. 4-35}$$

Donde:

V Velocidad lineal en la polea

H Potencia transmitida por el motor

Además se conoce que:

$$P_1 = P_2 + \frac{H}{V} \quad \text{Ec. 4-36}$$

Igualando la ecuación (4.29) con la ecuación (4.36), se tiene:

$$P_2 \times e^{\mu\beta} = P_2 + \frac{H}{V}$$

Y despejando  $P_2$ , se tiene:

$$P_2 \times (e^{\mu\beta} - 1) = \frac{H}{V}$$

$$P_2 = \frac{H}{V \times (e^{\mu\beta} - 1)} \quad \text{Ec. 4-37}$$

La velocidad lineal, viene dado por:

$$V = \omega \times \frac{D_P}{2} \quad \text{Ec. 4-38}$$

Donde:

$$\omega = \left(\frac{1750}{3}\right) \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi \text{ rad.}}{1 \text{ rev}}$$

$$\omega = 61,1 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.38), se tiene:

$$V = 61,1 \times \frac{0,189}{2}$$

$$V = 5,77 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Sea 1 HP = 746 W, y conocidos los valores del coeficiente de fricción y el ángulo de contacto, se reemplazan en la ecuación (4.37):

$$P_2 = \frac{2 \times 746}{5,77 \times (e^{0,35 \times 9,61} - 1)}$$

$$P_2 = 9 \text{ [N]}$$

La fuerza que faltaba determinar, se calcula reemplazando el valor de  $P_2$ , en la ecuación (4.29). Se tiene:

$$P_1 = 9 \times e^{0,35 \times 9,61}$$

$$P_1 = 260 \text{ [N]}$$

#### 4.2.2.2.4 Selección de la banda.

**Potencia nominal o teórica [ $p_n$ ].-** Es la potencia requerida por la máquina. Cuando este valor se desconoce o es de difícil determinación, se puede utilizar la potencia indicada en la placa de características del motor.

**Factor de servicio [ $\mu$ ].-** Es un valor que indica las condiciones en que trabajarán las correas. Puede estar comprendido entre uno (1) y dos (2) y debe ser estimado por el diseñador.

Cuando se trate de servicios intermitentes, donde nunca se excede la carga asignada, los arranques se producen en vacío; Las correas trabajan en condiciones higiénicas, al resguardo de los factores climáticos y en instalaciones que poseen un adecuado mantenimiento; bajo tales condiciones el factor de servicio tiende a 1 (uno).

Por el contrario, cuando se trate de servicios continuos (16 a 24 horas diarias), con sobrecargas importantes, arranques a plena carga, a la intemperie, en ambientes sucios con mantenimiento deficiente, en esos casos el factor de servicio tiende a 2 (dos).

En la mayoría de las situaciones se adoptan valores intermedios (1,4 / 1,5 / 1,6), pero en el presente diseño se utilizará un factor de 2, debido a que la máquina permanecerá a la intemperie.

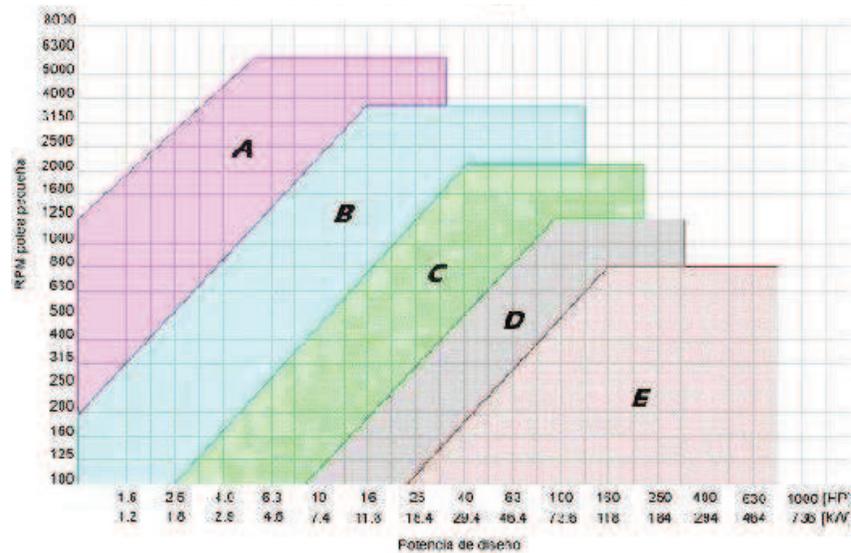
**Potencia de diseño [ $p_d$ ].-** Es el valor que se utilizará para los cálculos posteriores y resulta de multiplicar los valores de los puntos anteriores.

$$P_d = P_t \times \mu \text{ [HP]}$$

Por lo que se tiene:

$$P_d = 1 \times 2 = 2 \text{ [HP]}$$

**Sección de la correa.-** Para determinar la sección de la correa se utiliza el siguiente gráfico:



**Figura 4.38 Selección del perfil de la correa**

Fuente: Catálogo de Selección de correas Trapezoidales Roflex

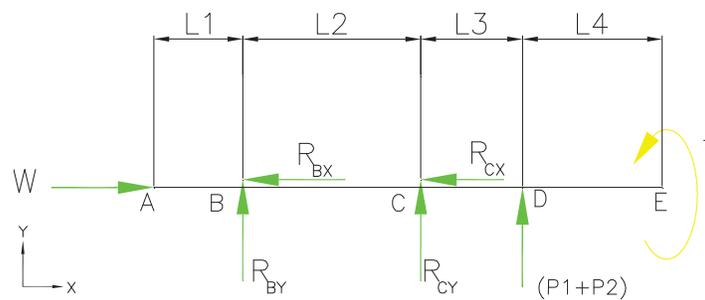
Se conoce que un motor eléctrico de baja revolución de 2 HP gira a 1750 rpm, y con estos valores se trazan perpendiculares en cada uno de los ejes de la gráfica, y el resultado indica que se debe utilizar una banda tipo A. El número de banda se determina cuando se tenga la distancia entre centros de las poleas al momento del montaje.

En resumen:

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Potencia teórica                          | 1 HP                        |
| Factor de servicio                        | 2 (trabajo a la intemperie) |
| Potencia de diseño                        | 2 HP                        |
| Revoluciones del motor                    | 1750 rpm                    |
| Sección de la banda                       | Tipo A                      |
| Diámetro primitivo de la polea conductora | 63 mm                       |
| Diámetro primitivo de la polea conducida  | 189 mm                      |

**Tabla 4.13 Datos para la selección de la banda**

#### 4.2.2.3 Diseño del árbol de transmisión



**Figura 4.39 Diagrama de cuerpo libre del árbol de transmisión**

Fuente: Propia.

## 4.2.2.3.1 Cálculo de reacciones

$$\sum F_x = 0$$

$$W = R_{BX} + R_{CX}$$

Ec. 4-39

$$\sum F_y = 0$$

$$P_1 + P_2 = -(R_{BY} + R_{CY})$$

Despejando  $R_{BY}$ , se tiene:

$$R_{BY} = -(P_1 + P_2) - R_{CY}$$

Ec. 4-40

$$\sum M_{Z_B} = 0$$

$$l_2 R_{CY} = -(P_1 + P_2) (l_2 + l_3)$$

Despejando  $R_{CY}$ , se tiene:

$$R_{CY} = -(P_1 + P_2) \left( \frac{l_2 + l_3}{l_2} \right)$$

Ec. 4-41

Reemplazando (4.41) en (4.40), se tiene:

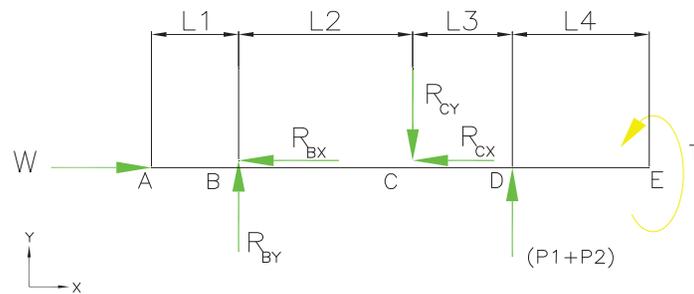
$$R_{BY} = -(P_1 + P_2) - \left[ -(P_1 + P_2) \left( \frac{l_2 + l_3}{l_2} \right) \right]$$

Reduciendo la ecuación, se obtiene:

$$R_{BY} = (P_1 + P_2) \left[ \left( \frac{l_2 + l_3}{l_2} \right) - 1 \right]$$

Ec. 4-42

Finalmente el diagrama de cuerpo libre queda de la siguiente forma:



**Figura 4.40 Diagrama de cuerpo libre concluido**

Fuente: Propia.

#### 4.2.2.3.2 Cálculo para encontrar el diagrama cortante

TRAMO I

$$0 \leq x_1 \leq L_2$$

$$V(x_1) = R_{Ay}$$

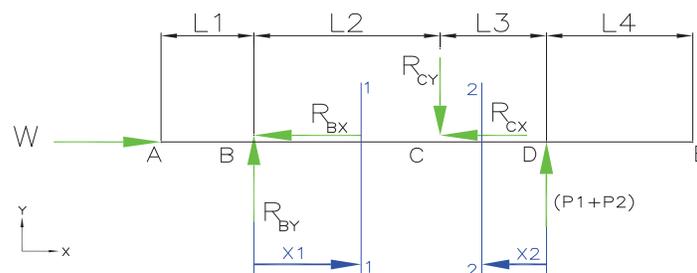
Ec. 4-43

TRAMO II

$$0 \leq x_2 \leq L_3$$

$$V(x_2) = -(P_1 + P_2)$$

Ec. 4-44



**Figura 4.41 DCL Diagrama cortante**

Fuente: Propia.

Si se reemplazan los siguientes datos en las ecuaciones (4.43) y (4.44), se obtendrán los valores que permiten graficar el diagrama de cortante:

$$P_1=145 \text{ [N]}$$

$$P_2=5 \text{ [N]}$$

$$l_1=35 \text{ [mm]}$$

$$l_2=70 \text{ [mm]}$$

$$l_3=40 \text{ [mm]}$$

$$l_4=55 \text{ [mm]}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.42), se tiene:

$$R_{BY}=(260+9) \left[ \left( \frac{70+40}{70} \right) -1 \right]$$

$$R_{BY}=153,88 \text{ [N]}$$

Reemplazando los valores indicados en la ecuación (4.41), se tiene:

$$R_{CY}=- (260+9) \left( \frac{70+40}{70} \right)$$

$$R_{CY}=-423,18 \text{ [N]}$$

Finalmente se tiene:

$$V(x_1)=153,88 \text{ [N] para } 0 \leq x_1 \leq 70 \text{ mm}$$

$$V(x_2)=-269 \text{ [N] para } 0 \leq x_2 \leq 40 \text{ mm}$$

#### 4.2.2.3.3 Cálculo para encontrar el diagrama de momento flector

TRAMO I

$$0 \leq x_1 \leq L_2$$

$$M(x_1) = - R_{BY} \times X_1$$

Cuando  $X_1=0$

$$M(x_1) = 0$$

Cuando  $X_1=L_2$

$$M(x_1) = -R_{BY} \times L_2$$

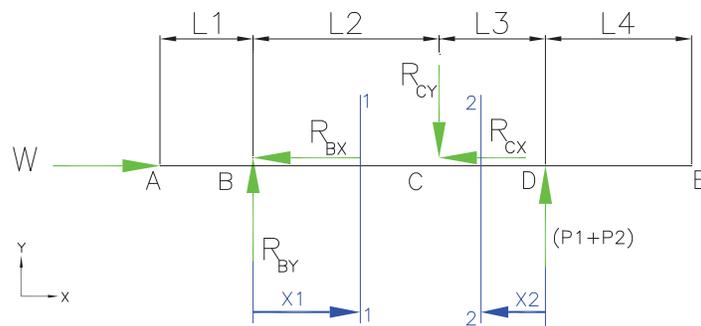


Figura 4.42 DCL Diagrama del momento flector

Fuente: Propia.

Reemplazando valores se obtienen los siguientes resultados:

$$L_2 = 0,07 \text{ m}$$

$$R_{BY} = 153,88 \text{ [N]}$$

$$M(x_1) = -10,76 \text{ [N-m]}$$

TRAMO II

$$0 \leq x_2 \leq L_3$$

$$M(x_2) = (P_1 + P_2) \times x_2$$

Cuando  $X_2=0$

$$M(x_2) = 0$$

Cuando  $X_2=L_3$

$$M(x_2) = - (P_1 + P_2) \times L_3$$

Remplazando valores se obtiene:

$$L_2=0,04 \text{ m}$$

$$(P_1+P_2)=269 \text{ [N]}$$

$$M(x_2)=- 10,76 \text{ [N-m]}$$

#### 4.2.2.3.4 Cálculo para encontrar el diagrama de momento torsor

El momento torsor se calcula con la siguiente expresión:

$$T=(P_1-P_2) \times \left(\frac{D_p}{2}\right) \text{ [N-m]} \quad \text{Ec. 4-45}$$

Remplazando valores en la ecuación (4.45), se obtiene:

$$T=(260-9) \times \left(\frac{0,189}{2}\right)$$

$$T=23,72 \text{ [N-m]}$$

#### 4.2.2.3.5 Cálculo para encontrar el diagrama de carga axial

Para este caso, la única carga axial que actúa sobre el árbol de transmisión es el peso del molde con el volante y los accesorios de sujeción, que dan el siguiente resultado:

$$m_{\text{TOTAL}}=m_{\text{MOLDE}}+m_{\text{VOLANTE}}+m_{\text{PLATO}}+m_{\text{ACCESORIOS}} \quad \text{Ec. 4-46}$$

Remplazando valores en la ecuación (4.46), se obtiene:

$$m_{\text{TOTAL}}=(22,47+0,3+13+1) \text{ Kg}$$

$$m_{\text{TOTAL}}=36,77 \text{ Kg}$$

Donde la fuerza axial sería:

$$F_{\text{AXIAL}}=m_{\text{TOTAL}} \times g \quad \text{Ec. 4-47}$$

Remplazando valores en la ecuación (4.47), se obtiene:

$$F_{AXIAL} = 36,77 \text{ Kg} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{AXIAL} = 360,35 \text{ [N]}$$

A continuación se presentan los diagramas anteriormente descritos, se ubican de manera que se pueda observar claramente la sección crítica:

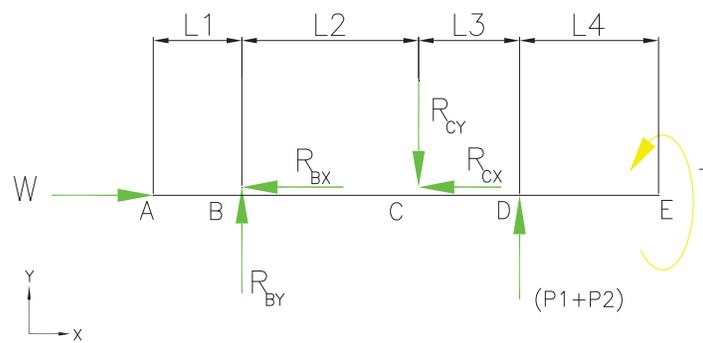


Figura 4.43 DCL concluido del árbol de transmisión

Fuente: Propia.

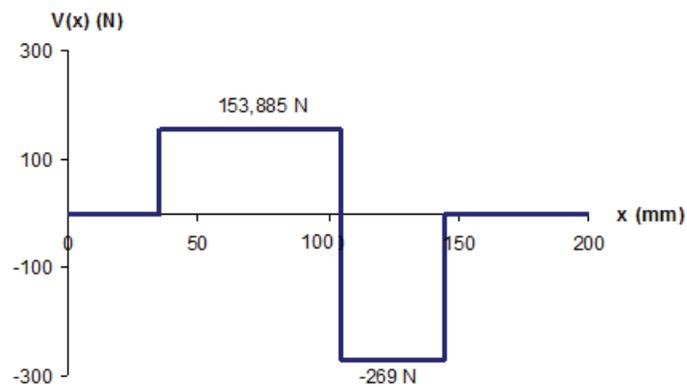


Figura 4.44 Diagrama cortante

Fuente: Propia.

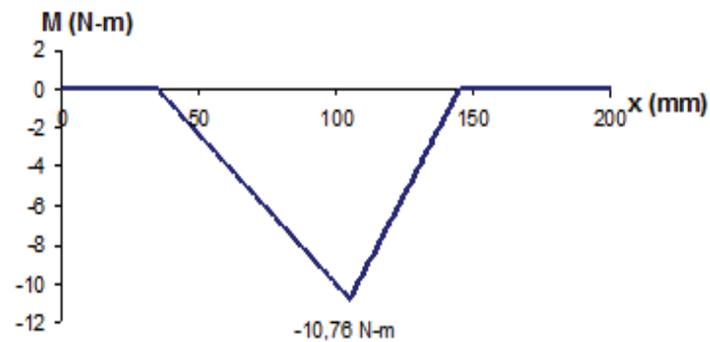


Figura 4.45 Diagrama de momento flector

Fuente: Propia.

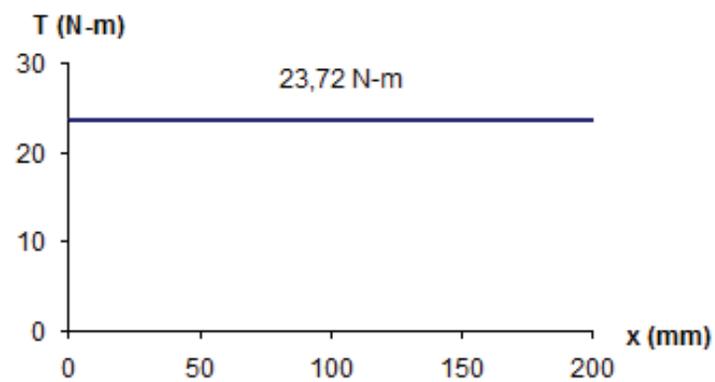


Figura 4.46 Diagrama de momento torsor

Fuente: Propia.

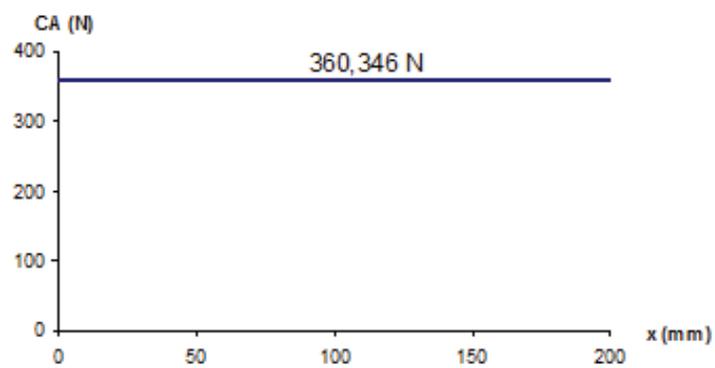


Figura 4.47 Diagrama de carga axial

Fuente: Propia.

#### 4.2.2.3.6 Determinación de la sección crítica

Como se puede observar en el diagrama de momento flector, la sección crítica aparece en C. Este elemento trabaja a esfuerzos combinados.

#### 4.2.2.3.7 Determinación del punto crítico

El estado de esfuerzos del punto C es el siguiente:

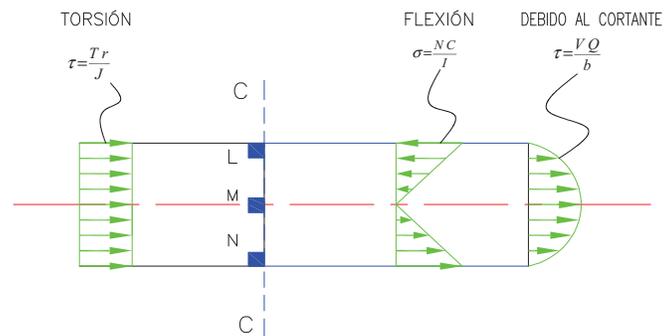
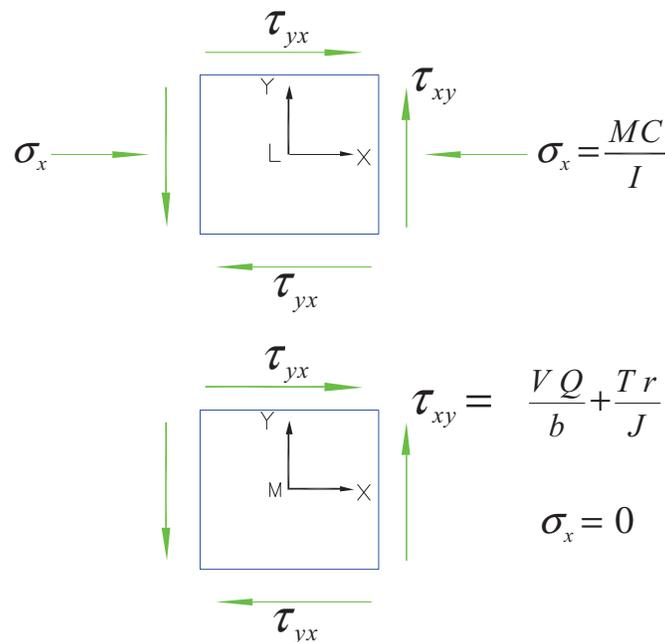


Figura 4.48 Determinación del punto crítico

Fuente: Propia.

De donde se analizan los puntos L, M, N para determinar, cuál de ellos es el elemento crítico:



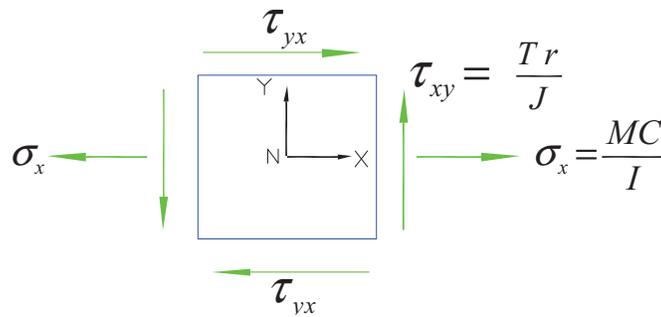


Figura 4.49 Esfuerzos en el punto crítico

Fuente: Propia.

Por lo general, el esfuerzo de corte generado por torsión es mayor que el esfuerzo de corte. Como conclusión se tiene que el elemento crítico es el elemento N debido a que presenta esfuerzos combinados de corte y tracción y en base a los esfuerzos que allí se presentan, se determinará el diámetro del eje de transmisión.<sup>47</sup>

#### 4.2.2.3.8 Diseño del eje por medio de los esfuerzos principales

Para el siguiente caso, los esfuerzos que se presentan son los siguientes:

$$\tau_{12} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 4-48}$$

Si  $\sigma_y = 0$

$$\tau_{12} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 4-49}$$

Para secciones circulares, se tienen las siguientes expresiones:

$$\sigma_x = \frac{M}{I} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad \text{Ec. 4-50}$$

<sup>47</sup> SHIGLEY, J. Diseño en Ingeniería Mecánica; 4ta Edición; México DF; McGraw-Hill; 1985. Pág 72

$$\tau_{xy} = \frac{T}{J} = \frac{16T}{\pi d^3} \frac{r}{r} \quad \text{Ec. 4-51}$$

Reemplazando las expresiones (4.50) y (4.51) en la ecuación (4.49), se tiene:

$$\tau_{12} = \sqrt{\left(\frac{16M}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \quad \text{Ec. 4-52}$$

De la expresión anterior se despeja d, que es el diámetro del eje, y se obtiene:

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{16}{\tau_{12} \pi}\right) \sqrt{M^2 + T^2}} \quad \text{Ec. 4-53}$$

Siendo  $\tau_{12} = [\tau_p]$ , y  $[\tau_p]$ , el esfuerzo de corte admisible, entonces:

$$[\tau_p] = \frac{S_y}{2} \quad \text{Ec. 4-54}$$

Para la selección del acero con el que se construirá el árbol de transmisión se ha consultado de manuales de aceros especiales para la construcción de maquinaria<sup>48</sup>.

Se han tabulado los resultados para diferentes tipos de aceros que comúnmente se emplean en la industria, los posibles diámetros son los siguientes:

| Acero AISI | Sut Mpa | Sy Mpa | $[\tau_p]$ Mpa | d (m)    | d(mm) |
|------------|---------|--------|----------------|----------|-------|
| 4340       | 1100    | 900    | 450            | 6,66E-03 | 6,66  |
| 4140       | 1100    | 750    | 375            | 7,07E-03 | 7,07  |
| 1045       | 650     | 340    | 170            | 9,21E-03 | 9,21  |
| 1040       | 523,64  | 289,38 | 144,69         | 9,71E-03 | 9,71  |
| 1018       | 410     | 235    | 117,5          | 1,04E-02 | 10,41 |
| 1010       | 161,915 | 179,14 | 89,57          | 1,14E-02 | 11,40 |

**Tabla 4.14 Datos para el diseño**

<sup>48</sup> Catálogo de aceros Bohler 2007

Las dimensiones obtenidas en el cálculo anterior dan como resultado un factor de seguridad igual a 2 en todos los casos, pero son diámetros poco comunes. Si se consultan ciertos catálogos de rodamientos se encontrará que el mínimo diámetro de eje para rodamientos cónicos es de un valor de 15 mm (el uso de este tipo de rodamiento se justificará más adelante). Por lo tanto, se procede a calcular el factor de seguridad asignando a la ecuación (4.53) un valor del diámetro  $d$ , mayor a los encontrados.

El diámetro  $d$  será de 25 mm, entonces se procede a calcular nuevamente los esfuerzos principales y luego el factor de seguridad. Para los esfuerzos principales, se reemplaza datos en la ecuación (4.52), y se tiene:

$$\tau_{12} = \sqrt{\left(\frac{16 (10,76)}{\pi 0,025^3}\right)^2 + \left(\frac{16 (23,72)}{\pi 0,025^3}\right)^2}$$

$$\tau_{12} = 8489813 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Para el factor de seguridad, se tiene:

$$n = \frac{[\tau_P]}{\tau_{12}}$$

Ec. 4-55

Reemplazando el esfuerzo admisible y el esfuerzo encontrado con el valor de diámetro que ya se indicó, se tabulan los resultados para todos los aceros que pueden emplearse:

| Acero AISI | Factor de seguridad con $d=25\text{mm}$ |
|------------|---|
| 4340       | 53,00                                   |
| 4140       | 44,17                                   |
| 1045       | 20,02                                   |
| 1040       | 17,04                                   |
| 1018       | 13,84                                   |
| 1010       | 10,55                                   |

**Tabla 4.15 Factor de seguridad calculado con esfuerzos principales para diferentes aceros**

Se observa que el factor de seguridad obtenido en todos los casos es lo suficientemente grande, por lo que se podría utilizar cualquiera de los aceros para construir el eje. La selección definitiva del diámetro se dará cuando se terminen todos los cálculos del eje.

#### 4.2.2.3.9 Diseño estático del árbol de transmisión

En este caso, se procede de la siguiente manera:

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 4-56}$$

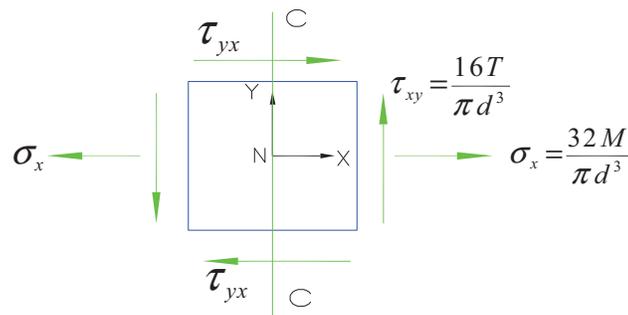


Figura 4.50 Diseño estático del árbol de transmisión.

Fuente: Propia.

Se reemplazan las expresiones (4.50) y (4.51) en la ecuación (4.56), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_{AB} = \frac{16}{\pi d^3} \left( M_C \pm \sqrt{M_C^2 + T^2} \right) \quad \text{Ec. 4-57}$$

Siendo  $M_C$  el momento flector en el punto C, y T el momento torsor:

$$M_C = 10,76 \text{ N-m}$$

$$T = 23,72 \text{ N-m}$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.56), se tiene:

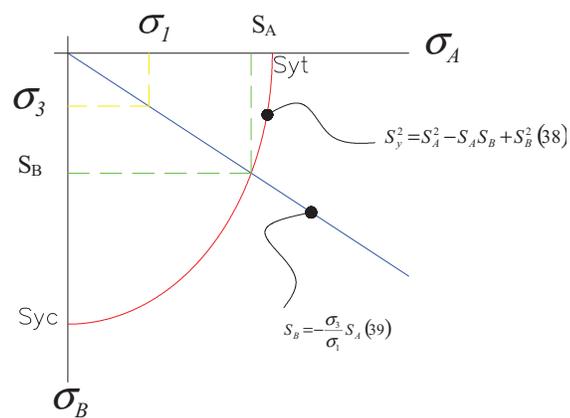
$$\sigma_{AB} = \frac{16}{\pi d^3} (10,76 \pm 26,05) \quad \text{Ec. 4-58}$$

Entonces:

$$\sigma_A = \frac{187,45}{d^3} = \sigma_1 \quad \text{Ec. 4-59}$$

$$\sigma_B = \frac{77,85}{d^3} = \sigma_3 \quad \text{Ec. 4-60}$$

Se usa la teoría de la Energía de Distorsión para materiales dúctiles, se obtiene el siguiente análisis:



**Figura 4.51 Teoría de la Energía de distorsión**

Fuente: Propia.

De donde se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$S_Y^2 = S_A^2 - S_A S_B + S_B^2 \quad \text{Ec. 4-61}$$

$$S_B = - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \times S_A \quad \text{Ec. 4-62}$$

Reemplazando la ecuación (4.62) en (4.61), y despojando  $S_A$ , se tiene:

$$S_A = \frac{S_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right) + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)^2}} \quad \text{Ec. 4-63}$$

Reemplazando las ecuaciones (4.59) y (4.60) en la ecuación (4.63), se tiene:

$$S_A = \frac{S_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{-77,85}{187,45}\right) + \left(\frac{-77,85}{187,45}\right)^2}}$$

$$S_A = \frac{S_y}{\sqrt{1 - 0,415 + 0,173}}$$

$$S_A = 1,15 S_y \quad \text{Ec. 4-64}$$

Para un diseño adecuado, es recomendable tener un factor de seguridad  $n > 2$ .

El factor de seguridad estático es:

$$n_d = \frac{S_A}{\sigma_A} \quad \text{Ec. 4-65}$$

Reemplazando la ecuación (4.64) en (4.65), se tiene:

$$n_d = \frac{1,15 S_y d^3}{187,45}$$

$$n_d = 0,00613 S_y d^3 \quad \text{Ec. 4-66}$$

Si  $n > 2$

$$0,00613 S_y d^3 > 2$$

Despejando d, se tiene:

$$d^3 > \sqrt[3]{\frac{326,22}{S_y}}$$

Ec. 4-67

Igual que el caso anterior, se tabula los resultados para los diferentes aceros, de donde se obtiene:

| Acero AISI | Sy MPa | d (m)   | d (mm)   |
|------------|--------|---------|----------|
| 4340       | 900    | 0,00713 | 7,13001  |
| 4140       | 750    | 0,00758 | 7,57677  |
| 1045       | 340    | 0,00986 | 9,86305  |
| 1040       | 289,38 | 0,01041 | 10,40754 |
| 1018       | 235    | 0,01116 | 11,15531 |
| 1010       | 179,14 | 0,01221 | 12,21162 |

**Tabla 4.16 Resultados del diseño estático**

Al igual que en el caso anterior, se debe calcular nuevamente el factor de seguridad con un diámetro mayor a los que se han obtenido.

En la ecuación (4.59), se reemplaza un diámetro  $d = 25\text{mm}$  y se obtiene:

$$\sigma_A = 11,99 \times 10^6 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Reemplazando valores en (4.65), se tiene:

$$n_d = 0,0096 S_y$$

Ec. 4-68

De donde se tabulan los siguientes resultados:

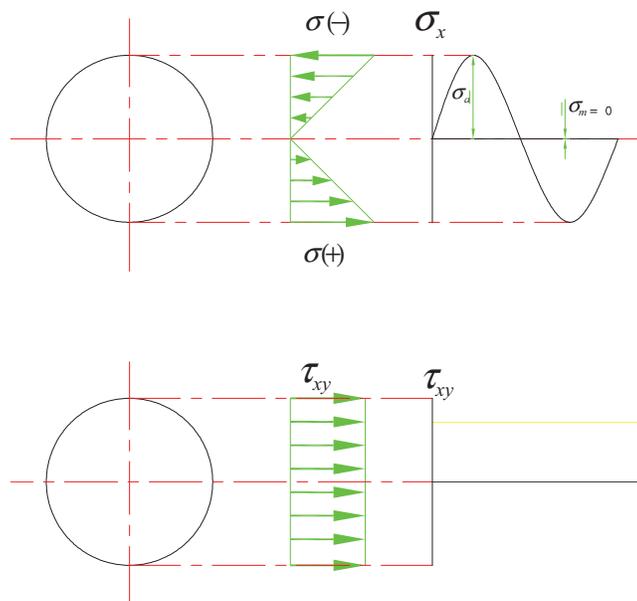
| Acero AISI | Sy (MPa) | $n_s$   |
|------------|----------|---------|
| 4340       | 900      | 86,2128 |
| 4140       | 750      | 71,8440 |
| 1045       | 340      | 32,5692 |
| 1040       | 289,38   | 27,7202 |
| 1018       | 235      | 22,5111 |
| 1010       | 179,14   | 17,1601 |

**Tabla 4.17** Factor de seguridad estático para diferentes aceros para el diseño del árbol de transmisión

Los resultados son favorables, aparentemente el eje está sobredimensionado pero es un valor razonable para poder utilizar los rodamientos, como se verá más adelante.

#### 4.2.2.3.10 Diseño dinámico del árbol de transmisión

Diseño en la sección C (crítica)



**Figura 4.52** Diseño dinámico del árbol de transmisión

Fuente: Propia.

El cálculo para este caso es iterativo, es decir, se asume un diámetro y se comprueba el factor de seguridad. Por lo tanto, se toma como dato un diámetro del eje de 25 mm.

En primer lugar, al aplicar la teoría de la energía de la distorsión, se tiene:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 4-69}$$

Luego, se determinan los esfuerzos de *Von Mises*:

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3\tau_{xya}^2} \quad \text{Ec. 4-70}$$

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3\tau_{xym}^2} \quad \text{Ec. 4-71}$$

Sean:

$$\tau_{xya} = 0$$

$$\sigma_{xm} = 0$$

Se tendría que:

$$\sigma_a = \sigma_{xa} \quad \text{Ec. 4-72}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3\tau_{xym}^2} \quad \text{Ec. 4-73}$$

#### 4.2.2.3.10.1 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.

Se encuentran en la siguiente relación:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad \text{Ec. 4-74}$$

Donde:

- $S_e$  : Límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico
- $S'_e$  : Límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria
- $k_a$  : Factor de superficie
- $k_b$  : Factor de tamaño
- $k_c$  : Factor de confiabilidad
- $k_d$  : Factor de temperatura
- $k_e$  : Factor de modificación por concentración de esfuerzos
- $k_f$  : Factor de efectos diversos

### Límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria $S_e$

El límite de resistencia a la fatiga de la viga rotatoria se determina por la siguiente expresión. (Siempre que el material sea dúctil):

Para el caso de materiales dúctiles:

$$S_e = 0,5 S_{ut} \text{ si } S_{ut} \leq 200 \text{ Kpsi (1400 MPa)} \quad \text{Ec. 4-75}$$

$$S_e = 100 \text{ Kpsi cuando } S_{ut} > 200 \text{ Kpsi (1400 MPa)} \quad \text{Ec. 4-76}$$

Para el caso de materiales frágiles:

$$S_e = 0,45 S_{ut} \text{ si } S_{ut} \leq 88 \text{ Kpsi (600 MPa)} \quad \text{Ec. 4-77}$$

$$S_e = 40 \text{ Kpsi cuando } S_{ut} > 88 \text{ Kpsi (600 MPa)} \quad \text{Ec. 4-78}$$

Aplicando el criterio de falla de la línea de Goodman modificado para esfuerzos combinados, se obtiene:

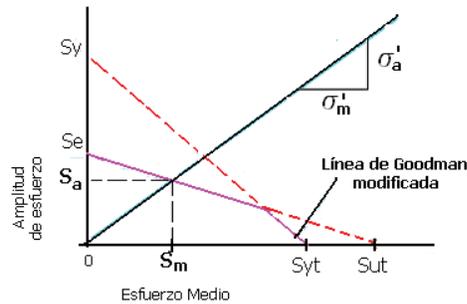


Figura 4.53 Diagrama de fatiga

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 334.

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} = \frac{1}{n}$$

Ec. 4-79

Procediendo al cálculo de  $S_a$  y  $S_m$

### Factor de superficie $K_a$

El factor de Superficie, se obtiene de la Figura (4.54). Para la selección del factor es necesaria la resistencia a la tensión, y el tipo de acabado del elemento.

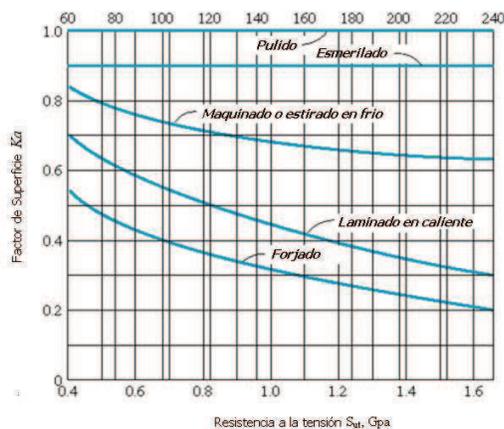


Figura 4.54 Factores de modificación de acabado superficial para el acero.

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 308.

**Factor de Tamaño  $K_b$** 

Para el cálculo del factor de tamaño se utiliza la siguiente expresión:

$$k_b = 0.869.d^{-0.097} \text{ si } 0.3" < d < 10" \quad \text{Ec. 4-80}$$

$$k_b = 1 \text{ si } d \leq 0.3" \quad \text{Ec. 4-81}$$

$$k_b = 1.189.d^{-0.097} \text{ si } 8\text{mm} < d < 250\text{mm} \quad \text{Ec. 4-82}$$

**Factor de confiabilidad  $K_c$** 

El factor de confiabilidad se determina con la ayuda de la siguiente Tabla:

| Confiabilidad | Variable estandarizada $Z_T$ | Factor de Confiabilidad $k_c$ |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0.50          | 0                            | 1.000                         |
| 0.90          | 1.288                        | 0.897                         |
| 0.95          | 1.645                        | 0.868                         |
| 0.99          | 2.326                        | 0.814                         |
| 0.999         | 3.091                        | 0.753                         |
| 0.999 9       | 3.719                        | 0.702                         |
| 0.999 99      | 4.265                        | 0.659                         |
| 0.999 999     | 4.753                        | 0.620                         |
| 0.999 999 9   | 5.199                        | 0.584                         |
| 0.999 999 99  | 5.612                        | 0.551                         |
| 0.999 999 999 | 5.997                        | 0.520                         |

**Tabla 4.18 Factor de confiabilidad**

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 319.

**Factor de temperatura  $K_d$** 

El cálculo del factor de temperatura se determina mediante las ecuaciones:

$$k_d = 1 \text{ si } T \leq 450^\circ\text{C} \text{ (840}^\circ\text{F)} \quad \text{Ec. 4-83}$$

$$k_d = 1 - (5.8 \times 10^{-3}) \times (T - 450) \text{ si } 450^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 4-84}$$

$$k_d = 1 - (3.2 \times 10^{-3}) \times (T - 840) \text{ si } 840^\circ\text{F} < T \leq 1020^\circ\text{F} \quad \text{Ec. 4-85}$$

### **Factor de concentración de esfuerzos $K_e$**

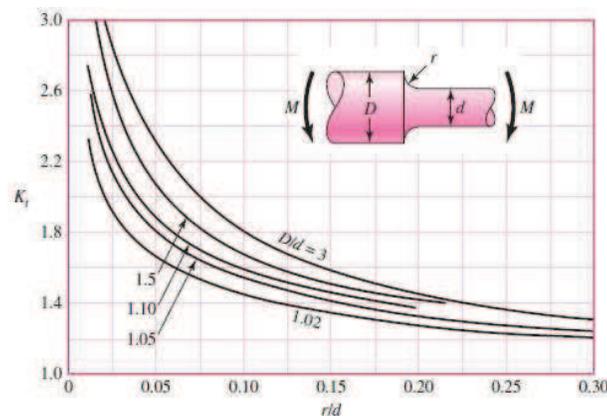
Para determinar el factor de concentración de esfuerzos, es necesario saber, el tipo de esfuerzo que está presente en el elemento a calcular, es decir, es necesario saber si el esfuerzo es flector o torsor.

Para determinar el factor de concentración de esfuerzos se utiliza la siguiente expresión:

$$k_e = \frac{1}{k_f} = \frac{1}{1 + q(k_t - 1)} \quad \text{Cuando el esfuerzo es flector} \quad \text{Ec. 4-86}$$

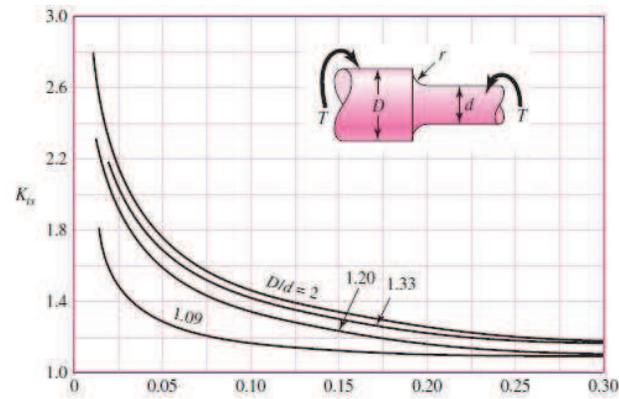
$$k_{es} = \frac{1}{k_{fs}} = \frac{1}{1 + q_s(k_{ts} - 1)} \quad \text{Cuando el esfuerzo es torsor} \quad \text{Ec. 4-87}$$

Para determinar los factores  $k_t$  o  $k_{ts}$ , se procede a ver el Manual de Diseño Mecánico, elaborado por Shigley, el cuál muestra los siguientes diagramas para factores teóricos de concentración de esfuerzo; ya sea para flexión o para torsión:



**Figura 4.55 Factor  $K_t$  para flexión**

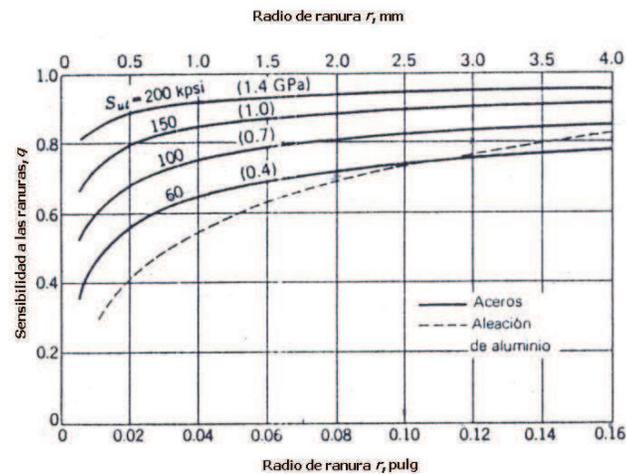
Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 884.



**Figura 4.56 Factor  $K_{ts}$  para torsión**

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 884.

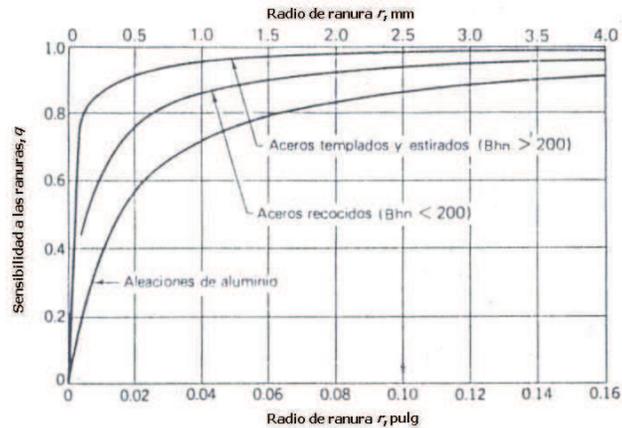
Para determinar el factor de sensibilidad a las ranuras para aceros ( $q$ ) se utiliza la figura:



**Figura 4.57 Diagrama de sensibilidad a las ranuras para aceros y aleaciones de aluminio forjado UNS A92024-T, sometidos a cargas flexionantes o axiales invertidas**

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 323.

Para determinar la sensibilidad a las ranuras para materiales sometidos a torsión invertida alternativamente, se utiliza la Figura (4.58)



**Figura 4.58 Diagrama de sensibilidad a las ranuras para materiales en torsión invertida alternativamente.**

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 324.

*Factor de efectos diversos  $K_e$ .*

Por lo general este factor es considerado igual a 1, excepto para engranes.

Luego de conocer los parámetros necesarios para el diseño dinámico, se inicia con los cálculos, de donde, se obtiene la siguiente tabla:

| Acero AISI | $S_{ut}$ (Kpsi) | $S_{ut}$ (MPa) | $S_e'$  |
|------------|-----------------|----------------|---------|
| 4340       | 158,65          | 1100           | 550     |
| 4140       | 158,65          | 1100           | 550     |
| 1045       | 94,34           | 650            | 325     |
| 1040       | 76              | 523,64         | 261,82  |
| 1018       | 59,5            | 410            | 205     |
| 1010       | 47              | 161,915        | 80,9575 |

**Tabla 4.19 Resultados de  $S_e'$  para diseño dinámico del árbol de transmisión**

Se ha determinado con el criterio de material dúctil, los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga. En la siguiente tabla se resumen los tipos de aceros que se han considerado para el diseño:

| Acero AISI | Ka   | Kb    | Kc | Kd | Ke | Kf |
|------------|------|-------|----|----|----|----|
| 4340       | 0,42 | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 4140       | 0,42 | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1045       | 0,56 | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1040       | 0,64 | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1018       | 0,7  | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1010       | 0,7  | 1,382 | 1  | 1  | 1  | 1  |

**Tabla 4.20 Factores que modifican  $S_e'$  de diseño dinámico del árbol de transmisión**

Finalmente, se determina los valores de  $S_e$ :

| Acero AISI | $S_e$   |
|------------|---------|
| 4340       | 319,333 |
| 4140       | 319,333 |
| 1045       | 251,596 |
| 1040       | 231,641 |
| 1018       | 198,374 |
| 1010       | 78,341  |

**Tabla 4.21 Valores de  $S_e$  para diseño dinámico del árbol de transmisión**

Para determinar el factor de seguridad falta calcular el esfuerzo medio  $S_m$  con la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{S_e}{\frac{\sigma_a'}{\sigma_m'} + \frac{S_e}{S_{ut}}}$$

Ec. 4-88

Para luego obtener:

$$n_d = \frac{S_m}{\sigma_m}$$

Ec. 4-89

Tabulando los datos queda:

| Acero AISI | Sm      | n <sub>d</sub> |
|------------|---------|----------------|
| 4340       | 392,251 | 29,291         |
| 4140       | 392,251 | 29,291         |
| 1045       | 276,214 | 20,626         |
| 1040       | 239,752 | 17,903         |
| 1018       | 196,870 | 14,701         |
| 1010       | 77,747  | 5,806          |

**Tabla 4.22 Factor de seguridad dinámico para diferentes aceros para el diseño del árbol de transmisión**

#### 4.2.2.3.11 Conclusión del diseño del árbol de transmisión

Para el diseño dinámico se tiene un resultado favorable en lo que respecta al factor de seguridad. Se puede observar que el acero AISI 1010 presenta el menor factor de seguridad de todos los aceros que se consideraron, pero tiene buena soldabilidad y no requiere de tratamientos térmicos posteriores. Sin embargo, se opta por el acero AISI 4340 (ASSAB 705) por ser el más utilizado en la construcción de maquinaria según se observa en catálogos especializados de aceros, y para soldar este tipo de material se cuenta con electrodos especiales disponibles en el mercado nacional.

#### 4.2.2.4 Selección de rodamientos para el árbol de transmisión

Para la selección de rodamientos se consideran las cargas que actúan sobre el árbol de transmisión. De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre del árbol de transmisión se tienen las siguientes fuerzas:

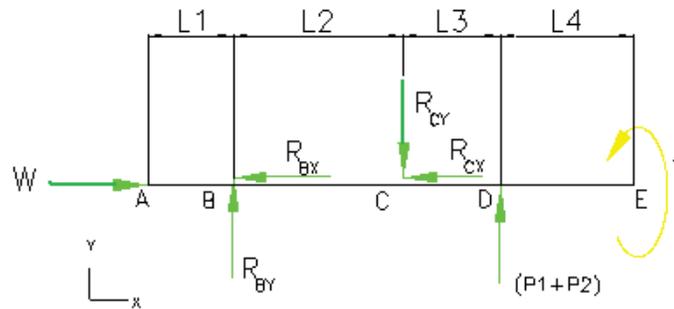


Figura 4.59 DCL del árbol de transmisión para la selección de rodamientos

Donde:

$$R_{BY} = 153,89 \text{ [N]}$$

$$R_{CY} = 423,18 \text{ [N]}$$

$$R_{BX} = 300,83 \text{ [N]}$$

$$R_{CX} = 91,17 \text{ [N]}$$

$$W = 392 \text{ [N]}$$

NOTA.- No se presenta cálculos para  $R_{BX}$  y  $R_{CX}$ , pero se los adopta con toda la responsabilidad del caso.

#### 4.2.2.4.1 Cálculo de la vida de los rodamientos

El cálculo de la vida útil depende del rodamiento en particular, para lo que se aplica la siguiente tabla:

| <b>Guía de valores requeridos de vida nominal L10h para diferentes clases de máquinas</b>  |                               |
|--|-------------------------------|
| <b>Clases de máquinas</b>  | <b>L10h horas de servicio</b> |
| Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, aparatos para uso médico.   | 300 a 3 000                   |
| Máquinas usadas intermitente o por cortos períodos: Máquinas-herramienta portátiles, aparatos elevadores para talleres, máquinas para la construcción.   | 3 000 a 8 000                 |
| Máquinas para trabajar con alta fiabilidad de funcionamiento por cortos períodos o intermitentemente: Ascensores, grúas para mercancías embaladas.   | 8 000 a 1 2000                |
| Máquinas para 8 [h] de trabajo diario no totalmente utilizadas:<br>Transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos para uso industrial, machacadoras giratorias.   | 10 000 a 25 000               |
| Máquinas para 8[h] de trabajo diario totalmente utilizadas: Máquinas-herramientas, máquinas para trabajar la madera, máquinas para la industria mecánica general, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipo de imprenta, separadores y centrifugos. | 20 000 a 30 000               |
| Máquinas para trabajo continuo, 24 [h] al día: Cajas de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil.  | 40 000 a 50 000               |
| Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para trasatlánticos.   | 60 000 a 100 000              |
| Maquinaria eléctrica de gran tamaño, centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para la línea de eje de transatlánticos.  | » 100 000                     |

**Tabla 4.23** Tabla de horas de servicio para diferentes clases de máquinas

Fuente: SKF; Catálogo General; 1975: Pág. 30.

Para la presente máquina, se toma un valor de vida nominal de 10000 horas de servicio.

El análisis se realiza para el punto B por ser el que soporta la mayor carga, de allí se obtiene el resultado para los puntos B y C, ya que los rodamientos de rodillo cónico admiten su uso en pares.

Con la siguiente relación se determina la carga dinámica, es decir:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{300,83 \text{ N}}{153,89 \text{ N}} = 1,95$$

Buscando un valor  $e=0.35^{49}$ , que depende del diámetro del eje (25mm de acuerdo al cálculo del árbol de transmisión), se concluye que:

$$\frac{F_a}{F_r} \geq e$$

Por tanto, la carga equivalente sobre el rodamiento se calcula con la siguiente expresión:

$$P=0,4 F_r + Y \times F_a \text{ [KN]}$$

Ec. 4-90

Donde:

$$F_r = 0,15389 \text{ KN}$$

$$F_a = 0,30083 \text{ KN}$$

$$Y = 1,71 \text{ (valor adimensional dado en el catálogo, depende del tipo de rodamiento y del valor de e)}$$

$$P=0,4 F_r + Y \times F_a \text{ (KN)}$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.90), se tiene:

$$P=0,4 \times 0,153+1,71 \times 0,30083$$

$$P=0,57597 \text{ [KN]}$$

---

<sup>49</sup> Catálogo de rodamientos FAG,2000, pág. 369

Se determina la carga dinámica equivalente C con la siguiente expresión:

$$C = \frac{f_L}{f_n \times f_H} \times P \text{ [KN]} \quad \text{Ec. 4-91}$$

De donde:

$f_L$  = factor de esfuerzos dinámicos, para condiciones de servicio de un banco de pruebas (pág. 38 catálogo FAG)

$f_H$  = factor de dureza, depende del factor de servicio (pág. 35 catálogo FAG)

$f_n$  = factor de velocidad (pág. 39 catálogo FAG)

De acuerdo con lo descrito anteriormente, los factores tienen los siguientes valores:

$f_L$  = 3 para centrifugadoras (pág. 38 catálogo FAG)

$f_H$  = 1, temperatura de servicio < 120 °C

$f_n$  = 0,498 para cojinetes de rodillo y  $n$  = 340 rpm (pág. 39 catálogo FAG)

Luego:

$$C = \frac{3}{0,498 \times 1} \times 0,57597 \text{ [KN]}$$

De donde  $C = 3,769$  KN, valor con el cual se busca en catálogo un rodamiento que cumpla con este requerimiento, el cual es el de la serie 32205 cuya carga dinámica equivalente es  $C = 49$  KN. Si bien es cierto, los rodamientos de rodillo cónico de diámetros de eje menores tienen un valor de C mayor al que se ha encontrado en los cálculos, pero son diámetros menores al que se ha escogido.

Debe tomarse en cuenta que las dimensiones que se obtienen en los cálculos no siempre están acorde a la oferta nacional, por ello se adoptan valores aproximados, que cumplen con los criterios de selección.

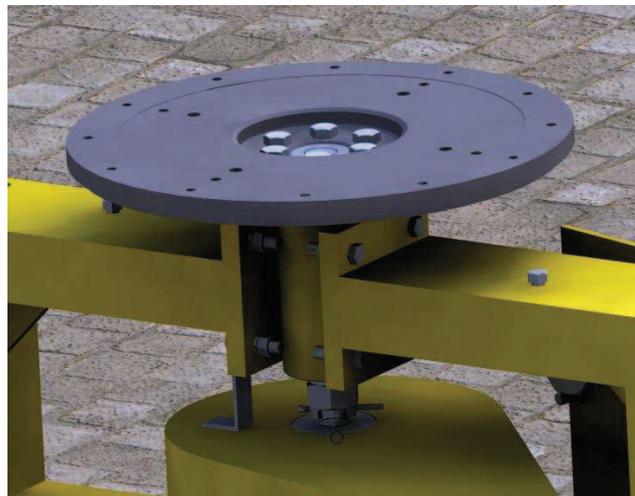
De acuerdo con el estudio anterior, el rodamiento escogido para el montaje en los puntos B y C tiene las siguientes dimensiones:

| SERIE | Diámetro interior | Diámetro exterior | Ancho |
|-------|-------------------|-------------------|-------|
| 32305 | 25                | 52                | 22    |

**Tabla 4.24 Dimensiones de los rodamientos para el árbol de transmisión**

Fuente: Catálogo de Rodamientos FAG; 2000; Pág. 359

#### 4.2.2.5 Selección de pernos para el acople entre el sistema rotatorio del plato y la estructura



**Figura 4.60 Acople entre el sistema rotatorio del plato y la estructura**

Fuente: Propia.

Los pernos utilizados para el acople en cuestión tienen como dimensiones  $\varnothing 3/8''$  (9,52 mm) x 25,4mm de longitud, de grado 8. Se determinará el factor de seguridad para comprobar la fiabilidad de los elementos.

#### 4.2.2.5.1 Diseño estático de los pernos superiores

Los pernos superiores están sometidos a tensión, por tanto se diseñarán con la teoría de falla en tensión simple.

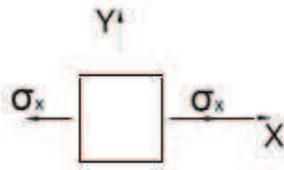


Figura 4.61 Tensión simple

##### 4.2.2.5.1.1 Determinación de la relación de rigidez

Para determinar la rigidez del perno se debe determinar la longitud de agarre del mismo. Cada perno soporta dos veces el espesor de placa, entonces:

$$\text{Agarre} = l = 0,008 \text{ m} + 0,008 \text{ m} = 0,016 \text{ m}$$

Luego, la constante de rigidez del perno es:

$$K_b = \frac{\pi d^2 E}{4l} \quad \text{Ec. 4-92}$$

Donde:

$k_b$  : Constante de rigidez del perno [kgf/m]

$d$  : Diámetro mayor [kgf]

$E$  : Módulo de elasticidad del acero  $E = 2,10 \times 10^6 \left[ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \right]$

$l$  : Longitud de agarre del perno [m]

Reemplazando valores en la ecuación (4.92), se tiene:

$$K_b = \frac{\pi (0,009)^2 2,1 \times 10^6}{4(0,016)} = 8349,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

La constante de rigidez de los elementos se encuentra con la siguiente expresión:

$$K_m = \frac{\pi E d}{2 \ln \left[ 5 \frac{l+0.5d}{l+2.5d} \right]} \quad \text{Ec. 4-93}$$

Donde:

|    |   |                       |
|----|---|-----------------------|
| km | : Constante de rigidez de los elementos | [kgf/m]               |
| d  | : Diámetro mayor                        | [kgf]                 |
| E  | : Módulo de elasticidad                 | [kgf/m <sup>2</sup> ] |
| l  | : Longitud de agarre del perno          | [m]                   |

Reemplazando valores en la ecuación (4.95), se tiene:

$$K_m = \frac{\pi 2,1 \times 10^6 0,009}{2 \ln \left[ 5 \left( \frac{0,016+0.5 0,009}{0,016+2.5 0,009} \right) \right]}$$

$$K_m = 30318,5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$$

La constante C, se la determina utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{kb}{kb + km} \quad \text{Ec. 4-94}$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.94), se tiene:

$$C = \frac{8349,7}{8349,7 + 30318,5}$$

$$C=0,21$$

#### 4.2.2.5.1.2 Selección de la precarga

La carga de prueba obtenida  $F_p$ , se la determina utilizando la siguiente expresión:

Ec. 4-95

$$F_p = S_p \times A_t$$

Donde:

$F_p$  : Carga de prueba [kgf]

$S_p$  : Resistencia a la tensión [kgf/m<sup>2</sup>]

$A_t$  : Área de tensión [m<sup>2</sup>]

Para determinar la resistencia a la tensión ( $S_p$ ), Resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) y la resistencia a la rotura ( $S_{ut}$ ), se utiliza el anexo E tabla (E.1), que muestra las especificaciones de pernos:

Se obtienen los siguientes resultados:

$$S_{ut} = 150 \text{ Kpsi} = 1,05 \times 10^8 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$$

$$S_p = 120 \text{ Kpsi} = 8,43 \times 10^7 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$$

$$S_p = 130 \text{ Kpsi} = 9,13 \times 10^7 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}$$

Según el diámetro mayor nominal, se encuentra el área esfuerzo tensión, en el anexo E, con la tabla (E.2), se muestra los esfuerzos de tensión según su tipo de paso y el diámetro del tornillo o perno.

Se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{Tabla} \rightarrow A_t = 0.000047 \text{m}^2$$

Además se conoce que la precarga debe estar en el rango siguiente:

$$0,6 F_p \leq F_i \leq 0,9 F_p \quad \text{Ec. 4-96}$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.95), se tiene:

$$F_p = (8,43 \times 10^7) \times 0,000047$$

$$F_p = 3962,1 \text{ Kg}$$

Por lo tanto se obtiene la precarga mínima y máxima:

$$F_i(\text{mín}) = 0,6 F_p$$

$$F_i(\text{mín}) = 2377,26 \text{ Kg}$$

$$F_i(\text{máx}) = 0,9 F_p$$

$$F_i(\text{máx}) = 3565,89 \text{ Kg}$$

Entonces reemplazando en la ecuación (4.96), se tiene:

$$2377,26 \text{ Kg} \leq F_i \leq 3565,89 \text{ Kg}$$

La precarga elegida para el caso va a ser la mayor y es:

$$F_i = 3565,89 \text{ Kg}$$

#### 4.2.2.5.1.3 Determinación del factor estático

Se obtiene la precarga a utilizar mediante la siguiente ecuación:

$$F_i = A_t \times S_y \times C \times P \times n \quad \text{Ec. 4-97}$$

Despejando el factor de seguridad se tiene:

$$n = \frac{A_t \times S_y - F_i}{C \times P} \quad \text{Ec. 4-98}$$

Reemplazando valores anteriores en la ecuación (4.98), se tiene:

$$n = \frac{0,00047 \times (9,133 \times 10^7) - 3565,89}{0,21 \times 20}$$

$$n = 173$$

Del resultado obtenido del factor de seguridad, se concluye que los pernos seleccionados cumplen con el requerimiento del equipo.

#### 4.2.2.5.2 Diseño estático de los pernos inferiores

Los pernos inferiores están sometidos a corte directo, aplastamiento y flexión, por lo que se analizará con las teorías para esfuerzos puros.

##### 4.2.2.5.2.1 Corte Puro

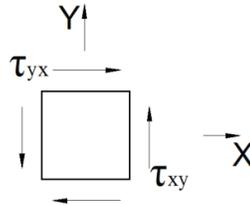


Figura 4.60 Corte puro

Fuente: Propia.

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d^2} = \frac{4(20)}{\pi(0.009)^2} = 314380 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}} = \frac{0.577 S_y}{\tau_{xy}} = \frac{0.577 (9,13 \times 10^7)}{314380}$$

$$n=167$$

##### 4.2.2.5.2.2 Aplastamiento

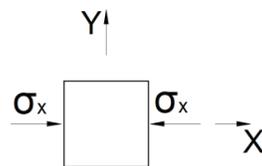


Figura 4.61 Aplastamiento

Fuente: Propia.

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = \frac{F}{t d} = \frac{20}{0.016(0.009)} = 138889 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{9,13 \times 10^7}{138889}$$

$$n=657$$

#### 4.2.2.5.2.3 Flexión

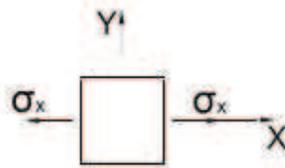


Figura 4.623 Flexión

Fuente: Propia.

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{F t}{I/c} = \frac{32F t}{\pi d^3} = \frac{32(20)(0.016)}{\pi(0.009)^3} = 4,47 \times 10^6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{9,13 \times 10^7}{4,47 \times 10^6}$$

$$n=20$$

De lo analizado anteriormente, se observa que el factor de seguridad en todos los casos es satisfactorio, lo cual quiere decir que los pernos cumplen también con los requerimientos del equipo.

### 4.2.3 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Este sistema está configurado como se muestra en la figura:

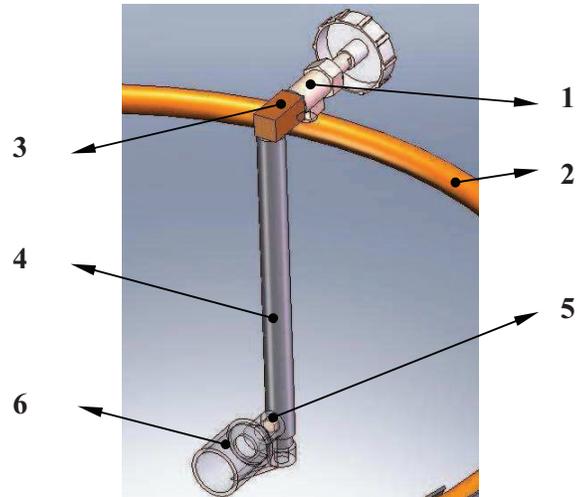


Figura 4.64 Partes del sistema de calentamiento

Fuente: Propia.

Consta de las siguientes partes:

5. 1.- Llave reguladora de gas
6. 2.- Cañería para gas
7. 3.- Acople en L
8. 4.- Acople para boquilla
9. 5.- Shiglor
10. 6.- Boquilla para gas

Como se indicó en la selección de alternativas para el sistema de calentamiento, el combustible utilizado es gas licuado de petróleo, el cual circula por la cañería. La intensidad de la flama es controlada con la llave reguladora, y la boquilla tiene un diseño especial que permite el paso suficiente de aire con lo que se logra una buena combustión. La coloración de la flama es un indicativo del funcionamiento, es decir, si el sistema funciona correctamente siempre se obtendrá una flama azulada.

El equipo en total cuenta con tres boquillas distribuidas simétricamente para calentar el molde, como se muestra en la figura.



**Figura4. 65 Funcionamiento del sistema de llamas**

Fuente: Propia

Este sistema ha sido desarrollado de una manera empírica, a medida que avanzaba la construcción del equipo. Durante este proceso iban apareciendo criterios e ideas para elaborar nuevos elementos, necesarios para el funcionamiento. El tiempo de calentamiento de la coquilla se determinará en el protocolo de pruebas.

#### 4.2.4 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Este sistema tiene el siguiente esquema:

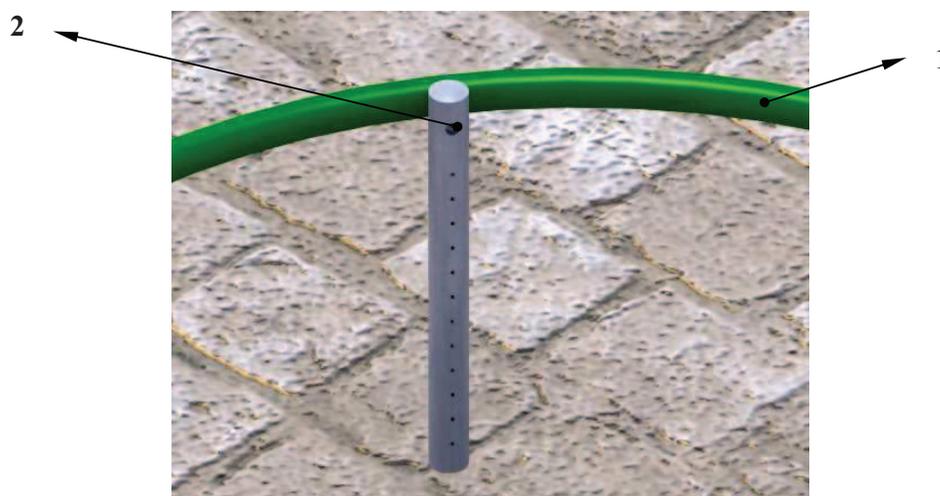


Figura 4.66 Partes del sistema de enfriamiento

Fuente: Propia

Consta de:

1. Cañería para agua
2. Boquilla para agua

El líquido refrigerante circula por la cañería y sale por las boquillas dirigiéndose hacia molde, con lo que se logra el enfriamiento. Este sistema fue desarrollado de manera similar al sistema de calentamiento, por lo que no hay necesidad de profundizar en el tema.

La cantidad de agua necesaria para enfriar el molde se determina experimentalmente en el protocolo de pruebas.



**Figura 4.67 Sistema de enfriamiento funcionado**

Fuente: Propia

#### **4.2.5 CONSTRUCCIÓN DEL EMBUDO ENVASADOR**

Este dispositivo consta de las siguientes partes:



**Figura 4.68 Esquema del sistema de envasado para la coquilla**

Fuente: Propia

1. Pivote
2. Brazo del envasador
3. Envasador

Tener precaución al momento de instalar este accesorio, porque la salida del embudo debe mantenerse a una distancia de la entrada de la coquilla que permita la salida de gases del interior del molde, así como el direccionamiento adecuado del metal.

## CAPÍTULO 5

### 5. ANÁLISIS DE COSTOS

Los costos se dividen en dos partes:

- COSTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA
- COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL

#### 5.1. COSTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA COQUILLA

Se tomarán en cuenta los costos directos e indirectos en la construcción de la coquilla en los que se incurren.

El costo del uso de maquinaria por hora incluye mano de obra, como se detalla:

| DETALLE                                  | CANTIDAD    | VALOR UNITARIO (USD) | VALOR TOTAL (USD) | TOTAL DE COSTOS (USD) |
|--|-------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| <b>COSTOS DIRECTOS</b>                   |             |                      |                   |                       |
| MODELO DE MADERA                         | 1           | 120                  | 120               |                       |
| TORNEADO (LAS DOS PARTES DE LA COQUILLA) | 20 horas    | 8/hora               | 160               |                       |
| TALADRADO                                | 6 horas     | 6/hora               | 36                |                       |
| ROSCADO CON MACHUELO                     | 6 orificios | 1/orificio           | 6                 |                       |
| <b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>             |             |                      |                   | <b>322</b>            |
| <b>COSTOS INDIRECTOS</b>                 |             |                      |                   |                       |
| TRANSPORTE                               |             |                      | 15                |                       |
| CILINDRO DE GLP                          | 2           | 2                    | 4                 |                       |
| DIESEL                                   | 20 (gal.)   | 1,03/gal             | 20,60             |                       |
| VARIOS                                   |             |                      | 10                |                       |
| IMPREVISTOS                              |             |                      | 20                |                       |
| <b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>           |             |                      |                   | <b>69,60</b>          |
| <b>COSTO TOTAL DE LA COQUILLA</b>        |             |                      |                   | <b>391,60</b>         |

Tabla 5.1 Costos de la coquilla

No se tomaron en cuenta los siguientes rubros:

- Utilización de los equipos y materiales del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, como: Horno de inducción, mezcladora de arena, tecla, herramientas, arena, resinas, hierro gris, entre otros.

## **5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL**

Para efectos de cálculo de los costos de construcción del equipo se toman en cuenta los siguientes rubros:

- Costos Directos
- Costos indirectos,

Dentro de los costos directos se encuentran:

- Costos de Materiales.
- Costos de Fabricación
- Costos de Diseño.

En los costos indirectos se encuentran:

- Costos de Pruebas.
- Costos por Imprevistos.
- Costos varios (transporte, alimentación, combustibles)

## 5.2.1 COSTOS DIRECTOS

### 5.2.1.1 Costos de materiales

Los costos de los materiales que son susceptibles de transformación no incluyen IVA, y se detallan a continuación:

| <b>COSTOS DE MATERIALES</b>                                |                 |                             |                          |
|--|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>MATERIAL</b>  | <b>CANTIDAD</b> | <b>VALOR UNITARIO (USD)</b> | <b>VALOR TOTAL (USD)</b> |
| <b>ESTRUCTURA</b>  |                 |                             |                          |
| PERFIL LAMINADO UPN 120                                    | 1 PERFIL 6m     | 160                         | 160                      |
| PLACA DE 8 mm  | 5,3 Kg          | 0,8/Kg                      | 4,27                     |
| <b>TOTAL MATERIAL ESTRUCTURA</b>                           |                 |                             | <b>164,27</b>            |
| <b>SOPORTE PARA EJE MOTRIZ</b>                             |                 |                             |                          |
| PLACA DE 8 mm  | 2,7 Kg          | 0,8/Kg                      | 2,16                     |
| EJE PERFORADO SKF 280                                      | 3,02 Kg         | 5,715/Kg                    | 17,26                    |
| <b>TOTAL MATERIAL SOPORTE PARA RODAMIENTO</b>              |                 |                             | <b>19,42</b>             |
| <b>EJE CON BRIDA</b>                                       |                 |                             |                          |
| EJE DE ACERO ASSAB 705 $\Phi$ 28mm                         | 1,18 kg         | 6,850/Kg                    | 8,083                    |
| EJE DE ACERO SAE 1018 $\Phi$ 5 1/2"                        | 2 cm            | 4,61/cm                     | 8,122                    |
| <b>TOTAL MATERIAL EJE CON BRIDA</b>                        |                 |                             | <b>16,21</b>             |
| <b>SOPORTE PARA POLEAS</b>                                 |                 |                             |                          |
| PLETINA DE 32 X 8  | 10cm            | 0,05/cm                     | 0,50                     |
| EJE PERFORADO ASTM A36 $\Phi$ 49 X 90                      |                 |                             | 3                        |
| <b>TOTAL MATERIAL SOPORTE PARA POLEAS</b>                  |                 |                             | <b>3,50</b>              |
| <b>EJE DE REDUCCIÓN</b>                                    |                 |                             |                          |
| EJE DE ACERO ASSAB 705 $\Phi$ 19mm                         | 0,52 kg         | 7,076/Kg                    | 3,680                    |
| <b>TOTAL MATERIAL EJE DE REDUCCIÓN</b>                     |                 |                             | <b>3,68</b>              |
| <b>PLACA SOPORTE PARA MOTOR</b>                            |                 |                             |                          |
| PLACA DE ASTM A36 DE 8 mm                                  | 3,83 Kg         | 0,8/Kg                      | 3,06                     |
| <b>TOTAL MATERIAL PLACA SOPORTE PARA MOTOR</b>             |                 |                             | <b>3,06</b>              |
| <b>PLACA SOPORTE PARA TEMPLADOR</b>                        |                 |                             |                          |
| PLACA DE ASTM A36 DE 8 mm                                  | 1,72 Kg         | 0,8/Kg                      | 1,42                     |
| <b>TOTAL MATERIAL PLACA SOPORTE PARA TEMPLADOR</b>         |                 |                             | <b>1,42</b>              |
| <b>VISAGRAS</b>  |                 |                             |                          |
| EJE SAE 1018 $\Phi$ 1"                                     | 10 cm           | 0,101/cm                    | 1,01                     |
| <b>TOTAL MATERIAL VISAGRAS</b>                             |                 |                             | <b>1,01</b>              |
| <b>SEGUROS PARA MOLDE</b>                                  |                 |                             |                          |
| EJE SAE 1018 $\Phi$ 1"                                     | 10 cm           | 0,101/cm                    | 1,01                     |
| PLETINA DE 1" X 8mm  | 20 cm           | 0,05/cm                     | 1                        |
| VARILLA CUADRADA 10X10                                     | 14 cm           | 0,05/cm                     | 0,7                      |
| <b>TOTAL MATERIAL SEGUROS PARA MOLDE</b>                   |                 |                             | <b>2,71</b>              |
| <b>CAÑERÍAS Y BOQUILLAS PARA GAS Y AGUA</b>                |                 |                             |                          |
| TUBERÍA API 5L CÉDULA 40 1/4 D.E = 13,7mm                  | 6m              | 1,77/m                      | 10,62                    |
| <b>TOTAL MATERIAL CAÑERÍAS Y BOQUILLAS PARA GAS Y AGUA</b> |                 |                             | <b>10,62</b>             |

| <b>COSTOS DE MATERIALES</b>   |                 |                             |                          |
|---|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>MATERIAL</b>   | <b>CANTIDAD</b> | <b>VALOR UNITARIO (USD)</b> | <b>VALOR TOTAL (USD)</b> |
| <b>MANIJA PARA MOLDE</b>  |                 |                             |                          |
| VARILLA LISA REDONDA $\Phi$ 10mm  | 50 cm           | 0,1/cm                      | 5                        |
| Pletina de 32x8   | 24 cm           | 0,05/cm                     | 1,2                      |
| <b>TOTAL MATERIAL MANIJA PARA MOLDE</b>   |                 |                             | <b>6,2</b>               |
| <b>TAPAS PROTECTORAS SUPERIOR E INFERIOR, PIVOTE Y BRAZO DE ENVASADOR</b>               |                 |                             |                          |
| PLETINA DE 2"X1/8   | 3 m             | 1,51/m                      | 4,53                     |
| LÁMINA DE TOL 1,5 mm  | ¼ de plancha    | 25/plancha                  | 6,25                     |
| <b>TOTAL MATERIAL TAPAS PROTECTORAS SUPERIOR E INFERIOR PIVOTE Y BRAZO DE ENVASADOR</b> |                 |                             | <b>10,78</b>             |
| <b>ACOPLE EN L DE BRONCE</b>  |                 |                             |                          |
| EJE CUADRADO DE BRONCE DE 1"  | 0,58 Kg         | 19,982/Kg                   | 11,59                    |
| <b>TOTAL MATERIAL ACOPLE EN L DE BRONCE</b>   |                 |                             | <b>11,59</b>             |
| <b>TOTAL MATERIALES</b>   |                 |                             | <b>248,27</b>            |

Tabla 5.2 Costos de materiales a ser procesados

Los elementos que son prefabricados se enlistan a continuación:

| <b>COSTOS DE ELEMENTOS PREFABRICADOS</b>                                   |                 |                             |                          |
|--|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>ELEMENTO</b>  | <b>CANTIDAD</b> | <b>VALOR UNITARIO (USD)</b> | <b>VALOR TOTAL (USD)</b> |
| <b>SISTEMA MOTRIZ DEL MOLDE</b>  |                 |                             |                          |
| RODAMIENTOS DE RODILLO CÓNICO NTN 33205                                    | 2               | 10                          | 20                       |
| RETENEDORES 25x52x10   | 2               | 2,5                         | 5                        |
| TUERCA DE CASTILLA M24   | 1               | 1                           | 1                        |
| PASADOR DE ALETAS 3/16"  | 1               | 0,25                        | 0,25                     |
| PERNOS 3/8" X 1" GRADO 8 CON TUERCA, ARANDELA SIMPLE Y ARANDELA DE PRESIÓN | 8               |                             | 2,72                     |
| <b>TOTAL SISTEMA MOTRIZ DEL MOLDE</b>                                      |                 |                             | <b>29,97</b>             |
| <b>SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO</b>                                |                 |                             |                          |
| POLEA SIMPLE $\Phi$ 8"   | 2               | 5,89                        | 11,78                    |
| POLEA SIMPLE $\Phi$ 3"   | 1               | 2,02                        | 2,02                     |
| RODAMIENTO 6203ZZ  | 2               | 1,10                        | 2,20                     |
| PRISIONERO M8  | 3               | 0,25                        | 0,75                     |
| CHAVETAS 6x6X40  | 3               | 0,80                        | 2,40                     |
| BANDA A-33   | 1               | 2,40                        | 2,40                     |
| BANDA A-38   | 1               | 2,40                        | 2,40                     |
| <b>TOTAL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO</b>                          |                 |                             | <b>23,95</b>             |

| <b>COSTOS DE ELEMENTOS PREFABRICADOS</b>           |                 |                             |                          |
|--|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>ELEMENTO</b>                                    | <b>CANTIDAD</b> | <b>VALOR UNITARIO (USD)</b> | <b>VALOR TOTAL (USD)</b> |
| <b>PATAS NIVELADORAS DE LA ESTRUCTURA</b>          |                 |                             |                          |
| VARILLA ROSCADA 5/8"                               | 1               | 6,00                        | 6,0                      |
| TUERCAS 5/8"                                       | 12              | 0,12                        | 1,44                     |
| ARANDELAS PLANAS                                   | 4               | 0,10                        | 0,40                     |
| <b>TOTAL PATAS NIVELADORAS DE LA ESTRUCTURA</b>    |                 |                             | <b>7,84</b>              |
| <b>SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO</b>     |                 |                             |                          |
| LLAVES PARA GAS                                    | 3               | 2,70                        | 8,10                     |
| TUERCA PARA LLAVE DE GAS                           | 3               | 0,50                        | 1,50                     |
| LLAVE ESFÉRICA 1"                                  | 2               | 3,80                        | 7,60                     |
| CANASTILLA   | 1               | 7,00                        | 7,00                     |
| PERNOS 3/16" X1/2" CON TUERCA                      | 4               | 0,15                        | 0,80                     |
| <b>TOTAL SISTEMA DE CALENTAMIENTO</b>              |                 |                             | <b>25</b>                |
| <b>SUJECIÓN Y CIERRE DEL MOLDE</b>                 |                 |                             |                          |
| PLATO DE HIERRO GRIS (VOLANTE DE MOTOR FORD F-150) | 1               | 10                          | 10                       |
| PERNOS M11 x 25,4 CON TUERCA Y ARANDELA SIMPLE     | 6               |                             | 3                        |
| PERNOS 5/16" x1 ¼                                  | 4               | 0,15                        | 0,60                     |
| ARANDELAS 5/16"                                    | 4               | 0,04                        | 0,16                     |
| PERNOS 3/8"  | 8               | 0,30                        | 2,40                     |
| ARANDELAS 3/8"                                     | 8               | 0,04                        | 0,32                     |
| <b>TOTAL SUJECIÓN Y CIERRE DE MOLDE</b>            |                 |                             | <b>16,48</b>             |
| <b>SISTEMA ELÉCTRICO</b>                           |                 |                             |                          |
| MOTOR TRIFÁSICO DE 1HP, 240V, 1735 RPM             | 1               | 55                          | 55                       |
| INTERRUPTOR DE BOTONERA ON/OFF                     | 1               | 4,64                        | 4,64                     |
| CABLE CA-0219 BO-1150                              | 1 m             | 2,72/m                      | 2,72                     |
| <b>TOTAL SISTEMA ELÉCTRICO</b>                     |                 |                             | <b>62,36</b>             |
| <b>TOTAL ELEMENTOS PREFABRICADOS</b>               |                 |                             | <b>165,60</b>            |

Tabla 5.3 Costos de materiales prefabricados

### 5.2.1.2. Costos de fabricación

Se toman en cuenta los precios por el uso de maquinaria y el precio de la mano de obra empleada.

A continuación, en la Tabla 5.4 se muestran los costos de mano de obra, y los costos por la utilización de máquinas herramientas.

| OPERACIÓN                      | COSTO USO DE MÁQUINA [USD/h] | COSTO OPERADOR [USD/h] |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Torneado                       | \$ 5.00                      | \$ 3.00                |
| Fresado                        | \$ 5.00                      | \$ 3.00                |
| Limado                         | \$ 0.00                      | \$ 2.00                |
| Esmerilado                     | \$ 3.00                      | \$ 1.00                |
| Amolado                        | \$ 3.00                      | \$ 1.00                |
| Grateado                       | \$ 3.00                      | \$ 2.00                |
| Soldadura eléctrica            | \$ 5.00                      | \$ 4.00                |
| Pintado                        | \$ 4.00                      | \$ 2.00                |
| Aserrado                       | \$ 0.00                      | \$ 2.00                |
| Cizallado                      | \$ 1.00                      | \$ 2.00                |
| Remachado                      | \$ 0.00                      | \$ 1.00                |
| Taladrado                      | \$ 5.00                      | \$ 1.00                |
| Doblado de tubo                | \$ 2.00                      | \$ 1.00                |
| Doblado                        | \$ 2.00                      | \$ 1.00                |
| Taladro manual                 | \$ 0.00                      | \$ 1.00                |
| Soldadura Autógena             | \$ 5.00                      | \$ 3.00                |
| Roscado con machuelo o terraja | \$ 1.00                      | \$ 1.00                |

**Tabla 5.4 Costos de mano de obra y uso de máquina**

Determinados los costos por mano de obra y uso de maquinaria, se establecen los costos de fabricación. La Tabla 5.5 muestra los costos; por cada uno de los procesos utilizados para la construcción de cada uno de los elementos en la máquina.

| PIEZA                               | MAQUINARIA         | TOTAL HORAS | COSTO MÁQUINA | COSTO MANO DE OBRA | SUBTOTAL |
|-------------------------------------|--------------------|-------------|---------------|--------------------|----------|
| <b>ESTRUCTURA</b>                   | Sierra             | 2.00        | \$ 0.00       | \$ 4.00            | \$ 4.00  |
|                                     | Lima               | 1.00        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Suelda             | 2.00        | \$ 10.00      | \$ 8.00            | \$ 18.00 |
|                                     | Amoladora          | 0.50        | \$ 1.50       | \$ 0.50            | \$ 2.00  |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 0.50            | \$ 0.50  |
|                                     | Grata              | 0.25        | \$ 0.75       | \$ 0.50            | \$ 1.25  |
|                                     | Pintura            | 2.00        | \$ 8.00       | \$ 2.00            | \$ 10.00 |
| <b>SOPORTE PARA EJE MOTRIZ</b>      | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Torno              | 8.00        | \$ 40.00      | \$ 24.00           | \$ 64.00 |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
|                                     | Suelda             | 1.00        | \$ 5.00       | \$ 4.00            | \$ 9.00  |
| <b>EJE CON BRIDA</b>                | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Torno              | 4.00        | \$ 20.00      | \$ 12.00           | \$ 32.00 |
|                                     | Taladro            | 1.00        | \$ 5.00       | \$ 1.00            | \$ 6.00  |
|                                     | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50  |
| <b>SOPORTE PARA POLEAS</b>          | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Torno              | 2.00        | \$ 10.00      | \$ 6.00            | \$ 16.00 |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
|                                     | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50  |
|                                     | Amoladora          | 0.25        | \$ 0.75       | \$ 0.25            | \$ 1.00  |
| <b>EJE DE REDUCCIÓN</b>             | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Torno              | 2.00        | \$ 10.00      | \$ 6.00            | \$ 16.00 |
|                                     | Fresado            | 2.00        | \$ 10.00      | \$ 6.00            | \$ 16.00 |
| <b>PLACA SOPORTE PARA MOTOR</b>     | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
| <b>PLACA SOPORTE PARA TEMPLADOR</b> | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
| <b>VISAGRAS</b>                     | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
|                                     | Torno              | 2.00        | \$ 10.00      | \$ 6.00            | \$ 16.00 |
| <b>SEGUROS PARA MOLDE</b>           | Sierra             | 1.00        | \$ 0.00       | \$ 2.00            | \$ 2.00  |
|                                     | Torno              | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 1.50            | \$ 4.00  |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
|                                     | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50  |
|                                     | Esmerilado         | 0.50        | \$ 1.50       | \$ 0.50            | \$ 2.00  |
|                                     | Lima               | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00  |
| <b>CAÑERÍAS PARA GAS Y AGUA</b>     | Sierra             | 0.25        | \$ 0.00       | \$ 0.50            | \$ 0.50  |
|                                     | Doblado            | 5.00        | \$ 10.00      | \$ 5.00            | \$ 15.00 |
|                                     | Rosca con Machuelo | 0.50        | \$ 0.50       | \$ 0.50            | \$ 1.00  |
|                                     | Suelda autógena    | 0.25        | \$ 1.25       | \$ 0.75            | \$ 2.00  |
| <b>BOQUILLAS PARA GAS Y AGUA</b>    | Sierra             | 1.00        | \$ 0.00       | \$ 2.00            | \$ 2.00  |
|                                     | Torno              | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 1.50            | \$ 4.00  |
|                                     | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50  |
|                                     | Esmerilado         | 0.50        | \$ 1.50       | \$ 0.50            | \$ 2.00  |
| <b>MANIJA PARA MOLDE</b>            | Sierra             | 1.00        | \$ 0.00       | \$ 2.00            | \$ 2.00  |
|                                     | Taladro            | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 0.50            | \$ 3.00  |
|                                     | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50  |
|                                     | Esmerilado         | 0.25        | \$ 0.75       | \$ 0.25            | \$ 1.00  |
|                                     | Grata              | 0.25        | \$ 0.75       | \$ 0.50            | \$ 1.25  |

| PIEZA  | MAQUINARIA         | TOTAL HORAS | COSTO MÁQUINA | COSTO MANO DE OBRA | SUBTOTAL      |
|--|--------------------|-------------|---------------|--------------------|---------------|
| <b>TAPAS PROTECTORAS SUPERIOR E INFERIOR</b> | Sierra             | 0.25        | \$ 0.00       | \$ 0.50            | \$ 0.50       |
|  | Doblado            | 1.00        | \$ 2.00       | \$ 1.00            | \$ 3.00       |
|  | Cizallado          | 1.00        | \$ 2.00       | \$ 1.00            | \$ 3.00       |
|  | Suelda             | 1.00        | \$ 5.00       | \$ 4.00            | \$ 9.00       |
|  | Grata              | 0.25        | \$ 0.75       | \$ 0.50            | \$ 1.25       |
|  | Pintura            | 1.00        | \$ 4.00       | \$ 2.00            | \$ 6.00       |
| <b>ACOPLE EN L DE BRONCE</b>                 | Sierra             | 1.00        | \$ 0.00       | \$ 2.00            | \$ 2.00       |
|  | Torno              | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 1.50            | \$ 4.00       |
|  | Rosca con Terraaja | 0.50        | \$ 0.50       | \$ 0.50            | \$ 1.00       |
|  | Rosca con machuelo | 0.50        | \$ 0.50       | \$ 0.50            | \$ 1.00       |
|  | Lima               | 0.25        | \$ 0.00       | \$ 0.50            | \$ 0.50       |
| <b>CANASTILLA</b>                            | Suelda autógena    | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 1.50            | \$ 4.00       |
| <b>PATAS NIVELADORAS DE LA ESTRUCTURA</b>    | Sierra             | 0.50        | \$ 0.00       | \$ 1.00            | \$ 1.00       |
|  | Torno              | 0.25        | \$ 1.25       | \$ 0.75            | \$ 2.00       |
|  | Suelda             | 0.50        | \$ 2.50       | \$ 2.00            | \$ 4.50       |
| <b>TOTAL COSTOS DE FABRICACIÓN</b>           |                    |             |               |                    | <b>341,75</b> |

Tabla 5.5 Costos de Fabricación

### 5.2.1.3. Costos de diseño

En los costos de diseño se consideran los siguientes valores:

| DESCRIPCIÓN                           | CANTIDAD | VALOR UNITARIO (USD) | VALOR TOTAL (USD) | TOTAL DE COSTOS (USD) |
|---------------------------------------|----------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| USO DE INTERNET                       |          |                      | 200               |                       |
| OBTECIÓN DE BIBLIOGRAFÍA              |          |                      | 300               |                       |
| USO DE EQUIPOS DE COMPUTACIÓN         |          |                      | 300               |                       |
| DOCUMENTACIÓN Y ELABORACIÓN DE PLANOS |          |                      | 300               |                       |
| <b>TOTAL COSTOS DE DISEÑO</b>         |          |                      |                   | <b>1100</b>           |

Tabla 5.6 Costos de diseño

## 5.2.2 COSTOS INDIRECTOS

### 5.2.2.1 Costos de Pruebas

Los costos de pruebas se detallan a continuación:

| DESCRIPCIÓN                        | CANTIDAD    | VALOR UNITARIO (USD) | VALOR TOTAL (USD) | TOTAL DE COSTOS (USD) |
|------------------------------------|-------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| CILINDRO DOMÉSTICO DE GAS          | 2           | 2                    | 4                 |                       |
| VÁLVULA INDUSTRIAL DE GAS          | 1           | 3                    | 3                 |                       |
| TEFLÓN                             | 1 rollo     | 1                    | 1                 |                       |
| ALCOHOL PARA MECHERO               | 100 ml      | 0,60                 | 0,60              |                       |
| FÓSFOROS                           | 1 cajetilla | 0,15                 | 0,15              |                       |
| <b>TOTAL COSTOS DE LAS PRUEBAS</b> |             |                      |                   | <b>8,75</b>           |

Tabla 5.7 Costos de pruebas

Cabe indicar que el aluminio utilizado en las pruebas fue proporcionado en el laboratorio de fundición, por lo que no es considerado en este rubro.

### 5.2.2.2 Costos Varios

Los costos varios se detallan a continuación:

| DESCRIPCIÓN                | VALOR TOTAL (USD) | TOTAL DE COSTOS (USD) |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|
| TRANSPORTE Y MOVILIZACIÓN  | 400               |                       |
| GASTOS VARIOS              | 40                |                       |
| <b>TOTAL COSTOS VARIOS</b> |                   | <b>440</b>            |

Tabla 5.8 Costos varios

### 5.2.2.3 Costos por imprevistos

Para imprevistos que se puedan generar durante la construcción, así como en las pruebas a realizar, se considera un 5% del costo total de la máquina construida. Por lo que este costo tendría un valor de \$17 usd.

### 5.2.3 COSTO TOTAL DEL EQUIPO

El costo total se detalla a continuación:

| DETALLE   | VALOR TOTAL (USD) | TOTAL DE COSTOS (USD) |
|---|-------------------|-----------------------|
| <b>COSTOS DIRECTOS</b>  |                   |                       |
| TOTAL MATERIALES  | 248,27            |                       |
| TOTAL ELEMENTOS PREFABRICADOS                                     | 165,60            |                       |
| TOTAL COSTOS DE FABRICACIÓN                                       | 341,75            |                       |
| TOTAL COSTOS DE DISEÑO  | 1100              |                       |
| IMPUESTOS (12% DEL COSTO DE MATERIALES Y ELEMENTOS PREFABRICADOS) | 49,66             |                       |
| <b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>                                      |                   | <b>1925,28</b>        |
| <b>COSTOS INDIRECTOS</b>  |                   |                       |
| TOTAL COSTOS DE LAS PRUEBAS                                       | 8,75              |                       |
| TOTAL COSTOS VARIOS   | 440               |                       |
| COSTOS POR IMPREVISTOS  | 17                |                       |
| <b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>                                    |                   | <b>465,17</b>         |
| <b>COSTO TOTAL DEL EQUIPO</b>                                     |                   | <b>2390,45</b>        |

Tabla 5.9 Costo total del equipo

## CAPÍTULO 6

### 6. PROTOCOLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1. PROTOCOLO DE PRUEBAS

En esta sección se consideran las pruebas que deben efectuarse al equipo para garantizar su funcionamiento, una vez que éste se haya construido e instalado. Con esta consideración, se pone en marcha cada uno de los sistemas que conforman el equipo: calentamiento, enfriamiento, rotación del molde.

Se acciona individualmente cada sistema:

- Comprobar que la coquilla se encuentre bien cerrada, cerciorarse que no haya presencia de cuerpos extraños en el interior de la canastilla, luego encender el motor eléctrico para comprobar su funcionamiento.



Figura 6.1 Funcionamiento del sistema de rotación del molde

- Encender el sistema de llamas y dejarlo funcionando aproximadamente 3 minutos, apagarlo y volver a encenderlo para comprobar su eficacia. El molde se encuentra girando durante este proceso.
- Cerrar la llave general de paso de gas, ésta consiste en una llave de media vuelta acoplada a la cañería de gas, antes de colar el metal; Con ello se evita que el metal líquido se mezcle con los gases de combustión y queden atrapados durante la solidificación, con lo que se producen defectos de fundición.



**Figura 6.2 Funcionamiento del sistema de llamas**

- Para comprobar el sistema de enfriamiento puede conectarse el equipo a una bomba o al sistema de agua potable. El control se realiza con una llave de media vuelta y debe accionarse inmediatamente después del colado. El agua de enfriamiento sale por un ducto ubicado en un costado de la canastilla, y puede desembocar en un recipiente.



**Figura 6.3 Funcionamiento del sistema de enfriamiento**

## 6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- a. En lo que refiere al equipo, todos los sistemas trabajaron adecuadamente, el funcionamiento es silencioso demostrando que el ensamblaje es correcto.
- b. Con los productos se obtienen los siguientes resultados:
  - La mala operación de colado produce piezas incompletas. El llenado del molde debe ser continuo y la colada debe estar suficientemente caliente; Si esto no ocurre, el primer flujo de metal líquido que ingresa a la cavidad se solidifica impidiendo que el flujo restante complete la operación, por tanto, solamente se llena la mazarota de la coquilla.



**Figura 6.4 Pieza incompleta por mala operación de colado**

- En la figura anterior se diferencia claramente que el colado fue hecho en dos etapas.
- El número de revoluciones del molde es un parámetro importante para el colado centrífugo. Si es elevado, el gas del ambiente queda atrapado en la colada y al momento de solidificar éste no alcanza a salir, por lo que la pieza terminada presenta sopladuras con la forma del gas que quedó atrapado.



**Figura 6.5 Volante centrifugado a altas revoluciones**

- En la figura anterior se observa claramente la cavidad dejada por el gas que quedó atrapado en la colada, en este caso el molde se llenó a una velocidad aproximada de 600 rpm. Un motivo más para encontrar ese defecto fue el mantener encendido el sistema de llamas durante el proceso de llenado del molde y una colada que no ha sido lo suficientemente sobrecalentada. Por tanto, el número ideal de revoluciones es aproximadamente de 300 rpm.
- Se tiene también el caso en el cual el molde no se mueve, en donde se observa que el diseño de la coquilla no es adecuado para trabajar estáticamente. Como resultado se tiene una figura con rechupe.



**Figura 6.6 Volante colado con molde estático**

- Nótese que no se reproduce exactamente el detalle del aro del volante (izquierda), demostrando que la rotación ayuda a un mejor llenado del molde.

- Cuando el proceso es realizado correctamente se obtiene un volante de buena calidad, lo cual indica la ventaja sobre otros procesos de fundición.



**Figura 6.7 Volante centrifugado correctamente elaborado**

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. CONCLUSIONES

1. El objetivo general planteado, de dar a conocer a las futuras generaciones de estudiantes que utilizan el laboratorio de fundición, un proceso que permite obtener piezas fundidas de buena calidad superficial y dimensional, se ha cumplido exitosamente.
2. Se construye el equipo de colado centrífugo vertical con el cual se demuestra el principio de la fundición centrífuga, determinando los parámetros que rigen el proceso y la influencia que tienen sobre el producto final.
3. De acuerdo a la teoría investigada, se aconsejaba que la velocidad de rotación durante el colado debía incrementarse, por lo que en los inicios del diseño se había considerado el uso de una caja de cambios para variar la velocidad, misma que fue construida y probada su funcionamiento por los investigadores. Sin embargo, se debe anotar que este aditamento no dio resultado por los materiales utilizados en su elaboración. Así también, no se consideró el uso del variador de frecuencia para este equipo por el costo y por la poca funcionalidad que presta. Por lo tanto, el equipo trabaja a un solo régimen de revoluciones (aproximadamente 333 rpm).
4. El equipo que se ha construido y diseñado es versátil, de tal manera que es posible intercambiar los moldes para obtener diferentes diseños de productos, en lo que se refiere al proceso.
5. El equipo es de fácil manejo, lo que permite que sea operado por una sola persona.
6. De acuerdo al protocolo de pruebas, se pudo constatar que los seguros axiales de la coquilla no fueron necesarios para este tipo de productos (volantes de aluminio); El peso de la tapa superior (hierro gris) es el suficiente para impedir que la misma se levante durante el proceso de colado. En el caso de que se ensaye con otro tipo de material y/o diseño de moldura, por precaución deberían

colocarse nuevamente los seguros hasta ver los resultados que de allí se obtuvieren.

7. Para el proceso de construcción del equipo los materiales, maquinaria y herramientas son de fácil acceso.
8. Luego de diversos ensayos (moldeo en arena, coquilla del equipo estática) se comprobó que los volantes centrifugados son de óptima calidad. Cabe resaltar que la calidad de la pieza terminada tiene relación directa con la calidad del molde.
9. Se han aplicado todos los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera. Pero si hay que anotar que no se pudo contar con la maquinaria y el personal calificado para la construcción del equipo, demostrando una actitud contraria el personal del laboratorio de fundición, poniendo a disposición todo el laboratorio y el asesoramiento.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

1. Aspirando a que la presente investigación sirva de motivación para el estudio y desarrollo de nuevos proyectos en la rama de la fundición; las autoridades de la facultad deberían destinar recursos e incentivar a que los futuros profesionales desarrollen su potencial acorde a su preparación académica, buscando soluciones a las necesidades de la facultad y de la producción nacional.
2. En base a este proyecto deben realizarse más estudios para perfeccionar el proceso, analizando los resultados que se obtendrían si se varía la velocidad de rotación durante el colado inclusive ensayando con velocidades diferentes a la establecida sin variación alguna.
3. Incentivar al alumnado de la facultad a desarrollar nuevos equipos para implementarlos en el laboratorio de fundición para las prácticas de las nuevas generaciones.
4. En el manejo de los equipos del laboratorio deben tenerse presente las indicaciones para el uso de los mismos, respetando también las normas de seguridad establecidas.

5. Para el diseño de cualquier tipo de equipos debe considerarse que cada uno de sus componentes presenten la menor dificultad de procesar, es decir, si la maquinaria con la que se cuenta es suficiente o adecuada para estos fines.
6. Los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional deben contar con más horas de práctica en los laboratorios de cada área de la malla curricular, para afianzar los conocimientos y disminuir las falencias con las que los nuevos profesionales están saliendo.
7. El personal operativo de los laboratorios tiene que colaborar con la orientación, del manejo de los equipos, a los estudiantes para el desarrollo de los proyectos realizados para la facultad.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDREW, PYTEL; Resistencia de Materiales; México; 1994
- ASTIGARRAGA U, J; Hornos industriales de Resistencias, Mc-Graw Hill; España; 1995; Sexta Edición.
- BAUMISTER, TIM y AVALLONE, EDGARD; MARK'S; Manual de Ingeniero Mecánico. 8<sup>va</sup> Edición; McGraw-Hill; New York
- CALDAS MOLINA, M; Preparación y Evaluación de Proyectos – Manual Práctico; Centro de Investigaciones Económicas – Universidad Tecnológica Equinoccial; Quito; 1997; 3<sup>era</sup> Edición.
- CENGEL, Yunus; BOLES, Michael; Termodinámica; Cuarta Edición; Mc Graw Hill, 2004, México
- DISEÑO PRELIMINAR Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA CRISOL QUE PERMITA FUNDIR HIERROS COLADOS UTILIZANDO DIESEL; Tesis de Ingeniería Mecánica; EPN, Quito, Ecuador, 1992
- D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition METALS HANDBOOK.
- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA COLADO CENTRÍFUGO; Sanz, M; Tesis de Ingeniería Mecánica; EPN, Quito, Ecuador, 1993.
- GOYOS, LEONARDO; Tecnología en la Fundición; Tomo II; ISPJAE.
- HERRERA, L y otros; Tutoría de la Investigación; Asociación de Facultades Ecuatorianas de Filosofía y Ciencias de la Educación; Quito; 2002; 1<sup>era</sup> Edición.
- INCROPERA, FRANK P; Fundamentos en la Transferencia de Calor; 4ta Edición; Prentice Hall, México; 1999.
- KALPAKJIAN, S; Manufactura Ingeniería y Tecnología; Cuarta Edición. México. Editorial Pearson Educación. 2002.
- LIBRO BLANCO PARA LA MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES - ARENAS DE MOLDEO EN FUNDICIONES FÉRREAS, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente, ESPAÑA, 2008
- SHIGLEY, J. Diseño en Ingeniería Mecánica; 4ta Edición; México DF; McGraw-Hill; 1985.

- TIMOSHENKO; Resistencia de Materiales; Editorial Thompson; 5ta Edición; 1978.
- TITOV, STEPANOV; Tecnología de los Procesos de Fundición, Editorial Mir, 1981.
- VARGAS T, J., 2004, “Producción por Virutaje - Fundamentos y Componentes de las Máquinas Herramientas”, Quito – Ecuador.

# **A N E X O S**

ANEXO A.  
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

# 1. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL

## 1.1. CONSIDERACIONES PREVIAS AL USO

Antes de usar el equipo:

- Verificar que la máquina esté adecuadamente nivelada para evitar vibraciones. Con las patas niveladoras y un nivel de burbuja colocado en el bastidor, regular hasta cumplir con dicho propósito.
- Revisar que las conexiones de agua y gas, instaladas en el equipo, se encuentren en buen estado y correctamente acopladas. Es recomendable hacer funcionar cada sistema (el sistema de enfriamiento con agua y el de calentamiento con gas) por separado previo al inicio del proceso.
- En lo posible, tratar de que la máquina se encuentre cercana a un sifón para evacuar el agua que sale después del enfriamiento del molde. En caso de no tener esa posibilidad, colocar un recipiente debajo de la canastilla, y así recolectar el agua que sale del enfriamiento.
- Verificar que durante la rotación del molde no exista interferencia con algún elemento, para ello se debe hacer girar el molde manualmente y verificar que no haya interferencia de ningún tipo.
- Chequear el funcionamiento del motor.
- Colocar antiadherente en la cavidad de la coquilla. Éste puede ser plumbagina o grafito.
- Revisar que las mitades del molde se encuentren bien acopladas, y los seguros axiales correctamente colocados.

## 1.2. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE COLADO CENTRÍFUGO VERTICAL

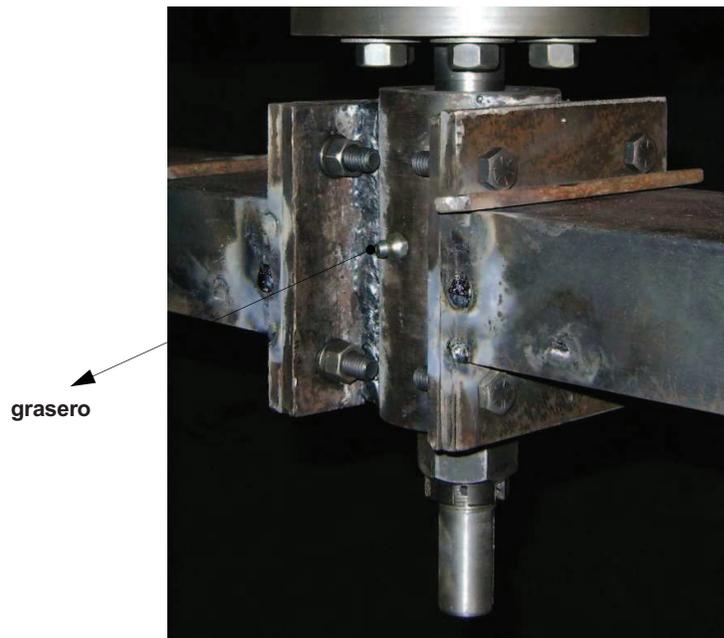
- Para el encendido de las boquillas controlar el paso de gas desde la llave de media vuelta acoplada a la cañería de gas (la de color anaranjado), entendiéndose que las llaves de cada boquilla han sido previamente reguladas.
- Encender las boquillas de gas, para ello es aconsejable utilizar un mechero de alcohol.
- Para iniciar la rotación del molde encienda el motor con el pulsador en la posición ON.
- Precalentar el molde en rotación durante 10 minutos previo a la primera colada. No olvidar que el dispositivo envasador (embudo) debe calentarse en conjunto con el molde hasta el momento del colado.
- Antes del llenado cerrar el paso del gas con la llave de media vuelta.
- Proceder al llenado del molde de forma uniforme y continua utilizando una cuchara de fundición, misma que deberá estar a una temperatura adecuada para evitar que el metal fundido se solidifique en su superficie.
- Una vez llenado el molde, abrir inmediatamente el paso del agua para el enfriamiento, hasta observar que no se produzca vapor.
- Cerrar el paso del agua y apagar el motor con el pulsador en la posición OFF. Levantar el envasador (el cual pivota en un soporte apoyado en la canastilla para facilitar la extracción)
- En la extracción de la pieza, levantar la tapa superior de la coquilla sujetándola de las manijas. Si hubiera dificultad en levantar la tapa superior significa que la pieza está aún dilatada, por lo que debe repetirse el proceso de enfriamiento por un periodo adicional (más corto que el anterior).
- Levantada la tapa, golpear ligeramente la pieza terminada en la mazarota de la misma, siguiendo la dirección marcada en el molde con un orificio en el contorno.
- Extraer la pieza terminada.
- En los colados posteriores, aplicar plumbagina uniformemente en las cavidades del molde si fuera necesario.

- Colocar nuevamente la tapa superior verificando que coincidan las marcas que tienen cada una de las partes del molde.
- Repetir las instrucciones anteriores para colados posteriores.

## 2. INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento del equipo es sencillo y no requiere de mayores cuidados, sin embargo es aconsejable seguir las siguientes instrucciones para garantizar la durabilidad de la máquina y sus accesorios:

- Los rodamientos del sistema giratorio del molde (rodamientos de rodillo cónico) se lubrican con grasa de grado 1 (grasa pesada) de litio. Es aconsejable llenar de grasa de la mencionada anteriormente a través del grasero que tiene el soporte, como se muestra en la figura:



- Lo aconsejable sería consultar los respectivos catálogos de rodamientos y de grasas para tener una mejor referencia acerca del mantenimiento de estos elementos, sin embargo, por experiencias de otras máquinas observadas, la lubricación debe hacerse, por seguridad, semestralmente, dependiendo del uso del equipo este periodo puede extenderse o disminuirse.

- En cuanto a las bandas se refiere, de igual manera consultar los manuales de bandas trapezoidales para determinar su vida útil.
- En el sistema de reducción de velocidades se cuenta con rodamientos de rígidos de esferas, los cuales son autolubricados. Sería aconsejable consultar un catálogo de rodamientos para determinar su periodo de cambio (vida útil).
- Si se considera un mantenimiento correctivo del equipo, los elementos más afectados serían solamente las bandas. Aún así, no habría inconveniente con este tipo de mantenimiento puesto que estos aditamentos son de fácil intercambio. Hay que advertir que las poleas deben estar correctamente alineadas para garantizar la duración de los elementos flexibles.

ANEXO B.

VELOCIDAD DE ROTACIÓN PARA MÁQUINAS DE COLADO CENTRÍFUGO  
VERTICAL

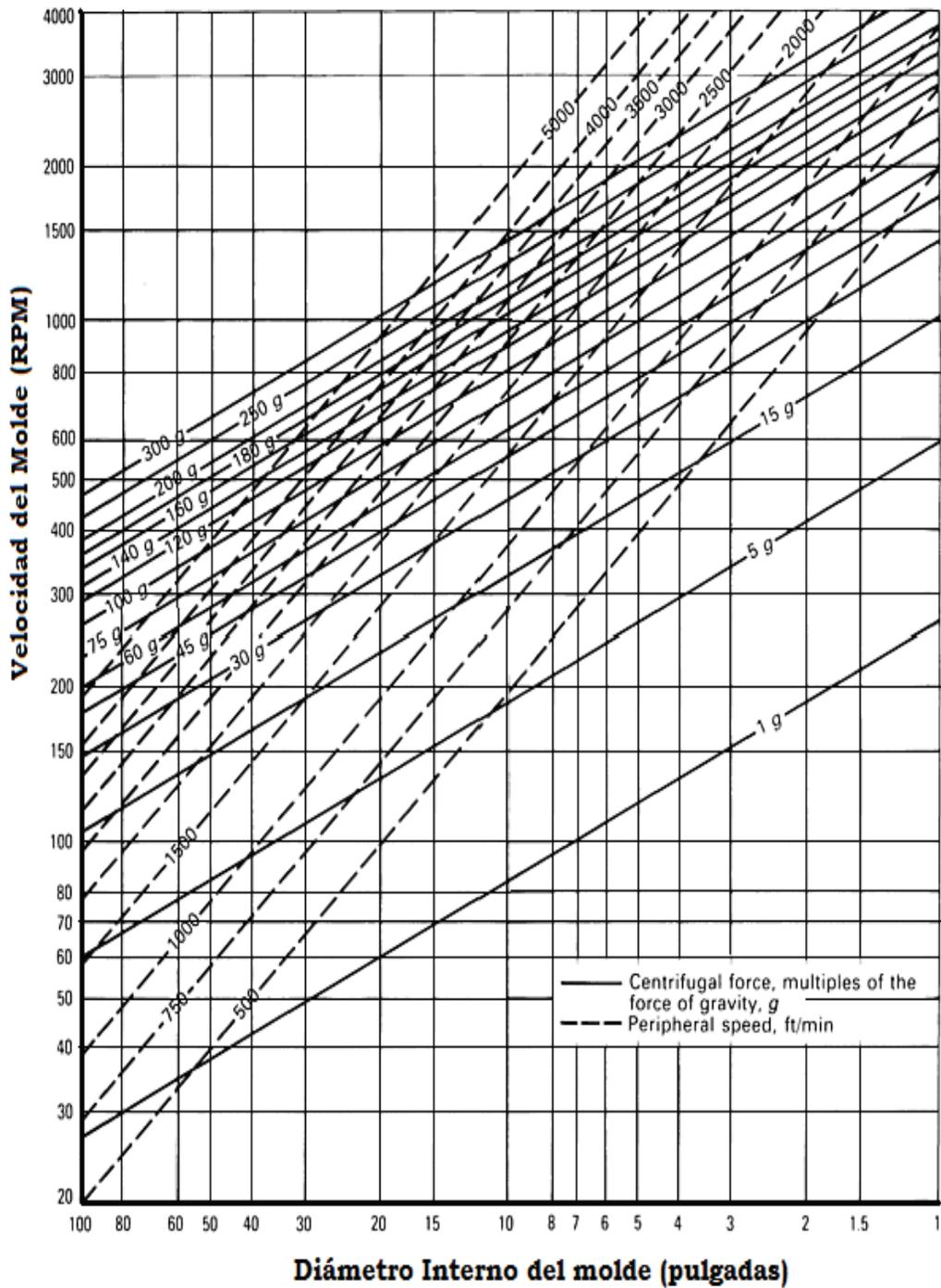


Figura B-1 Velocidad de rotación para máquinas de colado centrífugo vertical

FUENTE: D. M. STEFANESCU, ASTM International, The Materials Information Company, Volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, 1992, pág 652

ANEXO C.  
DIMENSIONES APLICABLES PARA LA CAJA DE MOLDEO

| Long | Altura de la caja H (mm) |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|------|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|      | 50                       | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| 300  | X                        | X  | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 350  | X                        | X  | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 400  | X                        | X  | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 450  |                          | X  | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 500  |                          | X  | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 550  |                          | X  | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 600  |                          | X  | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 650  |                          |    | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 700  |                          |    | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 750  |                          |    | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 800  |                          |    | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 900  |                          |    |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |     |      |
| 1000 |                          |    |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |     |     |      |
| 1100 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 1200 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 1400 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 1500 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 1600 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 1800 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 2000 |                          |    |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 2200 |                          |    |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 2400 |                          |    |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |     |     |      |
| 2500 |                          |    |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |
| 2600 |                          |    |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |
| 2800 |                          |    |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |
| 3000 |                          |    |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 3250 |                          |    |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 3500 |                          |    |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 3750 |                          |    |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 4000 |                          |    |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 4250 |                          |    |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 4500 |                          |    |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 4750 |                          |    |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 5000 |                          |    |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 5500 |                          |    |     |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    |
| 6000 |                          |    |     |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |
| 6500 |                          |    |     |     |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |
| 7000 |                          |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     | X   | X   | X   | X   | X   | X   |     |      |

Figura C-2 Dimensiones de la caja de moldeo

FUENTE: GOYOS LEONARDO, Tecnología de la Fundición Tomo II, ISPJAE, 1992, pág 62

ANEXO D.

PROPIEDADES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES SEGÚN CATALOGO DIPAC

**PERFILES LAMINADOS**  
**UPN**

**Especificaciones Generales**

|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| Calidad:         | ASTMA 36              |
| Otros catálogos: | Previa Consulta       |
| Longitud:        | 6,00 mts. Y 12,00 mts |
| Otros usos:      | Previa Consulta       |
| Acabado:         | Natural               |
| Otro acabado:    | Previa Consulta       |



| DENOMINACION | DIMENSIONES |         |         |         |         |           | TIPOS          |                |           |           |           |           |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | h<br>mm     | s<br>mm | g<br>mm | t<br>mm | R<br>mm | R1<br>cm4 | SECCION<br>cm2 | PESOS<br>kg/mt | Ix<br>cm4 | Iy<br>cm4 | Wx<br>cm3 | Wy<br>cm3 |
| UPN 50       | 50          | 38      | 5.00    | 7.00    | 7.00    | 3.50      | 7.12           | 5.59           | 26.40     | 9.12      | 10.60     | 3.75      |
| UPN 65       | 65          | 42      | 5.50    | 7.50    | 7.50    | 4.00      | 9.03           | 7.09           | 57.50     | 14.10     | 17.70     | 5.07      |
| UPN 80       | 80          | 45      | 6.00    | 8.00    | 8.00    | 4.00      | 1.10           | 8.64           | 106.00    | 19.40     | 25.50     | 6.36      |
| UPN 100      | 100         | 50      | 6.00    | 8.50    | 8.50    | 4.50      | 13.50          | 10.60          | 205.00    | 29.30     | 41.20     | 8.49      |
| UPN 120      | 120         | 55      | 7.00    | 9.00    | 9.00    | 4.50      | 17.00          | 13.40          | 364.00    | 45.20     | 60.70     | 11.10     |
| UPN 140      | 140         | 60      | 7.00    | 10.00   | 10.00   | 5.00      | 20.40          | 16.00          | 605.00    | 62.70     | 85.40     | 14.80     |
| UPN 160      | 160         | 65      | 7.50    | 10.50   | 10.50   | 5.50      | 24.00          | 18.80          | 905.00    | 85.30     | 116.00    | 18.30     |
| UPN 180      | 180         | 70      | 8.00    | 11.00   | 11.00   | 5.50      | 28.00          | 22.00          | 1350.00   | 114.00    | 150.00    | 22.40     |
| UPN 200      | 200         | 75      | 8.50    | 11.50   | 11.50   | 6.00      | 32.20          | 25.30          | 1910.00   | 148.00    | 191.00    | 27.00     |
| UPN 220      | 220         | 80      | 9.00    | 12.50   | 12.50   | 6.50      | 37.40          | 29.40          | 2690.00   | 197.00    | 245.00    | 33.60     |
| UPN 240      | 240         | 85      | 9.50    | 13.00   | 13.00   | 6.50      | 42.30          | 33.20          | 3600.00   | 248.00    | 300.00    | 39.60     |
| UPN 260      | 260         | 90      | 10.00   | 14.00   | 14.00   | 7.00      | 46.30          | 37.50          | 4820.00   | 317.00    | 371.00    | 47.70     |
| UPN 300      | 300         | 100     | 10.00   | 16.00   | 16.00   | 8.00      | 66.80          | 46.20          | 8030.00   | 495.00    | 536.00    | 67.80     |

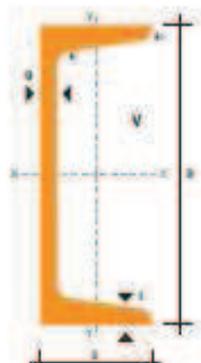


Figura D-3 Catálogo de perfiles en C

FUENTE: Catálogo de productos DIPAC.

ANEXO E.

ESPECIFICACIONES Y MARCAS DE IDENTIFICACIÓN PARA PERNOS  
TORNILLOS, ESPÁRRAGOS SEMS/ Y PERNOS U.

SAE Specifications for Steel Bolts

| SAE Grade No. | Size Range Inclusive, in        | Minimum Proof Strength,* kpsi | Minimum Tensile Strength,* kpsi | Minimum Yield Strength,* kpsi | Material                   | Head Marking  |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| 1             | $\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$  | 33                            | 60                              | 36                            | Low or medium carbon       |    |
| 2             | $\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$   | 55                            | 74                              | 57                            | Low or medium carbon       |    |
|               | $\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$  | 33                            | 60                              | 36                            |                            |   |
| 4             | $\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$  | 65                            | 115                             | 100                           | Medium carbon, cold-drawn  |    |
| 5             | $\frac{1}{4}$ -1                | 85                            | 120                             | 92                            | Medium carbon, Q&T         |    |
|               | $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ | 74                            | 105                             | 81                            |                            |   |
| 5.2           | $\frac{1}{4}$ -1                | 85                            | 120                             | 92                            | Low-carbon martensite, Q&T |   |
| 7             | $\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$  | 105                           | 133                             | 115                           | Medium-carbon alloy, Q&T   |  |
| 8             | $\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$  | 120                           | 150                             | 130                           | Medium-carbon alloy, Q&T   |  |
| 8.2           | $\frac{1}{4}$ -1                | 120                           | 150                             | 130                           | Low-carbon martensite, Q&T |  |

\*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

**Tabla E-4 Especificaciones y marcas de identificación para pernos tornillos, espárragos SEMS/ y pernos U.**

FUENTE: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 73, 250, 294, 302-364

| Diámetro mayor nominal, $d$ | Serie de paso basto |                                    |                                | Serie de paso fino |                                    |                                |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------|
|                             | Paso $p$            | Área de esfuerzo de tensión, $A_t$ | Área del diámetro menor, $A_r$ | Paso $p$           | Área de esfuerzo de tensión, $A_t$ | Área del diámetro menor, $A_r$ |
| 1.6                         | 0.35                | 1.27                               | 1.07                           |                    |                                    |                                |
| 2                           | 0.04                | 2.07                               | 1.79                           |                    |                                    |                                |
| 2.5                         | 0.45                | 3.39                               | 2.98                           |                    |                                    |                                |
| 3                           | 0.5                 | 5.03                               | 4.47                           |                    |                                    |                                |
| 3.5                         | 0.6                 | 6.78                               | 6.00                           |                    |                                    |                                |
| 4                           | 0.7                 | 8.78                               | 7.75                           |                    |                                    |                                |
| 5                           | 0.8                 | 14.2                               | 12.7                           |                    |                                    |                                |
| 6                           | 1                   | 20.1                               | 17.9                           |                    |                                    |                                |
| 8                           | 1.25                | 36.6                               | 32.8                           | 1                  | 39.2                               | 36.0                           |
| 10                          | 1.5                 | 58.0                               | 52.3                           | 1.25               | 61.2                               | 56.3                           |
| 12                          | 1.75                | 84.3                               | 76.3                           | 1.25               | 92.1                               | 86.0                           |
| 14                          | 2                   | 115                                | 104                            | 1.5                | 125                                | 116                            |
| 16                          | 2                   | 157                                | 144                            | 1.5                | 167                                | 157                            |
| 20                          | 2.5                 | 245                                | 225                            | 2                  | 272                                | 259                            |
| 24                          | 3                   | 353                                | 324                            | 2                  | 384                                | 365                            |
| 30                          | 3.5                 | 561                                | 519                            | 2                  | 621                                | 596                            |
| 36                          | 4                   | 817                                | 759                            | 2                  | 915                                | 884                            |
| 42                          | 4.5                 | 1120                               | 1050                           | 2                  | 1260                               | 1230                           |
| 48                          | 5                   | 1470                               | 1380                           | 2                  | 1670                               | 1630                           |
| 56                          | 5.5                 | 2030                               | 1910                           | 2                  | 2300                               | 2250                           |
| 64                          | 6                   | 2680                               | 2520                           | 2                  | 3030                               | 2980                           |
| 72                          | 6                   | 3460                               | 3280                           | 2                  | 3860                               | 3800                           |
| 80                          | 6                   | 4340                               | 4140                           | 1.5                | 4850                               | 4800                           |
| 90                          | 6                   | 5590                               | 5360                           | 2                  | 6100                               | 6020                           |
| 100                         | 6                   | 6990                               | 6740                           | 2                  | 7560                               | 7470                           |
| 110                         |                     |                                    |                                | 2                  | 9180                               | 9080                           |

**Tabla E-2 Diámetros y áreas de roscas métricas de paso fino y de paso basto (Dimensiones en milímetros).**

Fuente: SHIGLEY, J: Manual de Diseño Mecánico: Editorial McGraw-Hill: Cuarta Edición 1989: México; Pág. 382.

ANEXO F  
PLANOS