ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CÁMARA DE PRESIONES BAJAS PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE REDUCCIÓN DE POROSIDADES EN LAS ETAPAS DE COLADO Y SOLIDIFICACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA F.I.M. – E.P.N.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JHON SEBASTIÁN ARMAS VÁSQUEZ

armasjhon@yahoo.com

SANTIAGO JOSÉ CAVIEDES PASQUEL

sjcaviedesp@yahoo.es

DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO MSc.

fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, JHON SEBASTIÁN ARMAS VÁSQUEZ y SANTIAGO JOSÉ CAVIEDES PASQUEL, 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 correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.

_____ _____

Jhon Sebastián Armas Vásquez Santiago José Caviedes Pasquel

CERTIFICACIÓN

Certificamos que bajo nuestra dirección, el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por los señores: JHON SEBASTIÁN ARMAS VÁSQUEZ y SANTIAGO JOSÉ CAVIEDES PASQUEL.

_____

Ing. FAUSTO OVIEDO MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

_____

Ing. PATRICIO ESTUPIÑÁN MSc.

CODIRECTOR

DEDICATORIA

Para ese ser tan especial que fue mi abuelito Alonso, su recuerdo es un motivo para salir adelante en cada cosa que realice.

Sebastián.

A mi familia por su inquebrantable apoyo incondicional que pusieron en todo momento de mi formación profesional, por toda su inigualable orientación y por todos los valores inculcados los cuales han contribuido para alcanzar todos mis anhelos, metas y sueños.

Santiago.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el cariño, la paciencia y el apoyo incondicional que siempre me han tenido, a mis primos(as) que desde la infancia me prestaron su amistad; y a mi familia en general les agradezco el apoyo prestado y la unión que siempre se ha mantenido, como un legado de nuestros abuelitos.

Al Ing. Fausto Oviedo, por la orientación para la elaboración de la tesis, al Ing. Patricio Estupiñan por su paciencia y acertadas sugerencias y al Tnlgo. Fabián Peñaloza por su colaboración en la realización de las pruebas.

Al Sr. Luis Quillupangui por la amistad, acogimiento y guía durante la construcción de la cámara, además de los conocimientos transmitidos durante ese tiempo.

Por ultimo les agradezco a los amigos que me acompañaron durante este tiempo, hasta poder cumplir con esta meta.

Sebastián.

A toda mi familia por ser la razón para alcanzar todos mis ideales.

Al Sr. Luis Quillupangui y toda su familia por ayudarnos de una manera desinteresada en la construcción del prototipo, facilitándonos maquinas herramientas y su ayuda en todo momento.

Al Ingeniero Fausto Oviedo y al Tecnólogo Fabián Peñaloza por su dirección y estimulo durante el desarrollo del presente proyecto.

Al Ingeniero Patricio Estupiñan por su colaboración y conocimientos compartidos.

A “Todos los Nacidos Bajo la Luz de la Séptima Estrella” y a los panas con los que se compartieron experiencias pero sobretodo borracheras.

Santiago.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I 1

1. GENERALIDADES 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 OBJETIVOS 2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL 2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
1.3 JUSTIFICACIÓN 3
1.4 ALUMINIO 4
1.4.1 OBTENCIÓN DEL ALUMINIO 4
1.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO 5
1.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO 5
1.4.4 APLICACIONES DEL ALUMINIO 5
1.5 MACRODEFECTOS EN PIEZAS COLADAS 7
1.5.1 POROSIDADES 7
1.5.1.1 Porosidad de Contracción 8
1.5.1.1.1 La Porosidad Difusa 9
1.5.1.1.2 La Porosidad Axial 9
1.5.1.1.3 La Porosidad Local 10
1.5.2 RECHUPES 10
1.5.3 GRIETAS 10
1.5.4 ESCORIA 10
1.6 MÉTODOS PARA DETECCIÓN DE POROSIDADES 11
1.6.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS 11
1.6.1.1 Inspección Visual 11
1.6.1.2 Radiografiado 11
1.6.1.3 Ultrasonido 12
1.6.1.4 Gravimetría 12
1.6.2 MÉTODOS DESTRUCTIVOS 12
1.6.2.1 Análisis de Imagen mediante Mecanizado 12
1.6.2.2 Fusión al Vacío 13
1.6.3 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE GASES 13

1.7 FUSIÓN POR INDUCCIÓN EN VACÍO 14

CAPÍTULO II 16

2. FUNDAMENTO TEÓRICO 16

2.1 VACÍO 16

2.1.1 REGIONES DE PRESIÓN DE VACÍO 17

2.1.2 RANGOS DE VACÍO 17

2.2 SISTEMA DE VACÍO 18

2.2.1 CÁMARA DE VACÍO 18

2.2.2 BOMBA DE VACÍO 19

2.2.3 VÁLVULA DE REGULACIÓN 19

2.2.4 VACUÓMETRO 19

2.2.5 MANGUERAS 19

2.2.6 VÁLVULA DE PASO 20

2.2.7 SELLOS 20

2.2.8 VACUOSTATO 20

2.3 EQUIPO DE FUSIÓN AL VACÍO 20

2.3.1 TIPOS DE BOMBAS DE VACÍO 21

2.3.1.1 Bombas de Vacío según el Rango de Trabajo 22

2.3.1.1.1 Bomba de Membrana 22

2.3.1.1.2 Bomba Rotatoria de Paletas 23

2.3.1.1.3 Bomba de Pistón Rotatoria 24

2.3.1.1.4 Bomba Roots 24

2.3.2 HORNO DE INDUCCIÓN 25

CAPÍTULO III 27

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO 27

3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE VACÍO 27

3.1.1 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE VACÍO 28

3.1.2 PARÁMETROS FUNCIONALES DE DISEÑO DE LA CÁMARA 28

3.2 MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CÁMARAS DE VACÍO 29

3.3 ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA LA CÁMARA 30
3.3.1 CÁMARA CILÍNDRICA DISPUESTA VERTICALMENTE (ALTERNATIVA 1) 31
3.3.1.1 Partes Constitutivas 31
3.3.1.2 Descripción..... 31
3.3.1.3 Ventajas 32
3.3.1.4 Desventajas..... 32
3.3.2 CÁMARA PARALELEPÍPEDA (ALTERNATIVA 2) 33
3.3.2.1 Partes Constitutivas 33
3.3.2.2 Descripción..... 33
3.3.2.3 Ventajas 34
3.3.2.4 Desventajas..... 34
3.3.3 CÁMARA CILÍNDRICA DISPUESTA HORIZONTALMENTE (ALTERNATIVA 3) 34
3.3.3.1 Partes Constitutivas 35
3.3.3.2 Descripción..... 35
3.3.3.3 Ventajas 35
3.3.3.4 Desventajas..... 35
3.3.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS 36
3.3.4.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa 36
3.3.4.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados..... 36
3.3.4.3 Valoración y Factores de Incidencia..... 37
3.3.4.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones 37
3.3.4.5 Resultados y Conclusiones 39
3.3.4.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada 39
3.4 ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN..... 40
3.4.1 DESPLAZAMIENTO VERTICAL CON MECANISMO DE TIJERAS (ALTERNATIVA 1)..... 40
3.4.1.1 Partes Constitutivas 41
3.4.1.2 Descripción..... 41
3.4.1.3 Ventajas 41

3.4.1.4 Desventajas..... 41
3.4.2 DESPLAZAMIENTO VERTICAL CON DOBLE GATO MECÁNICO A MANIVELA (ALTERNATIVA 2)..... 42
3.4.2.1 Partes Constitutivas 42
3.4.2.2 Descripción..... 43
3.4.2.3 Ventajas 43
3.4.2.4 Desventajas..... 43
3.4.3 DESPLAZAMIENTO VERTICAL MEDIANTE DOBLE TORNILLO DE POTENCIA ACCIONADOS POR SIN FINES A TRAVÉS DE CORONAS (ALTERNATIVA 3) 44
3.4.3.1 Partes Constitutivas 44
3.4.3.2 Descripción..... 45
3.4.3.3 Ventajas 45
3.4.3.4 Desventajas..... 45
3.4.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS 46
3.4.4.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa 46
3.4.4.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados..... 47
3.4.4.3 Valoración y Factores de Incidencia..... 47
3.4.4.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones 47
3.4.4.5 Resultados y Conclusiones 49
3.4.4.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada 50
3.5 ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA DE BASCULAMIENTO DEL HORNO DE INDUCCIÓN 50
3.5.1 BASCULAMIENTO MEDIANTE LEVAS DE CONTORNO (ALTERNATIVA 1) 51
3.5.1.1 Partes Constitutivas 51
3.5.1.2 Descripción..... 51
3.5.1.3 Ventajas 52
3.5.1.4 Desventajas..... 52
3.5.2 BASCULAMIENTO MEDIANTE ENGRANAJES RECTOS (ALTERNATIVA 2) 52
3.5.2.1 Partes Constitutivas 53

3.5.2.2 Descripción 53
3.5.2.3 Ventajas 53
3.5.2.4 Desventajas 53
3.5.3 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS 54
3.5.3.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa 54
3.5.3.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados 54
3.5.3.3 Valoración y Factores de Incidencia 55
3.5.3.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones 55
3.5.3.5 Resultados y Conclusiones 56
3.5.3.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada 57
3.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO A CONSTRUIR 57

CAPÍTULO IV 59

4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO 59

4.1 DISEÑO DE LA CÁMARA DE VACÍO 59
4.1.1 TEORÍA CLÁSICA DE PLACAS 61
4.1.1.1 Placas Planas 61
4.1.1.1.1 Cálculo de la Deflexión 62
4.1.2 CÁLCULO DE LAS PLACAS DE LA CÁMARA 67
4.1.2.1 Cálculo de la Placa Crítica 68
4.1.2.1.1 Cálculo de las Tensiones en el Plano Medio de la Placa 70
4.1.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS PLACAS DE LA CÁMARA SEGÚN OTRAS TEORÍAS 73
4.1.4 DISEÑO DE LA CÁMARA DE VACÍO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS 74
4.1.4.1 Elementos Finitos 75
4.1.4.2 Dimensionamiento del Alma Metálica 77
4.1.4.3 Diseño de la Cámara de Vacío en base a las especificaciones generales propuestas 78
4.1.4.4 Simulación de la Cámara de Vacío mediante Elementos Finitos 79

4.1.4.4.1 Definiciones Generales 80
4.1.4.5 Simulación Estática de la Cámara de Vacío 80
4.2 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN 82
4.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA 82
4.2.1.1 Determinación del ángulo θ máximo y mínimo de apertura del mecanismo 83
4.2.1.2 Determinación del radio tentativo máximo y mínimo de apertura del mecanismo 84
4.2.2 DISEÑO DEL ESLABÓN RANURADO 84
4.2.2.1 Cálculo de reacciones en los apoyos del eslabón 85
4.2.2.2 Determinación de fuerzas cortantes (V) y de momentos flexionantes (M) 86
4.2.2.3 Diseño Estático 87
4.2.2.3.1 Determinación del Esfuerzo Normal 88
4.2.2.3.2 Determinación del Esfuerzo Cortante 89
4.2.2.3.3 Determinación de los Esfuerzos Principales 91
4.2.2.3.4 Determinación del Esfuerzo Equivalente 91
4.2.2.3.5 Determinación del Factor de Seguridad Estático 91
4.2.2.4 Diseño Dinámico 92
4.2.2.4.1 Determinación de los Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes 93
4.2.2.4.2 Cálculo de los Esfuerzos Medio y Amplitud Equivalentes 94
4.2.2.4.3 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga 94
4.2.2.4.4 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico 99
4.2.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ESLABONES CRUZADOS 99
4.2.3.1 Cálculo de Reacciones en el Plano Actuante de las Reacciones 100
4.2.3.2 Determinación de cargas normales (N), fuerzas cortantes (V) y de momentos flexionantes (M) 103
4.2.3.3 Diseño Estático 105

4.2.3.3.1 Determinación del Esfuerzo Normal debido a la Compresión..... 105
4.2.3.3.2 Determinación del Esfuerzo Normal debido a la Flexión……. 106
4.2.3.3.3 Determinación del Esfuerzo Cortante 107
4.2.3.3.4 Determinación de los Esfuerzos Totales Máximos y del Punto Critico..... 107
4.2.3.3.5 Cálculo de los Esfuerzos Principales..... 109
4.2.3.3.6 Cálculo del Esfuerzo Equivalente 109
4.2.3.3.7 Determinación del Factor de Seguridad Estático..... 109
4.2.3.4 Diseño Dinámico 110
4.2.3.4.1 Determinación de los Componentes de los Esfuerzos…. 110
4.2.3.4.2 Determinación de los Esfuerzos Medio y Amplitud Equivalentes 111
4.2.3.4.3 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga…… 111
4.2.3.4.4 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico..... 113
4.2.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE PERNOS DEL MECANISMO DE TIPO TIJERAS 113
4.2.5 CÁLCULO DEL EJE IMPULSOR DEL MECANISMO..... 116
4.2.5.1 Diseño Estático 116
4.2.5.2 Diseño Dinámico 117
4.2.5.2.1 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga……..... 117
4.2.5.2.2 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico..... 120
4.2.6 DISEÑO DEL DOBLE TORNILLO ACCIONADOR DEL EJE IMPULSOR 120
4.2.6.1 Selección del Tipo de Rosca..... 120
4.2.6.2 Diseño Estático 121
4.3 CÁLCULO DEL SISTEMA DE BASCULAMIENTO MEDIANTE ENGRANAJES RECTOS..... 124

4.3.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL ACCIONAR DEL PAR DE ENGRANAJES 124
4.3.2 DISEÑO ESTÁTICO 125
4.3.3 DISEÑO DINÁMICO A FLEXIÓN 127
4.3.4 DISEÑO A FATIGA SUPERFICIAL 130
4.3.5 CÁLCULO DE LENGÜETAS 133
4.3.5.1 Cálculo de la lengüeta del eje basculador 134
4.4 SELECCIÓN DEL EQUIPO PARA EL SISTEMA DE VACÍO 136
4.4.1 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LA BOMBA DE VACÍO…. 136
4.4.2 SELECCIÓN DE LOS ACCESORIOS Y LÍNEAS DE VACÍO 139

CAPÍTULO V 140

5. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS 140

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS A SER MECANIZADOS 140
5.2 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO 144
5.2.1 EQUIPOS, HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE CÁMARA DE VACÍO 145
5.2.2 MATERIA PRIMA 146
5.2.3 ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN 147
5.3 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN 147
5.3.1 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS MECANIZADOS 148
5.3.1.1 Construcción del Sistema de Desplazamiento Vertical del Horno de Inducción 148
5.3.1.2 Construcción de la Cámara de Vacío 151
5.3.1.3 Construcción del Sistema de Basculamiento 153
5.3.1.4 Ensamble Final e Instalación del Prototipo 155
5.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS 157
5.4.1 DESPLAZAMIENTO 157
5.4.2 BASCULAMIENTO 157
5.4.3 EMPAQUETADURAS Y SELLOS 157

5.4.4 BOMBA DE VACÍO 158
5.4.5 FUSIÓN EN EL HORNO 158
5.5 ANÁLISIS DE COSTOS 162
5.5.1 COSTOS DIRECTOS 162
5.5.1.1 Costos de Materiales 162
5.5.1.2 Costos de Maquinado y Mano de obra 163
5.5.1.3 Costos de Ingeniería 164
5.5.2 COSTOS INDIRECTOS 164
5.5.3 COSTOS TOTALES 165

CAPÍTULO VI 166

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO 166

6.1 INTRODUCCIÓN 166
6.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LA POROSIDAD 166
6.2.1 ANÁLISIS CUALITATIVO 166
6.2.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO 167
6.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 168
6.3.1 COLADO EN ARENA 169
6.3.2 COLADO EN MOLDE METÁLICO 169
6.3.3 SELECCIÓN DE MATERIAL A FUNDIR 170
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS 172
6.4.1 ANÁLISIS CUALITATIVO 172
6.4.1.1 Muestra IA 172
6.4.1.2 Muestra IB 173
6.4.1.3 Muestra 1B 173
6.4.1.4 Muestra 2A 174
6.4.1.4.1 Sección transversal 174
6.4.1.4.2 Sección longitudinal 175
6.4.1.5 Muestra 2B 175
6.4.1.5.1 Sección transversal 175
6.4.1.5.2 Sección longitudinal 176
6.4.1.6 Muestra 3A 177
6.4.1.6.1 Sección transversal 177

6.4.1.6.2 Sección longitudinal 177
6.4.1.7 Muestra 3B 178
6.4.1.7.1 Sección transversal 178
6.4.1.7.2 Sección longitudinal 179
6.4.1.8 Muestra 4A 179
6.4.1.8.1 Sección transversal 179
6.4.1.8.2 Sección longitudinal 180
6.4.1.9 Muestra 4B 180
6.4.1.9.1 Sección transversal 180
6.4.1.9.2 Sección longitudinal 181
6.4.1.10 Muestra 5B 181
6.4.1.11 Muestra 6A 182
6.4.1.12 Muestra 6B 183
6.4.1.13 Muestra 7B 183
6.4.1.13.1 Sección transversal 183
6.4.1.13.2 Sección longitudinal 184
6.4.1.14 Muestra 8A 184
6.4.1.15 Análisis Fotográfico 185
6.4.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO 192
6.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS 194
6.4.3.1 Muestra IA 194
6.4.3.2 Muestra IB 195
6.4.3.3 Muestra 1B 195
6.4.3.4 Muestra 2A 196
6.4.3.4.1 Sección transversal 196
6.4.3.4.2 Sección longitudinal 196
6.4.3.5 Muestra 2B 196
6.4.3.5.1 Sección transversal 196
6.4.3.5.2 Sección longitudinal 197
6.4.3.6 Muestra 3A 197
6.4.3.6.1 Sección transversal 197
6.4.3.6.2 Sección longitudinal 197
6.4.3.7 Muestra 3B 198

6.4.3.7.1 Sección transversal 198
6.4.3.7.2 Sección longitudinal 198
6.4.3.8 Muestra 4A 199
6.4.3.8.1 Sección transversal 199
6.4.3.8.2 Sección longitudinal 199
6.4.3.9 Muestra 4B 199
6.4.3.9.1 Sección transversal 199
6.4.3.9.2 Sección longitudinal 200
6.4.3.10 Muestra 5B 200
6.4.3.11 Muestra 6A 200
6.4.3.12 Muestra 6B 200
6.4.3.13 Muestra 7A 201
6.4.3.13.1 Estudio preliminar 201
6.4.3.14 Muestra 7B 204
6.4.3.14.1 Sección transversal 204
6.4.3.14.2 Sección longitudinal 204
6.4.3.15 Muestra 8A 205

CAPITULO VII 206

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 206

7.1 CONCLUSIONES 206
7.2 RECOMENDACIONES 207

BIBLIOGRAFÍA 209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Aplicaciones de aluminio fundido, (a) Block de cilindros de un auto y (b) Impulsores de bombas centrifugas 6
Figura 1.2 Macrografía a 10X de una Aleación de Aluminio, (a) porosidad por presencia de gas y (b) porosidad por contracción. 8
Figura 1.3 Esquema de los diferentes tipos de porosidad debido a la contracción a) formación de poros, b) porosidad difusa c) porosidad axial d) porosidad local..... 9
Figura 1.4 Cortes de bloques solidificados en vacío. Izquierda: el contenido de gases es muy grande, Centro: contenido medio de gases, Derecha: desgasificación completa 14
Figura 2.1 Vacío 16
Figura 2.2 Formas más comunes de las Cámaras de Vacío, a) Cilíndrica, b) Paralelepípeda, c) Esférica 18
Figura 2.3 Configuraciones básicas de los sistemas de fusión al vacío. a) Cámara de vacio dentro del horno de fusión. b) Horno de fusión dentro de la cámara de vacío 21
Figura 2.4 Bombas de vacío según el Rango de Trabajo 22
Figura 2.5 Bomba de Diafragma con sus partes constitutivas..... 23
Figura 2.6 Bomba Rotatoria de Paletas con sus partes constitutivas..... 23
Figura 2.7 Bomba de Pistón Rotatoria 24
Figura 2.8 Bomba Roots con sus partes constitutivas..... 25
Figura 2.9 Horno de Inducción 26
Figura 3.1 Esquema del Sistema de Vacío 29
Figura 3.2 Cámara de Vacío Cilíndrica dispuesta Verticalmente 31
Figura 3.3 Cámara de Vacío Paralelepípeda 33
Figura 3.4 Cámara de Vacío Cilíndrica dispuesta Horizontalmente 34
Figura 3.5 Esquema del mecanismo de tijeras y tornillo de potencia accionado manualmente 40
Figura 3.6 (a) Esquema del mecanismo con doble gato mecánico a manivela, (b) Detalle del funcionamiento de un gato mecánico 42

Figura 3.7 (a) Esquema del mecanismo con doble tornillo de potencia accionados por sin fines a través de coronas, (b) Detalle del funcionamiento del mecanismo 44
Figura 3.8 Esquema del mecanismo de basculamiento mediante levas de contorno 51
Figura 3.9 Esquema del mecanismo de basculamiento mediante engranajes rectos 52
Figura 3.10 Esquema del mecanismo de desplazamiento vertical dentro de la cámara 57
Figura 3.11 Esquema del mecanismo de basculamiento dentro de la cámara 58
Figura 4.1 Cámara de Vacío 59
Figura 4.2 Plano medio de una Placa 61
Figura 4.3 Placa Rectangular Cargada Uniformemente 63
Figura 4.4 Placa Superior de la Cámara con sus Condiciones de Borde 68
Figura 4.5 Teoría de la Energía de la Distorsión 72
Figura 4.6 (a) Modelo real, (b) Modelo con elementos finitos 76
Figura 4.7 Análisis de las deformaciones de un elemento mecánico mediante SOLIDWORKS y la presentación grafica de los resultados obtenidos por medio de una escala de colores 77
Figura 4.8 Alma Metálica con Refuerzos 78
Figura 4.9 Cámara de Vacío; Izquierda: Perspectiva Frontal y Derecha: Perspectiva Posterior 79
Figura 4.10 Simulación Estática de desplazamientos de la Cámara de Vacío (SOLIDWORKS) 80
Figura 4.11 Simulación Estática de desplazamientos de la Cámara de Vacío (AUTODESK INVENTOR) 81
Figura 4.12 Dimensiones principales del mecanismo tipo tijeras 82
Figura 4.13 Eslabón ranurado 84
Figura 4.14 DCL del eslabón ranurado 85
Figura 4.15 Diagramas de fuerza cortante V_y y momento flector M_z 87
Figura 4.16 Distribución del esfuerzo normal por flexión 88
Figura 4.17 Distribución del Esfuerzo Cortante 89
Figura 4.18 Propiedades de la Sección Rectangular del Eslabón Ranurado 90

Figura 4.19 Variación en el Tiempo de los Esfuerzos (a) Normales y (b) Cortantes 93
Figura 4.20 Diámetro Equivalente para un Perfil de Forma Rectangular 96
Figura 4.21 Factor Teórico de Concentración de Esfuerzos para Barras de Sección Rectangular a Tracción Pura con un Agujero Transversal 98
Figura 4.22 Cargas sobre las platinas del sistema de sujeción tipo tijeras 100
Figura 4.23 Cargas y Reacciones en el plano sobre las Platinas..... 100
Figura 4.24 Esquema y DCL de una Platina 102
Figura 4.25 Diagramas De fuerza normal (N), cortante (V) y momento flexionante (M) 103
Figura 4.26 Distribución Uniforme del Esfuerzo Normal por Compresión 106
Figura 4.27 Distribución del Esfuerzo Normal por Flexión 106
Figura 4.28 Distribución del Esfuerzo Cortante 107
Figura 4.29 Esfuerzos Totales Máximos 108
Figura 4.30 Unión entre los Eslabones del Sistema Tipo Tijeras 114
Figura 4.31 Factor Teórico de Concentración de Esfuerzos para una Barra de Sección Circular en Flexión con Estrechamiento y Entalle 119
Figura 4.32 Configuración de la Rosca a emplear en el Mecanismo 120
Figura 4.33 Tornillo – Tuerca en Condiciones Estáticas 121
Figura 4.34 Mecanismo accionador del basculamiento..... 125
Figura 4.35 (a) Elemento ordinario de esfuerzos, (b) Esfuerzo repetitivo 127
Figura 4.36 Esquema general de la lengüeta y el eje 134
Figura 4.37 Bomba de Vacío seleccionada 138
Figura 5.1 Mecanismo de Desplazamiento Vertical; Izquierda: Construcción y Derecha: Diseño..... 150
Figura 5.2 Máxima Carrera del Mecanismo; Izquierda: Construcción y Derecha: Diseño 150
Figura 5.3 Vistas Laterales del mecanismo; Izquierda: Sin accionar y Derecha: Tope de carrera 150
Figura 5.4 Izquierda: Corte de Placas con Plasma y Derecha: Maquinado de Placas 152
Figura 5.5 Soldadura de Cámara de Vacío Interna y Externamente 153
Figura 5.6 Cámara de Vacío Construida 153

Figura 5.7 Eje acoplado a engrane basculador 155
Figura 5.8 Engrane basculante acoplado a extremo del horno 155
Figura 5.9 Conexiones de las mangueras provenientes del tablero de control 156
Figura 5.10 Cámara de Vacío instalada en el Laboratorio de Fundición 156
Figura 6.1 Moldes metálicos para el colado de las muestras 169
Figura 6.2 (a) Muestra con defectos y (b) Macrografía de la probeta IA a 10X. 172
Figura 6.3 (a) Sección representativa de la muestra y (b) Probeta IB cortada en secciones. 173
Figura 6.4 Muestra 1B 174
Figura 6.5(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X, de la probeta 2A. 174
Figura 6.6 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la probeta 2A. 175
Figura 6.7(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 2B. 176
Figura 6.8 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 2B. 176
Figura 6.9 (a) Corte transversal y (b) Macrografía de la probeta 3A a 10X. 177
Figura 6.10 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la muestra 3A. ... 178
Figura 6.11 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 3B. 178
Figura 6.12 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10 X de la probeta 3B. ... 179
Figura 6.13 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4A. 179
Figura 6.14 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4A. 180
Figura 6.15(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4B. 181
Figura 6.16 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4B. ... 181
Figura 6.17 Muestra axial de la probeta 5B. 182
Figura 6.18 (a) Corte axial y (b) Macrografía a 20X de la probeta 6A. 182
Figura 6.19(a) Corte axial y (b) Macrografía a 20X de la probeta 6B. 183
Figura 6.20 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 7B. 183
Figura 6.21 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la probeta 7B. 184
Figura 6.22 (a) Corte axial y (b) Macrografía a 10X de la probeta 8A 185
Figura 6.23 Sales de cobertura para el galvanizado en caliente 202

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Aplicaciones representativas de las aleaciones de fundición de aluminio 6
Tabla 2.1 Factores de Conversión de las Unidades de Presión 17
Tabla 2.2 Características de los Rangos de Vacío 17
Tabla 3.1 Condiciones Ambientales de la Ciudad de Quito 27
Tabla 3.2 Características del Vacío Grueso 28
Tabla 3.3 Matriz de Decisión para el Material de la Cámara de Vacío 30
Tabla 3.4 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio 37
Tabla 3.5 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo 38
Tabla 3.6 Evaluación del Peso Específico del Criterio Robustez 38
Tabla 3.7 Evaluación del Peso Específico del Criterio Disponibilidad 38
Tabla 3.8 Evaluación del Peso Específico del Criterio Flexibilidad 39
Tabla 3.9 Tabla de Resultados y Conclusiones 39
Tabla 3.10 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio 47
Tabla 3.11 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo 48
Tabla 3.12 Evaluación de Peso Específico del Criterio Sincronización 48
Tabla 3.13 Evaluación de Peso Específico del Criterio Fugas 48
Tabla 3.14 Evaluación de Peso Específico del Criterio Ergonomía 49
Tabla 3.15 Evaluación de Peso Específico del Criterio mantenimiento 49
Tabla 3.16 Tabla de Resultados y Conclusiones 49
Tabla 3.17 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio 55
Tabla 3.18 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo 55
Tabla 3.19 Evaluación del Peso Específico del Criterio Sincronización 55
Tabla 3.20 Evaluación del Peso Específico del Criterio Mantenimiento 56
Tabla 3.21 Evaluación del Peso Específico del Criterio Ergonomía 56
Tabla 3.22 Tabla de Resultados y Conclusiones 56
Tabla 4.1 Espesores calculados por medio de ciertas teorías 74
Tabla 4.2 Resultados por medio de la Simulación 81
Tabla 4.3 Cálculo de reacciones en función de valores de x en pasos de 10 [mm] 86
Tabla 4.4 Valores Máximos de Cortante Vy y Momento Flector Mz 87
Tabla 4.5 Esfuerzos Normales y Cortantes Máximos 90

Tabla 4.6 Esfuerzos Principales, Equivalentes y Factor de Diseño Estático del Eslabón Ranurado 92
Tabla 4.7 Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes 94
Tabla 4.8 Limite de resistencia a la Fatiga de la Probeta para Materiales Dúctiles 95
Tabla 4.9 Factor ka para Acabado Superficial..... 95
Tabla 4.10 Factores de Confiabilidad k_c..... 97
Tabla 4.11 Valores de las Reacciones en el Mecanismo Tipo Tijeras 104
Tabla 4.12 Fuerzas Normales, Cortantes y Momentos Flexionantes Máximos de los Eslabones..... 104
Tabla 4.13 Esfuerzos Normales y Cortantes Máximos sobre los Eslabones 109
Tabla 4.14 Esfuerzos Principales. Equivalentes y factor de Seguridad Estático de los Eslabones..... 110
Tabla 4.15 Esfuerzos Medios y Amplitud para el Caso Crítico..... 111
Tabla 4.16 Fuerzas Cortantes Totales (V) y Momentos Flexionantes Totales (M) del Eje Impulsor 116
Tabla 4.17 Propiedades de una Sección Circular 116
Tabla 4.18 Esfuerzos Principales, Equivalentes y Factor de Diseño Estático del Eje Impulsor 117
Tabla 4.19 Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes 117
Tabla 4.20 Esfuerzos de Corte y Compresión en la Tuerca y el Tornillo..... 122
Tabla 4.21 Valores de Esfuerzos a Corte y Compresión para la Tuerca y el Tornillo 122
Tabla 4.22 Factores de Diseño para Materiales Dúctiles para Tuerca y Tornillo 123
Tabla 4.23 Valores de Factores de Seguridad Estáticos tanto para la Tuerca como para el Tornillo 123
Tabla 4.24 Dimensiones de las lengüetas según Norma UNIM 84 133
Tabla 4.25 Características de diferentes bombas de vacío..... 137
Tabla 4.26 Tiempo de evacuación para cada modelo de bomba de vacío 137
Tabla 4.27 Matriz de Decisión para la Bomba de Vacío..... 138
Tabla 5.1 Equipos de mecanizado 145
Tabla 5.2 Herramientas de ajustaje mecánico 145

Tabla 5.3 Instrumentos de medida y control 146
Tabla 5.4 Materia Prima 146
Tabla 5.5 Construcción del Sistema de Desplazamiento Vertical del Horno de Inducción..... 148
Tabla 5.6 Construcción de Cámara de Vacío..... 151
Tabla 5.7 Construcción del Sistema de Basculamiento 154
Tabla 5.8 Criterios de evaluación para pruebas de protocolo 158
Tabla 5.9 Protocolo de Pruebas 159
Tabla 5.10 Costos de materia prima 162
Tabla 5.11 Costos de Elementos normalizados 163
Tabla 5.12 Costos de materiales..... 163
Tabla 5.13 Costos de Maquinado y Mano de Obra 163
Tabla 5.14 Costos de Ingeniería 164
Tabla 5.15 Costos Directos totales..... 164
Tabla 5.16 Costo indirecto total..... 165
Tabla 5.17 Costos totales del prototipo 165
Tabla 6.1 Pruebas realizadas en la Cámara 171
Tabla 6.2 Porosidades de la sección transversal por medio del Análisis Fotográfico..... 186
Tabla 6.3 Porcentaje de Áreas de Porosidades de la sección transversal para cada Probeta 189
Tabla 6.4 Porosidades de la sección longitudinal por medio del Análisis Fotográfico..... 190
Tabla 6.5 Porcentaje de Áreas de Porosidades de la sección longitudinal para cada Probeta 191
Tabla 6.6 Análisis Químico de las muestras representativas 192
Tabla 6.7 Densidades de referencia obtenidas del Metals Handbook volume II 193
Tabla 6.8 Cálculo de la Variación de densidad para cada una de las muestras 194

RESUMEN

El presente proyecto de titulación comprende el diseño y construcción de un prototipo de cámara de baja presión, para el estudio experimental de la reducción de las porosidades en las etapas de colado y solidificación de aleaciones de aluminio para el Laboratorio de Fundición de la F.I.M.-E.P.N.; el cual está estructurado de la siguiente forma:

En el primer capítulo se describen los objetivos del proyecto, como además las propiedades y aplicaciones del aluminio fundido, incluyendo los defectos más comunes en la fundición, y los métodos de inspección más aplicados.

En el segundo, se desarrollan los fundamentos sobre la tecnología de vacío, estableciendo los diferentes rangos de vacío que se puede obtener, además de los tipos de bombas de vacío; así como también las desventajas y ventajas de cada una.

En el tercer capítulo, se plantea la selección de alternativas sobre la geometría de la cámara de vacío, el sistema de desplazamiento vertical y el sistema de basculado del horno.

Para el cuarto capítulo, se realizan los cálculos para el diseño de los elementos mecánicos constitutivos de la cámara, además de la simulación de esfuerzos a soportar por la cámara.

En el quinto capítulo, se detalla la construcción de cada una de las partes de la cámara, además de su ensamblaje y las pruebas de campo para comprobar su funcionamiento, por medio de un protocolo de pruebas. Por ultimo un análisis de costos sobre la tesis.

Para el sexto capítulo, se describe el procedimiento de análisis de porosidades de las probetas de aluminio coladas a baja presión y a presión ambiente; además de un análisis de resultados de cada una de las muestras.

En el último capítulo se contemplan las conclusiones y recomendaciones del proyecto de tesis.

PRESENTACIÓN

En la industria nacional la fundición de aluminio y sus aleaciones, es un campo de gran crecimiento, pero no consta de procesos muy tecnificados en la mayoría de los casos; por consiguiente son procesos realizados empíricamente; obteniendo resultados no muy favorables en los productos. La Escuela Politécnica Nacional consiente de estos problemas y como institución generadora de conocimiento, tiene la obligación de abordar estos problemas y dar solución, en medida de lo posible.

Por lo tanto en el Laboratorio de Fundición de la F.I.M., no exento de estas responsabilidades; se han venido desarrollando durante los últimos años diferentes investigaciones en base a estos problemas, creando una base teórica y práctica de gran ayuda para el sector industrial.

Con tales antecedentes, se desarrolla el proyecto de investigación de diseñar y construir un prototipo de cámara de bajas presiones para reducir las porosidades de gas en aleaciones de aluminio en las etapas de fusión, colado y solidificación.

Experiencias en países desarrollados han logrado obtener excelentes resultados al fundir y colar aluminio al vacío, ya que al extraer el aire para generar dicho vacío, se evita que el hidrogeno resultado de la reacción del metal liquido con el vapor de agua o la humedad, se introduzcan en el metal liquido al momento de verter el colado en el molde, debido a su alta solubilidad en el aluminio fundido; y así se reduce considerablemente la formación de porosidades de gas, así como también la escoria en la superficie de la colada.

Aunque en la industria se use los desgasificantes (otro método para eliminar gases disueltos en la colada), para eliminar defectos por gases, como los poros; se ha propuesto investigar sobre la fusión en vacío como un método alternativo para la solución de este problema

Al emplear este método se está impulsando el desarrollo de una técnica poco conocida a nivel nacional y aportando al mejoramiento en cuanto tiene que ver con las propiedades de las aleaciones de aluminio.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se describe y se justifica la necesidad de construir un prototipo de cámara de presiones bajas en el Laboratorio de Fundición de la F.I.M. – E.P.N., para colar aleaciones de aluminio, con la finalidad de estudiar experimentalmente la reducción de porosidades en este material. Además se describen los fundamentos teóricos sobre los posibles defectos en la fundición enfatizando en las porosidades, así como algunos modos de inspección de estas.

1.1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de fundición de metales se caracterizan, esencialmente, por su gran versatilidad para fabricar a bajo coste, piezas de una gran diversidad de tamaños y formas y, por procesar determinados materiales de difícil tratamiento. Además son capaces de reproducir geometrías muy complejas, permitiendo también generar cavidades o superficies internas en las piezas de cierta complejidad.

Son muy diversas las tecnologías que hasta la fecha se han desarrollado en el ámbito de los procesos de fundición de metales. Aunque obviamente las distintas tecnologías tienen sus propias características, aplicaciones, ventajas y limitaciones, existen aspectos comunes a todas ellas cuyo conocimiento es indispensable para controlar el proceso y garantizar un adecuado nivel de calidad en el producto.

Uno de los defectos más frecuentes que presentan las piezas fabricadas con procesos de fundición y que limita sus posibilidades de aplicación es la porosidad. La porosidad puede ser debida, entre otras causas, al atrapamiento de gases durante el llenado del molde o a la contracción del metal durante su solidificación. En algunos procesos de fundición como, por ejemplo, la fundición por inyección a presión, la porosidad final de la pieza se puede reducir significativamente, aunque no la cantidad de aire atrapado, ejerciendo una alta presión sobre el metal al final

del proceso de inyección mejorando, de esta forma, las propiedades mecánicas más significativas.

Son muchos los estudios realizados y los métodos utilizados para la evaluación de la porosidad en piezas fabricadas por fundición. Entre los que utilizan ensayos no destructivos se puede destacar los métodos basados en la inspección visual, el radiografiado, el uso de ultrasonidos o el método gravimétrico. Entre los que utilizan métodos destructivos destacan el análisis de distintas secciones de la pieza y el calentamiento de las muestras para provocar la expansión del gas atrapado y el posterior empleo del método gravimétrico.[1]

El empleo de la técnica de fusión a presión baja, en la que el metal, se funde y se cola en el interior de una cámara de vacío bajo condiciones controladas, permite extraer el aire del medio y evitar que el hidrogeno y el vapor de agua presentes, se introduzcan en el material fundido durante las etapas de fusión, colado y solidificación obteniéndose de esta manera una reducción de poros, así como de escoria presentes en la colada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de cámara de presiones bajas que permite el estudio experimental de reducción de porosidades en las etapas de colado y solidificación de aleaciones de aluminio para el Laboratorio de Fundición de la F.I.M. – E.P.N.

---

[1] Artículo de Investigación (2009): Revista Metalúrgica: "*Equipo de fusión al vacío para la determinación cuantitativa del gas atrapado en piezas fundidas*"; J.J. Hernández-Ortega, R. Zamora, F. Faura, J. López; Volumen 45; Madrid.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un prototipo de cámara que satisfaga las especificaciones particulares del Laboratorio de Fundición de la F.I.M. - E.P.N.
- Diseñar un mecanismo para levantar y bascular el horno de inducción dentro de la cámara para el posterior colado en el molde.
- Instalar el mecanismo seleccionado, dentro de la cámara, y verificar su adecuado funcionamiento.
- Realizar pruebas de hermeticidad en la cámara, para así lograr una adecuada presión dentro de la misma.
- Comprobar que la presión dentro de cámara sea un valor aproximado al vacío aproximado.
- Realizar un estudio comparativo de presencia de porosidades entre piezas coladas dentro de la cámara y sin la utilización de ésta.
- Utilizar una nueva tecnología de colado para la obtención de piezas fundidas de aluminio que no se dispone en el mercado nacional.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El Laboratorio de Fundición de la E. P. N. ha trabajado con aluminio y sus aleaciones durante varios años en prácticas de laboratorio de los estudiantes de la F. I. M., pero en vista que no se ha logrado obtener un aluminio con buenas propiedades mecánicas debido a la gran presencia de poros y escoria se ha intentado mejorar esto por varios métodos con unas mejoras significativas.

Con lo anteriormente expuesto, se ha visto la necesidad de diseñar y construir un prototipo de cámara de presiones bajas para controlar las etapas de fusión, colado y solidificación de las aleaciones de aluminio. Experiencias en países desarrollados han logrado obtener excelentes resultados al fundir y colar aluminio

al vacío, ya que al extraer el aire para generar dicho vacío, se evita que el hidrogeno y el vapor de agua presentes, se introduzcan en el material en la etapa de solidificación y así se reduzca la formación de poros, así como de escoria en la colada.

Al emplear este método se está impulsando el desarrollo de una técnica poco conocida a nivel nacional y aportando al mejoramiento en cuanto tiene que ver con las propiedades de las aleaciones de aluminio.

1.4 ALUMINIO

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre conocida, de la que forma parte en una proporción del 8,13%, superior a la del hierro, que se supone es de un 5%, y solamente superada entre los metales por el silicio (26,5%).

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que están formadas por un 62-65% de alúmina (Al_2O_3), hasta un 28% de óxido de hierro (Fe_2O_3), 12-30% de agua de hidratación (H_2O) y hasta un 8% de sílice (SiO_2).

1.4.1 OBTENCIÓN DEL ALUMINIO

La obtención del aluminio se realiza en dos fases:

1. Separación de la alúmina (Al_2O_3) de las bauxitas por el procedimiento Mayer, que comprende las siguientes operaciones: Se calientan las bauxitas para deshidratarlas, una vez molidas; se atacan a continuación con lejía de sosa en caliente y a presión para formar aluminato sódico ($Na_2O.\ Al_2O_3$), que se separa del resto de los componentes de la bauxita; después, bajo la influencia de una pequeña cantidad de alúmina que inicia la reacción, se hidroliza el aluminato de sodio, quedando alúmina hidratada e hidróxido de sodio; y por fin, se calcina la alúmina hidratada a 1.200ºC, con lo que queda preparada para la fase siguiente.

2. Reducción de la alúmina disuelta en un baño de criolita, y con cierta cantidad de fundente, por electrolisis con electrodos de carbón se obtiene el aluminio puro.

Para obtener una tonelada de aluminio son necesarias 4 Toneladas de bauxita, 80 kg de criolita, 600 kg de electrodos de carbón y 22.000kw-h. La metalurgia de aluminio es, por tanto, esencialmente electrolítica.

1.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ALUMINIO

El aluminio es un metal blanco brillante, cristaliza en red cúbica centrada en las caras (FCC). Su peso específico es igual a 2,699 g/cm^3; es decir, casi 1/3 del hierro (7,87 g/cm^3). El único metal industrial más ligero que el aluminio es el magnesio, de peso específico 1,74 g/cm^3. Su conductividad eléctrica es un 60% de la del cobre y 3,5 veces mayor que la del hierro. Su punto de fusión es 660 º C y el de ebullición 2.450 º C. Este punto de fusión relativamente bajo, unido a su punto de ebullición bastante alto facilita su fusión y moldeo.

1.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO

Las principales propiedades mecánicas del aluminio son su baja resistencia mecánica, y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimos y laminarlo en láminas o panes tan finos como los del oro, hasta de un espesor de 0,0004 mm (0,4 micras). A la temperatura de 500ºC se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

1.4.4 APLICACIONES DEL ALUMINIO

Piezas de fundición de aleaciones de aluminio son económicas en muchas aplicaciones. Se utilizan en la industria del automovilismo, en la construcción de máquinas y estructuras, utensilios de cocina, cubiertas, carcasas para equipos electrónicos y en innumerables otras áreas. La Tabla 1.1 enumera las aplicaciones típicas de algunas aleaciones de fundición de aluminio.

Tabla 1.1 Aplicaciones representativas de las aleaciones de fundición de aluminio

Aleación	Aplicaciones Representativas
201.0	Elementos estructurales, culatas, pistones, engranajes, bombas y carcasas aeroespaciales.
B295.0	Cajas de engranajes, piezas de aviones, bielas de compresores.
520.0	Accesorios de aeronaves, estructura de buses y camiones
413.0	Arquitectónico, ornamental y equipos para los productos lácteos y de alimentos.
A850.0	Rodamientos de bolas y aplicaciones similares.
850.0	Bujes y cojinetes de deslizamiento para ferrocarriles.
713.0	Piezas de automóviles, bombas, partes de remolques, equipos de minería

Fuente: Metals Handbook volume XV (1988) – *Casting;* ASM International; 9th Edition; USA.

En la figura 1.1 se ilustra algunas aplicaciones comunes.

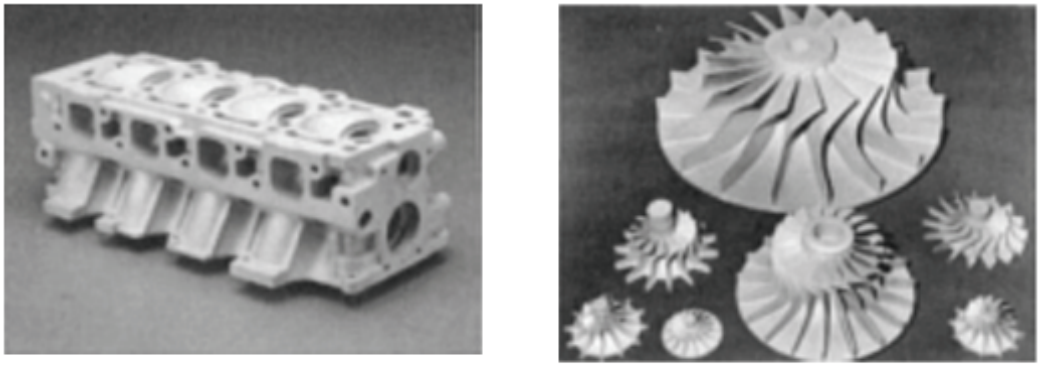


Figura 1.1 Aplicaciones de aluminio fundido, (a) Block de cilindros de un auto y (b) Impulsores de bombas centrifugas

Fuente: Metals Handbook volume XV (1988) – *Casting;* ASM International; 9th

1.5 MACRODEFECTOS EN PIEZAS COLADAS

Los defectos que pueden surgir de la solidificación son suficientemente grandes para que se puedan advertir a simple vista, entre los cuales los más comunes son las cavidades de contracción o encogimiento y porosidades.[2]

1.5.1 POROSIDADES

La porosidad se presenta siempre que los gases quedan atrapados en la fundición; por lo general, las porosidades son más abundantes y más pequeñas que las cavidades por contracción y pueden distinguirse por su forma redondeada. Durante la colada puede quedar aire atrapado, debido a la repentina precipitación de metal dentro del molde. Como generalmente los gases son más solubles en metal líquido, los gases disueltos pueden librarse durante la solidificación.

Los gases también pueden producirse por reacción del metal líquido con sustancias volátiles, como humedad que pudiera haber en el molde. La porosidad puede reducirse considerablemente si se ventila en forma adecuada el molde y se evita compactar exageradamente la arena. [3]

La porosidad en las aleaciones de aluminio son asociadas a burbujas de gas que quedan atrapadas en la solidificación de la aleación (porosidad gaseosa) y por vacíos que se forman entre las dendritas debido a los efectos de la contracción durante la solidificación (porosidad de contracción), las burbujas de gas son causadas principalmente por la presencia de hidrogeno (atrapado mientras el líquido se solidifica, debido a que baja la solubilidad) y por aire atrapado debido a una alta velocidad de flujo del metal fundido durante el colado en el molde.

La porosidad en la fundición de aluminio es irregular debido a la combinación de los dos métodos mencionados anteriormente, porosidad gaseosa y porosidad de

---

[2] AVNER Sydney; (1988); *"Introducción a la Metalurgia Física"*; Segunda Edición; Editorial McGraw Hill; México; p. 109

[3] AVNER Sydney; (1988); *"Introducción a la Metalurgia Física"*; Segunda Edición; Editorial McGraw Hill; México; p. 109 - 110

contracción, sin embargo es posible determinar el origen de ciertos poros, basados en su distribución y en aspectos de su morfología así como su localización en la pieza. Los poros gaseosos usualmente tienen forma esférica mientras que los poros de contracción tienen normalmente forma más irregular y elongada.

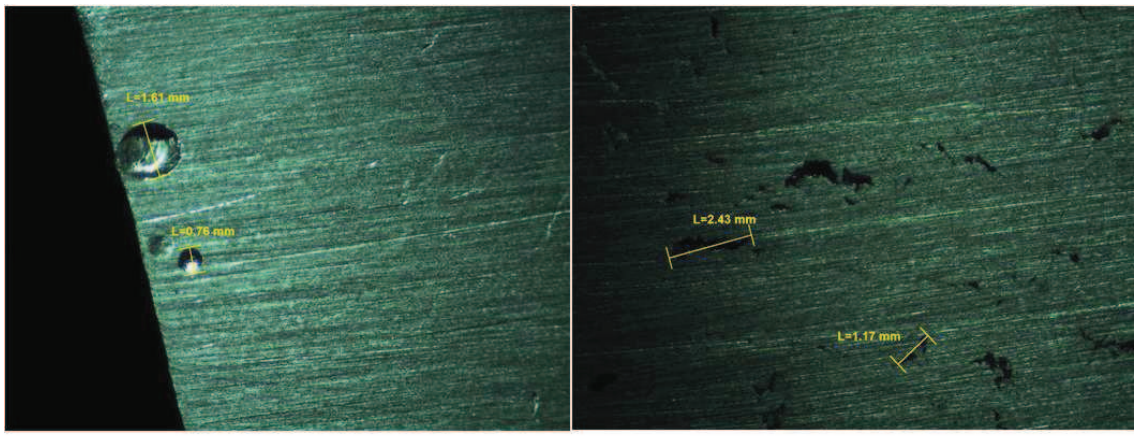


Figura 1.2 Macrografía a 10X de una Aleación de Aluminio, (a) porosidad por presencia de gas y (b) porosidad por contracción.

Fuente: Propia

En la figura 1.2, se puede establecer claramente la diferencia entre las porosidades de contracción con las porosidades por presencia de gas, en la forma y la superficie brillante.

1.5.1.1 Porosidad de Contracción [4]

La porosidad de contracción es la acumulación de pequeñas oquedades (poros) de forma irregular, los cuales son formados en la moldura como resultado de la contracción volumétrica al no haber afluencia de metal fundido líquido. La porosidad de contracción es característica para las aleaciones de amplio intervalo de cristalización (Figura 1.3 a).

[4] TITOV N., STEPANOV A.; (1981); *"Tecnología del Proceso de Fundición";* Editorial Mir; Moscú; p. 242

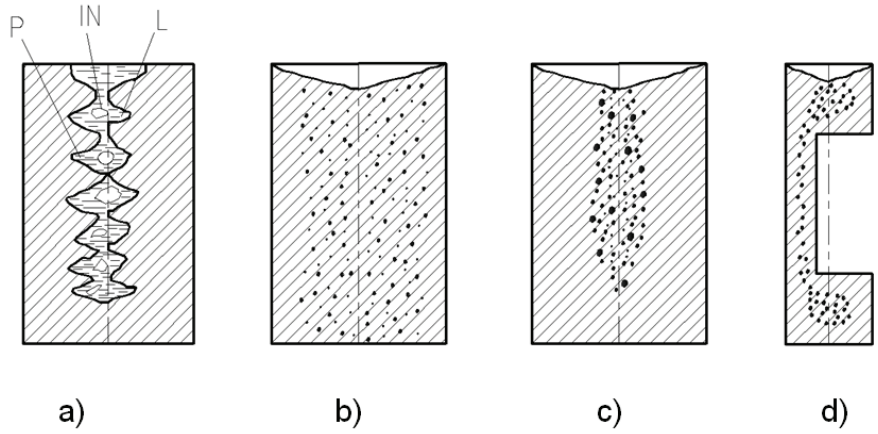


Figura 1.3 Esquema de los diferentes tipos de porosidad debido a la contracción a) formación de poros, b) porosidad difusa c) porosidad axial d) porosidad local.

Fuente: TITOV N., STEPANOV A.; (1981); "*Tecnología del Proceso de Fundición*"; Editorial Mir; Moscú; p. 241.

Elaboración: Propia.

Los poros de contracción *P* aparecen en los espacios interdendriticos *IN* cuando la contracción volumétrica aun continua y el suministro del metal líquido L a los poros se interrumpe. Durante la solidificación las dendritas que aparecen se unen, creando células aisladas una de la otra y de la mazarota. Cuando cesa la alimentación de la células con la masa fundida se crean pequeñas oquedades, cuyo conjunto forma la porosidad de contracción.

Se distingue la porosidad difusa, axial y local.

1.5.1.1.1 La Porosidad Difusa

Son poros pequeños diseminados uniformemente por una gran parte del volumen de la moldura. La porosidad de contracción difusa se desarrolla durante la solidificación lenta de molduras gruesas de aleaciones con un gran intervalo de temperatura de solidificación.

1.5.1.1.2 La Porosidad Axial

Se crea en las partes centrales de las molduras, como también en las secciones largas y delgadas. Esto se explica por el hecho de que la contracción volumétrica de la parte central aun no terminó y disminuyó o se interrumpió el acceso a está, de la aleación liquida.

1.5.1.1.3 La Porosidad Local

Se crea en las partes de la moldura, separadas de la aleación liquida por la aleación ya solidificada, que cerró el acceso de aleación liquida a ellas. La porosidad local, consta de poros grandes, concentrados en las partes macizas de las molduras y en los lugares de unión de los bebederos.

1.5.2 RECHUPES

Técnicamente se denominan como contracción, puesto que se produce por este fenómeno. La contracción es la propiedad que depende de la naturaleza del material. Es consecuencia de un fenómeno físico de disminución de volumen al pasar del estado líquido al estado sólido. Para controlar esto, se utiliza montantes ya que este defecto también se produce en la última zona en solidificarse.

1.5.3 GRIETAS

Estas se presentan porque existe una diferencia muy grande entre volúmenes a solidificar. Esta diferencia produce esfuerzos de diferentes magnitudes que promueven la formación de fisuras en las esquinas de la pieza.

1.5.4 ESCORIA

Este defecto se produce en el enfriamiento de la pieza fundida, debido a la acumulación de gases en esta. Cada material tiene un porcentaje de gases disueltos. Por tanto es importante evitar que estos se produzcan. Lo que se puede realizar para evitar este defecto es aplicar montantes, mazarotas y alimentadores, con esto se concentra los gases en estos elementos sin afectar a la pieza (la escoria se forma en el último sitio de solidificación).

1.6 MÉTODOS PARA DETECCIÓN DE POROSIDADES [5]

Cuando se estudia la porosidad que pueda aparecer en una pieza fundida, la idoneidad de los diferentes métodos para examinarla depende de en qué medida la porosidad afecte a las propiedades de la pieza fabricada. Del mismo modo se debe tener en cuenta que el problema de la porosidad en las piezas fundidas depende de su localización, su caracterización y el grado de exigencia funcional que se le exija.

1.6.1 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

1.6.1.1 Inspección Visual

Se trata de un método muy sencillo aunque tiene grandes limitaciones, como por ejemplo, el que únicamente permite distinguir cualitativamente la presencia de porosidad superficial. Este método es apropiado en el caso de fabricación de piezas donde únicamente las consideraciones estéticas son importantes como por ejemplo en el caso de la fabricación de modelos.

1.6.1.2 Radiografiado

Los métodos de radiografiado (rayos X o gamma), están muy extendidos en el ámbito de la fundición industrial ya que permiten detectar, además de la porosidad, otros defectos internos tales como la presencia de grietas o fisuras, segregaciones o inclusiones de impurezas.

En cuanto a la evaluación de la porosidad, este método permite localizar e identificar con precisión las zonas donde se concentra, aunque la información es bidimensional lo que impide una evaluación cuantitativa.

---

[5] ZAMORA Rosendo; (2005); *"Estudio Experimental de la Formación de Porosidad por Atrapamiento de Aire durante la Etapa Lenta de Inyección en Maquinas de Fundición a Alta Presión"*; Universidad Politécnica de Cartagena; Tesis Doctoral; p. 19 - 21

1.6.1.3 Ultrasonido

La detección de defectos mediante el uso de ultrasonidos también es aplicable a la medida de porosidad en piezas fundidas aunque de manera cualitativa y con cierto grado de incertidumbre.

1.6.1.4 Gravimetría

Este método está basado en el principio de Arquímedes y permite conocer la densidad de un sólido mediante el uso de una balanza hidrostática donde se pesa el sólido en aire así como sumergido en agua una vez conocida la densidad del líquido utilizado. Conocida la densidad de la muestra, el cálculo de la porosidad se realiza en función de la densidad teórica de la muestra sin poros. De entre los métodos no destructivos que han sido expuestos, es precisamente este el más utilizado a la hora de valorar la porosidad en piezas fundidas.

Comúnmente, los valores de porosidad se expresan en formato porcentual.

1.6.2 MÉTODOS DESTRUCTIVOS

1.6.2.1 Análisis de Imagen mediante Mecanizado

Dentro del grupo de los métodos destructivos, el más empleado es el de mecanizado de la pieza a estudiar y posterior inspección de las superficies seccionadas. El estudio de la porosidad a nivel micro o macrogeométrico depende del tratamiento que se proporcione a las superficies estudiadas y de los métodos de visualización empleados (lupas y microscopios fundamentalmente). Actualmente se está extendiendo cada vez más el uso del computador, cámaras digitales.

Aunque la técnica de análisis de imagen presenta la capacidad de medir el porcentaje de porosidad local, se utiliza una sencilla técnica para relacionar el porcentaje de porosidad de varias imágenes con el porcentaje de porosidad global de una pieza de fundición. Así, los porcentajes de porosidad de cada sección se ponderan con los volúmenes de la sección para calcular el porcentaje medio de porosidad de toda la pieza fundida. Esta técnica presenta el inconveniente de que pudieran quedar zonas de porosidad no seccionadas por lo que, a pesar de que

esta técnica tiene una incertidumbre, se recomienda su uso en los casos en que se requieran estudios de porosidad locales.

1.6.2.2 Fusión al Vacío

Esta técnica permite la cuantificación de la cantidad de gas atrapado en una pieza mediante la fusión de la misma en el interior de una cámara en la que las condiciones de presión, volumen y temperatura son conocidas.

El principio básico de funcionamiento de este método consiste en relacionar la variación de presión experimentada con la cantidad de gas atrapado que se libera durante la fusión de la pieza.

Existen trabajos experimentales donde se describe el diseño de un sistema de fusión al vacío y se obtienen resultados sobre la cantidad de aire atrapado en piezas fundidas. Los diseños contemplan la disposición de una cámara de vacío que contiene un horno de fusión, alcanzando niveles de vacío adecuados a la necesidad.

1.6.3 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE GASES [6]

En muchas fundidoras se emplea el aparato Straube – Pfeiffer de solidificación en vacío para estimar el contenido de gases del caldo antes de la colada. El ensayo consiste en solidificar el metal bajo presión reducida.

Una estimación cualitativa del contenido de gases se consigue ya de la observación de los que se desprenden en la solidificación en el aparato, pero una estimación más cuantitativa se obtiene cortando las piezas fundidas después de la solidificación. La figura 1.4 muestra el progreso de la desgasificación.

---

[6] HOWARD E.; (1962); *"Tratado Practico de Fundición"*; Segunda Edición; Editorial Aguilar S. A.; España; p. 127

Figura 1.4 Cortes de bloques solidificados en vacío. Izquierda: el contenido de gases es muy grande, Centro: contenido medio de gases, Derecha: desgasificación completa

Fuente: HOWARD E.; (1962); *"Tratado Practico de Fundición"*; Segunda Edición; Editorial Aguilar S. A.; España; p. 131

1.7 FUSIÓN POR INDUCCIÓN EN VACÍO [7]

La fusión por inducción en vacío (VIM) es la fusión de metales por inducción realizado en virtud de un vacío. El éxito en la producción de súper aleaciones por VIM por la industria de turbina de gas estimuló el interés por el VIM para la fabricación de otras aleaciones de aplicaciones críticas para uso en reactores nucleares y electrónica. Además, las bajas pérdidas de material de este proceso hicieron la técnica económica para algunas aleaciones de alto valor que no requieren una pureza superior.

Las ventajas específicas incluyen:

- **Eliminación de Gases.** Con la presión muy baja que se obtiene, 10^{-3} torr o 0.000001 atmósferas, se eliminan los gases indeseables y elementos volátiles potencialmente dañinos de la carga de materias primas cuando se produce la fusión.

---

[7] Instituto Tecnológico Metalmecánico (AIMME); (2009) Observatorio Tecnológico del Metal (OTE); *"Procesos de Fusión y Colada del Titanio y Aleaciones";* Valencia-España.

- **Control de Análisis Químico.** Es posible un control excepcional y reproducible de los elementos reactivos presentes en la composición debido a la falta de atmósfera.
- **Control de Procesos Superior.** Control de presión independiente, temperatura y remoción por inducción proporcionan una oportunidad excepcional para el desarrollo de las prácticas de fusión específicamente adaptadas a composiciones de aleación y propiedades deseadas.
- **Fusión Libre de Escoria.** La fusión en vacío elimina la necesidad de una cubierta protectora de escoria y disminuye el potencial de contaminación accidental por escoria o inclusiones en el lingote.
- **Protección del Fundido.** El alto vacío evita la contaminación nociva de las reacciones con los gases atmosféricos.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

El objetivo del capítulo es presentar los fundamentos teóricos sobre los temas a ser tratados con el fin de poder determinar los factores de diseño, funcionamiento y condiciones de operación del prototipo a construir.

2.1 VACÍO [8]

De acuerdo con la definición de la Sociedad Americana de Vacío (1958), el término *vacío* se refiere a cierto espacio lleno con gases, a una presión total menor que la presión atmosférica, por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual.

Esto significa que en cuanto más se disminuye la presión, mayor vacío se obtiene lo que permite clasificar el grado de vacío. Entonces, se puede hablar de bajo, mediano, alto y ultra alto vacío, en correspondencia con intervalos de presiones cada vez menores. Cada intervalo tiene características propias.

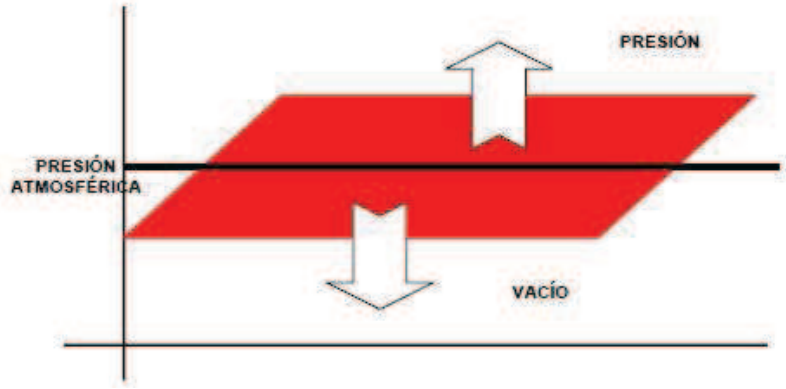


Figura 2.1 Vacío

Fuente: Propia

[8] HOFFMAN D., THOMAS J.; (1998); *"Handbook of Vacuum Science and Technology"*; Printed in the United States of America; p. 3

2.1.1 REGIONES DE PRESIÓN DE VACÍO

El término vacío se refiere a una región que se compone de cerca de 19 órdenes de magnitud bajo 1 atmosfera; por conveniencia, este rango de presiones es generalmente dividido en varias regiones que indican el grado de vacío.

Esta división de la escala de presión bajo 1 atmosfera es algo arbitraria y es una manera conveniente de indicar los diferentes fenómenos físicos que ocurren dentro de los rangos de presión especificados para cada categoría. Muchas aplicaciones industriales de vacío pueden clasificarse usando estas categorías.

Tabla 2.1 Factores de Conversión de las Unidades de Presión

Unidades de Presión	Pa	bar	mbar	Atm	Torr
Pa	1	1×10^{-5}	1×10^{-2}	9.87×10^{-6}	7.5×10^{-3}
bar	1×10^{5}	1	1×10^{3}	0.987	750
mbar	100	1×10^{-3}	1	9.87×10^{-4}	0.75
Atm	1.01×10^{5}	1.013	1013	1	760
Torr	1.33×10^{2}	1.33×10^{-3}	1.33	1.32×10^{-3}	1

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 9

2.1.2 RANGOS DE VACÍO

Tabla 2.2 Características de los Rangos de Vacío

Rangos de vacío	Presión (mbar)	Densidad de Moléculas (cm^3)
Vacío Grueso	1013 - 1	$10^{19} – 10^{16}$
Vacío Medio	$1 – 10^{-3}$	$10^{16} – 10^{13}$
Alto Vacío	$10^{-3} – 10^{-7}$	$10^{13} – 10^{9}$
Ultra Alto Vacío	$< 10^{-7}$	$< 10^{9}$

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 8

2.2 SISTEMA DE VACÍO [9]

Un sistema de vacío es diseñado en base a parámetros que necesitan ser controlados para que el funcionamiento del sistema sea eficiente, estos parámetros son la presión y el caudal.

En un sistema de vacío se necesita una serie de elementos o mecanismos que, al trabajar en conjunto, permiten obtener una atmósfera ideal de trabajo. El arreglo físico de los componentes del sistema depende de las características del sistema que va a ser llevado a cabo.

Un sistema de vacío consta de los siguientes componentes: cámara de vacío, bomba (s) de vacío, válvula de regulación, vacuometros, mangueras, válvulas de paso, sellos y vacuostatos.

2.2.1 CÁMARA DE VACÍO

Las cámaras o contenedores en los sistemas de vacío se construyen por lo general de acero inoxidable. La característica principal que debe tener el material de la cámara es su resistencia a la fuerza ejercida sobre ella por la presión atmosférica. Esto es claro si se considera que la presión atmosférica ejerce una fuerza de 1 kg/cm^2 sobre la cámara.

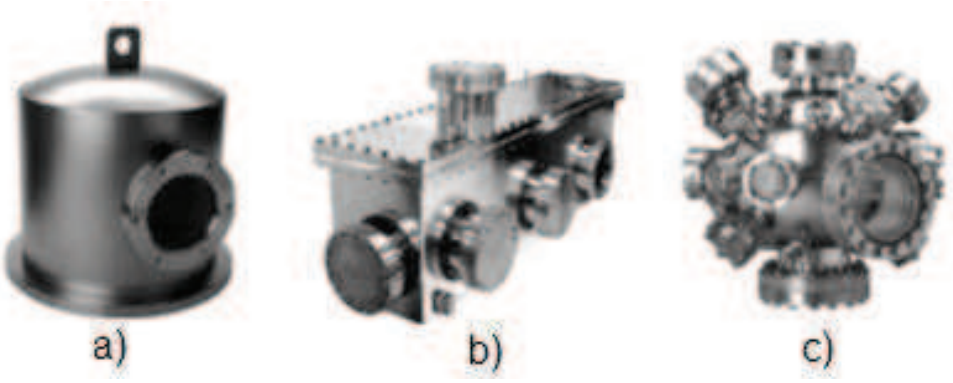


Figura 2.2 Formas más comunes de las Cámaras de Vacío, a) Cilíndrica, b) Paralelepípeda, c) Esférica

Fuente: Chamber & Weldments; General Information.pdf

[9] VACUUBRAND; (2010); *"Tecnología de Sistemas de Vacío"*; Printed in Germany; p. 3

2.2.2 BOMBA DE VACÍO

Fundamentalmente el principio de funcionamiento es común a todas las bombas mecánicas, en definitiva, consiste en el hecho de cambiar de un modo u otro un cierto volumen de aire que fluye de la zona de aspiración. Creando de esta forma una depresión en el interior de la cámara, con respecto al valor de la presión atmosférica que reina en el exterior del mismo.

2.2.3 VÁLVULA DE REGULACIÓN

La válvula de regulación está directamente ligada al control del caudal en el sistema y en sus ramales. La forma más precisa de regular el caudal de un sistema, resulta mediante el uso de una válvula reguladora de caudal. Según la velocidad requerida por el actuador se determinará un caudal.

2.2.4 VACUÓMETRO

Instrumento medidor de presión para valores inferiores a la presión atmosférica. Se trata, pues, de un manómetro adecuado para medidas negativas de presiones relativas.

2.2.5 MANGUERAS

En un sistema de vacío, el correcto dimensionado de las líneas que unen el sistema de bombeo con el recinto de proceso es por lo menos tan importante como determinar correctamente la velocidad de bombeo necesaria para el proceso. Un incorrecto dimensionado de las líneas puede llevar a que, aun cuando la velocidad del sistema de bombeo instalado sea mucho mayor que la requerida, no se alcance la presión de trabajo o se tenga una presión inestable durante el proceso.

2.2.6 VÁLVULA DE PASO

Una válvula de paso es un sistema mecánico gracias al cual se puede regular el flujo de líquidos y gases que circulan a través de una cañería.

2.2.7 SELLOS

Son anillos generalmente de forma circular con sección transversal rectangular o circular que se utilizan en las extensiones de las cámaras de vacío; son fabricados generalmente de materiales de viton, neopreno o metálicos.

2.2.8 VACUOSTATO

Un vacuostato no es más que un presóstato para trabajar a presiones muy bajas o, lo que es lo mismo, a alto grado de vacío. Al igual que el presóstato tiene una presión de consigna que puede ser regulable o fija y, cuando la presión llega al valor de consigna, hace conmutar un contacto de tipo relé. La conmutación de ese contacto puede ser utilizada para cualquier proceso que interese: arrancar y parar la bomba de vacío, abrir o cerrar una determinada válvula, etc.

2.3 EQUIPO DE FUSIÓN AL VACÍO [10]

Existen dos configuraciones básicas de equipos de fusión al vacío: (1) La cámara de vacío se encuentra situada en el interior del sistema de fusión y (2) El sistema de fusión forma parte de la cámara de vacío.

Una representación esquemática de cada configuración se puede ver en la figura 2.3. Aunque ambas configuraciones presentan sus propias ventajas e inconvenientes, la configuración (2) representa la más adecuada.

---

[10] Artículo de Investigación (2009): Revista Metalúrgica: "*Equipo de fusión al vacío para la determinación cuantitativa del gas atrapado en piezas fundidas*"; J.J. Hernández-Ortega, R. Zamora,

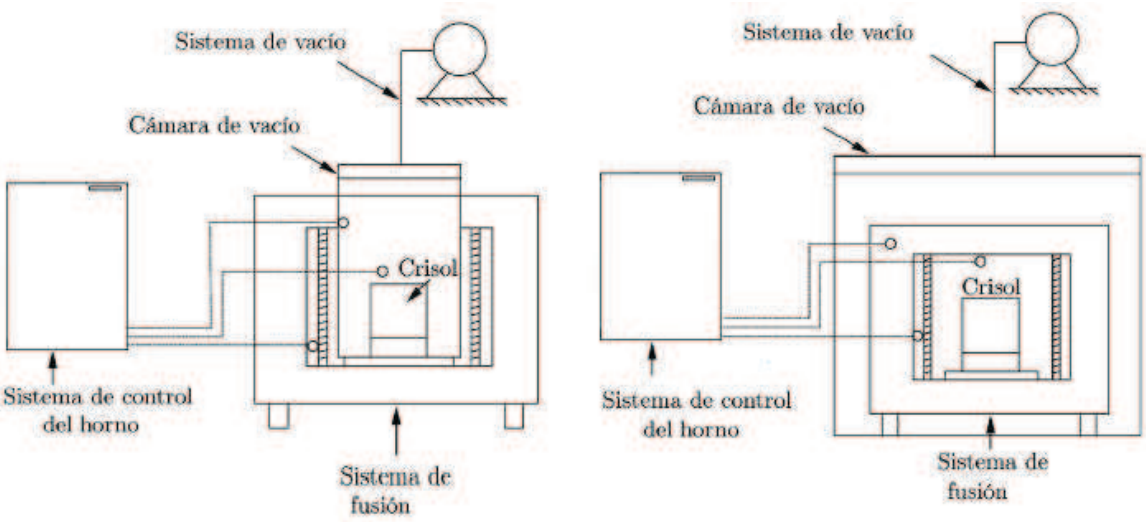


Figura 2.3 Configuraciones básicas de los sistemas de fusión al vacío. a) Cámara de vacio dentro del horno de fusión. b) Horno de fusión dentro de la cámara de vacío

(a) (b)

Fuente: Artículo de Investigación (2009): Revista Metalúrgica: "*Equipo de fusión al vacío para la determinación cuantitativa del gas atrapado en piezas fundidas*"; J.J. Hernández-Ortega, R. Zamora.

Las partes principales que conforman el equipo de fusión al vacío son: cámara de vacío, bomba de vacío, medidor de presión de vacío y horno de inducción.

A continuación se describen algunos tipos de bombas en función del rango de vacío que por tratarse de un prototipo, se considera trabajar dentro de los límites de vacío grueso. Así mismo se detalla cierta información del funcionamiento del horno de inducción.

2.3.1 TIPOS DE BOMBAS DE VACÍO

La selección de la bomba de vacío que va a emplearse para un cierto proceso está definida por sus parámetros específicos, los cuales determinan sus propiedades. Los parámetros más importantes de los sistemas de vacío son: la presión más baja que puede lograr, el intervalo de presión, la velocidad de bombeo, la presión de descarga y el gas residual. [11]

[11] Revista BETICO; Catalogo General (2004); *"Vacío – Presión - Líquidos"*; Rietschle Thomas

2.3.1.1 Bombas de Vacío según el Rango de Trabajo

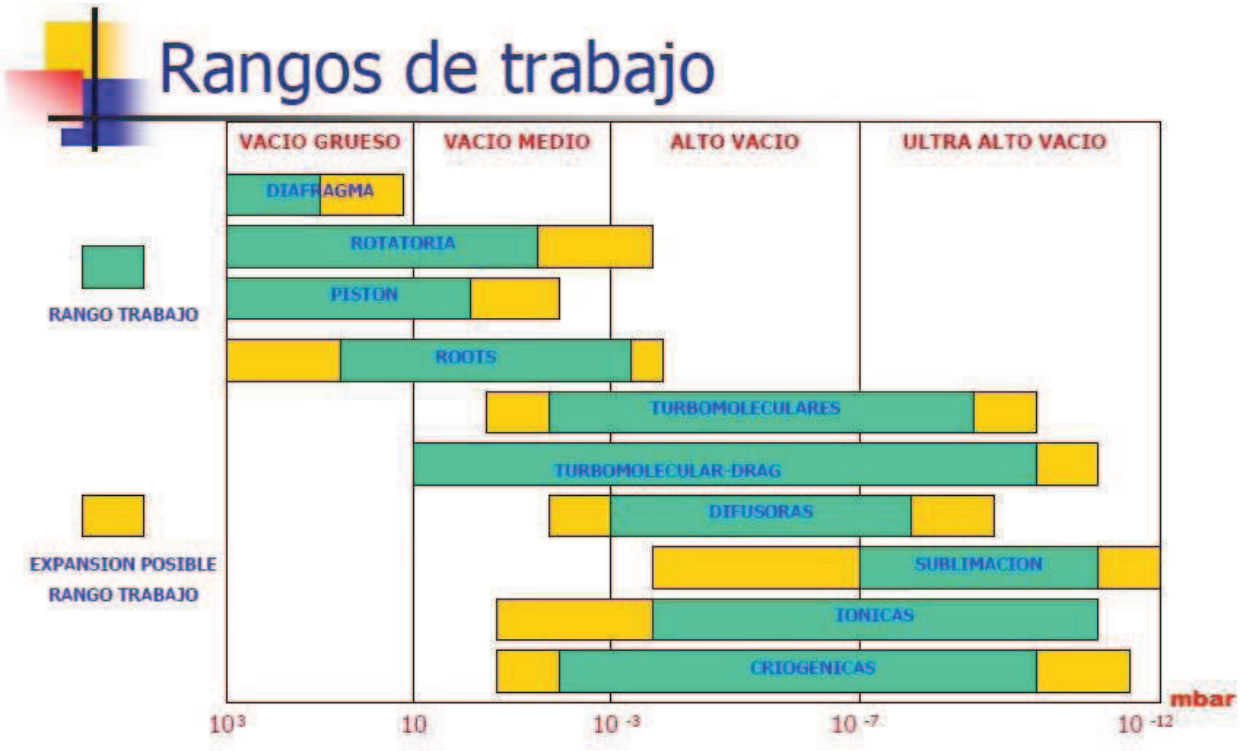


Figura 2.4 Bombas de vacío según el Rango de Trabajo

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 33

A continuación se describen algunas bombas de vacío que son utilizadas para trabajar dentro del rango de vacío grueso.

2.3.1.1.1 Bomba de Membrana

Se basa en el cambio continuo de volumen de una pequeña cámara de bombeo como consecuencia de la expansión y compresión que sufre su membrana. En la etapa de expansión se produce la toma de gas y en la de compresión su expulsión. Suelen tener tres – cuatro etapas de bombeo para llegar a un vacío final de aproximadamente 2 mbar. [12]

VENTAJAS: Bomba totalmente seca, utilizada en procesos químicos.

DESVENTAJAS: No alcanza un gran vacío, pequeña capacidad de bombeo.

MANTENIMIENTO: Cambio de membranas y válvulas.

---

[12] TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 36

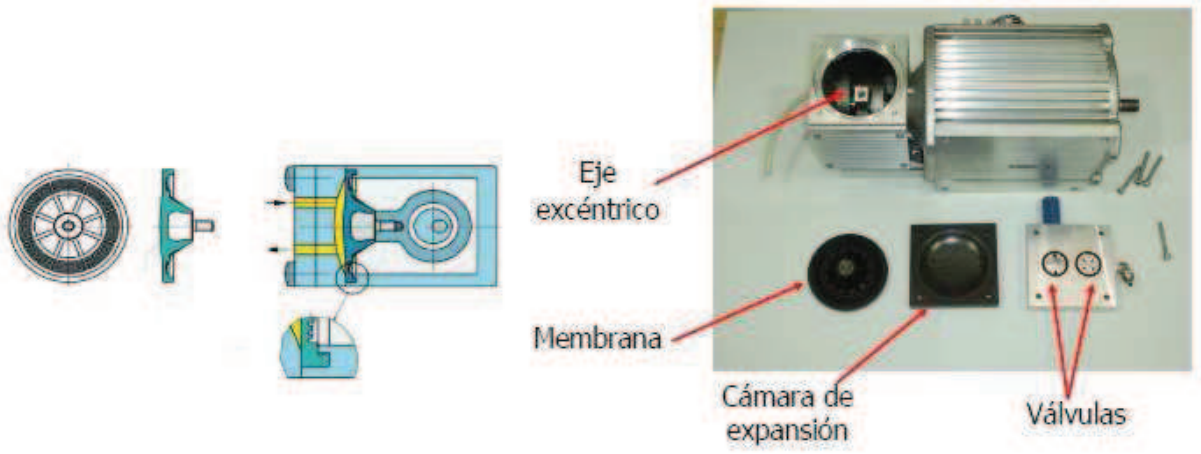


Figura 2.5 Bomba de Diafragma con sus partes constitutivas

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 38

2.3.1.1.2 Bomba Rotatoria de Paletas

El funcionamiento de la bomba de paletas rotatorias es sencillo: al girar el rotor provoca que las paletas se deslicen sobre las paredes del estator (con una presión uniforme debido al resorte que sostiene a las paletas), esto permite la entrada del gas entre el estator y el rotor; después se mueve el volumen de gas contenido en esta región hasta la salida del estator.

VENTAJAS: Alto índice de compresión, efectiva desde presión atmosférica, contamina.

DESVENTAJAS: Retrodifusión de vapores de aceite al sistema, contamina.

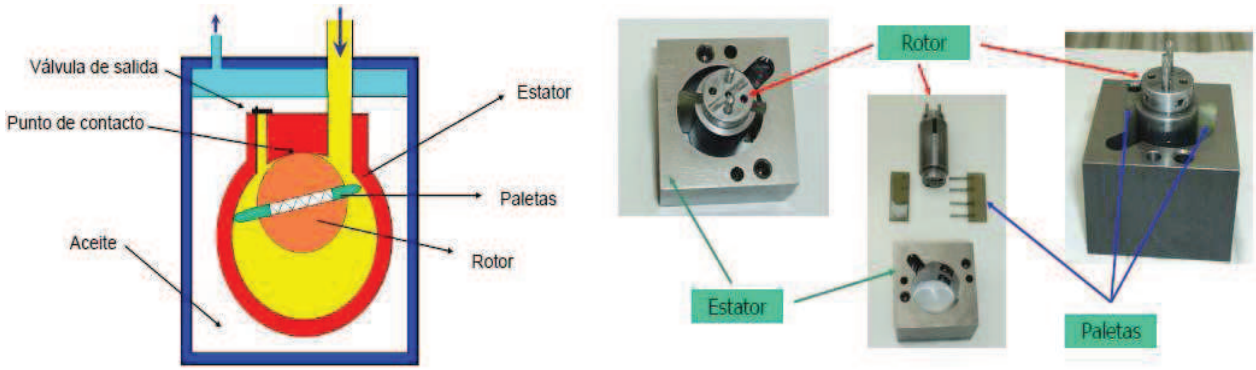


Figura 2.6 Bomba Rotatoria de Paletas con sus partes constitutivas

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 45

2.3.1.1.3 Bomba de Pistón Rotatoria

Se utilizan en sistemas grandes, solos o en combinación con bombas de lóbulos. Una bomba de pistón rotatorio es una bomba mecánica robusta y sencilla. El pistón y todas las piezas están acoplados mecánicamente a un eje que es accionado por un motor. [13]

VENTAJAS: Exenta de aceite y partículas, poco mantenimiento.

DESVENTAJAS: Ruidosa.

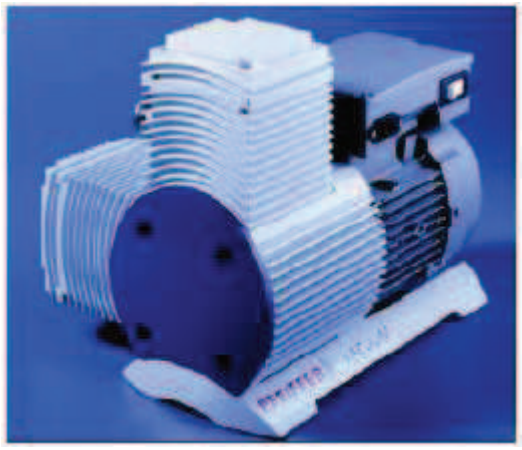


Figura 2.7 Bomba de Pistón Rotatoria

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 57

2.3.1.1.4 Bomba Roots [14]

Se utiliza en serie con una bomba rotativa para lograr mayor velocidad y disminuir la alta presión en la región media de vacío. Constan de dos rotores en forma de ocho montados en ejes paralelos. Los rotores tienen un espacio entre ellos y con la carcasa que normalmente es de 0,2 mm. Giran en sincronismo en sentidos opuestos, a velocidades de 3000 a 3500 rpm. Estas velocidades son posibles gracias al que el lubricante sella los espacios entre los rotores y la carcasa de la bomba.

---

[13] Revista BETICO; Catalogo General(2004); *"Vacío – Presión - Líquidos"*; Rietschle Thomas

[14] TECNOVAC; *"Curso de vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 63

VENTAJAS: Alta capacidad de bombeo, exenta de aceite, coste de funcionamiento bajo.

DESVENTAJAS: Necesita bomba de apoyo, ruidosa.

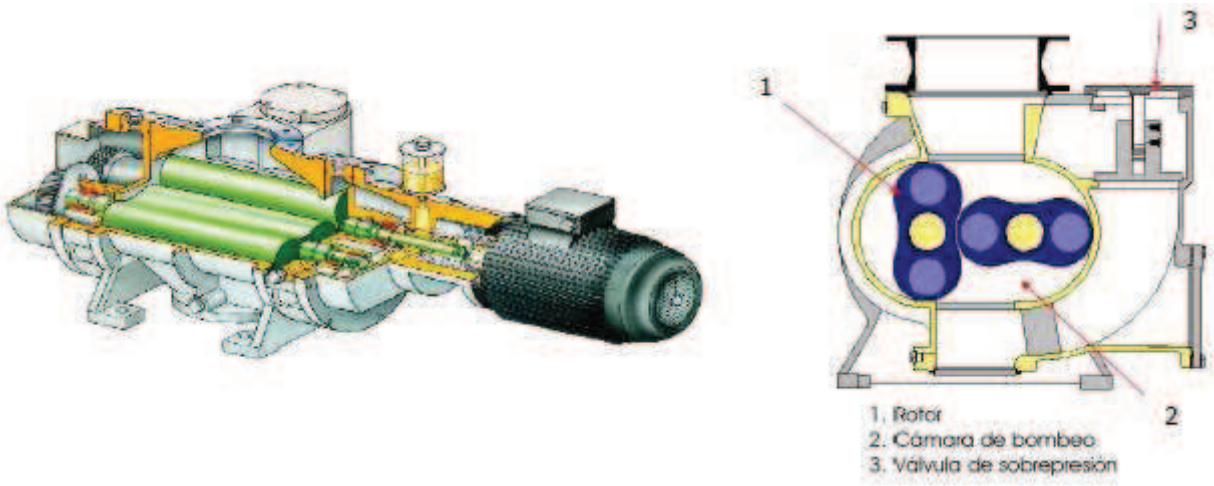


Figura 2.8 Bomba Roots con sus partes constitutivas

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 64

2.3.2 HORNO DE INDUCCIÓN

El principio de funcionamiento de este tipo de unidades es una corriente eléctrica que pasa a través de una bobina situada en el interior del refractario del horno, creando un campo electromagnético que se induce a la carga metálica que actúa como bobina secundaria generando calor que finalmente funde el metal.

La cantidad de energía absorbida por la carga depende de la intensidad del campo magnético, la resistividad eléctrica de la carga y la frecuencia de operación. El campo magnético secundario que se crea en la carga posee siempre un sentido opuesto al de la bobina lo que crea una fuerza electromagnética que pone en movimiento la masa fundida.

Los hornos de inducción pueden ser de baja, media o de alta frecuencia y el rango de volúmenes de producción que se puede obtener con este tipo de unidades es muy amplio. El control metalúrgico de la aleación es muy preciso debido a que no hay producción de gases de combustión y las oxidaciones de los

elementos pueden conocerse muy fácilmente, además la contaminación es mínima lo que hace el control ambiental relativamente fácil.

La bobina de los hornos de inducción es de cobre. Se consigue un mayor rendimiento en la fusión del material, producto del campo eléctrico, cuanto más delgada sea la pared refractaria. Debido a esto, la bobina debe ser refrigerada internamente con agua. La temperatura de la bobina no debe pasar los 45 ° C, ya que a los 60 ° C se favorece la formación de incrustaciones que tienden a cerrar los canales. [15]

La intensidad de las corrientes inducidas es función de la potencia de la bobina, que a su vez es proporcional al volumen de material a ser fundido.

La frecuencia de alimentación de la bobina es uno de los parámetros importantes de los hornos a inducción, cuya definición está íntimamente ligada a la aplicación del horno.

Figura 2.9 Horno de Inducción

Fuente: Inductotherm, Catálogo del Horno de inducción; Laboratorio de Fundición, EPN.

[15] ORDOÑEZ Stella; *"Técnicas Experimentales en Metalurgia"*; Dpto. de Ingeniería Mecánica; Universidad de Santiago de Chile; p. 55

CAPÍTULO III

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

El objetivo del capítulo es presentar las especificaciones técnicas para el diseño del prototipo de cámara de presiones bajas, estableciendo la geometría en base a los parámetros de: tipo de vacío, rango de trabajo y facilidad de construcción. Además se presenta el análisis de las diferentes alternativas propuestas para el diseño del prototipo así como del mecanismo de transporte y basculamiento del horno de inducción dentro de la cámara. De cada alternativa propuesta se presenta una breve descripción general indicando sus principales características, seguido de la selección de la mejor alternativa.

3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE VACÍO

Los diferentes equipos que se van a dimensionar y construir están sujetos a dos parámetros principales:

1. Condiciones internas del prototipo de cámara de vacío.
2. Condiciones ambientales de funcionamiento de dicho prototipo.

Las condiciones se pueden apreciar en la Tabla 3.1 y determinan los límites de funcionamiento del prototipo.

Tabla 3.1 Condiciones Ambientales de la Ciudad de Quito

Altitud [m]	Humedad relativa [%]	Presión [kPa]	Presión [psi]
2800	67 a 80	72.809	10.56

Fuente: Propia

Las características del sistema de vacío son las siguientes:

- Rango de vacío a alcanzar dentro del prototipo: 1013 – 1 mbar (vacío grueso).

- Resistencia a presión externa debido a que el prototipo trabaja a una presión menor que la atmosférica.
- Red de suministro eléctrico en el Laboratorio de Fundición de la F.I.M. (220 ó 110 [V] y 60[Hz]).
- Facilidad de movilidad del horno de inducción para desplazarse dentro del prototipo y colar con facilidad las aleaciones de aluminio deseadas.

Con base en estos criterios se realizan las consideraciones para el diseño del sistema de vacío.

3.1.1 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE VACÍO

De los parámetros antes mencionados se define el tipo de vacío que se va a generar, correspondiendo a vacío grueso. Las características del mismo se pueden apreciar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características del Vacío Grueso

Rango de vacío	Presión [mbar]	Densidad de moléculas/cm^3
Vacío Grueso	1013 - 1	$10^{19} – 10^{16}$

Fuente: TECNOVAC; *"Curso de vacío";* Tecnología de vacío S.L.; p. 8

Por lo expresado anteriormente se realiza un esquema como el mostrado en la Figura 3.1, para el cual, el prototipo de cámara se conecta a la bomba de vacío mediante una línea de extracción con una válvula de un solo sentido para impedir el retorno del aire extraído.

3.1.2 PARÁMETROS FUNCIONALES DE DISEÑO DE LA CÁMARA

El diseño de la cámara que va a trabajar a una presión interior menor que la atmosférica debe cumplir con lo siguiente:

- Resistencia a la corrosión.

- El material empleado para la construcción no debe ser magnético.
- Adaptabilidad para la implementación del mecanismo interno que desplaza y bascula al horno.
- Debe implementar visores para apreciar con facilidad la fundición que se realiza en su interior.

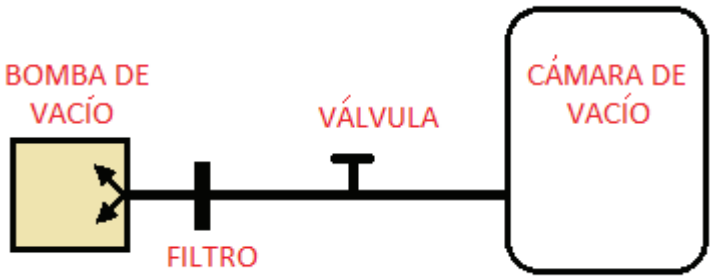


Figura 3.1 Esquema del Sistema de Vacío

Fuente: Propia

3.2 MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CÁMARAS DE VACÍO

Los materiales comúnmente usados en las técnicas de vacío y con regularidad en la aplicación específica que se presenta, deben básicamente tener la característica de no ser magnéticos debido a que no deben influir en el funcionamiento del horno de inducción que se encuentra en su interior.

Debido a esto se presentan dos tipos de metales para su construcción como son: Acero Inoxidable y Aluminio. La selección del material idóneo, se la realiza mediante una matriz de decisión, en donde el puntaje más alto que obtiene una alternativa, resultado del producto de un factor de peso y una calificación, caracteriza a la alternativa más idónea.

A continuación se presenta dicha matriz en donde se valoran parámetros fundamentales según las propiedades propias de los materiales así como se le concede una calificación a cada parámetro en base a las siguientes valoraciones:

1 = Regular, 2 = Poco Aceptable, 3 = Aceptable, 4 = Bueno, 5 = Muy bueno.

Tabla 3.3 Matriz de Decisión para el Material de la Cámara de Vacío

Material		Acero Inoxidable		Aluminio	
Características	Factor de peso	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
Facilidad de adquisición	0.1	3	0.3	2	0.2
Soldabilidad	0.2	4	0.8	3	0.6
Resistencia a la corrosión	0.2	5	1.0	4	0.8
Maquinabilidad	0.2	3	0.6	4	0.8
Precio	0.2	3	0.6	2	0.4
Vida Útil	0.1	5	0.5	3	0.3
TOTAL	1		3.8		3.1

Fuente: Propia

Según los resultados de la matriz de decisión se concluye que el material óptimo para la construcción de la cámara es el acero inoxidable debido a su alta resistencia principalmente a la corrosión y su conductividad térmica, además se debe aclarar que para este caso se recomienda trabajar con la serie 304; debido a que este tipo de acero inoxidable es no magnético y de esa forma no influya con el campo magnético del horno de inducción.

3.3 ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA LA CÁMARA

La característica principal que debe tener el material de la cámara es su resistencia a la fuerza ejercida sobre ella por la presión atmosférica. Esto es claro si se considera que la presión atmosférica ejerce una presión de un 1 kgf/cm² en el área superficial de la cámara. Por ejemplo, una cámara con una superficie de 1 m² debe soportar 10000 kgf, que es proporcional a tener 10 toneladas de peso.

3.3.1 CÁMARA CILÍNDRICA DISPUESTA VERTICALMENTE (ALTERNATIVA 1)

Figura 3.2 Cámara de Vacío Cilíndrica dispuesta Verticalmente

Fuente: Propia

3.3.1.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.2 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Visores
2. Brida para cargar al horno
3. Puerta para extracción de aleaciones fundidas
4. Placa base

3.3.1.2 Descripción

En esta alternativa se presenta la cámara en forma cilíndrica dispuesta verticalmente, consta básicamente de tres visores que permiten observar su interior en donde se funden, colan y solidifican las aleaciones solicitadas, además

de una brida en su parte superior por donde se carga al horno y una puerta en su parte frontal que fundamentalmente sirve para extraer las aleaciones fundidas.

Así mismo se tiene de soporte una placa base que mediante elementos de sujeción sirve para unir el cuerpo cilíndrico con su parte inferior.

3.3.1.3 Ventajas

- Puede resistir con mayor facilidad la presión externa y los esfuerzos a los que está sometida.
- Permite trabajar en otros rangos de vacio dependiendo de la aplicación que se necesite.
- Es el tipo más común para aplicaciones industriales.

3.3.1.4 Desventajas

- Alto costo de fabricación.
- Dificultad en el caso del rolado debido a que la industria local no muy pocos los lugares que provean dicho servicio.
- Inconvenientes para la implementación del mecanismo para transportar y bascular al horno dentro del prototipo.

3.3.2 CÁMARA PARALELEPÍPEDA (ALTERNATIVA 2)

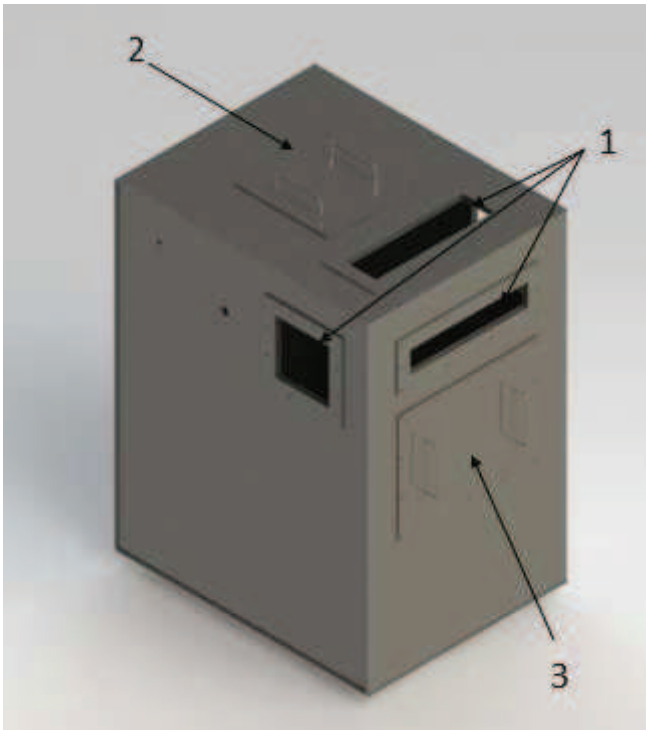


Figura 3.3 Cámara de Vacío Paralelepípeda

Fuente: Propia

3.3.2.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.3 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Visores
2. Puerta para cargar al horno
3. Puerta para extracción de aleaciones fundidas

3.3.2.2 Descripción

En este caso se tiene la cámara de forma paralelepípeda en donde se puede implementar el uso de visores cuadrados que permitan visualizar su interior, además de dos puertas que sirven para cargar al horno y extraer las aleaciones que han sido fundidas.

3.3.2.3 Ventajas

- Costo de fabricación relativamente menor que la alternativa anterior.
- Bastante cómoda para implementar el mecanismo para transportar y bascular al horno.
- Recomendable para la aplicación que se requiere.

3.3.2.4 Desventajas

- No soporta muy bien la presión externa y los esfuerzos que se encuentran concentrados en las aristas.
- No se recomienda para aplicaciones industriales en donde se requieren rangos de vacío mayores.
- Debido a su configuración se requiere que al menos uno de sus lados sea desmontable.

3.3.3 CÁMARA CILÍNDRICA DISPUESTA HORIZONTALMENTE (ALTERNATIVA 3)

Figura 3.4 Cámara de Vacío Cilíndrica dispuesta Horizontalmente

Fuente: Propia

3.3.3.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.4 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Estructura soporte
2. Visores
3. Brida para cargar al horno
4. Tapa frontal para extracción de aleaciones fundidas

3.3.3.2 Descripción

En esta alternativa se presenta la cámara en forma cilíndrica dispuesta horizontalmente, la misma que debe ser sujeta a una estructura que soporta esta configuración, consta básicamente de dos visores en el cuerpo cilíndrico, además de un tercer visor en la tapa frontal de la cámara que también sirve para extraer la fundición que se realiza en su interior. Además se presenta una brida que sirve para cargar al horno en su parte superior.

3.3.3.3 Ventajas

- Al igual que la alternativa 1 tiende a resistir con bastante facilidad la presión externa y los esfuerzos a los que está sometida.
- Se pueden trabajar en otros rangos de vacío si la aplicación lo requiere.
- Se la utiliza con bastante frecuencia en algunas aplicaciones industriales.

3.3.3.4 Desventajas

- Se necesita de una estructura adicional que permite acondicionar la cámara a dicha disposición.
- Alto costo de fabricación.
- Al igual que la alternativa 1 se requiere de bridas, las mismas que no se encuentran con facilidad en el mercado local.

- Se presenta inconvenientes al momento de tratar de implementar el mecanismo para transportar y bascular el horno de inducción en su interior.

3.3.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de haber planteado tres alternativas, se procede con la evaluación de las mismas para tomar la decisión más adecuada. Esta evaluación se basa en distintos aspectos a considerar descritos como criterios de ponderación para la selección de la alternativa que se describen a continuación.

3.3.4.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa

Los criterios de ponderación que se consideran más determinantes son:

a) **Costo**, es el criterio que siempre está presente en la selección de alternativas en todo proyecto, en este caso la geometría de la cámara que se elija no debe encarecer el costo final del prototipo.

b) **Disponibilidad en el mercado nacional**, los componentes de la cámara deben encontrarse de preferencia en el mercado local, a fin de evitar largos tiempos de espera para su importación.

c) **Robustez**, la configuración de la cámara debe resistir la presión atmosférica que se distribuirá alrededor del prototipo.

d) **Flexibilidad**, se desea que el prototipo pueda ajustarse según la necesidad de movilizar al horno de inducción dentro de este a fin de lograr el colado de las aleaciones sin interrupción alguna.

3.3.4.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados

Para decidir entre diversas soluciones es suficiente con conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Es por eso que se utiliza el método ordinal corregido de criterios ponderados que, sin la necesidad de evaluar los parámetros

de cada propiedad, y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, permite obtener resultados globales suficientemente significativos. [16]

Se trata de confrontar criterios en tablas y se asigna la siguiente escala:

- 1 Si el criterio de las filas es superior que el de las columnas
- 0.5 Si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas
- 0 Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Luego, para cada criterio, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se le añade una unidad (para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula); después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio.

La evaluación total para cada solución resulta de la suma de los productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

3.3.4.3 Valoración y Factores de Incidencia

Evaluación del peso específico de cada criterio.

Tabla 3.4 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio

Costo > Robustez > Disponibilidad > Flexibilidad

Criterio	Costo	Robustez	Disponibilidad	Flexibilidad	Σ+1	Ponderación
Costo		1	1	1	4	0.4
Robustez	0		1	1	3	0.3
Disponibilidad	0	0		1	2	0.2
Flexibilidad	0	0	0		1	0.1
				Suma	10	1

Fuente: Propia

3.3.4.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones

Evaluación del peso específico del criterio costo:

[16] Riba C, Diseño Concurrente, ETSEIB – UPC, 2002, p. 59, 60

Tabla 3.5 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo

Alternativa 2 > Alternativa 1 = Alternativa 3

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	1.5	0.25
Alternativa 2	1		1	3	0.5
Alternativa 3	0.5	0		1.5	0.25
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio robustez:

Tabla 3.6 Evaluación del Peso Específico del Criterio Robustez

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Robustez	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.1667
Alternativa 3	0	1		2	0.3333
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad:

Tabla 3.7 Evaluación del Peso Específico del Criterio Disponibilidad

Alternativa 2 > Alternativa 1 = Alternativa 3

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	1.5	0.25
Alternativa 2	1		1	3	0.5
Alternativa 3	0.5	0		1.5	0.25
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio flexibilidad:

Tabla 3.8 Evaluación del Peso Específico del Criterio Flexibilidad

Alternativa 2 >Alternativa 1 > Alternativa 3

Flexibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0.2
Alternativa 2	1		1	3	0.6
Alternativa 3	0	0		1	0.2
			Suma	5	1

Fuente: Propia

3.3.4.5 Resultados y Conclusiones

De los resultados cuantitativos antes obtenidos, se obtiene la prioridad del diseño entre las tres alternativas, que expresa cuál de ellas cumple de mejor manera con las especificaciones más importantes.

Tabla 3.9 Tabla de Resultados y Conclusiones

Conclusión	Costo	Robustez	Disponibilidad	Flexibilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.1	0.15	0.05	0.02	0.32	2
Alternativa 2	0.2	0.05	0.1	0.06	0.41	1
Alternativa 3	0.1	0.0999	0.05	0.02	0.2699	3

Fuente: Propia

Después del análisis realizado se puede concluir que la alternativa de forma paralelepípeda es la mejor opción, por lo tanto se procede a realizar una síntesis de la alternativa seleccionada.

3.3.4.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada

La alternativa seleccionada para este caso radica fundamentalmente en que se tiene suficiente espacio para implementar el mecanismo de movimiento del horno de inducción en su interior, además de que se abaratan básicamente los costos de fabricación.

La principal desventaja que se presenta es la concentración de esfuerzos en las aristas de la cámara por lo que será necesario instalar un alma metálica en su interior para que básicamente reduzca dichos esfuerzos y se refuercen algunas

partes internas que según la teoría de resistencia de materiales podrán pandear debido a la distribución uniforme de presión a la que estará expuesta dicha cámara.

3.4 ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN

Actualmente para la etapa de colado de aleaciones con el uso del horno de inducción que se dispone en el Laboratorio de Fundición se necesita levantar manualmente dicho horno, sin embargo se necesita un mecanismo que lo desplace dentro de la cámara ya que el sistema a implementar debe encerrar una atmosfera controlada en donde se necesitan reducir las fugas a la menor cantidad posible para trabajar en el rango de vacío mencionado.

3.4.1 DESPLAZAMIENTO VERTICAL CON MECANISMO DE TIJERAS (ALTERNATIVA 1)

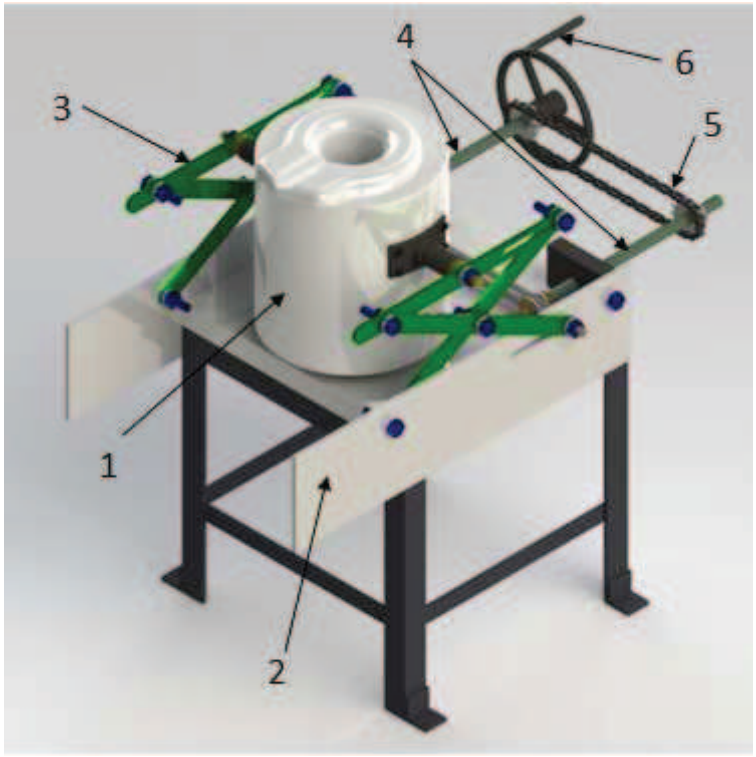


Figura 3.5 Esquema del mecanismo de tijeras y tornillo de potencia accionado manualmente

Fuente: Propia

3.4.1.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.5 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Horno de Inducción
2. Estructura soporte
3. Mecanismo de tijeras
4. Tornillo de rosca triangular (2)
5. Transmisión de movimiento a través de cadena
6. Volante accionador del tornillo

3.4.1.2 Descripción

Basado en la unión de dos eslabones en su punto medio, los cuales transforman el movimiento horizontal en movimiento vertical. Al conformar esta estructura el peso que este soporta se distribuye de una mejor manera.

El funcionamiento del mecanismo se lo realiza por medio de dos tornillos de rosca triangular accionados por medio de un volante a través de una cadena ofreciéndose un movimiento suave y preciso a baja velocidad indicado para este tipo de necesidad.

3.4.1.3 Ventajas

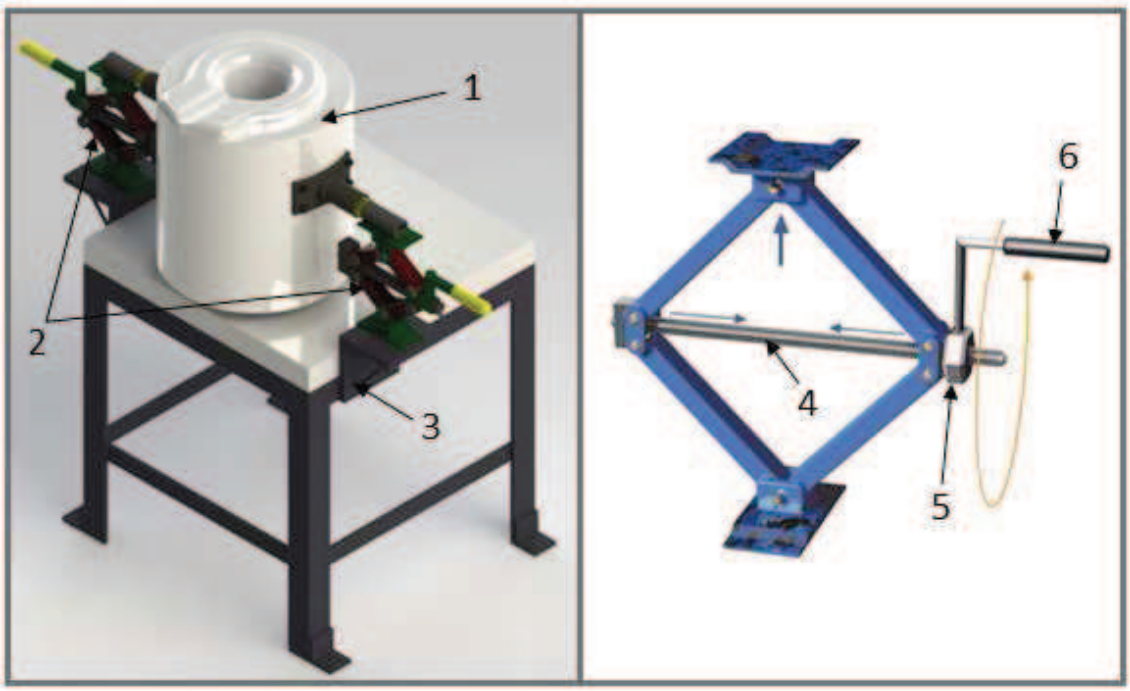
- Desplaza al horno verticalmente de manera suave y precisa.
- Bastante útil para mover el peso requerido dentro del prototipo.
- Elementos de fácil mantenimiento.
- Costo relativamente bajo fabricación así como de operación.

3.4.1.4 Desventajas

- Los tornillos se deben fabricar ya que no se encuentran de venta en el mercado local debido a su gran longitud.

- Los eslabones deben ser robustos así como los elementos de sujeción deben ser de alta resistencia para soportar el peso del horno con material fundido que posteriormente se colara en un molde previamente establecido.
- Se deben implementar unos canales en la estructura para que sirva de guía y extremos de acuerdo a las necesidades de movimiento del mecanismo.

3.4.2 DESPLAZAMIENTO VERTICAL CON DOBLE GATO MECÁNICO A MANIVELA (ALTERNATIVA 2)



(a) (b)

Figura 3.6 (a) Esquema del mecanismo con doble gato mecánico a manivela, (b) Detalle del funcionamiento de un gato mecánico

Fuente: Propia

3.4.2.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.6 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Horno de Inducción

2. Mecanismos de gato mecánico a manivela
3. Estructuras soporte para los mecanismos
4. Eje roscado (Husillo)
5. Tuerca
6. Manivela

3.4.2.2 Descripción

Compuesto principalmente de un eje roscado (husillo) y una tuerca con la misma rosca que el eje, que sirven de unión a cuatro eslabones generalmente formados de perfiles laminados en forma de C.

Este sistema es accionado por medio de una manivela que gira el tornillo de potencia produciendo el movimiento relativo de las tuercas que se encuentran sujetas a las articulaciones haciendo que estas se aproximen produciendo l elevación y al alejarse el descenso, transformándose el movimiento circular en lineal que sirve para levantar al horno por ambos extremos donde se apoya para desplazarlo.

3.4.2.3 Ventajas

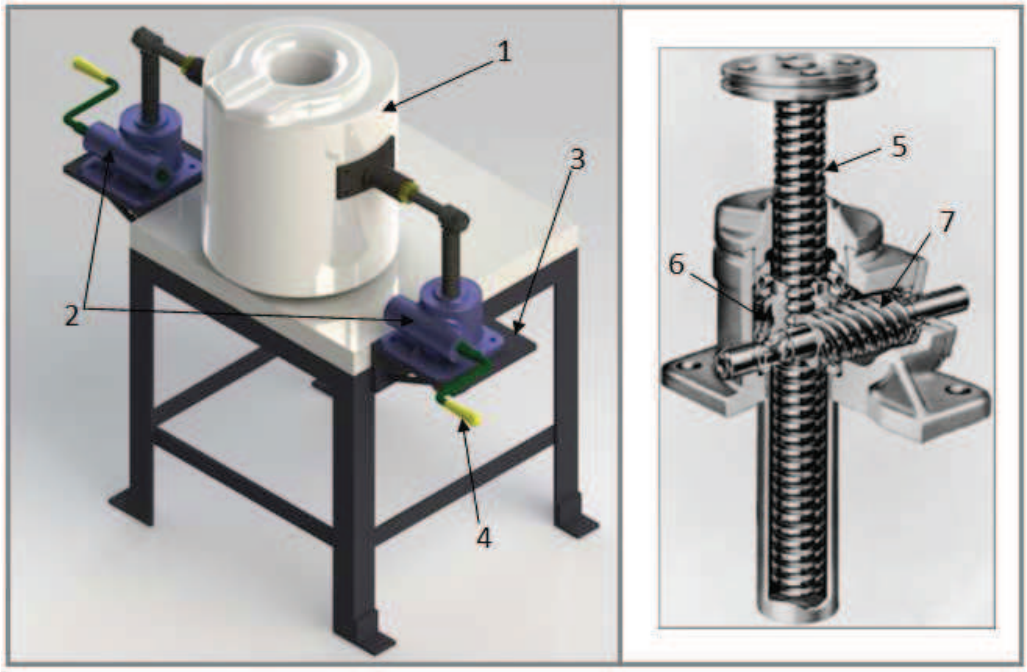
- Fácil adquisición en el mercado puesto que lo utilizan algunos vehículos.
- Costo relativamente parecido que la alternativa anterior considerando que no se necesita fabricar el mecanismo.
- Relativamente cómodo para ubicarlo dentro de la cámara.
- Elementos de fácil mantenimiento.

3.4.2.4 Desventajas

- El desplazamiento del horno de manera vertical no será muy uniforme, puesto que se necesita de dos personas para accionar a los gatos mecánicos.

- Debido a la configuración del mecanismo así como su ubicación dentro del prototipo es necesario aumentar el ancho de la cámara para evitar inconvenientes por el accionar de las manivelas.
- Se deben tomar en cuenta mayores condiciones de seguridad puesto que el horno puede inclinarse incorrectamente y derramarse el metal fundido.

3.4.3 DESPLAZAMIENTO VERTICAL MEDIANTE DOBLE TORNILLO DE POTENCIA ACCIONADOS POR SIN FINES A TRAVÉS DE CORONAS (ALTERNATIVA 3)



(a) (b)

Figura 3.7 (a) Esquema del mecanismo con doble tornillo de potencia accionados por sin fines a través de coronas, (b) Detalle del funcionamiento del mecanismo

Fuente: Propia

3.4.3.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.7 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Horno de Inducción

2. Mecanismo de tornillo de potencia accionado por sin fin a través de una corona
3. Estructura soporte de los mecanismos
4. Manivela para el tornillo sin fin
5. Tornillo de potencia
6. Corona
7. Tornillo sin fin

3.4.3.2 Descripción

Accionado básicamente por el giro del tornillo sin fin que se encuentra conjugado con un tornillo de potencia a través de una corona que permite el movimiento lineal de elevación.

Empleando dos dispositivos de este tipo en ambos extremos del horno de inducción y mediante el empleo de manivelas en los extremos de los sin fines se puede desplazar verticalmente dicho horno.

3.4.3.3 Ventajas

- Elementos de cómodo mantenimiento.
- Permite obtener una alta ventaja mecánica en el caso de levantamiento de pesos.
- Movimiento axial bastante preciso.
- Soporta con facilidad fuerzas de gran magnitud.

3.4.3.4 Desventajas

- Debido a que deben accionarse los mecanismos por separado, se podría ocasionar un desnivel del horno de inducción y regar la colada; además que el peso no se distribuya correctamente, soportando más carga uno de los dos mecanismos, causando un mayor desgate del tornillos y del sin fín.

- Alto costo de adquisición debido a que este mecanismo no se lo encuentra con facilidad de venta en el mercado, por lo que se puede considerar la idea de importarlos o fabricarlos.
- Se deben tomar en consideración medidas de seguridad puesto que puede derramarse el metal fundido si no se accionan los mecanismos adecuadamente.

3.4.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de haber planteado tres alternativas, se procede con la evaluación de las mismas para tomar la decisión más adecuada. Esta evaluación se basará en distintos aspectos a considerar descritos como criterios de ponderación para la selección de la alternativa que se describen a continuación.

3.4.4.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa

Los criterios de ponderación que se consideran más determinantes son:

a) **Costo**, es el criterio que siempre está presente en la selección de alternativas en todo proyecto, en este caso el mecanismo de desplazamiento vertical del horno que se elija no debe encarecer el costo final del prototipo.

b) **Ergonomía**, este aspecto tiene gran influencia en la actualidad y se encuentra ligado con el confort del operario/os al momento de emplear el mecanismo.

c) **Mantenimiento**, este debe ser lo menos frecuente y de fácil realización.

d) **Sincronización en la elevación del horno**, es un factor vital ya que si no existiera, el mecanismo provocaría que el desplazamiento vertical sea inadecuado, incurriéndose en derramamiento de metal fundido, además de que los componentes del mecanismo se desgasten rápidamente e incluso fallen repentinamente.

e) **Fugas de aire**, es un factor muy importante que debe tenerse en cuenta en la implementación del mecanismo, ya que este debe adaptarse dentro de la cámara que ha de trabajar en un rango de vacío definido y dichas fugas provocarían inconvenientes.

3.4.4.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados

Para decidir entre diversas soluciones es suficiente con conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Es por eso que se utilizará el método ordinal corregido de criterios ponderados que, sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad, y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, permite obtener resultados globales suficientemente significativos. [17]

3.4.4.3 Valoración y Factores de Incidencia

Evaluación del peso específico de cada criterio.

Tabla 3.10 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio

Costo = Sincronización > Fugas > Ergonomía > Mantenimiento

Criterio	Costo	Sincronización	Fugas	Ergonomía	Mantenimiento	Σ+1	Ponderación
Costo		0.5	1	1	1	4.5	0.3
Sincronización	0.5		1	1	1	4.5	0.3
Fugas	0	0		1	1	3	0.2
Ergonomía	0	0	0		1	2	0.1333
Mantenimiento	0	0	0	0		1	0.0667
					Suma	15	1

Fuente: Propia

3.4.4.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones

Evaluación del peso específico del criterio costo:

[17] Riba C, Diseño Concurrente, ETSEIB – UPC, 2002, p. 60

Tabla 3.11 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	2.5	0.4167
Alternativa 2	0.5		1	2.5	0.4167
Alternativa 3	0	0		1	0.1667
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio sincronización:

Tabla 3.12 Evaluación de Peso Específico del Criterio Sincronización

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Sincronización	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.1667
Alternativa 3	0	1		2	0.3333
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio fugas:

Tabla 3.13 Evaluación de Peso Específico del Criterio Fugas

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Fugas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		1	0.5	2.5	0.4167
Alternativa 2	0		0	1	0.1667
Alternativa 3	0.5	1		2.5	0.4167
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio ergonomía:

Tabla 3.14 Evaluación de Peso Específico del Criterio Ergonomía

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Ergonomía	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.1667
Alternativa 3	0	1		2	0.3333
			Suma	6	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio mantenimiento:

Tabla 3.15 Evaluación de Peso Específico del Criterio mantenimiento

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0.5	1	2.5	0.4167
Alternativa 2	0.5		1	2.5	0.4167
Alternativa 3	0	0		1	0.1667
			Suma	6	1

Fuente: Propia

3.4.4.5 Resultados y Conclusiones

De los resultados cuantitativos antes obtenidos, se obtiene la prioridad del diseño entre las tres alternativas, que expresa cuál de ellas cumple de mejor manera con las especificaciones más importantes.

Tabla 3.16 Tabla de Resultados y Conclusiones

Conclusión	Costo	Sincronización	Fugas	Ergonomía	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.125	0.15	0.083	0.0667	0.0278	0.4525	1
Alternativa 2	0.125	0.050	0.033	0.0222	0.0278	0.258	3
Alternativa 3	0.050	0.099	0.083	0.0444	0.0111	0.2875	2

Fuente: Propia

Después del análisis realizado se puede concluir que la alternativa del mecanismo de tijeras y tornillo de potencia accionado manualmente es la mejor opción, por lo tanto se procede a realizar una síntesis de la alternativa seleccionada.

3.4.4.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada

La alternativa seleccionada para el caso de elevación del horno de inducción dentro de la cámara es la que precisa un desplazamiento vertical de una manera cómoda y bastante segura debido al mecanismo que involucra un movimiento regular y concretamente sincronizado que provoca que el horno se eleve correctamente debido a la utilización de dos tornillos que además de producir una alta ventaja mecánica soportan adecuadamente el peso del horno, así como la fricción por deslizamiento.

Cabe mencionar que la configuración de dicho mecanismo además de emplear lo mas adecuadamente el espacio disponible dentro de la cámara, también presenta la ventaja de ser accionado por un solo operario.

3.5 ALTERNATIVAS PARA EL SISTEMA DE BASCULAMIENTO DEL HORNO DE INDUCCIÓN

Debido a la dificultad que se presenta dentro de la cámara de vacío para manipular al horno de inducción y colar las aleaciones, se precisa de un sistema de basculamiento que permita girar dicho horno con la mayor facilidad posible.

Dicho mecanismo debe ser construido de tal manera que al igual que se menciona anteriormente para levantar al horno se evite fugas de aire hacia dentro de la cámara y trabajar dentro del rango de vacío requerido.

3.5.1 BASCULAMIENTO MEDIANTE LEVAS DE CONTORNO (ALTERNATIVA 1)

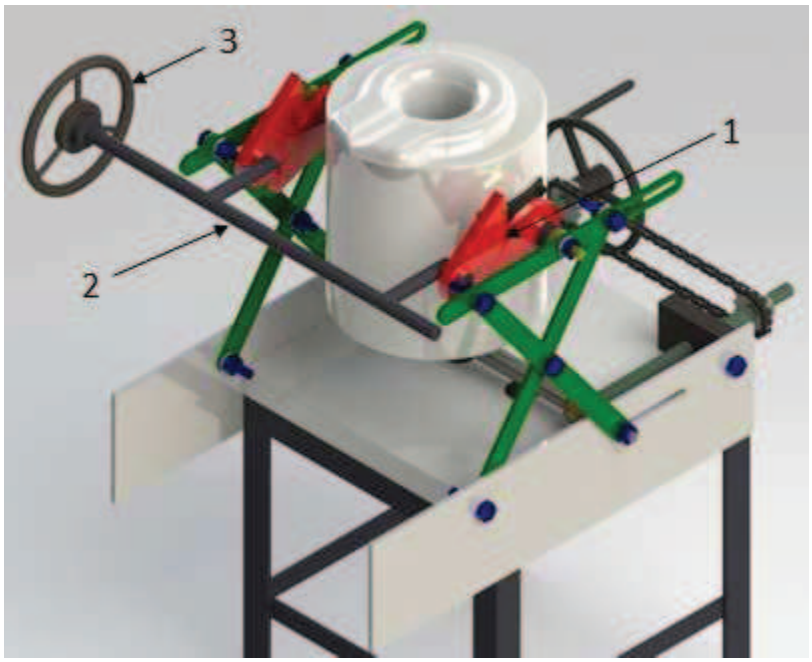


Figura 3.8 Esquema del mecanismo de basculamiento mediante levas de contorno

Fuente: Propia

3.5.1.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.8 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Levas de contorno
2. Eje basculador
3. Volante

3.5.1.2 Descripción

El funcionamiento del mecanismo consiste básicamente en el basculamiento del horno mediante el empleo de levas de contorno ya que con este tipo de levas, los miembros ruedan el uno sobre el otro sin deslizamiento, facilitando de este modo el vertido del metal fundido durante la etapa de colado de la fundición.

3.5.1.3 Ventajas

- Su aplicación se encuentra principalmente en el diseño de sistemas de basculamiento.
- Permite un basculamiento bastante cómodo.
- Ambas superficies de las levas ruedan una sobre otra a lo largo de la misma distancia.

3.5.1.4 Desventajas

- Costo de fabricación relativamente elevado en el caso de precisión dependiendo la aplicación a la que se las destine.
- Necesidad de montaje de las levas de manera lo mas tangencial posible para que la superficie de contacto sea la menor posible, garantizándose de esta manera una rodadura sin deslizamiento.
- Mantenimiento regular de las superficies en contacto.

3.5.2 BASCULAMIENTO MEDIANTE ENGRANAJES RECTOS (ALTERNATIVA 2)

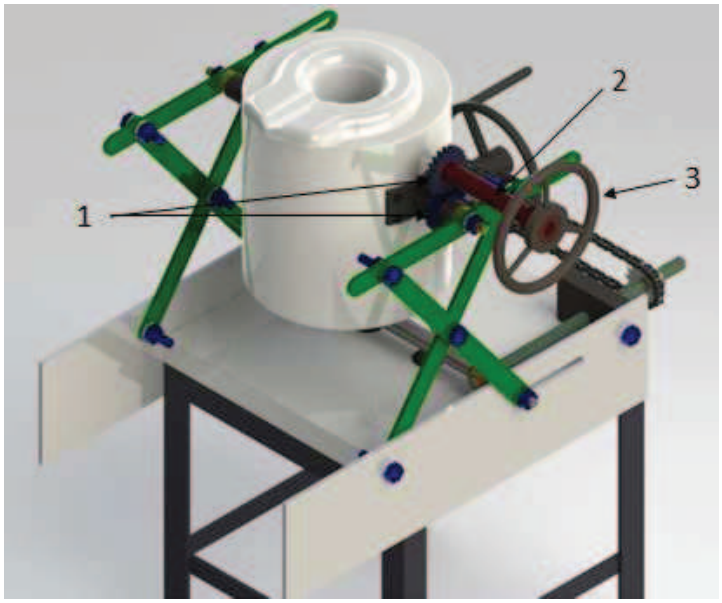


Figura 3.9 Esquema del mecanismo de basculamiento mediante engranajes rectos

Fuente: Propia

3.5.2.1 Partes Constitutivas

En la figura 3.9 se puede visualizar que la alternativa consta de las siguientes partes:

1. Engranes rectos
2. Eje del engrane motriz basculador
3. Volante

3.5.2.2 Descripción

El funcionamiento se produce mediante un engrane fijado a la estructura por medio de un eje que gira por medio de un volante que produce el basculamiento del horno dentro del prototipo, el mismo que esta conjugado con otro engranaje recto que se encuentra fijado por medio de una lengüeta a un extremo del horno, básicamente el basculamiento es muy parecido al caso del horno basculante.

3.5.2.3 Ventajas

- Basculamiento seguro y sin interrupción dentro del prototipo.
- Costo relativamente bajo, puesto que los engranajes pueden adquirirse dentro del mercado local.
- Comodidad moderada para el operario.

3.5.2.4 Desventajas

- Desgaste debido a la fatiga superficial que presenta el propio empleo de engranajes.
- Inconvenientes causados por la sincronización al momento que deben conjugarse los engranajes.
- Mantenimiento relativamente igual comparado con la alternativa anterior.

3.5.3 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de haber planteado dos alternativas, se procede con la evaluación de las mismas para tomar la decisión más adecuada. Esta evaluación se basará en distintos aspectos a considerar descritos como criterios de ponderación para la selección de la alternativa que se describen a continuación.

3.5.3.1 Criterios de ponderación para la selección de la alternativa

Los criterios de ponderación que se consideran más determinantes son:

a) **Costo**, es el criterio que siempre está presente en la selección de alternativas en todo proyecto, en este caso el mecanismo de basculamiento del horno que se elija no debe encarecer el costo final del prototipo.

b) **Ergonomía**, este aspecto tiene gran influencia en la actualidad y se encuentra ligado con el confort del operario al momento de emplear el mecanismo.

c) **Mantenimiento**, este debe ser lo menos frecuente y de fácil realización.

d) **Sincronización entre los elementos de basculación**, es un factor vital ya que si no existiera, el mecanismo provocaría que el basculamiento se produzca con inconvenientes, incurriéndose en derramamiento, así como solidificación de metal fundido dentro del crisol del horno, además de que los componentes del mecanismo se desgasten rápidamente e incluso fallen repentinamente.

3.5.3.2 Método Ordinal Corregido de Criterios Ponderados

Para decidir entre diversas soluciones es suficiente con conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Es por eso que se utilizará el método ordinal corregido de criterios ponderados que, sin la necesidad de evaluar los parámetros

de cada propiedad, y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio, permite obtener resultados globales suficientemente significativos. [18]

3.5.3.3 Valoración y Factores de Incidencia

Evaluación del peso específico de cada criterio.

Tabla 3.17 Evaluación del Peso Específico de cada Criterio

Costo = Sincronización > Mantenimiento > Ergonomía

Criterio	Costo	Sincronización	Mantenimiento	Ergonomía	Σ+1	Ponderación
Costo		0.5	1	1	3.5	0.35
Sincronización	0.5		1	1	3.5	0.35
Mantenimiento	0	0		1	2	0.2
Ergonomía	0	0	0		1	0.1
				Suma	10	1

Fuente: Propia

3.5.3.4 Evaluación de los Pesos Específicos de las distintas Soluciones

Evaluación del peso específico del criterio costo:

Tabla 3.18 Evaluación del Peso Específico del Criterio Costo

Alternativa 2 > Alternativa 1

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.3333
Alternativa 2	1		2	0.6667
		Suma	3	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio sincronización:

Tabla 3.19 Evaluación del Peso Específico del Criterio Sincronización

Alternativa 2 > Alternativa 1

Sincronización	Alternativa 1	Alternativa 2	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.3333
Alternativa 2	1		2	0.6667
		Suma	3	1

Fuente: Propia

[18] Riba C, Diseño Concurrente, ETSEIB – UPC, 2002, p. 60

Evaluación del peso específico del criterio mantenimiento:

Tabla 3.20 Evaluación del Peso Específico del Criterio Mantenimiento

Alternativa 1 = Alternativa 2

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0.5
Alternativa 2	1		2	0.5
		Suma	4	1

Fuente: Propia

Evaluación del peso específico del criterio ergonomía:

Tabla 3.21 Evaluación del Peso Específico del Criterio Ergonomía

Alternativa 2 > Alternativa 1

Ergonomía	Alternativa 1	Alternativa 2	Σ+1	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0.3333
Alternativa 2	1		2	0.6667
		Suma	3	1

Fuente: Propia

3.5.3.5 Resultados y Conclusiones

De los resultados cuantitativos antes obtenidos, se obtiene la prioridad del diseño entre las tres alternativas, que expresa cuál de ellas cumple de mejor manera con las especificaciones más importantes.

Tabla 3.22 Tabla de Resultados y Conclusiones

Conclusión	Costo	Sincronización	Mantenimiento	Ergonomía	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.117	0.117	0.1	0.03333	0.367	2
Alternativa 2	0.233	0.233	0.1	0.06667	0.633	1

Fuente: Propia

Después del análisis realizado se puede concluir que la alternativa con levas de contorno es la mejor opción, por lo tanto se procede a realizar una síntesis de la alternativa seleccionada.

3.5.3.6 Síntesis de la Alternativa Seleccionada

La alternativa seleccionada para el caso de basculación es la que depende de engranes rectos que para el caso a implementar es la más adecuada prácticamente debido a la sincronización que es bastante cómoda puesto que se conjugan adecuadamente los elementos.

3.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO A CONSTRUIR

El prototipo a construir consta básicamente de 2 sistemas que son: el sistema de desplazamiento vertical del horno y el de basculamiento, que se encuentran ubicados dentro de una cámara de vacío de forma paralelepípeda.

El sistema de desplazamiento vertical del horno de inducción se encuentra constituido por un mecanismo de tijeras que transforman el desplazamiento horizontal de un eje acondicionado con dos tornillos que desplazan a dos eslabones, los mismos que se mueven por una estructura con canales que sirven de guía y convierten dicho movimiento en desplazamiento vertical del horno como lo indica la figura 3.10

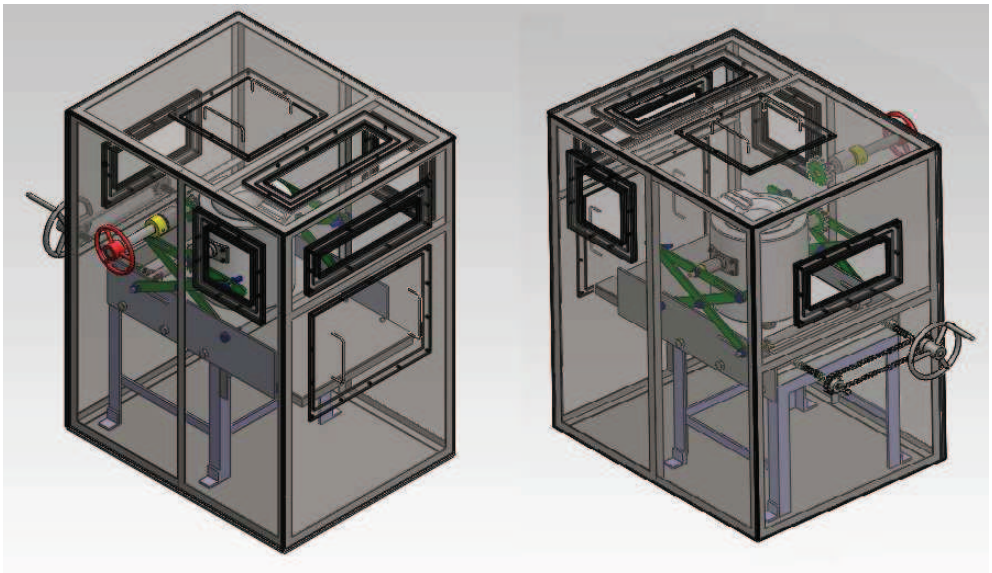


Figura 3.10 Esquema del mecanismo de desplazamiento vertical dentro de la cámara

Fuente: Propia

El sistema de basculamiento es accionado a continuación por medio de un volante que conecta un eje a un engrane motriz que se conjuga con otro engrane ubicado en un costado del horno, los mismos que permiten el basculamiento para colar las aleaciones fundidas como lo demuestra la figura 3.11.

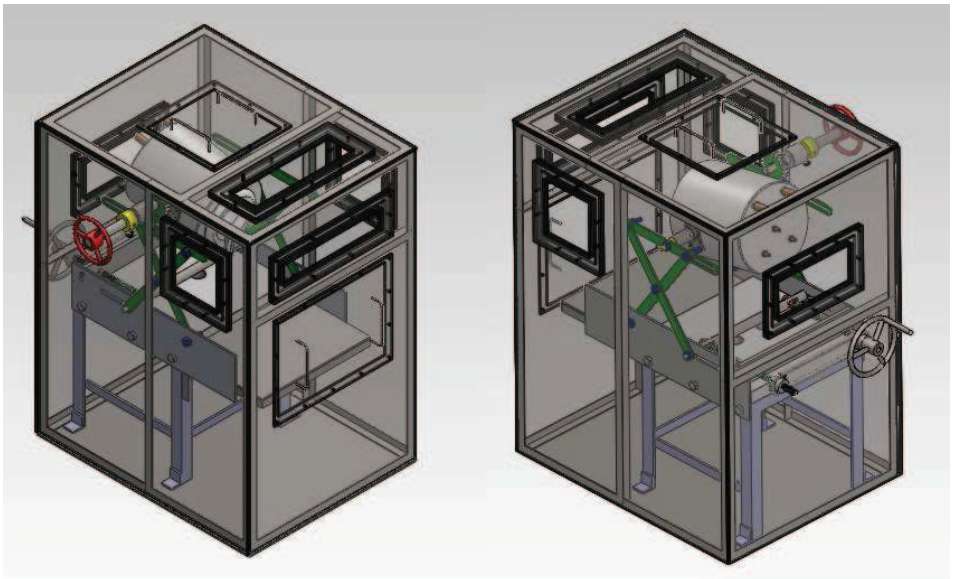


Figura 3.11 Esquema del mecanismo de basculamiento dentro de la cámara

Fuente: Propia

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO

En el presente capítulo se muestra el diseño del prototipo de cámara de vacío y de sus accesorios, así como de los mecanismos para transportar y bascular al horno de inducción. Para el diseño de cada elemento se considera su función y a partir de ello se establecen sus características mecánicas y geométricas, además de los esfuerzos a los que se encuentran sometidos, posteriormente se establece un factor de seguridad acorde al trabajo a desarrollar.

4.1 DISEÑO DE LA CÁMARA DE VACÍO

El diseño de la cámara de forma paralelepípeda como se ilustra en la figura 4.1 involucra una configuración en donde se tiene que dimensionar el espesor de las paredes sobre las cuales se ejercerá una presión distribuida uniformemente cuando se ponga en funcionamiento la bomba de vacío, es así que se inicia un estudio de placas partiendo de las dimensiones generales del prototipo.

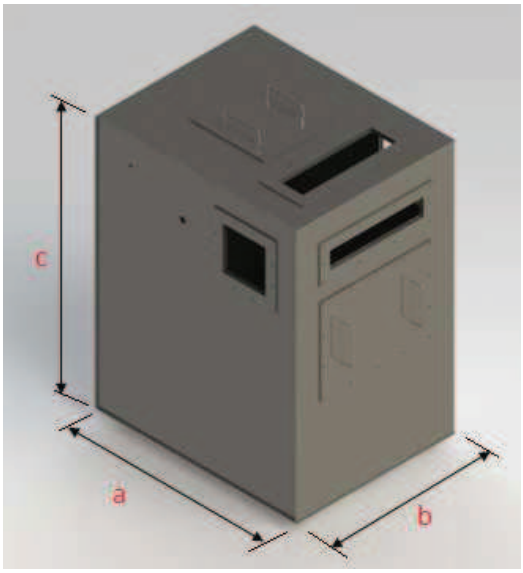


Figura 4.1 Cámara de Vacío

Fuente: SolidWorks 2011.

Las dimensiones generales del prototipo que permiten trabajar adecuadamente sin interferencia para transportar y bascular al horno de inducción, según el volumen de metal fundido que se obtiene del horno, son las siguientes:

Largo: a = 795 mm

Ancho: b = 625 mm

Altura: c = 1000 mm

Las propiedades mecánicas que presenta el Acero Inoxidable AISI 304, que previamente fue seleccionado en el capítulo III son las siguientes: [19]

E = 193 [GPa] (Modulo de Elasticidad)

G = 86.2 [GPa] (Modulo de Rigidez)

ν = 0.3 (Relación de Poisson)

S_y = 300 [MPa] (Límite de Fluencia)

Para el caso del diseño se parte del hecho de alcanzar dentro del prototipo una presión de 0 [MPa], así se asegura que los resultados obtenidos de los cálculos son límites máximos a los que estará expuesta la cámara.

De esta manera la presión distribuida uniformemente a la que estará expuesta la cámara será de 72.809 [kPa] o 72.809 (10^{-3}) [MPa], correspondiente a la presión atmosférica a 2800 [m], altura en la que se encuentra localizado el laboratorio de fundición de la F.I.M. – E.P.N.

[19] CATALOGO IVAN BOHMAN C.A.; Acero INOX Planchas

4.1.1 TEORÍA CLÁSICA DE PLACAS

Se define como placa al sólido con una de sus dimensiones (espesor) mucho menor que las otras dos. La superficie plana equidistante de las dos caras con mayores dimensiones se denomina plano medio de placa. [20]

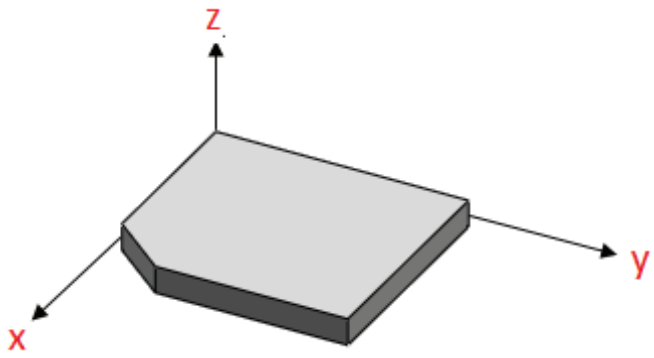


Figura 4.2 Plano medio de una Placa

Fuente: Propia

Por otra parte se define como estado de placa al sistema de cargas en el que solo actúan fuerzas exteriores normales al plano medio de la placa y momentos contenidos en planos perpendiculares al mismo.

4.1.1.1 Placas Planas

En una placa se puede suponer que la variación de las distintas magnitudes que intervienen en el proceso a lo largo del espesor, son una función conocida de los valores que toman en el plano medio de la misma. [21]

Para generar la teoría de placas es necesario establecer las siguientes hipótesis:

- El material de la placa se supone elástico, homogéneo e isótropo.
- Se supone valida la teoría de las pequeñas deformaciones. Una deflexión del 10% del espesor puede ser considerada como un límite máximo para satisfacer la hipótesis de deformaciones pequeñas.

---

[20] TIMOSHENKO S. y WOINOWSKY-KRIEGER S.; (1970); *"Teoría de Placas y Laminas"*; Ed. URMO; España; p.49

[21] SEVILLA R., RUS CARLBORG G. y MARTÍNEZ E.; (2007); *"Placas Delgadas Mediante Métodos Clásicos"*; Ed. FUENTENUEVA; España; p.1

- Todos los puntos situados sobre una recta normal al plano medio de la placa sin deformar, permanecen después de la deformación sobre una recta (Hipótesis de Navier) normal al plano medio deformado.

- Los puntos del plano medio solo se mueven en la dirección perpendicular al mismo, es decir solo se considera la deformación provocada por la flexión.

- Todos los puntos situados sobre una normal al plano medio tienen la misma deflexión, es decir w (x, y, z) = w (x, y).

- La tensión normal al plano medio de la placa se considera despreciable.

Estas hipótesis permiten expresar los desplazamientos, deformaciones, tensiones y esfuerzos en el plano medio sólo en función de la deflexión w (x, y) que caracteriza cada punto de la placa transformando así un problema inicialmente tridimensional en bidimensional. Posteriormente estableciendo las ecuaciones de equilibrio, se determina la ecuación diferencial en derivadas parciales que debe satisfacer la función w (x, y).

4.1.1.1.1 Cálculo de la Deflexión

El cálculo de la deflexión en una placa plana se realiza mediante series trigonométricas, las series de Fourier nos dan una solución muy exacta y compleja, una solución menos compleja a través de series simples se conoce como: Método de Levy, donde la carga *q* distribuida uniformemente a lo largo de toda la placa es perpendicular a ésta, como se ilustra en la figura 4.3. [22]

[22] SEVILLA R., RUS CARLBORG G. y MARTÍNEZ E.; (2007); *"Placas Delgadas Mediante Métodos Clásicos"*; Ed. FUENTENUEVA; España; p.10

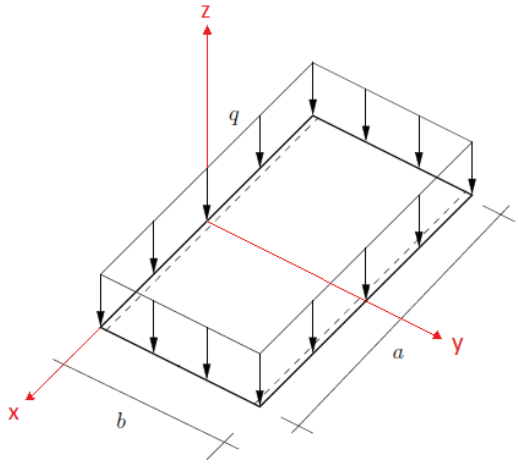


Figura 4.3 Placa Rectangular Cargada Uniformemente

Fuente: SEVILLA R., RUS CARLBORG G. y MARTÍNEZ E., (2007); *"Placas Delgadas Mediante Métodos Clásicos"*, España, Ed. FUENTENUEVA, p.10

El método de Levy es aplicable en las siguientes condiciones:

1. Placa rectangular, de dimensiones *a* x *b* x *h*.
2. Condiciones de empotramiento en dos bordes paralelos, w = 0
3. Condiciones cualesquiera en los otros dos bordes.

Con esas condiciones se considera una solución de la forma:

$$w_{(x,y)} = \sum_{n=1}^{\infty} w_{n(x)} \sin(\lambda_n . y) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.1}]$$

En donde:

$$\lambda_n = \frac{n.\pi}{b} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.2}]$$

y; w_n es solución de la ecuación diferencial:

$$\frac{d^4 w_{n(x)}}{dx^4} - 2\lambda_n^2 \frac{d^2 w_{n(x)}}{dx^2} + \lambda_n^4 w_{n(x)} = \frac{P_{n(x)}}{D} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.3}]$$

En donde:

$$D = \frac{E.h^3}{12\,(1-\nu^2)} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.4}]$$

$$P_{n(x)} = \frac{2}{b}\int_0^b P_{(x,y)}.\sin(\lambda_n.y)\,.dy$$

$$P_{n(x)} = \frac{2}{b}\int_0^b -q.\sin(\lambda_n.y).dy = -\frac{2.q}{b}\left(\frac{b}{n.\pi}\right).\cos\left(\frac{n.\pi.y}{b}\Big|\begin{matrix}o\\b\end{matrix}\right) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.5}]$$

$$P_{n(x)} = P_n; \quad puesto\ que\ no\ depende\ de\ x$$

$$P_{n(x)} = P_n = -\frac{4.q}{n.\pi} \qquad si\ n\ es\ impar \qquad [\boldsymbol{Ec.4.6}]$$

$$P_n = 0 \qquad si\ n\ es\ par \qquad [\boldsymbol{Ec.4.7}]$$

La solución de la [Ec. 4.3] es una suma de una solución homogénea y una particular:

$$w_{n(x)} = w^h_{n\,(x)} + w^p_{n\,(x)} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.8}]$$

- La solución de la ecuación homogénea es:

$$w^h_{n(x)} = (A_n + B_n.\lambda_n.x).\sinh(\lambda_n.x) + (C_n + D_n.\lambda_n.x)\,.\cosh(\lambda_n.x)$$

Como la solución es simétrica en x, las funciones impares tienen coeficientes nulos, por lo tanto:

$$A_n = D_n = 0$$

$$w^h_{n(x)} = B_n\,.\lambda_n.x.\sinh(\lambda_n.x) + C_n.\cosh(\lambda_n.x) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.9}]$$

- La solución de la ecuación particular es una constante:

$$w^p_{n(x)} = \frac{P_{\boldsymbol{n}}}{D\,.\lambda_n^4} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.10}]$$

Por lo tanto, la solución general de la [Ec. 4.8] será igual a la suma de las ecuaciones [Ec. 4.9] y [Ec. 4.10]:

$$w_{n(x)} = B_n \,.\, \lambda_n . x . \sinh(\lambda_n . x) + \; C_n . \cosh(\lambda_n . x) + \frac{P_n}{D \,.\, \lambda_n^4} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.11}]$$

Aplicando las condiciones de contorno en $x = \frac{a}{2} = \; -\frac{a}{2}$, se tiene:

$$M_x = 0 \;\rightarrow\; -D\left(w_{n,xx} + \nu \,.\, w_{n,yy}\right), \text{evaluando en } x = \frac{a}{2} \text{ es igual a cero} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.12}]$$

$$V_x = 0 \rightarrow -D\left(w_{n,xxx} + (2-\nu) \,.\, w_{n,xyy}\right), \text{evaluando en } x = \frac{a}{2} \text{ es igual a cero } [\boldsymbol{Ec.4.13}]$$

Derivando la [Ec. 4.11] con respecto a *x* y agrupando se tiene:

$$w_{n,x} = \lambda_n[(B_n + C_n).\sinh(\lambda_n . x) + B_n \,.\, \lambda_n . x . \cosh(\lambda_n . x)] \qquad [\boldsymbol{Ec.4.14}]$$

Derivando la [Ec. 4.12] con respecto a *x* y agrupando se tiene:

$$w_{n,xx} = \lambda_n^2[(2.B_n + C_n).\cosh(\lambda_n . x) + B_n \,.\, \lambda_n . x . \sinh(\lambda_n . x)] \qquad [\boldsymbol{Ec.4.15}]$$

Derivando la [Ec. 4.13] con respecto a *x* y agrupando se tiene:

$$w_{n,xxx} = \lambda_n^3[(3.B_n + C_n).\sinh(\lambda_n . x) + B_n \,.\, \lambda_n . x . \cosh(\lambda_n . x)] \qquad [\boldsymbol{Ec.4.16}]$$

De esta manera evaluando la [Ec. 4.12], se tiene:

$$M_x = \; -D\left(w_{n,xx} + \nu \,.\, w_{n,yy}\right)$$

$$M_x = \sum_{n=1}^{\infty} -D\left[w_{n,xx} - \nu . \lambda_n^2 . w_n\right] . \sin(\lambda_n . y)$$

Evaluando en $x = \frac{a}{2}$

$$[M_x] = 0 \;\rightarrow\; w_{n,xx} - \nu . \lambda_n^2 . w_{n(x)} = 0 \qquad [\boldsymbol{Ec.4.17}]$$

Reemplazando las ecuaciones [Ec. 4.11] y [Ec. 4.15] en la [Ec. 4.17], se tiene:

$$\lambda_n^2\left[(2.B_n + C_n).\cosh\left(\lambda_n.\frac{a}{2}\right) + B_n\,.\lambda_n.\frac{a}{2}.\sinh\left(\lambda_n.\frac{a}{2}\right)\right]$$
$$-\nu.\lambda_n^2\left\{B_n\,.\lambda_n.\frac{a}{2}.\sinh\left(\lambda_n.\frac{a}{2}\right) + C_n.\cosh\left(\lambda_n.\frac{a}{2}\right) + \frac{P_n}{D\,.\lambda_n^4}\right\} = 0$$

Usando:

$$\alpha_n = \lambda_n.\frac{a}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.18}]$$

Entonces se tiene:

$$[2.B_n + (1-\nu).C_n].\cosh(\alpha_n) + (1-\nu).B_n.\alpha_n.\sinh(\alpha_n) = \frac{\nu.P_n}{D.\lambda_n^4} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.19}]$$

Ahora evaluando la [Ec. 4.13], se tiene:

$$V_x = -D\left(w_{n,xxx} + (2-\nu)\,.w_{n,xyy}\right)$$
$$V_x = \sum_{n=1}^{\infty} -D\left[w_{n,xxx} + (2-\nu)(-\lambda_n^2).w_{n,x}\right].\sin(\lambda_n.y)$$

Evaluando en $x = \frac{a}{2}$

$$[V_x] = 0 \;\rightarrow\; w_{n,xxx} - \lambda_n^2(2-\nu).w_{n,x} = 0 \qquad [\boldsymbol{Ec.4.20}]$$

Reemplazando las ecuaciones [Ec. 4.14], [Ec. 4.16] y [Ec. 4.18] en la [Ec. 4.20], se tiene:

$$\lambda_n^3[(3.B_n + C_n).\sinh(\alpha_n) + B_n\,.\alpha_n.\cosh(\alpha_n)]$$
$$+(\nu-2).\lambda_n^3[(B_n + C_n).\sinh(\alpha_n) + B_n\,.\alpha_n.\cosh(\alpha_n)] = 0$$

Agrupando términos:

$$[(1+\nu).B_n + (\nu-1).C_n].\sinh(\alpha_n) + (\nu-1).B_n.\alpha_n.\cosh(\alpha_n) = 0 \qquad [\boldsymbol{Ec.4.21}]$$

Multiplicando [Ec. 4.19] por $\tanh(\alpha_n)$ y sumando la [Ec. 4.21], entonces se elimina C_n, resultando:

$$2.B_n.\sinh(\alpha_n) + (1+\nu).B_n.\sinh(\alpha_n) + (1-\nu).B_n.\alpha_n.\tanh(\alpha_n).\sinh(\alpha_n) + (\nu-1).B_n.\alpha_n.\cosh(\alpha_n) = \frac{\nu.P_n.\tanh(\alpha_n)}{D.\lambda_n^4}$$

Agrupando términos:

$$\underbrace{[(3+\nu).\sinh(\alpha_n) + (1-\nu).\alpha_n.\tanh(\alpha_n).\sinh(\alpha_n) + (\nu-1).\alpha_n.\cosh(\alpha_n)]}_{\eta_n}.B_n = \frac{\nu.P_n.\tanh(\alpha_n)}{D.\lambda_n^4}$$

Simplificando la expresión anterior por el término η_n y despejando B_n se tiene:

$$B_n = \frac{1}{\eta_n}.\frac{\nu.P_n.\tanh(\alpha_n)}{D.\lambda_n^4} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.22}]$$

Agrupando términos en la [Ec. 4.21], se tiene:

$$B_n[(1+\nu).\sinh(\alpha_n) + (\nu-1).\alpha_n.\cosh(\alpha_n)] = (1-\nu).C_n.\sinh(\alpha_n)$$

$$B_n[(1+\nu) + (\nu-1).\alpha_n.\tanh(\alpha_n)] = (1-\nu).C_n$$

$$C_n = \frac{(1+\nu) + (\nu-1).\alpha_n.\tanh(\alpha_n)}{(1-\nu)}.B_n$$

$$C_n = \underbrace{\left[\frac{1+\nu}{1-\nu} - \alpha_n.\tanh(\alpha_n)\right]}_{\xi_n}.B_n$$

Simplificando la expresión anterior por el término ξ_n, se tiene:

$$C_n = \xi_n.B_n \qquad [\boldsymbol{Ec.4.23}]$$

Con las ecuaciones [Ec. 4.22] y [Ec. 4.23] se obtienen los coeficientes $B_n\ y\ C_n$ que definen la solución de la [Ec. 4.11]

4.1.2 CÁLCULO DE LAS PLACAS DE LA CÁMARA

La cámara se construye con 6 placas, que constituyen las paredes del prototipo.

En base a las dimensiones generales del prototipo que son: 900 x 600 x 1000 [mm], se procede al cálculo del espesor de las placas empleando la teoría de

placas a partir de un factor de seguridad previamente establecido en base a la teoría de la energía de la distorsión.

4.1.2.1 Cálculo de la Placa Crítica

Debido a que la presión atmosférica actúa de manera perpendicular al centro de la tierra, y conociendo que se define como la fuerza que el aire ejerce sobre cada cm^2 de la superficie terrestre por efecto de la fuerza de gravedad.

De esta manera la placa a considerar crítica sería la placa superior, con sus cuatro bordes empotrados tal como se describe en la figura 4.4.

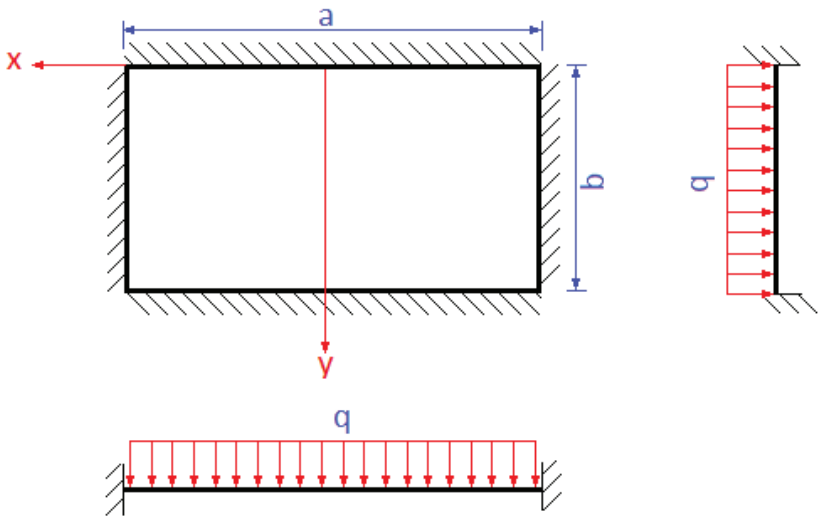


Figura 4.4 Placa Superior de la Cámara con sus Condiciones de Borde

Fuente: Propia

En donde:

q = 72.809 (10^{-3}) [MPa]

a = 795 [mm]

b = 625 [mm]

h = espesor [mm]

Como el resultado de la ecuación [Ec. 4.1], es una sumatoria de valores impares que van desde n =1 hasta infinito, el resultado para los términos en función de w (x, y), es muy complicado incluso para los programas computacionales existentes,

es por eso que se particulariza una solución para n = 1 hallando un término no nulo en la sumatoria que tiende a darnos una solución bastante precisa según la teoría descrita anteriormente.

Reemplazando n = 1 en las ecuaciones [Ec. 4.2], [Ec. 4.4], [Ec. 4.6], [Ec. 4.10], [Ec. 4.18], [Ec. 4.22] y [Ec. 4.23] se obtienen los siguientes resultados:

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{b} = \frac{\pi}{625}\left[\frac{1}{mm}\right]$$

$$P_1 = -\frac{4.q}{\pi} = -\frac{4\left(72.809(10^{-3})\right)}{\pi} = -0.093\ [MPa]$$

$$\alpha_1 = \lambda_1.\frac{a}{2} = \frac{\pi}{625}.\frac{795}{2} = 1.99$$

$$D = \frac{E.h^3}{12\ (1-\nu^2)} = \frac{[193(10^3)]h^3}{12(1-0.3^2)} = 17674\ h^3\ [N.mm]$$

$$\frac{P_1}{D\ .\lambda_1^4} = \frac{-0.093}{17674\ (h^3).\left(\frac{\pi}{625}\right)^4} = -\frac{8242.68}{h^3}\ \ [mm]$$

$$\eta_1 = (3+\nu).\sinh(\alpha_1) + (1-\nu).\alpha_1.\tanh(\alpha_1)\ .\sinh(\alpha_1) + (\nu-1).\alpha_1.\cosh(\alpha_1)$$
$$\eta_1 = (3+0.3).\sinh(1.99) + (1-0.3).(1.99).\tanh(1.99)\ .\sinh(1.99)$$
$$+ (0.3-1).(1.99).\cosh(1.99) = 11.47$$

$$B_1 = \frac{1}{\eta_1}.\frac{\nu.P_1.\tanh(\alpha_1)}{D.\lambda_1^4} = \frac{1}{11.47}.\frac{0.3(-0.093)[\tanh(1.99)]}{17674(h^3).\left(\frac{\pi}{625}\right)^4} = -\frac{207.68}{h^3}\ [mm]$$

$$\xi_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} - \alpha_1.\tanh(\alpha_1) = \frac{1+0.3}{1-0.3} - 1.99[\tanh(1.99)] = -0.06$$

$$C_1 = \xi_1.B_1 = -0.06\left[-\frac{207.68}{h^3}\right] = \frac{12.46}{h^3}\ \ [mm]$$

Reemplazando todos los resultados anteriores en la [Ec 4.1] que deja de ser una sumatoria y resulta:

$$w_{(x,y)} = w_{n(x)}.\sin(\lambda_n.y)$$

$$w_{(x,y)} = \left[\frac{P_1}{D\,.\lambda_1^4} + B_1.\lambda_1.x.\sinh(\lambda_1.x) + C_1.\cosh(\lambda_1.x)\right].\sin(\lambda_1.y)$$

$$\begin{aligned} & w_{(x,y)} \\ & = \left[-\frac{8242.68}{h^3}\right. \\ & -\frac{207.68}{h^3}\left(\frac{\pi}{625}\right)(x)\sinh\left(\frac{\pi}{625}.x\right) \\ & \left.+\frac{12.46}{h^3}.\cosh\left(\frac{\pi}{625}.x\right)\right].\sin\left(\frac{\pi}{625}.y\right) \end{aligned} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.24}]$$

4.1.2.1.1 Cálculo de las Tensiones en el Plano Medio de la Placa

Ya que para el estudio de las placas se considera un estado plano de tensiones, a través de la *ley de Hooke* se obtiene, para un material cuyo Módulo de Elasticidad sea *E,* Módulo de Rigidez sea G y Relación de Poisson *ν,* las siguientes expresiones para las tensiones en el plano de la placa: [23]

$$\sigma_x = \frac{E.z}{(1-\nu^2)}\left(\frac{1}{R_x}+\frac{\nu}{R_y}\right) = -\frac{E.z}{(1-\nu^2)}\left(\frac{d^2w_{(x,y)}}{dx^2}+\nu\frac{d^2w_{(x,y)}}{dy^2}\right) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.25}]$$

$$\sigma_y = \frac{E.z}{(1-\nu^2)}\left(\frac{1}{R_y}+\frac{\nu}{R_x}\right) = -\frac{E.z}{(1-\nu^2)}\left(\frac{d^2w_{(x,y)}}{dy^2}+\nu\frac{d^2w_{(x,y)}}{dx^2}\right) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.26}]$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{2.G.z}{R_{xy}} = 2.G.z\frac{d^2w_{(x,y)}}{dxdy} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.27}]$$

---

[23] PATANELLA A. y ACTIS M.; (2008); *"Placas Planas Rectangulares de Espesor Delgado"*; Ed. UNLP ;Argentina; p.4

Estas tensiones normales están linealmente distribuidas a lo largo del espesor de la placa.

Dónde:

$$z = \frac{h}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.28}]$$

De esta manera derivando la [Ec. 3.24], y empleando las condiciones de deflexión máxima en el centro de la placa:

$$x = 0\ [mm]$$

$$y = \frac{b}{2} = \frac{625}{2} = 312.5\ [mm]$$

Se obtienen los siguientes resultados para las ecuaciones [Ec. 4.25], [Ec. 4.26] y [Ec. 4.27]:

$$\sigma_x = -\frac{193(10^3)\left(\frac{h}{2}\right)}{(1-0.3^2)}\left[\left(\frac{0.000315}{h^3} - \frac{0.0105}{h^3}\right) + 0.3\left(-\frac{\pi^2\left(\frac{12.46}{h^3} - \frac{8242.68}{h^3}\right)}{390625}\right)\right]$$

$$\sigma_x = -\frac{5535.38}{h^2}\ [MPa]$$

$$\sigma_y = -\frac{193(10^3)\left(\frac{h}{2}\right)}{(1-0.3^2)}\left[\left(-\frac{\pi^2\left(\frac{12.46}{h^3} - \frac{8242.68}{h^3}\right)}{390625}\right) + 0.3\left(\frac{0.000315}{h^3} - \frac{0.0105}{h^3}\right)\right]$$

$$\sigma_y = -\frac{21727.43}{h^2}\ [MPa]$$

$$\tau_{xy} = 0\ [MPa]$$

Debido a que $\tau_{xy} = 0$, el valor de los esfuerzos principales mediante el Circulo de Mohr resulta ser los mismos σ_x y σ_y. [24]

Por lo tanto:

---

[24] BEER F., JOHNSTON R.; (2001); *"Mecánica de Materiales"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.428

$$\sigma_A = -\frac{5535.38}{h^2}\ [MPa]$$

$$\sigma_B = -\frac{21727.43}{h^2}\ [MPa]$$

Empleando la [Ec. 4.29] que se define de la Teoría de la Energía de Distorsión y mediante un factor de seguridad establecido con la [Ec. 4.30], se puede deducir el valor del espesor (h) de la placa. [25]

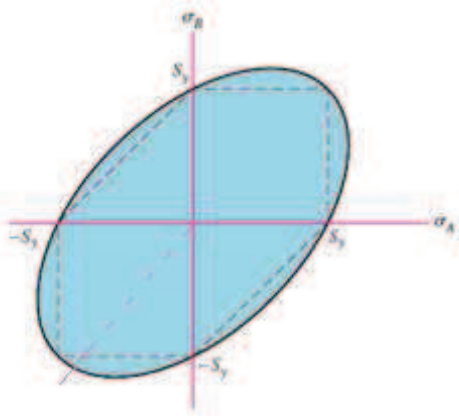


Figura 4.5 Teoría de la Energía de la Distorsión

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.247

$$S_y^2 = S_A^2 - S_A S_B + S_B^2$$

$$S_B = -\frac{\sigma_B}{\sigma_A}.S_A$$

$$S_A = \frac{S_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_A}\right) + \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_A}\right)^2}} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.29}]$$

$$n = \frac{S_A}{\sigma_A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.30}]$$

Sabiendo que: S_y = 300 [MPa] para el Acero Inoxidable 304

[25] SHIGLEY J.; (2006); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.247

Entonces:

$$S_A = \frac{300}{\sqrt{1 + \left(\frac{-\frac{21727.43}{h^2}}{-\frac{5535.38}{h^2}}\right) + \left(\frac{-\frac{21727.43}{h^2}}{-\frac{5535.38}{h^2}}\right)^2}} = 66.53\ [MPa]$$

Empleando un factor de seguridad de n = 1.4[♦] y la [Ec. 4.30] se calcula σ_A :

$$\sigma_A = \frac{S_A}{n} = \frac{63.53[MPa]}{1.4} = 47.52\ [MPa]$$

Igualando el valor anterior calculado con el $|\sigma_A|$ hallado con el Círculo de Mohr se tiene:

$$|\sigma_A| = \frac{5535.38}{h^2} = 47.52\ [MPa]$$

Finalmente despejando *h* de la ecuación anterior se puede encontrar el valor del espesor de la placa:

$$h^2 = \frac{5535.38}{47.52}$$

$$h = 10.8\ [mm]$$

4.1.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS PLACAS DE LA CÁMARA SEGÚN OTRAS TEORÍAS

Para el estudio del tema de placas existen muchas teorías para su dimensionamiento, algunos autores resumen dichos cálculos expresados como ecuaciones diferenciales en solo expresiones sencillas para el caso de la flexión en el centro de la placa, que sería el caso extremo o critico; es así que se procede

---

[♦] n = 1.25 – 1.5 para materiales confiables usados bajo condiciones controladas y sujetos a carga y esfuerzos que puedan determinarse con exactitud, casi siempre para pesos pequeños; DEUTSCHMAN A., MICHELS W; (1975); *"Diseño de Máquinas – Teoría y Práctica"* ; Ed. Continental S.A.; p. 22

a calcular dicho espesor en base a ciertos criterios que se detallan en los Anexos 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4; de esta manera se resumen dichos resultados en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Espesores calculados por medio de ciertas teorías

Criterio	Expresión para el cálculo en el Centro de la Placa	Hipótesis	Espesor Calculado
Semejanza a una viga doblemente empotrada en base a una zona crítica	$\sigma_{max} = \frac{M_{max}.c}{I_z}$ $n = \frac{S_y}{\lvert\sigma_{max}\rvert}$	n = 1.4	h = 8.15 [mm]
Placa Rectangular con todos sus lados empotrados según Roark	$y_{max} = \frac{\propto.q.b^4}{E.h^3}$	y_{max} = 0.1 h	h = 10.38 [mm]
Placa Rectangular empotrada en todo su contorno según Timoshenko y Woinowsky-Krieger	$w_{max} = 0.001857\frac{q.a^4}{D}$	w_{max} = 0.1 h	h = 9.73 [mm]
Placa Rectangular con sus cuatro lados empotrados propuesto por Feodosiev	$w_{max} = \propto \frac{P.a^4}{E.h^3}$	w_{max} = 0.1 h	h = 10.39 [mm]

Fuente: Propia

4.1.4 DISEÑO DE LA CÁMARA DE VACÍO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar el análisis de las placas que conforman la cámara se hará uso de dos programas de diseño 3D para su posterior simulación mediante elementos finitos; es así que se procede a diseñar dicha cámara por medio del software SOLIDWORKS y AUTODESK INVENTOR para posteriormente emplear las interfaces SOLIDWORKS SIMULATIONS e INVENTOR SIMULATIONS respectivamente para realizar dicha simulación.

Debido a la poca disponibilidad de recursos y el alto valor económico que incluye la adquisición de planchas de acero inoxidable AISI 304 de espesor 10 [mm] como promedio, se considera la alternativa de disminuir dicho espesor a 6 [mm], empleando internamente un alma metálica construida básicamente de ángulo

inoxidable de 25 x 3 [mm] para reforzar y disminuir la concentración de esfuerzos en las aristas, esquinas y centros de las placas que conforman la cámara.

De esta manera la hipótesis empleada disminuirá considerablemente costos tanto de materia prima como de maquinado además de reducirse básicamente el peso total de la cámara.

Cabe recalcar que dicha consideración se la realiza conociendo que las teorías propuestas y mencionadas anteriormente son idealistas y que considerando la hipótesis propuesta se refuerzan las partes que según las teorías sufren mayores deformaciones.

4.1.4.1 Elementos Finitos

Debido a que en el software de elementos finitos, la parte matemática se realiza internamente en el computador sin que pueda ser vista por el usuario, no se pondrá en este documento la matemática que es inherente a este método, sino que se explicara la manera de cómo funciona el mismo.

Los componentes mecánicos en forma de barras simples, vigas, etc., pueden ser analizados muy fácilmente por métodos básicos de mecánica, los componentes reales, sin embargo, son raras veces tan simples, forzando a realizar aproximaciones para su cálculo con métodos numéricos, experimentos con prototipos, etc.

Un componente mecánico real es una estructura elástica continua, el análisis por elementos finitos “FEA” divide (discretiza) la estructura en subestructuras finitas, bien definidas. Usando funciones polinomiales, conjuntamente con operaciones de matrices, el comportamiento elástico continuo de cada elemento es desarrollado en términos de las propiedades mecánicas y geométricas del elemento. Las cargas pueden ser aplicadas dentro, en la superficie, o en los nodos del elemento.

Una vez que cada elemento dentro de una estructura está definido localmente en forma de matriz, los elementos son globalmente ensamblados a través de sus nodos comunes en una matriz global del sistema. Las cargas aplicadas y las condiciones limite son luego especificadas y a través de operaciones de dicha

matriz global, los valores de todos los grados desconocidos de desplazamiento y de libertad son determinados. Una vez hecho esto, es simple usar estos desplazamientos para determinar tensiones y esfuerzos a través de las ecuaciones de elasticidad.

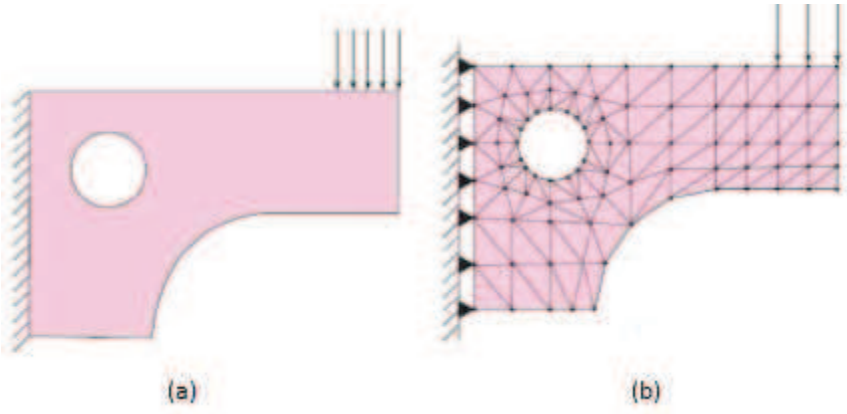


Figura 4.6 (a) Modelo real, (b) Modelo con elementos finitos

Fuente: Propia

Como el método de elementos finitos es una técnica numérica que discretiza el dominio de una estructura continua, los errores son inevitables, dichos errores pueden darse por distintos factores como el tamaño de la malla, un mallado muy grueso tendrá menor exactitud que uno muy fino, así mismo, como el tipo de mallado que se utiliza para el cálculo, esto también se ve reflejado en el tiempo de procesamiento en el computador, un cálculo con mallados muy finos y elementos muy complejos tardara mucho tiempo, en comparación que con un mallado grueso.

Una vez realizado el análisis los programas de elementos finitos presentan sus resultados en forma gráfica, mediante una escala de colores que generalmente van del azul al rojo; siendo azules los sitios donde existen menores esfuerzos, deformaciones, etc., y rojos los lugares donde se presentan los valores más altos, lo que permite observar el comportamiento del objeto analizado y sus puntos de mayor y menor esfuerzo, desplazamiento, etc.

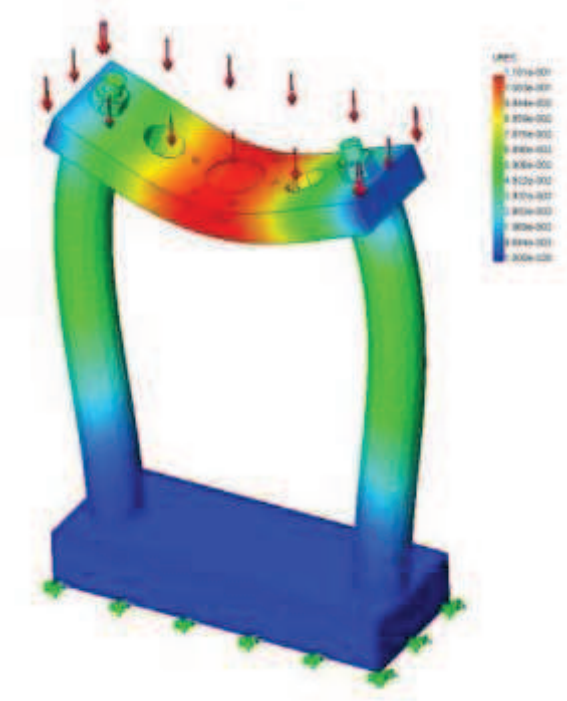


Figura 4.7 Análisis de las deformaciones de un elemento mecánico mediante SOLIDWORKS y la presentación grafica de los resultados obtenidos por medio de una escala de colores

Fuente: Propia

4.1.4.2 Dimensionamiento del Alma Metálica

Para este caso el perfil a ser utilizado en el diseño es ángulo de acero inoxidable AISI 304 de dimensiones 25 x 3 [mm], el mismo que servirá de soporte a las placas rectangulares de la cámara.

Mediante geometría se procede a dimensionarla en base a las medidas exteriores generales propuestas en el diseño; es así que se tienen las siguientes medidas exteriores:

Largo: 784 [mm]

Ancho: 613 [mm]

Altura: 1000 [mm]

De esta manera el diseño mediante el software, realizando las consideraciones necesarias, resulta como el presentado en la figura 4.8.

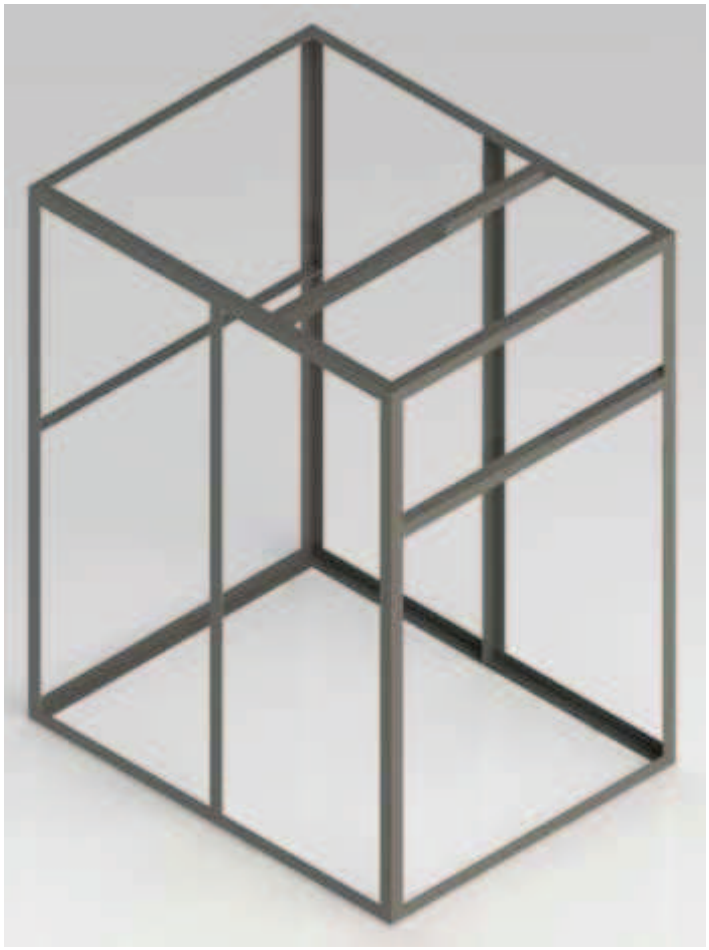


Figura 4.8 Alma Metálica con Refuerzos

Fuente: Propia

4.1.4.3 Diseño de la Cámara de Vacío en base a las especificaciones generales propuestas

Conocidas las especificaciones propuestas por parte del Laboratorio de Fundición, se procede a dimensionar detalladamente la cámara de vacío con las ventanas (de preferencia en cada lado que conforman la cámara) y puertas (2) que servirán para la aplicación solicitada.

Es así que se presenta un esquema bastante cercano a la realidad de lo solicitado a continuación en la figura 4.9.

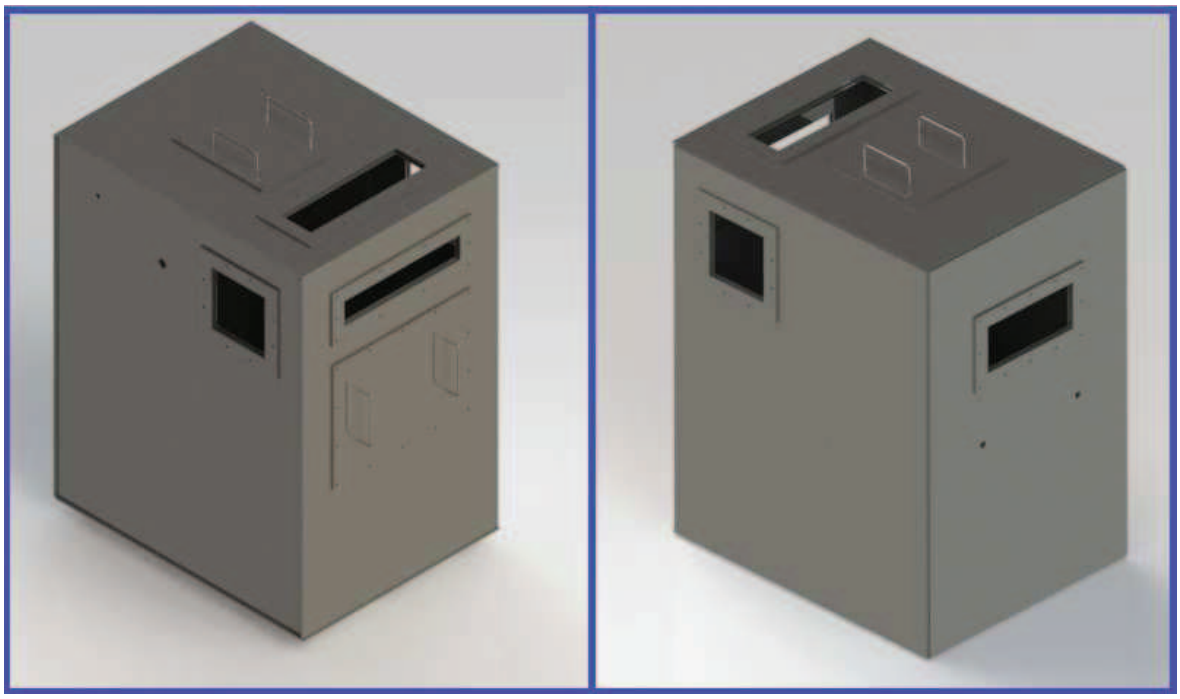


Figura 4.9 Cámara de Vacío; Izquierda: Perspectiva Frontal y Derecha: Perspectiva Posterior

Fuente: Propia

4.1.4.4 Simulación de la Cámara de Vacío mediante Elementos Finitos

Para realizar el análisis mediante elementos finitos de la simulación de la cámara se debe proceder primero a realizar las siguientes consideraciones:

- Dibujar la geometría de los elementos constituyentes del ensamblaje.
- Definir el material de los elementos.
- Definir el tipo de restricciones (empotramiento, apoyo, rotula, etc.)
- Definir las cargas, esfuerzos, etc.
- Generar el mallado con el que se va a calcular.
- Realizar el Post-proceso mediante análisis del software.
- Analizar los resultados.

4.1.4.4.1 Definiciones Generales

Para el cálculo con el programa citado, usaremos estos parámetros:

- Material: Acero Inoxidable AISI 304 para toda la estructura.
- La distribución de presión es uniforme considerando la presión atmosférica a 2800 m.s.n.m.
- Se empleara el mallado automático para considerar la simulación estática.

4.1.4.5 Simulación Estática de la Cámara de Vacío

Ingresando en el módulo de SOLIDWORKS Simulation, se procede a realizar la simulación estática, empotrando la placa inferior y aplicando una carga de presión distribuida uniformemente por todos los lados de la cámara, para de esta manera obtener como resultados limites los mostrados durante la simulación; considerando condiciones óptimas. Dichos resultados de deformaciones se aprecian en la Figura 4.10.

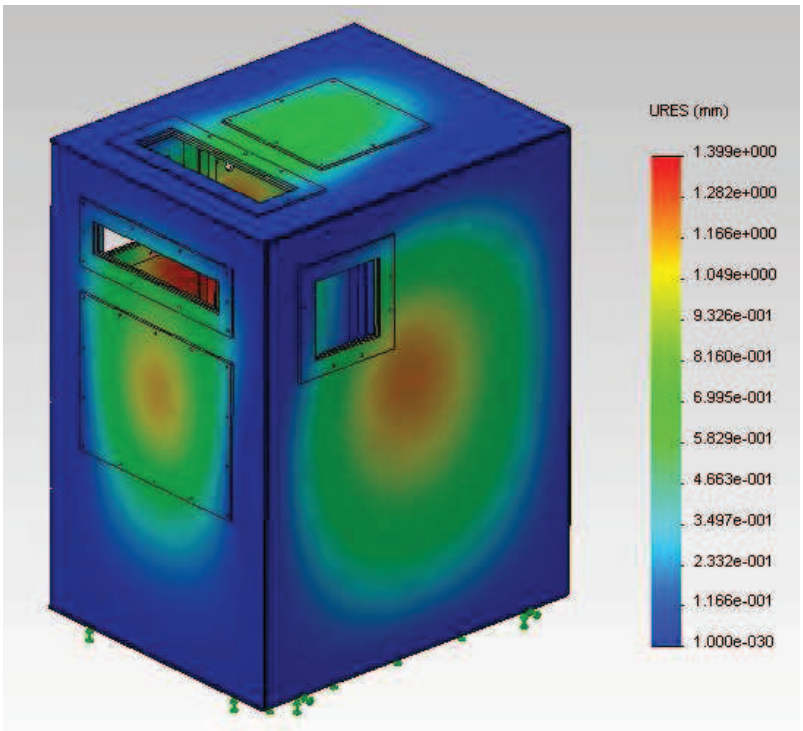


Figura 4.10 Simulación Estática de desplazamientos de la Cámara de Vacío (SOLIDWORKS)

Fuente: Propia

De la misma manera se procede a simular en AUTODESK INVENTOR, realizando las mismas consideraciones antes mencionadas obteniéndose resultados de deformaciones tal como se aprecia en la figura 4.11.

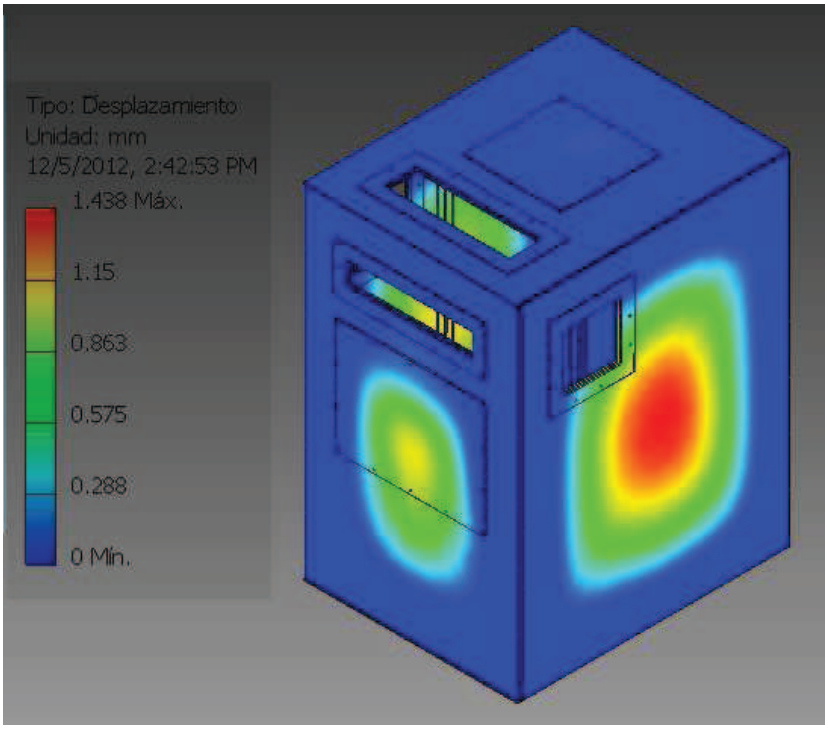


Figura 4.11 Simulación Estática de desplazamientos de la Cámara de Vacío (AUTODESK INVENTOR)

Fuente: Propia

Es así que mediante la simulación se obtienen de resultados:

Tabla 4.2 Resultados por medio de la Simulación

RESULTADOS	SOLIDWORKS		INVENTOR	
	Min	Max	Min	Max
DESPLAZAMIENTOS	0 [mm]	1.399 [mm]	0 [mm]	1.438 [mm]
ESFUERZOS DE VON MISES	0.00171 [MPa]	281.43 [MPa]	0.00178 [MPa]	282.78 [MPa]
DEFORMACIÓN EQUIVALENTE	8.71E-9	0.00109	8E-9	0.00141
FACTOR DE SEGURIDAD	1.12	14.6	1.17	15

Fuente: Propia

Con los resultados de la tabla 4.2 se considera que el diseño es aceptable tomando en consideración de que el pandeo de todas las placas se encuentra dentro de la zona elástica del material.

4.2 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN

El sistema de desplazamiento vertical está compuesto por un mecanismo doble de tijeras accionadas por dos barras roscadas que al trabajar en conjunto permiten levantar y asegurar al horno para su posterior basculamiento y colado de aleaciones de aluminio.

4.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA

Las dimensiones y geometría básica del sistema se ilustran en la figura 4.12.

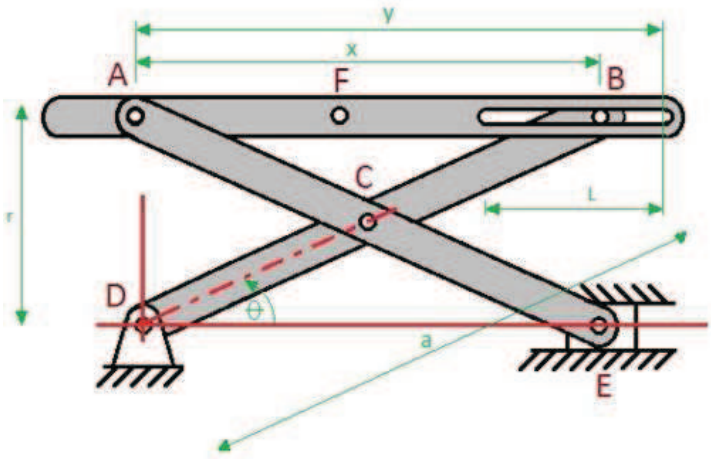


Figura 4.12 Dimensiones principales del mecanismo tipo tijeras

Fuente: Propia

Las dimensiones mostradas en la figura 4.12 se definen en base al criterio de los autores, procurando una buena estética, además de un tamaño reducido del sistema capaz de soportar el peso combinado tanto del horno de inducción como el volumen que soporta el crisol.

Los criterios considerados para el diseño son los siguientes:

- El eslabón superior dispuesto horizontalmente debe tener una longitud mínima capaz de albergar a manera sencilla a uno de los extremos del horno, es así que se tiene: y = 335 [mm].
- La ranura del eslabón antes mencionado debe permitir a las tijeras deslizar hasta obtener el levantamiento del horno a manera comida para que este a su vez salga de los agujeros que contienen mercurio que permiten su funcionamiento, entonces: L = 100 [mm].
- La longitud de los eslabones que forman las tijeras debe ser adecuada para permitir un correcto y adecuado funcionamiento del mecanismo, así se tiene que: a = 380 [mm].
- Considerando la longitud de la ranura se tiene 235 [mm] ≤ x ≤ 335 [mm].

4.2.1.1 Determinación del ángulo θ máximo y mínimo de apertura del mecanismo

Considerando el triángulo BDE de la figura 4.12, se obtiene el ángulo θ máximo y mínimo de apertura de las tijeras, de la siguiente manera:

$$\cos\theta = \frac{DE}{a} = \frac{x}{380} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.31}]$$

Reemplazando x = 235 [mm] en la ecuación [Ec. 4.31] y despejando el valor de θ, se tiene:

$$\theta_{max} = 52°$$

De igual manera y reemplazando x = 335 [mm] en la [Ec. 4.31] se obtiene el ángulo θ mínimo, como se indica a continuación:

$$\theta_{min} = 28°$$

4.2.1.2 Determinación del radio tentativo máximo y mínimo de apertura del mecanismo

Mediante el empleo de los ángulos θ_{max} y θ_{min} que corresponden a los estados de mayor y menor apertura del sistema, se obtienen los radios máximos y mínimos de apertura de la siguiente manera:

Del triángulo BDE de la figura 4.12 se tiene que:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{BE}{a} = \frac{r}{380} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.32}]$$

Reemplazando el valor de θ_{max} y θ_{min} en la ecuación anterior y despejando el valor de r se obtienen los valores tentativos de radios máximos y mínimos de apertura del mecanismo: es así que se obtienen:

$$r_{max} = 300 \text{ [mm]}$$

$$r_{min} = 178 \text{ [mm]}$$

Definida la geometría y dimensiones básicas del sistema se procede a realizar el diseño y selección de los elementos que lo conforman.

4.2.2 DISEÑO DEL ESLABÓN RANURADO

El peso combinado tanto del horno de inducción como de la carga de metal que se deposita dentro de su crisol es soportado por los eslabones ranurados, lo que ocasiona que sobre los apoyos A y B se generen reacciones. A continuación se muestra un esquema de dichos eslabones donde se pueden apreciar sus apoyos.

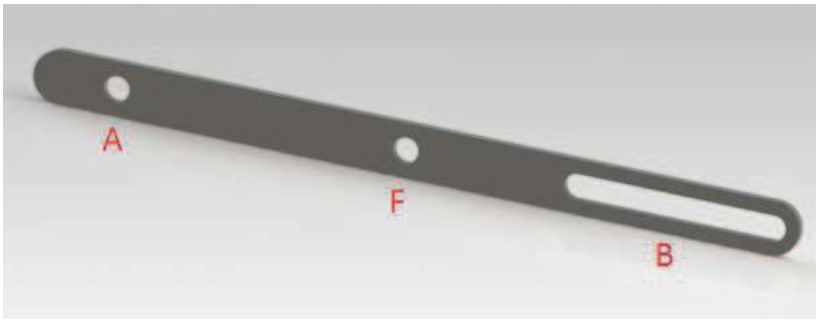


Figura 4.13 Eslabón ranurado

Fuente: Propia

4.2.2.1 Cálculo de reacciones en los apoyos del eslabón

A continuación se realiza la deducción de las ecuaciones que permiten obtener las reacciones en los apoyos A y B, a partir de la figura 4.13.

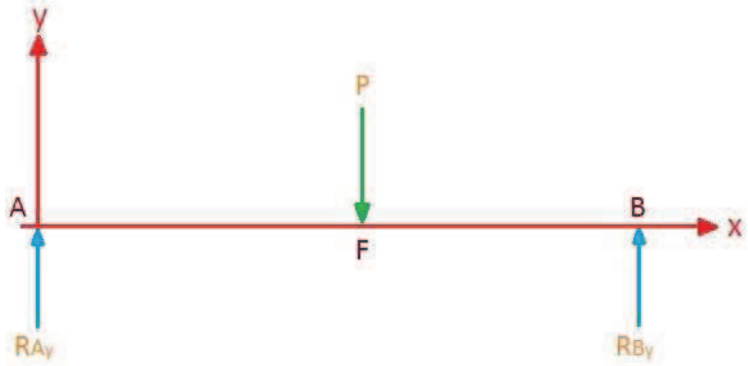


Figura 4.14 DCL del eslabón ranurado

Fuente: Propia

En donde:

AF = 147 [mm].

AB = x; pero: 235 [mm] ≤ x ≤ 335 [mm].

P = {(Masa Horno + Masa metal fundido) * (a_g = 9.8 m/s^2)} /2

Masa Horno = 24 [kg]

Masa metal fundido ~ 1 [kg]

P = 122.5 [N].

Puesto que el sistema debe permanecer en reposo (equilibrio de fuerzas y momentos); aplicando la respectiva sumatoria de fuerzas y de momentos igualados a cero, se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{A_y} + R_{B_y} = P \qquad [\boldsymbol{Ec.4.33}]$$

Y Aplicando la sumatoria de momentos en la dirección z, se tiene:

$$\sum M_z = 0$$

$$R_{B_y}\ (AB) = P\ (AF) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.34}]$$

De las ecuaciones 4.33 y 4.34 se obtienen las reacciones $R_{A_y} y\ R_{B_y}$ en función de los datos conocidos: es así que se presenta la tabla 4.3 para valores de 235 [mm] ≤ x ≤ 335 [mm], en pasos de 10 [mm].

Tabla 4.3 Cálculo de reacciones en función de valores de x en pasos de 10 [mm]

AF [m]	AB = x [m]	P [N]	$\mathbf{R_{A_y}}$ [N]	$\mathbf{R_{B_y}}$ [N]
0.147	0.235	122.5	45.87	76.63
	0.245		49	73.50
	0.255		51.88	70.62
	0.265		54.55	67.95
	0.275		57.02	65.48
	0.285		59.32	63.18
	0.295		61.46	61.04
	0.305		63.46	59.04
	0.315		65.33	57.17
	0.325		67.09	55.41
	0.335		68.75	53.75

Fuente: Propia

Al realizar estas variaciones se puede obtener las reacciones máximas y mínimas en los apoyos A y B durante todo el ciclo de operación, las cuales se emplearan en la determinación de los puntos críticos para el diseño y selección de los elementos del mecanismo.

4.2.2.2 Determinación de fuerzas cortantes (V) y de momentos flexionantes (M)

Mediante la utilización del método de las secciones se procede a obtener los diagramas de fuerza cortante y momento flector para los diversos tramos del eslabón.

Es así que los diagramas de cortante V_y y momento flector M_z se muestran a continuación en la figura 4.15.

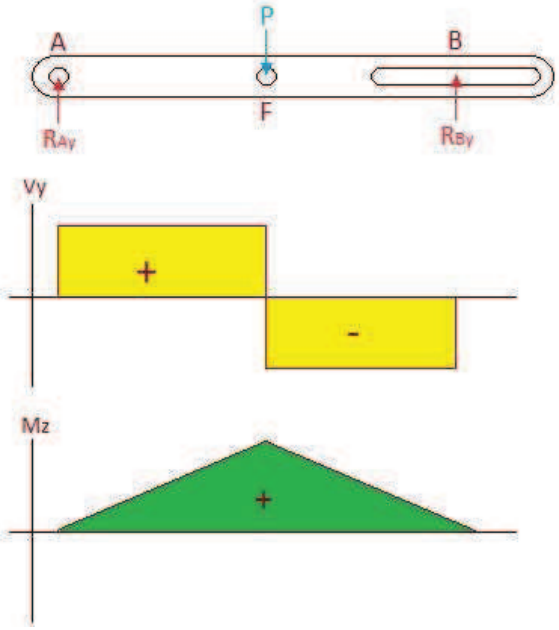


Figura 4.15 Diagramas de fuerza cortante V_y y momento flector M_z

Fuente: Propia

De la tabla 4.3 se obtienen los valores máximos de V_y y M_z para los distintos tramos del eslabón, los cuales se muestran en la tabla 4.4 y que corresponden a distintas variaciones de distancia del apoyo B en la ranura.

Tabla 4.4 Valores Máximos de Cortante Vy y Momento Flector Mz

AF [m]	AB = x [m]	P [N]	V_y [N]	M_Z [N. m]
0.147	0.235	122.5	153.26	13.49
	0.245		147	14.41
	0.255		141.24	15.25
	0.265		135.91	16.04
	0.275		130.96	16.76
	0.285		126.37	17.44
	0.295		122.08	18.07
	0.305		118.08	18.66
	0.315		114.33	19.21
	0.325		110.82	19.73
	0.335		107.51	20.21

Fuente: Propia

4.2.2.3 Diseño Estático

La finalidad del diseño estático es desarrollar las relaciones entre la resistencia y las cargas determinadas en las secciones anteriores, a fin de establecer las

dimensiones óptimas del perfil, con el requisito de que estas no fallen al estar en servicio.

Una carga estática es una acción estacionaria de una fuerza o un momento sobre un objeto. Para que una fuerza o momento sean estáticos deben poseer magnitud, dirección y punto de aplicación que sean invariables en el tiempo. Una carga estática puede ser tensión o compresión axiales, fuerza cortante, momento flexionante o de torsión o cualquier combinación de estas acciones.

4.2.2.3.1 Determinación del Esfuerzo Normal

Para el diseño estático se procede a calcular los esfuerzos normales y cortantes en el apoyo B utilizando los datos mostrados en la tabla 4.4.

El eslabón se encuentra sometido a un momento flexionante M, como resultado de dicho momento se produce un esfuerzo normal $\sigma_{(x)}$ sobre su sección transversal, la cual se encuentra a tensión por debajo del eje neutro y a compresión por encima del mismo, como se puede apreciar en la figura 4.16.

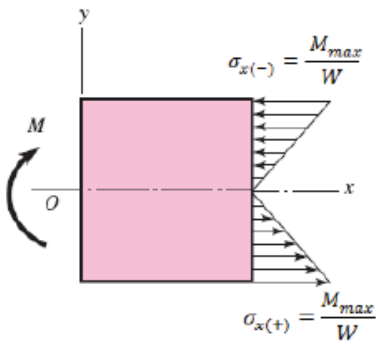


Figura 4.16 Distribución del esfuerzo normal por flexión

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edición; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.94

El esfuerzo máximo producido por un momento flexionante se calcula empleando la ecuación [Ec. 4.35]:

$$\sigma_{(x)} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{M_{max}}{\frac{I}{c}} = \frac{M_{max} \cdot c}{I} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.35}]$$

Puesto que se tiene flexión en un solo plano, el esfuerzo normal máximo será igual al esfuerzo normal.

4.2.2.3.2 Determinación del Esfuerzo Cortante

El esfuerzo cortante tiene una distribución parabólica para una sección uniforme, siendo cero en la fibra más alejada del eje neutro y máximo sobre este, como se indica en la figura 4.17.

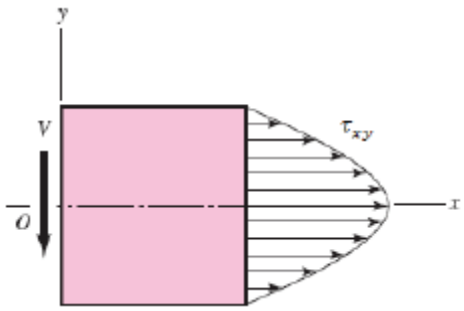


Figura 4.17 Distribución del Esfuerzo Cortante

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.94

El esfuerzo cortante máximo se determina empleando la siguiente ecuación:

$$\tau_{xy} = \frac{V.Q}{I.t} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.36}]$$

Debido a que se tiene flexión en un solo plano, el esfuerzo cortante máximo para el caso de una sección rectangular será igual a:

$$\tau_{xy} = \frac{3.V_y}{2.A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.37}]$$

Para la obtención de las propiedades de la sección rectangular del eslabón se emplea el Programa MDSolids 3.4, como se ilustra en la figura 4.18:

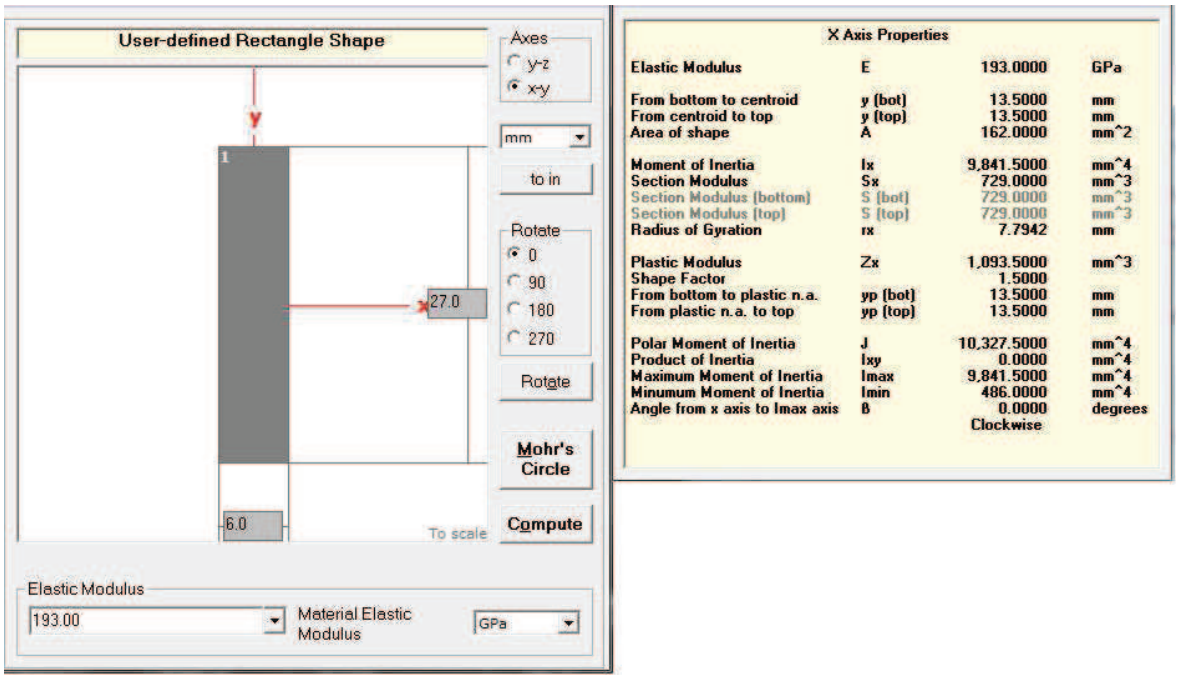


Figura 4.18 Propiedades de la Sección Rectangular del Eslabón Ranurado

Fuente: Propia

Empleando los valores de la tabla 4.4 y las [Ec. 4.35] y [Ec. 4.37] se tienen los siguientes valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante que se resumen en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Esfuerzos Normales y Cortantes Máximos

AF [m]	AB = x [m]	P [N]	V_y [N]	M_Z [N. m]	$\sigma_{(x)}$[MPa]	τ_{xy}[MPa]
0.147	0.235	122.5	153.26	13.49	18.505	1.419
	0.245		147	14.41	19.767	1.361
	0.255		141.24	15.25	20.919	1.308
	0.265		135.91	16.04	22.003	1.258
	0.275		130.96	16.76	22.990	1.213
	0.285		126.37	17.44	23.923	1.170
	0.295		122.08	18.07	24.787	1.130
	0.305		118.08	18.66	25.597	1.093
	0.315		114.33	19.21	26.351	1.059
	0.325		110.82	19.73	27.064	1.026
	0.335		107.51	20.21	27.723	0.995

Fuente: Propia

4.2.2.3.3 Determinación de los Esfuerzos Principales

Los esfuerzos principales se determinan mediante la ecuación [Ec. 4.38]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{(x)}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{(x)}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.38}]^{26}$$

4.2.2.3.4 Determinación del Esfuerzo Equivalente

La teoría de la Energía de Distorsión Máxima (TEDM) establece que el esfuerzo equivalente σ', a partir de los esfuerzos principales se determina empleando la ecuación [Ec. 4.39]:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1.\sigma_2 + \sigma_2^2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.39}]^{27}$$

4.2.2.3.5 Determinación del Factor de Seguridad Estático

Para una condición de diseño segura, se establece entonces que el esfuerzo equivalente calculado a partir de las teorías de diseño, debe ser menor o igual al esfuerzo de fluencia del material del eslabón, por tanto σ' ≤ S_y. Para garantizar que el elemento a diseñarse no alcance las condiciones de falla, el esfuerzo de fluencia debe ser igual al esfuerzo equivalente multiplicado por un factor de seguridad n, entonces: n (σ') = S_y.

Así se tiene que el factor estático de seguridad se determina mediante la ecuación [Ec. 4.40]:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.40}]$$

A partir de las ecuaciones [Ec. 4.38], [Ec. 4.39] y [Ec. 4.40] se determinan los esfuerzos principales, equivalentes y factores de seguridad estáticos respectivamente.

---

[26] SHIGLEY J; (1985); *"Manual de Diseño Mecánico"*; 4ta Edicion; Ed. McGraw-Hill; México; p. 34

[27] SHIGLEY J; (1985); *"Manual de Diseño Mecánico"*; 4ta Edicion; Ed. McGraw-Hill; México; p. 249

Considerando que el mecanismo será construido con Acero Inoxidable AISI 304 cuyas propiedades se aprecian en el ANEXO 1.2; los resultados se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Esfuerzos Principales, Equivalentes y Factor de Diseño Estático del Eslabón Ranurado

		Esfuerzos Principales		TEDM	Factor de Seguridad
$\sigma_{(x)}$[MPa]	τ_{xy}[MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ'	n
18.505	1.419	18.613	-0.108	18.667	16.071
19.767	1.361	19.860	-0.093	19.907	15.070
20.919	1.308	21.001	-0.081	21.041	14.258
22.003	1.258	22.074	-0.072	22.110	13.568
22.990	1.213	23.054	-0.064	23.086	12.995
23.923	1.170	23.980	-0.057	24.009	12.495
24.787	1.130	24.839	-0.051	24.865	12.065
25.597	1.093	25.643	-0.047	25.667	11.688
26.351	1.059	26.394	-0.042	26.415	11.357
27.064	1.026	27.103	-0.039	27.1123	11.061
27.723	0.995	27.759	-0.036	27.776	10.801

Fuente: Propia

Observando los resultados de la tabla 4.6, se establece que el diseño es seguro puesto que el factor de seguridad es mayor a uno.

4.2.2.4 Diseño Dinámico

Cuando las cargas que actúan sobre los diferentes elementos de una maquina varían con el tiempo, producen esfuerzos conocidos como repetitivos, alternantes o fluctuantes, los cuales producen la denominada falla por fatiga de dichos elementos.

Las fallas por fatiga comienzan en una pequeña grieta, la cual no se puede detectar a simple vista. Esta se desarrolla en un punto de discontinuidad del material, tal como un cambio en la sección transversal del elemento, un orificio, etc., y en otros puntos menos obvios como grietas internas o irregularidades causadas por el maquinado.

Una vez que se forma una grieta, el efecto de concentración de esfuerzos se hace mayor, como el área esforzada disminuye en tamaño, el esfuerzo aumenta en magnitud hasta que finalmente el área restante falla de repente.

Considerando esto, a continuación se presenta el diseño dinámico del perfil del eslabón ranurado, para garantizar que este resista con seguridad los efectos anteriormente mencionados y así evitar que falle durante el funcionamiento del mecanismo.

4.2.2.4.1 Determinación de los Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes

El diseño dinámico o falla a fatiga implica el análisis y determinación de los esfuerzos fluctuantes tanto normales como cortantes.

La figura 4.19 muestra la variación en el tiempo de los esfuerzos normal y cortante.

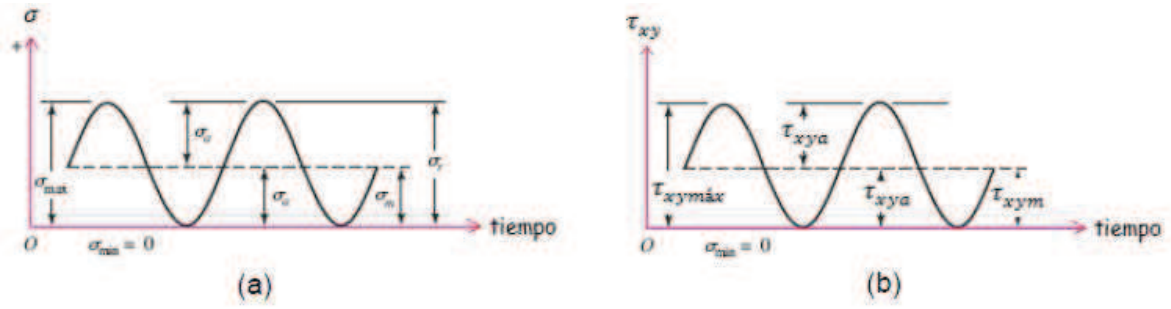


Figura 4.19 Variación en el Tiempo de los Esfuerzos (a) Normales y (b) Cortantes

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.293

Para calcular los esfuerzos amplitud y medio, se emplean las ecuaciones: [Ec. 4.41], [Ec. 4.42] y [Ec. 4.43][28]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.41}]$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.42}]$$

$$\tau_{xym} = \frac{\tau_{xymax} + \tau_{xymin}}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.43}]$$

[28] SHIGLEY J; (1985); *"Manual de Diseño Mecánico"*; 4ta Edicion; Ed. McGraw-Hill; México; p. 330

$$\tau_{xya} = \frac{\tau_{xymax} - \tau_{xymin}}{2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.44}]$$

Como se puede apreciar en la tabla 4.6, el caso crítico se presenta cuando el mecanismo se encuentra en su tope de recorrido, debido a que aquí se presentan los mayores esfuerzos. En base a las ecuaciones anteriores y para el caso crítico, se determinan los esfuerzos amplitud y medio. Los mismos que se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes

$\sigma_{(x)}$ [MPa]		τ_{xy} [MPa]		σ_m [MPa]	σ_a [MPa]	τ_{xym} [MPa]	τ_{xya} [MPa]
max	min	max	min				
27.723	0	0.995	0	13.861	13.861	0.498	0.498

Fuente: Propia

4.2.2.4.2 Cálculo de los Esfuerzos Medio y Amplitud Equivalentes

Los esfuerzos equivalentes según la teoría de la energía de la distorsión se obtienen empleando las ecuaciones: [Ec. 4.45] y [Ec. 4.46][29]

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3.\tau_{xym}^2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.45}]$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3.\tau_{xya}^2} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.46}]$$

Reemplazando los esfuerzos medios y amplitud de la tabla 4.7 en las ecuaciones [Ec. 4.45] y [Ec. 4.46] respectivamente, se tiene que:

$$\sigma'_m = \sigma'_a = 13.888\ [MPa]$$

4.2.2.4.3 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga [30]

La resistencia a la fatiga de un elemento mecánico se encuentra afectada por ciertos factores, como se indica en la ecuación [Ec. 4.47]:

---

[29] SHIGLEY J; (1985); *"Manual de Diseño Mecánico"*; 4ta Edicion; Ed. McGraw-Hill; México; p. 355

[30] SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte America; p. 278 - 288

$$Se = Se'.k_a.k_b.k_c.k_d.k_e.k_f \qquad [\boldsymbol{Ec.4.47}]$$

- Determinación del límite de resistencia a la fatiga de la probeta

Para materiales dúctiles, el límite de resistencia a la fatiga de la probeta se determina en base a la media estadística (50% de confiabilidad), como se indica en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Limite de resistencia a la Fatiga de la Probeta para Materiales Dúctiles

Material	Relación	Condición
Dúctil	Se'=0.5 S_{ut} Se'=100 kpsi	S_{ut} ≤200 kpsi S_{ut} >200 kpsi

Como se tiene que el mecanismo debe ser construido con Acero Inoxidable AISI 304, el cual corresponde a un material dúctil cuyas propiedades se indican en el ANEXO 1, se tiene que su S_{ut} = 700 [MPa].

Se' = 0.5 (700)

Se' = 350 [MPa]

- Determinación del factor de acabado superficial k_a

Este factor se determina empleando la ecuación [Ec. 4.49]:

$$k_a = a.S_{ut}^b \qquad [\boldsymbol{Ec.4.49}]$$

Puesto que el eslabón es maquinado y estirado en frio, según la tabla 4.9, se tienen valores de: a = 4.51 y b = - 0.265

Tabla 4.9 Factor ka para Acabado Superficial

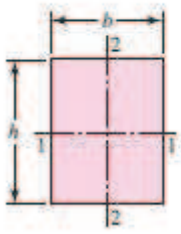
Surface Finish	Factor a S_{ut}, kpsi	Factor a S_{ut}, MPa	Exponent b
Ground	1.34	1.58	–0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	–0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	–0.718
As-forged	39.9	272.	–0.995

Reemplazando los valores de a y b en la [Ec. 4.49], se tiene que el factor de acabado superficial es:

$$k_a = 0.795$$

- Determinación del factor de tamaño k_b

Mediante la utilización del diámetro equivalente (d_e) de un perfil de forma rectangular y la fórmula del factor de corrección por tamaño, se tiene:



$$A_{0.95\sigma} = 0.05hb$$
$$d_e = 0.808\sqrt{hb}$$

Figura 4.20 Diámetro Equivalente para un Perfil de Forma Rectangular

En donde: h = 27 [mm] y b = 6 [mm]

Entonces: d_e = 10.284 [mm]

La fórmula empleada para el factor k_b es la siguiente:

$$(d/7.62)^{-0.107} = 1.24\, d^{-0.107} \qquad 2.79 \leq d \leq 51\ [mm] \qquad [\boldsymbol{Ec.4.50}]$$

Reemplazando los valores, se tiene que:

$$k_b = 0.966$$

- Determinación del factor de confiabilidad k_c

El factor de confiabilidad se determina según la ecuación [Ec. 4.51]:

$$k_c = 1 - 0.08\, Z_a \qquad [\boldsymbol{Ec.4.51}]$$

Y mediante el empleo de la tabla 4.10 correspondiente a valores de factores de confiabilidad a una desviación estándar de 8% del límite de fatiga, se obtiene el valor de k_c.

Tabla 4.10 Factores de Confiabilidad k_c

Reliability, %	Transformation Variate z_a	Reliability Factor k_a
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Como no se tiene información al respecto, se asume una confiabilidad del 50%, por lo tanto:

$$k_c = 1$$

- Determinación del factor de corrección por temperatura k_d

Para una temperatura de operación menor o igual a 450 °C, se tiene que el factor de corrección por temperatura es:

$$K_d = 1$$

- Determinación del factor de concentración de esfuerzos k_e

Es importante considerar el efecto que las ranuras y entalles provocan en el perfil del eslabón bajo ciertas condiciones de carga. Debido a que no existen graficas ni tablas para el tipo de ranura indicada en la figura 4.12 ni para la condición de carga a la que está sometida, se procede a hallar este factor suponiendo una ranura netamente circular sometida a esfuerzos de tracción.

Realizando dicha consideración, este factor se determina empleando la ecuación [Ec. 4.52]:

$$k_e = \frac{1}{1 + q(k_t - 1)} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.52}]$$

La sensibilidad a las ranuras q, en el caso de radios de ranuras grandes, corresponde al valor de 1.

El factor teórico de concentración de esfuerzos k_t, se determina mediante la figura 4.21; y mediante la relación: d/w se tiene:

$$\frac{d}{w} = \frac{12.7}{27} = 0.47$$

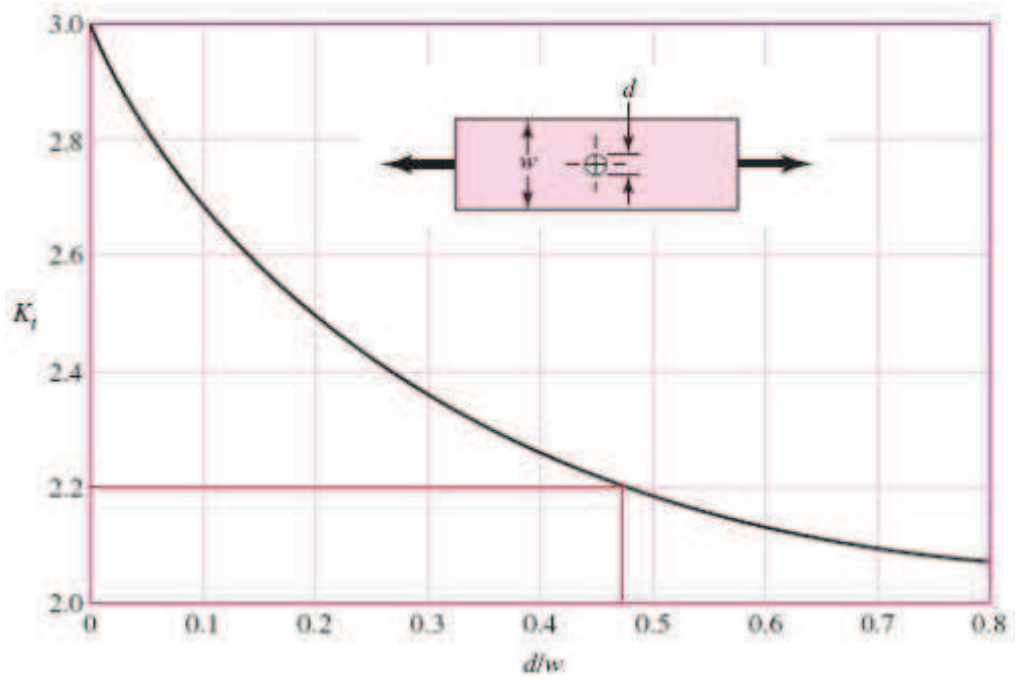


Figura 4.21 Factor Teórico de Concentración de Esfuerzos para Barras de Sección Rectangular a Tracción Pura con un Agujero Transversal

Es así que al valor de 0.47 le corresponde un valor de $k_t = 2.2$

Reemplazando los valores antes mencionados se tiene que:

$$k_e = 0.455$$

- Determinación del factor de efectos diversos k_f

No se dispone de valores reales de k_f, por tanto se considera:

$$K_f = 1$$

Una vez determinado el límite de resistencia a la fatiga de la probeta y los diferentes factores modificadores, se determina el límite de resistencia a la fatiga del perfil ranurado, reemplazando los valores respectivos en la [Ec. 4.47], se tiene:

Se = 122.3 [MPa]

4.2.2.4.4 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico

Para el caso se ha decidido utilizar el criterio de falla a fatiga ASME cuya fórmula se indica a continuación: [31]

$$\left(\frac{n.\sigma'_a}{Se}\right)^2 + \left(\frac{n.\sigma'_m}{Sy}\right)^2 = 1 \qquad [\boldsymbol{Ec.4.53}]$$

Despejando el factor de seguridad de la ecuación [Ec. 4.53], se tiene que:

$$n = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_a}{Se}\right)^2 + \left(\frac{\sigma'_m}{Sy}\right)^2}}$$

Reemplazando los valores de los esfuerzos medios y amplitud equivalentes, el límite de resistencia a la fatiga y el límite a la fluencia obtenidos anteriormente, obteniéndose como resultado:

$$n = 8.15$$

Analizando los factores de diseño estático y dinámico obtenidos, se puede establecer que el eslabón ranurado no fallara durante el funcionamiento del mecanismo.

4.2.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ESLABONES CRUZADOS

Las reacciones R_{Ay} y R_{By} en los apoyos del eslabón ranurado generadas por el peso combinado tanto del horno como del metal fundido, se transmiten a las platinas del sistema tipo tijeras, y estas a su vez generan reacciones en los apoyos D, E y en el pasador central C.

En la figura 4.22 se muestra un esquema del mecanismo, así como las cargas que actúan sobre este.

---

[31] SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte America; p. 298

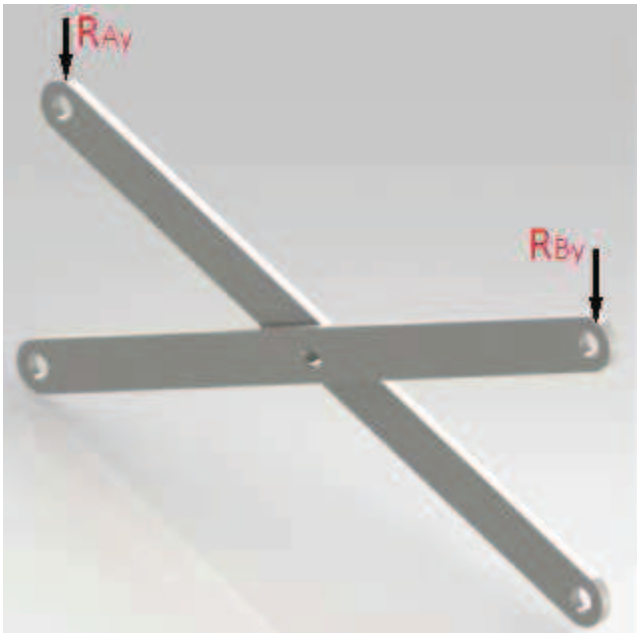


Figura 4.22 Cargas sobre las platinas del sistema de sujeción tipo tijeras

Fuente: Propia

4.2.3.1 Cálculo de Reacciones en el Plano Actuante de las Reacciones

En la figura 4.23 se puede apreciar un esquema del sistema tipo tijeras, las cargas que actúan sobre este y las reacciones que estas producen en cada uno de los apoyos.

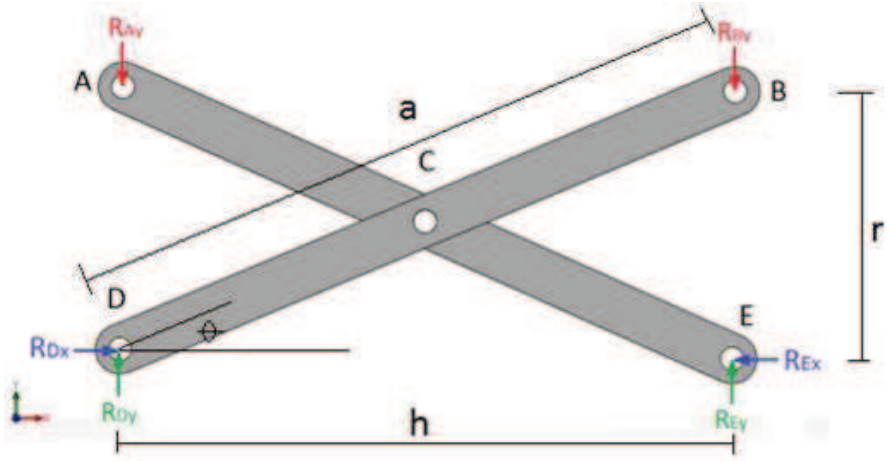


Figura 4.23 Cargas y Reacciones en el plano sobre las Platinas

Fuente: Propia

En base a la figura 4.23, se realiza el análisis estático de cargas y momentos de la siguiente manera:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{D_x} = R_{E_x} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.54}]$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{D_y} + R_{E_y} = R_{A_y} + R_{B_y} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.55}]$$

Aplicando la ley de la inercia de Newton para los momentos alrededor del eje z en el punto D, se tiene:

$$\sum M_D = 0$$

$$R_{E_y}(h) - R_{B_y}(a)cos\theta = 0 \qquad [\boldsymbol{Ec.4.56}]$$

Pero como: Según el triángulo BDE: h = (a).cos θ

Entonces, según la igualdad anterior, se observa que:

$$R_{E_y} = R_{B_y} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.57}]$$

Para realizar el análisis de cargas y cálculo de esfuerzos se separa un elemento (platina) del sistema tipo tijeras de ajuste de flejes, cuyo diagrama esquemático y cuerpo libre se muestra en la figura 4.24.

Y aplicando la ley de la inercia de Newton en la dirección x, se tiene que:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{C_x} = R_{E_x} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.58}]$$

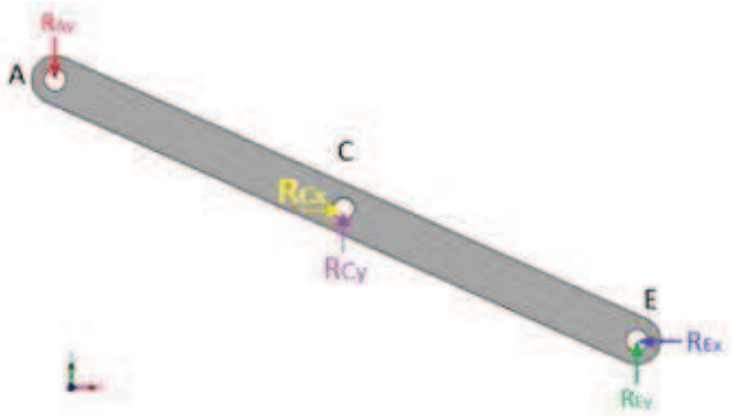


Figura 4.24 Esquema y DCL de una Platina

Fuente: Propia

De igual manera aplicando la ley de la inercia de Newton en la dirección y, se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{C_y} + R_{E_y} = R_{A_y} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.59}]$$

A continuación se aplica la misma ley para los momentos alrededor del eje z en el punto c, como se indica:

$$\sum M_z = 0$$

$$R_{A_y}\left(\frac{a}{2}\right) cos\theta + R_{E_y}\left(\frac{a}{2}\right) cos\theta - R_{E_x}\left(\frac{a}{2}\right) sen\theta = 0$$

$$R_{E_x} = \frac{R_{A_y} + R_{E_y}}{tan\theta} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.60}]$$

Reemplazando la [Ec. 4.57] en la [Ec. 4.55], se tiene:

$$R_{A_y} = R_{D_y} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.61}]$$

Reemplazando la [Ec. 4.57] en la [Ec. 4.59], se obtiene:

$$R_{C_y} = R_{A_y} - R_{B_y} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.62}]$$

Y finalmente empleando las [Ec. 4.54], [Ec. 4.57], [Ec. 4.58] y [Ec. 4.60] se tiene:

$$R_{C_x} = R_{D_x} = R_{E_x} = \frac{R_{A_y} + R_{E_y}}{tan\theta} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.63}]$$

4.2.3.2 Determinación de cargas normales (N), fuerzas cortantes (V) y de momentos flexionantes (M)

Mediante un análisis general y rotando el eslabón para que coincida con el eje x, se tiene que las reacciones involucran al ángulo θ, como se muestra en la figura 4.25.

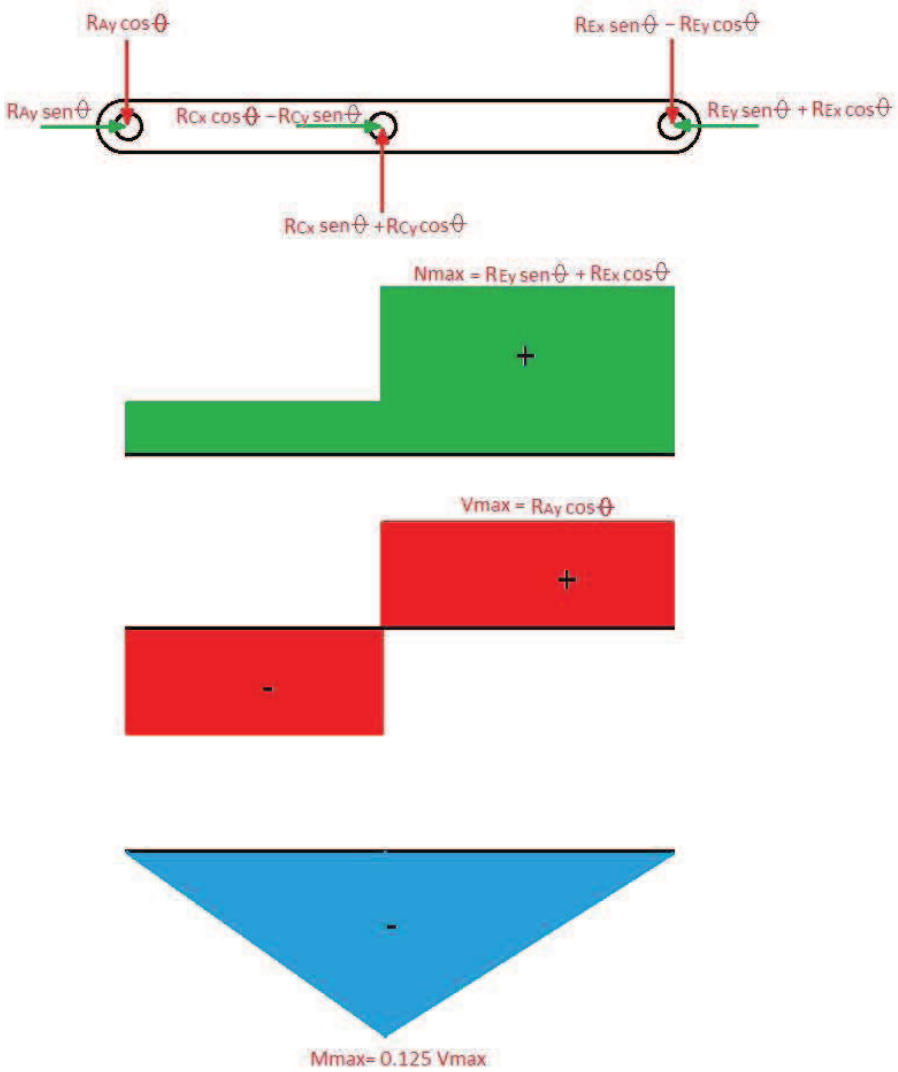


Figura 4.25 Diagramas De fuerza normal (N), cortante (V) y momento flexionante (M)

Fuente: Propia

Mediante las ecuaciones anteriores se procede a realizar el cálculo de las reacciones en los diferentes puntos del mecanismo de tipo tijeras, mismos resultados se presentan en la tabla 4.11 en base al ángulo θ.

Tabla 4.11 Valores de las Reacciones en el Mecanismo Tipo Tijeras

θ	$R_{A_y} = R_{D_y}$ [N]	$R_{B_y} = R_{E_y}$ [N]	R_{C_y} [N]	$R_{C_x} = R_{D_x} = R_{E_x}$[N]
52	45.87	76.63	-30.76	95.70
50	49	73.50	-24.50	102.08
48	51.88	70.62	-18.74	110.36
46	54.55	67.95	-13.40	117.79
44	57.02	65.48	-8.46	126.29
41	59.32	63.18	-3.86	140.80
39	61.46	61.04	0.42	151.23
37	63.46	59.04	4.42	163.33
34	65.33	57.17	8.16	182.84
31	67.09	55.41	11.68	204.17
28	68.75	53.75	15	231.13

Fuente: Propia

Mediante la tabla 4.11 se procede a calcular las fuerzas normales, cortantes y momentos flexionantes máximos.

Tabla 4.12 Fuerzas Normales, Cortantes y Momentos Flexionantes Máximos de los Eslabones

θ	Nmax [N]	Vmax [N]	Mmax [Nm]
52	119.87	28.44	3.55
50	121.93	31.36	3.92
48	126.20	34.76	4.34
46	130.20	37.64	4.70
44	136.11	41.05	5.13
41	147.30	44.49	5.56
39	156.42	47.94	5.99
37	166.09	50.77	6.35
34	183.77	54.22	6.78
31	204.40	57.70	7.21
28	228.66	60.50	7.56

Fuente: Propia

4.2.3.3 Diseño Estático

La finalidad del diseño estático es desarrollar las relaciones entre la resistencia y las cargas determinadas en las secciones anteriores, a fin de lograr dimensiones óptimas de los eslabones, con el requisito de que estas no fallen en servicio.

Para este caso específico se supone estáticas dichas cargas aunque se sabe que sufren variaciones. Esta consideración se hace para tener una idea aproximada de las dimensiones de los eslabones.

4.2.3.3.1 Determinación del Esfuerzo Normal debido a la Compresión

Como se indicó en la sección anterior, sobre cada eslabón actúa una fuerza normal N_{max} de compresión. Para el diseño se considera que hay una distribución uniforme del esfuerzo producido por dicha fuerza, puesto que cada eslabón es recto y de material homogéneo. Esta hipótesis de esfuerzo uniforme significa que si se corta el eslabón en una sección transversal, alejada de ambos extremos, y se separa una de las mitades, es posible sustituir su efecto aplicando una fuerza uniformemente distribuida de magnitud $\sigma_{(x)}$ en el extremo cortado.

Entonces se dice que el esfuerzo $\sigma_{(x)}$ esta uniformemente distribuido sobre la sección transversal del eslabón, como se indica en la figura 4.26 y se determina mediante la ecuación [Ec. 4.64] [32]

$$\sigma_{(x)} = \frac{N_{max}}{A} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.64}]$$

[32] SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte America; p. 84

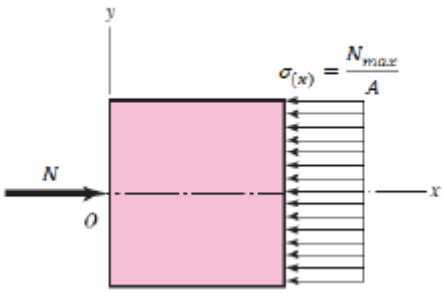


Figura 4.26 Distribución Uniforme del Esfuerzo Normal por Compresión

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.84

4.2.3.3.2 Determinación del Esfuerzo Normal debido a la Flexión

Los eslabones se encuentran sometidos a un momento flexionante M, como resultado de dicho momento se produce un esfuerzo normal $\sigma_{(x)}$ sobre su sección transversal, dicho esfuerzo se encuentra a tensión por encima del eje neutro y a compresión por debajo del mismo, como se puede apreciar en la figura 4.27.

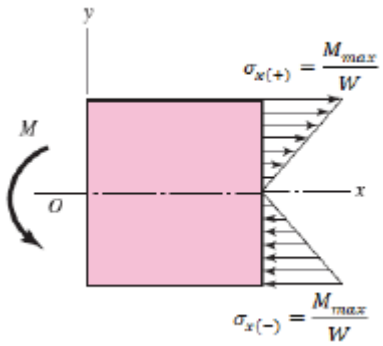


Figura 4.27 Distribución del Esfuerzo Normal por Flexión

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.94

El esfuerzo máximo producido por un momento flexionante se obtiene empleando la ecuación [Ec. 4.65] [33]

$$\sigma_{(x)} = \frac{M_{max}}{W} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.65}]$$

[33] SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte America; p. 86

4.2.3.3.3 Determinación del Esfuerzo Cortante

El esfuerzo cortante máximo que actúa sobre los eslabones se determina empleando la ecuación [Ec. 4.66] [34]

$$\tau_{xy} = \frac{3.V}{2.A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.66}]$$

En la figura 4.28 se puede observar la distribución del esfuerzo cortante sobre la sección de los eslabones; también se aprecia que el máximo esfuerzo se tiene en el eje neutro y cuya magnitud está dada por la [Ec. 4.66].

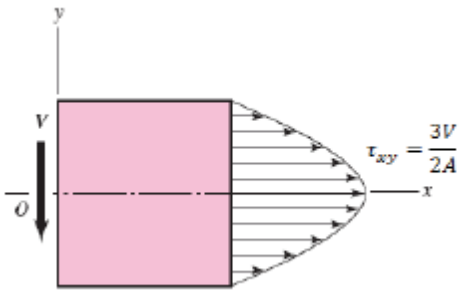


Figura 4.28 Distribución del Esfuerzo Cortante

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.94

4.2.3.3.4 Determinación de los Esfuerzos Totales Máximos y del Punto Critico

Como se tienen esfuerzos únicamente en el plano xy es necesario determinar los esfuerzos totales máximos. Para secciones no circulares los esfuerzos totales se obtienen por la superposición de esfuerzos producidos por los momentos flexionantes en el plano. Los máximos esfuerzos de tracción y compresión ocurren cuando dicha superposición produce los mayores esfuerzos positivos y negativos, como se ilustra en la figura 4.29.

---

[34] SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte America; p. 86

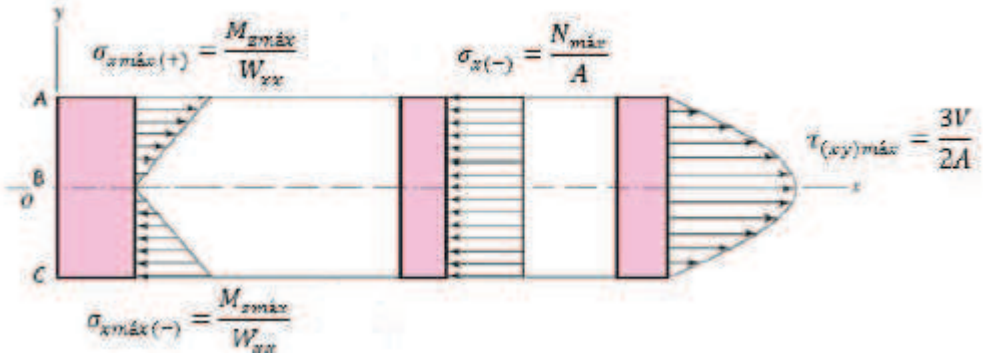


Figura 4.29 Esfuerzos Totales Máximos

Fuente: Propia

En la figura 4.29 se puede apreciar que el punto B está sometido a esfuerzos normales debido a la compresión, mientras que los puntos A y C están sometidos a esfuerzos normales debido a la flexión, los cuales son de mayor valor que los producidos por cargas de compresión, mientras que el esfuerzo cortante se asume constante en toda la sección de los eslabones. Debido a esto se desprecia el punto B; y puesto que se asegura que los materiales resisten más a compresión que a tensión se tiene que el punto crítico es el A.

Por tanto se tiene que los esfuerzos máximos en el punto crítico están dados por las ecuaciones [Ec. 4.67] y [Ec. 4.68]

$$\sigma_{(x)max} = \frac{M_{zmax}}{W_{xx}} - \frac{N_{max}}{A} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.67}]$$

$$\tau_{(xy)max} = \frac{3.V}{2.A} \qquad [\boldsymbol{Ec.\,4.68}]$$

En este punto del diseño se realiza una preselección de los eslabones del mecanismo, esto debido a que los esfuerzos dependen de la geometría de dichos eslabones. Así pues para los cálculos posteriores se emplearan platinas de Acero Inoxidable AISI 304 de 27 x 6 [mm] de sección, cuyas características se indican en el Anexo 1.2.

Con las características del material, los momentos máximos presentados en la tabla 4.12 y empleando las [Ec. 4.67] y [Ec. 4.68], se determinan los esfuerzos

máximos sobre el punto crítico A, para los diferentes ángulos de apertura de las tijeras. Estos resultados se resumen en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Esfuerzos Normales y Cortantes Máximos sobre los Eslabones

θ	h [m]	t [m]	$W_{xx} = I/c$	A [m^2]	$\sigma_{(x)max}$ [MPa]	$\tau_{(xy)max}$ [MPa]
52	0.027	0.006	$7.29(10^{-7})$	$1.62(10^{-4})$	4.14	0.26
50					4.62	0.29
48					5.18	0.32
46					5.65	0.35
44					6.20	0.38
41					6.72	0.41
39					7.25	0.44
37					7.68	0.47
34					8.16	0.50
31					8.63	0.53
28					8.96	0.56

Fuente: Propia

4.2.3.3.5 Cálculo de los Esfuerzos Principales

Los esfuerzos principales en el punto crítico A se determinan mediante la [Ec. 4.38]

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{(x)max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{(x)max}}{2}\right)^2 + \tau^2_{(xy)max}}$$

4.2.3.3.6 Cálculo del Esfuerzo Equivalente

El esfuerzo equivalente según la teoría de la energía de la distorsión se obtiene empleando la [Ec. 4.39].

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1.\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

4.2.3.3.7 Determinación del Factor de Seguridad Estático

El factor estático de seguridad se determina mediante la [Ec. 4.40].

$$n = \frac{S_y}{\sigma'}$$

Tabla 4.14 Esfuerzos Principales. Equivalentes y factor de Seguridad Estático de los Eslabones

	Esfuerzos Principales		TEDM	Factor de Seguridad
θ	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ'	n
52	4.15	-0.0167	4.16	72.09
50	4.64	-0.0182	4.65	64.49
48	5.20	-0.0199	5.21	57.57
46	5.67	-0.0214	5.68	52.79
44	6.22	-0.0232	6.23	48.12
41	6.74	-0.0252	6.76	44.40
39	7.28	-0.0271	7.30	41.12
37	7.71	-0.0287	7.72	38.85
34	8.19	-0.0308	8.21	36.54
31	8.66	-0.0329	8.68	34.56
28	9.00	-0.0349	9.01	33.28

Fuente: Propia

Para garantizar que un elemento no falle mientras está en funcionamiento, se recomienda que éste tenga un factor de seguridad estático n ≥ 2 [35]

4.2.3.4 Diseño Dinámico

A continuación se presenta el diseño dinámico o a fatiga de los eslabones, para garantizar que estos resistan con seguridad los efectos de las cargas fluctuantes y así evitar que fallen durante el funcionamiento del mecanismo.

4.2.3.4.1 Determinación de los Componentes de los Esfuerzos

Como se mencionó anteriormente, debido a la rotación del horno durante la etapa de colado, los esfuerzos generados sobre los eslabones varían en el tiempo, desde un valor máximo hasta un mínimo, el cual es cero.

Los componentes de los esfuerzos de determinan empleando las ecuaciones [Ec. 4.41], [Ec. 4.42], [Ec. 4.43] y [Ec. 4.44].

---

[35] DEUTSCHMAN A., MICHELS W; (1975); "*Diseño de Máquinas – Teoría y Práctica*"; Ed. Continental S.A.; p. 22

Los cálculos se realizan para el caso crítico, y como se definió anteriormente este se presenta cuando el ángulo de apertura de los eslabones es de 52°.

Tabla 4.15 Esfuerzos Medios y Amplitud para el Caso Crítico

$\sigma_{(x)}$ [MPa]		τ_{xy} [MPa]		σ_m [MPa]	σ_a [MPa]	τ_{xym} [MPa]	τ_{xya} [MPa]
max	min	max	min				
4.14	0	0.26	0	2.07	2.07	0.13	0.13

Fuente: Propia

4.2.3.4.2 Determinación de los Esfuerzos Medio y Amplitud Equivalentes

Reemplazando los valores de los esfuerzos medios y amplitudes antes determinados en las ecuaciones [Ec. 4.45] y [Ec. 4.46], se tiene:

$$\sigma'_m = \sigma'_a = 2.08\ [MPa]$$

4.2.3.4.3 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga

La resistencia a la fatiga de un elemento se calcula mediante la [Ec. 4.47].

- Determinación del límite de resistencia a la fatiga de la probeta

Puesto que los eslabones son de Acero Inoxidable AISI 304, correspondiendo a un material dúctil, al igual que para el caso del eslabón ranurado; se tiene que:

Se' = 350 [MPa]

- Determinación del factor de acabado superficial k_a

Empleando la [Ec. 4.49] y los mismos valores de a = 4.51 y b = - 0.265 obtenidos de la tabla 4.9, se tiene que:

$$k_a = 0.795$$

- Determinación del factor de tamaño k_b

De la misma manera que para el caso del eslabón ranurado y empleando la [Ec. 4.50], se tiene:

$$k_b = 0.966$$

- Determinación del factor de confiabilidad k_c

Como no se tiene información al respecto, se asume una confiabilidad del 50%, por lo tanto:

$$k_c = 1$$

- Determinación del factor de corrección por temperatura k_d

Para una temperatura de operación menor o igual a 450 °C, se tiene que el factor de corrección por temperatura es:

$$K_d = 1$$

- Determinación del factor de concentración de esfuerzos k_e

Los eslabones están conjugados mediante pernos, mismos que representan agujeros (r = 12.7 [mm]) los cuales alteran la distribución de los esfuerzos.

Realizando dicha consideración, este factor se determina empleando la [Ec. 4.52].

La sensibilidad a las ranuras q, en el caso de radios de ranuras grandes, corresponde al valor de 1.

El factor teórico de concentración de esfuerzos k_t, se determina mediante la siguiente grafica; y mediante la relación: d/w se tiene:

$$\frac{d}{w} = \frac{12.7}{27} = 0.47$$

Mediante la Figura 4.20 y el valor de 0.47 le corresponde un valor de $k_t = 2.2$

Reemplazando los valores antes mencionados se tiene que:

$$k_e = 0.455$$

- Determinación del factor de efectos diversos k_f

No se dispone de valores reales de k_f, por tanto se considera:

$$K_f = 1$$

Una vez determinado el límite de resistencia a la fatiga de la probeta y los diferentes factores modificadores, se determina el límite de resistencia a la fatiga del eslabón, reemplazando los valores respectivos en la [Ec. 4.47], se tiene:

Se = 122.3 [MPa]

4.2.3.4.4 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico

Para el caso se ha decidido utilizar el criterio de falla a fatiga ASME cuya expresión es la [Ec. 4.53] y despejando el factor de seguridad de la ecuación, se tiene que:

$$n = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_a}{Se}\right)^2 + \left(\frac{\sigma'_m}{Sy}\right)^2}}$$

Reemplazando los valores de los esfuerzos medios y amplitud equivalentes, el límite de resistencia a la fatiga y el límite a la fluencia obtenidos anteriormente, obteniéndose como resultado:

n = 54.45

Analizando los factores de diseño estático y dinámico obtenidos, se puede establecer que los eslabones no fallaran durante el funcionamiento del mecanismo.

4.2.4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE PERNOS DEL MECANISMO DE TIPO TIJERAS

Los eslabones del mecanismo de tipo tijeras, se encuentran unidos entre si a través de un perno central, y mediante pernos también a los eslabones ranurados, y debido a la carga resultante del peso del horno así como del metal fundido en su interior es necesario realizar el cálculo de los pernos que serán empleados en el prototipo para tener la certeza de que estos no fallen durante el funcionamiento del mismo.

El cálculo del perno se realiza en el punto en el cual éste soporta las cargas más elevadas. Dichas cargas se presentan en la unión entre el eslabón ranurado y el horno, punto que soporta una carga concentrada variable, el cálculo de los pernos se lo realizara empleando las teorías de diseño dinámico. La figura 4.30 indica un esquema para el cálculo del perno.

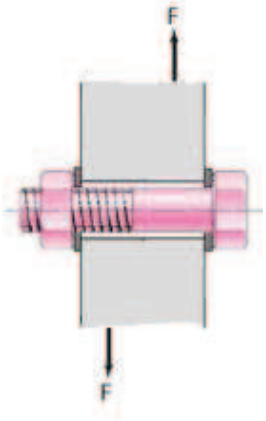


Figura 4.30 Unión entre los Eslabones del Sistema Tipo Tijeras

Fuente: SHIGLEY J.; (2006); *"Mechanical Engineering"*; Octava Edicion; Ed. McGraw-Hill; Estados Unidos de Norte América; p.439

Para este caso de diseño se tiene que la longitud de trabajo de los pernos es t = 6 [mm] y también que la carga cortante total sobre la unión es F = 122.5 [N].

Para calcular una **falla por flexión** se emplea la ecuación [Ec. 4.69]: [36]

$$\sigma = \frac{M}{\frac{I}{c}} = \frac{\frac{F.t}{2}}{\frac{I}{c}} = \frac{F.t.c}{2.I} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.69}]$$

En donde se considera que la parte sujeta a flexión en la parte del tornillo es redonda con: d = 12.7 [mm], c = 6.35 (10^{-3}) [m], I = 1.277 (10^{-9}) [m^4] y A = 126.7 (10^{-6}) [m^2]

Reemplazando los datos anteriores en la [Ec. 4.69] se tiene:

$$\sigma = 1.83 \text{ [MPa]}$$

[36] SHIGLEY J.; (2006); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.415

Y para calcular el esfuerzo cortante se tiene:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.70}]$$

Reemplazando los valores obtenidos en la expresión anterior resulta:

$$\tau = 0.967\ [MPa]$$

Ahora empleando la [Ec. 4.38], [Ec. 4.39] y [Ec. 4.40], se obtiene el factor de seguridad:

σ_1 = 1.95 [MPa]

σ_2 = -0.12 [MPa]

σ' = 2.01 [MPa]

n = 149.24

Para el caso de **falla por aplastamiento**, se emplean las mismas ecuaciones antes mencionadas solo con la modificación de que: A = t. d = 7.62 (10^{-5}) [m^2].

Así que σ es el mismo, es decir:

σ = 1.83 [MPa]

Sin embargo:

$$\tau = 1.61\ [MPa]$$

Igualmente como en el caso anterior se obtiene que el factor de seguridad sea:

σ_1 = 2.76 [MPa]

σ_2 = -0.93 [MPa]

σ' = 3.33 [MPa]

n = 90.04

4.2.5 CÁLCULO DEL EJE IMPULSOR DEL MECANISMO

4.2.5.1 Diseño Estático

Empleando los resultados de las reacciones de los eslabones en el punto E obtenidos de la tabla 4.11, y conociendo que estas se trasladan por acción y reacción a los extremos del eje impulsor, se obtienen los valores de fuerza cortante total (V) y momento flexionante total (M), respectivamente que se resumen a continuación en la tabla 4.16.

Tabla 4.16 Fuerzas Cortantes Totales (V) y Momentos Flexionantes Totales (M) del Eje Impulsor

θ	$R_{E_y}[N]$	$R_{E_x}[N]$	V [N]	M [N.m]
52	76.63	95.70	122.60	8.87
50	73.50	102.08	125.79	7.67
48	70.62	110.36	131.02	7.99
46	67.95	117.79	135.98	8.30
44	65.48	126.29	142.26	8.67
41	63.18	140.80	154.33	9.41
39	61.04	151.23	163.08	9.95
37	59.04	163.33	173.67	10.59
34	57.17	182.84	191.57	11.68
31	55.41	204.17	211.56	12.90
28	53.75	231.13	237.30	14.48

Fuente: Propia

Posteriormente empleando los valores obtenidos en la tabla 4.16, las propiedades de sección circular para (d = 12.7 [mm]) y las ecuaciones [Ec. 4.35], [Ec. 4.37], [Ec. 4.38], [Ec. 4.39] y [Ec. 4.40], se obtienen los siguientes factores de seguridad estáticos resumidos en la tabla 4.18.

Tabla 4.17 Propiedades de una Sección Circular

Sección Circular	Diámetro	c	I	A
	[m]	[m]	$[m^4]$	$[m^2]$
	0.0127	0.00635	$1.277\ (10^{-8})$	$1.267\ (10^{-4})$

Fuente: Propia

Tabla 4.18 Esfuerzos Principales, Equivalentes y Factor de Diseño Estático del Eje Impulsor

		Esfuerzos Principales		TEDM	Factor de Seguridad
$\sigma_{(x)}$[MPa]	τ_{xy}[MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ'	n
4.41	1.451	4.843	-0.435	5.075	59.12
3.82	1.489	4.328	-0.512	4.606	65.14
3.97	1.551	4.508	-0.534	4.797	62.54
4.13	1.610	4.679	-0.554	4.980	60.25
4.31	1.684	4.892	-0.580	5.206	57.62
4.68	1.827	5.310	-0.629	5.650	53.10
4.95	1.931	5.613	-0.664	5.972	50.23
5.27	2.056	5.974	-0.708	6.357	47.19
5.81	2.268	6.590	-0.781	7.013	42.78
6.41	2.505	7.277	-0.862	7.744	38.74
7.20	2.809	8.165	-0.967	8.689	34.53

Fuente: Propia

4.2.5.2 Diseño Dinámico

Para el caso de este tipo de diseño se considera que el punto crítico se presenta al momento de recorrerse todo el canal ranurado y encontrarse el mecanismo en su tope superior de recorrido. En base a dicha consideración y con el empleo de las ecuaciones [Ec. 4.41], [Ec. 4.42], [Ec. 4.43] y [Ec. 4.44], se presenta en la tabla 4.19 que resume los esfuerzos fluctuantes:

Tabla 4.19 Componentes de los Esfuerzos Fluctuantes

$\sigma_{(x)}$ [MPa]		τ_{xy} [MPa]		σ_m [MPa]	σ_a [MPa]	τ_{xym} [MPa]	τ_{xya} [MPa]
max	min	max	min				
4.41	0	1.451	0	2.205	2.205	0.7255	0.7255

Fuente: propia

Reemplazando los valores de los esfuerzos medios y amplitud de la tabla anterior en las ecuaciones [Ec. 4.45] y [Ec. 4.46] se tiene que:

$$\sigma'_m = \sigma'_a = 2.538\ [MPa]$$

4.2.5.2.1 Determinación del Límite de Resistencia a la Fatiga

La resistencia a la fatiga de un elemento se calcula mediante la [Ec. 4.47].

- Determinación del límite de resistencia a la fatiga de la probeta

Puesto que el eje es construido de Acero Inoxidable AISI 304, correspondiente a un material dúctil, se tiene que:

Se' = 350 [MPa]

- Determinación del factor de acabado superficial k_a

Empleando la [Ec. 4.49] y los valores de a = 4.51 y b = -0.265 obtenidos de la tabla 4.9, se tiene:

$$k_a = 0.795$$

- Determinación del factor de tamaño k_b

Mediante la [Ec. 4.50] se tiene que:

$$k_b = 1.24\ d^{-0.107} = 0.945$$

- Determinación del factor de confiabilidad k_c

Debido a que no se cuenta con información, se asume una confiabilidad del 50%, por lo tanto:

$$k_c = 1$$

- Determinación del factor de corrección por temperatura k_d

Para una temperatura de operación menor o igual a 450 °C, se tiene que el factor de corrección por temperatura es:

$$k_d = 1$$

- Determinación del factor de concentración de esfuerzos k_e

Puesto que se considera que el eje únicamente soporta momentos flexionantes debido a las cargas aplicadas en sus extremos, se aplica la [Ec. 4.52].

Además considerando la sensibilidad a ranuras q, en el caso de radios de ranuras grandes correspondiente al valor de 1 y que el factor teórico de concentración de esfuerzos k_t se determina mediante la figura 4.31, se tiene:

$$\frac{D}{d} = \frac{25.4}{12.7} = 2$$

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{12.7} = 0.078$$

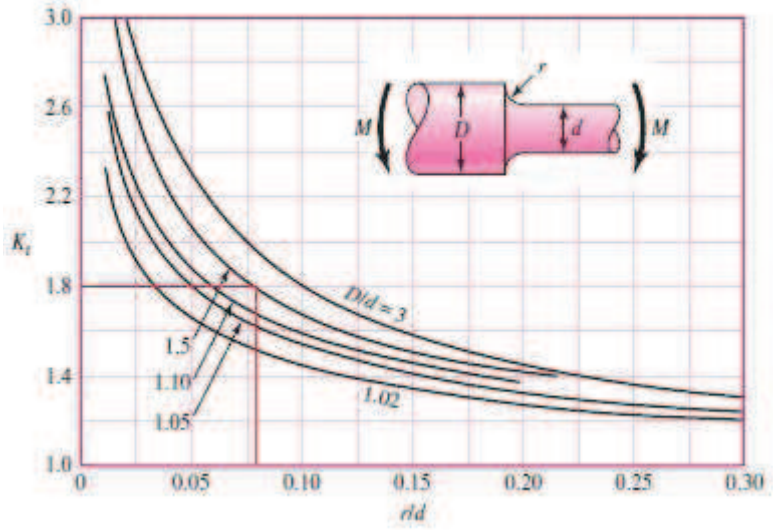


Figura 4.31 Factor Teórico de Concentración de Esfuerzos para una Barra de Sección Circular en Flexión con Estrechamiento y Entalle

Es así que con los valores: D/d y r/d se tiene un valor de: k_t =1.8

Posteriormente empleando la [Ec. 4.52] se tiene que:

$$k_e = 0.556$$

- Determinación del factor de efectos diversos k_f

Debido a que no se dispone de valores reales de k_f, se considera:

$$k_f = 1$$

Determinados tanto los límites de resistencia a la fatiga de la probeta y los diferentes factores modificadores, se determina el límite de resistencia a la fatiga del eje impulsor, reemplazando los valores respectivos en la [Ec. 4.47], se tiene:

Se = 146.2 [MPa]

4.2.5.2.2 Determinación del Factor de Seguridad Dinámico

Empleando el criterio de falla a fatiga ASME cuya expresión es la [Ec. 4.53], donde se despeja el valor de n, se tiene:

$$n = 51.78$$

4.2.6 DISEÑO DEL DOBLE TORNILLO ACCIONADOR DEL EJE IMPULSOR

Los elementos principales que permiten el accionamiento del eje impulsor son dos barras roscadas semejantes a tornillos de potencia con su respectiva tuerca. Dichos elementos empujan al mecanismo de tijeras para que se permita el levantamiento del horno de inducción dentro de la cámara de vacío.

4.2.6.1 Selección del Tipo de Rosca

De entre la variedad de tipos de roscas aplicables para accionar el mecanismo se empleará la tipo triangular debido básicamente al alto costo de fabricación de otro tipo de rosca que no se encuentra de venta en el mercado.

Es por eso que se decide emplear una barra roscada en donde en uno de sus extremos se suelda una tuerca para semejar a un tornillo para la aplicación deseada. En la figura 4.32 se puede observar la configuración de dicha rosca.

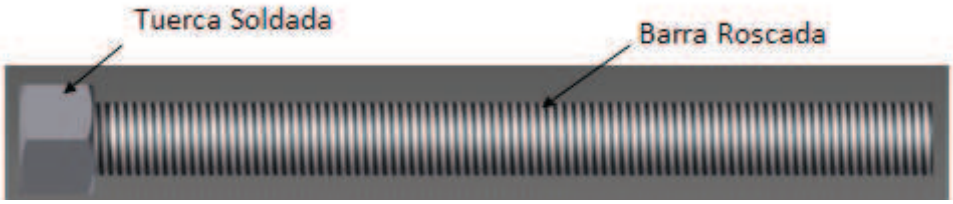


Figura 4.32 Configuración de la Rosca a emplear en el Mecanismo

Fuente: Propia

Es así que con la disposición limitada en el mercado nacional se selecciona un diámetro de rosca y el respectivo paso; con lo cual se procede a establecer los cálculos que garanticen el diseño.

Se toma entonces una rosca triangular M16 x 2; de donde se comenzará a diseñar empleando las ecuaciones mediante semejanza a tornillos de potencia.

4.2.6.2 Diseño Estático

Los tornillos tienen la función de desplazar al eje impulsor que fija en una posición dada el apoyo deslizante E del mecanismo doble de tijeras, mostrado en la figura 4.22; de tal manera que el horno permanezca ajustado por las tijeras en una posición dada para su posterior basculamiento.

En este sentido se asume que estos elementos estarán sometidos únicamente a cargas estáticas como se muestra en la figura 4.33, y por lo tanto el criterio de diseño estático es suficiente para su dimensionamiento.

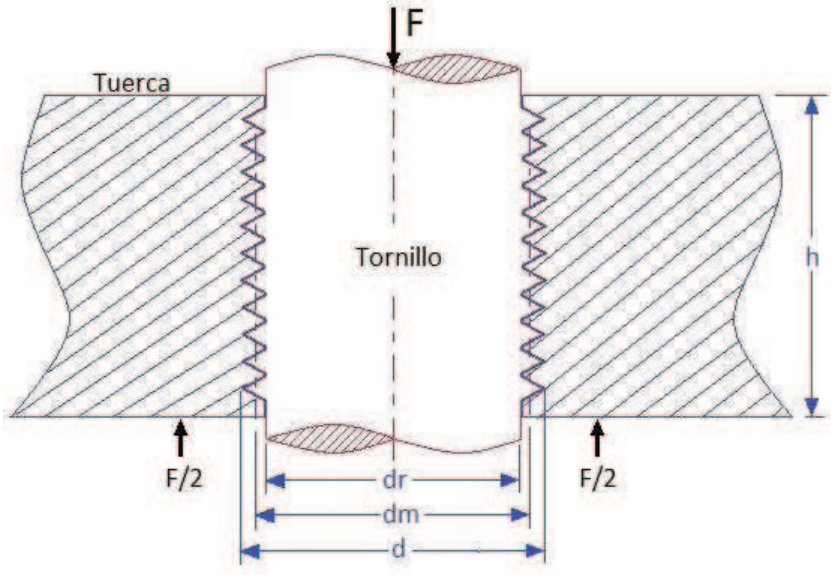


Figura 4.33 Tornillo – Tuerca en Condiciones Estáticas

Fuente: Propia

- Calculo de Esfuerzos de Corte y Compresión en la Tuerca y en el Tornillo

Puesto que las secciones críticas son diferentes, se debe separar los efectos de compresión y corte en los hilos de la tuerca y el tornillo.

Es así que se presentan las siguientes ecuaciones resumidas en la tabla 4.20 que sirven para calcular tanto los esfuerzos de corte como de compresión tanto en la tuerca como en el tornillo.

Tabla 4.20 Esfuerzos de Corte y Compresión en la Tuerca y el Tornillo

	Tuerca	Tornillo
Corte	$A = \pi . d . \frac{h}{2}$ $\tau = \frac{F}{A} = \frac{2.F}{\pi . d . h}$	$A = \pi . dr . \frac{h}{2}$ $\tau = \frac{F}{A} = \frac{2.F}{\pi . dr . h}$
Compresión	$A = \frac{1}{4} . \pi . (d^2 - dr^2) . \frac{h}{p}$ $\sigma_{(-)} = \frac{F}{A} = \frac{4.p.F}{\pi . (d^2 - dr^2) . h}$	$A = \frac{1}{4} . \pi . (d^2 - dr^2) . \frac{h}{p}$ $\sigma_{(-)} = \frac{F}{A} = \frac{4.p.F}{\pi . (d^2 - dr^2) . h}$

Fuente: VELASTEGUI Tito; (2009); *"Elementos de Maquinas"*; EPN; 2da Edicion; Quito; p.49

Reemplazando los valores de: h = 6.35 [mm], d = 16 [mm], p = 2 [mm] y dr = 14 [mm], en las ecuaciones de la tabla anterior y usando los valores de R_{Ex} que se transmiten a la rosca como valores de F; se tiene:

Tabla 4.21 Valores de Esfuerzos a Corte y Compresión para la Tuerca y el Tornillo

		Tuerca		Tornillo	
θ	$\mathbf{F = R_{E_X}[N]}$	$\boldsymbol{\tau_{xy}}$**[MPa]**	$\boldsymbol{\sigma_{(-)}}$**[MPa]**	$\boldsymbol{\tau_{xy}}$**[MPa]**	$\boldsymbol{\sigma_{(-)}}$**[MPa]**
52	95.70	0.600	0.640	0.685	0.640
50	102.08	0.640	0.682	0.731	0.682
48	110.36	0.692	0.738	0.790	0.738
46	117.79	0.738	0.787	0.844	0.787
44	126.29	0.791	0.844	0.904	0.844
41	140.80	0.882	0.941	1.008	0.941
39	151.23	0.948	1.011	1.083	1.011
37	163.33	1.023	1.092	1.170	1.092
34	182.84	1.146	1.222	1.309	1.222
31	204.17	1.279	1.365	1.462	1.365
28	231.13	1.448	1.545	1.655	1.545

Fuente: Propia

- Factor de Seguridad para materiales Dúctiles tanto para la Tuerca como para el Tornillo

Para el estudio del factor de seguridad según la teoría de la energía de la distorsión se resumen las ecuaciones tanto para la tuerca como para el tornillo en la tabla 4.22.

Tabla 4.22 Factores de Diseño para Materiales Dúctiles para Tuerca y Tornillo

	Tuerca	Tornillo
Corte	$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}} = \frac{0.577(Sy)}{\frac{2.F}{\pi.d.h}}$	$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}} = \frac{0.577(Sy)}{\frac{2.F}{\pi.dr.h}}$
Compresión	$n = \frac{Sy}{\sigma_x} = \frac{Sy}{\frac{4.p.F}{\pi.(d^2 - dr^2).h}}$	$n = \frac{Sy}{\sigma_x} = \frac{Sy}{\frac{4.p.F}{\pi.(d^2 - dr^2).h}}$

Fuente: Propia

Y teniendo en cuenta que el tornillo es fabricado de Acero Inoxidable AISI 304 y la tuerca de Acero AISI 1010 cuyos Sy son: 300 [MPa] y 180 [MPa] respectivamente; se tienen los siguientes factores de seguridad estáticos resumidos a continuación en la tabla 4.23:

Tabla 4.23 Valores de Factores de Seguridad Estáticos tanto para la Tuerca como para el Tornillo

		Tuerca		Tornillo	
θ	**F [N]**	**n_{corte}**	**$n_{compresión}$**	**n_{corte}**	**$n_{compresión}$**
52	95.70	173.2	281.4	252.6	469.0
50	102.08	162.4	263.8	236.8	439.7
48	110.36	150.2	244.0	219.0	406.7
46	117.79	140.7	228.6	205.2	381.1
44	126.29	131.2	213.3	191.4	355.4
41	140.80	117.7	191.3	171.7	318.8
39	151.23	109.6	178.1	159.8	296.8
37	163.33	101.5	164.9	148.0	274.8
34	182.84	90.7	147.3	132.2	245.5
31	204.17	81.2	131.9	118.4	219.8
28	231.13	71.7	116.5	104.6	194.2

Fuente: Propia

Puesto que los valores de factores de seguridad son altos, se asegura que los tornillos no fallarán durante su operación dentro de la cámara.

Para la transmisión del movimiento entre las dos barras roscadas se considera emplear catarinas de Z=13 y P=1/2”, esto con la finalidad de obtener un movimiento suave para su accionamiento.

4.3 CÁLCULO DEL SISTEMA DE BASCULAMIENTO MEDIANTE ENGRANAJES RECTOS

El sistema de basculamiento del horno de inducción dentro de la cámara de vacío está compuesto básicamente por un par de engranajes rectos que se conjugan al momento que el mecanismo de desplazamiento vertical recorre toda su trayectoria, es en ese instante cuando se procede a bascular al horno mediante acción manual a través del eje del engrane motriz accionado a través de un volante.

4.3.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL ACCIONAR DEL PAR DE ENGRANAJES

Para definir el problema se considera como un sistema de transmisión de engranes rectos, el mismo que tiene un par de ruedas conectadas con una relación de transmisión de 1:1, los dos son de duralon, con un ángulo de presión de $\phi = 20°$, modulo 4, y 18 dientes.

Se asume de hipótesis condiciones medias de montaje y choque ligero, confiabilidad del 95%, una fuerza de 245 [N] aplicada tangencialmente sobre el diámetro primitivo y un numero de revoluciones aproximado de 1 rpm.

De esta manera se procede a realizar los cálculos para determinar la confiabilidad del sistema mediante el cálculo del factor de diseño.

4.3.2 DISEÑO ESTÁTICO

A continuación en la figura 4.34 se muestra el sistema, así como los engranes con la simbología adecuada.

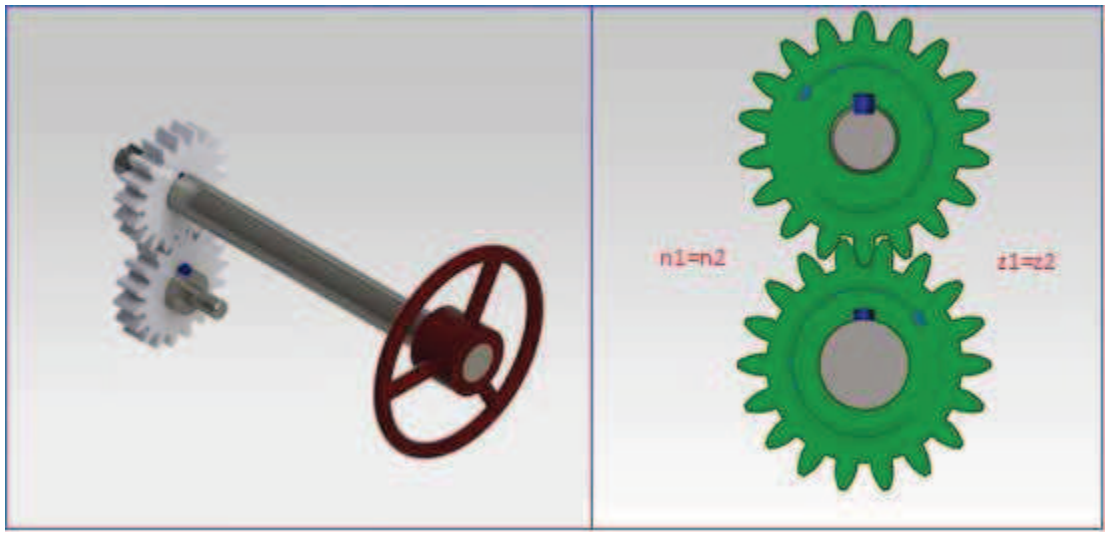


Figura 4.34 Mecanismo accionador del basculamiento

Fuente: Propia

Puesto que la relación de transmisión es 1:1, se tiene: $N_G = N_P$

El piñón y el engrane son de igual material, el diente del piñón es el más débil por el mayor rebaje para evitar la interferencia, por lo tanto el diseño se lo realiza únicamente para el piñón.

La carga es tangencial; $W_t = F = 245$ [N] = 55.078 [lb]

Se puede calcular el momento de rotación aplicado, mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{d}{2} W_t \qquad [\boldsymbol{Ec.4.71}]$$

En donde: d = diámetro primitivo del piñón = modulo * número de dientes

d = 4 * 18 = 72 [mm] = 2.835 [pulg]

Y empleando la [Ec. 4.71], se tiene que el momento de rotación es igual a:

T = 8820 [N.mm]

Según la tabla 13-3 [37] correspondiente a valores del factor de forma Y de Lewis, de la AGMA, se tiene que para 18 dientes, ϕ = 20°, a = 1 y b = 1.25; le corresponde un valor de:

Y = 0.29327

El paso diametral [dte/pulg], se obtiene mediante la [Ec. 4.72].

$$P = \frac{N_P}{d} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.72}]$$

Reemplazando los valores se tiene:

P = 18/2.835 = 6.35 [dte/pulg]

Ahora para calcular el valor de la velocidad en la línea de paso V [pies/min], se la obtiene de la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi . d . n}{12} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.73}]$$

En donde n = 1 rpm

Calculando la expresión anterior se tiene que:

V = 0.742 [pies/min]

El valor de Kv generado con cortador cremallera, resulta dado por la ecuación:

$$Kv = \frac{50}{50 + \sqrt{V}} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.74}]$$

De donde: Kv = 0.983

Con todos los valores antes mencionados se procede a realizar el cálculo del factor de seguridad estático que es igual a:

$$n = \frac{S_y}{\frac{W_t . P}{F . Y . Kv}} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.75}]$$

[37] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.633

Dónde:

Sy = 8702 [psi] [38]

F = ancho de cara = 22 [mm] = 0.866 [pulg]

Es así que el factor de seguridad resulta igual a:

n = 6.21

4.3.3 DISEÑO DINÁMICO A FLEXIÓN

Cuando un par de engranes funciona a velocidades moderadas o altas y se genera ruido, es seguro que existen efectos dinámicos. Es por esta razón que se considera el estudio de su comportamiento para de esta manera conocer si el diseño es satisfactorio.

A continuación se presenta un elemento ordinario en donde se aprecian los esfuerzos fluctuantes cuando se encuentran los engranes en pleno funcionamiento.

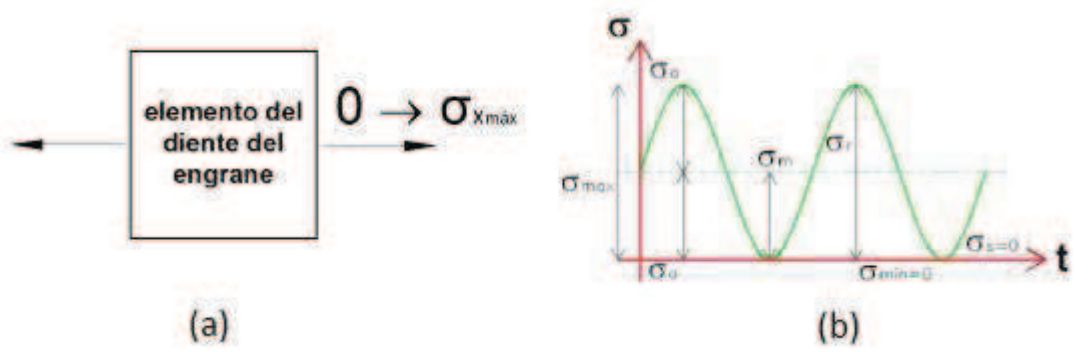


Figura 4.35 (a) Elemento ordinario de esfuerzos, (b) Esfuerzo repetitivo

Fuente: Propia

[38] Software SOLIDWORKS Office premium 2011, USA.

La expresión que permite calcular el valor del esfuerzo normal máximo se halla mediante la ecuación [Ecu. 4.76]

$$\sigma = \frac{W_t . P}{Kv . F . J} \qquad [\boldsymbol{Ec. 4.76}]$$

.En donde el valor de J se obtiene de la tabla 13-5 [39] correspondiente al factor geométrico de la AGMA para el caso de dientes con ϕ = 20°.

De esta manera para un par de engranajes motriz y conducido de 18 dientes, interpolando; le corresponde un valor de:

J = 0.32505

Reemplazando los valores antes calculados en la [Ec. 4.76], se tiene:

σ = 1263.95 [psi]

Ahora se procede a calcular el límite de resistencia a la fatiga mediante la [Ec. 4.47].

- Así se tiene que para un material dúctil; con Sut = 11500 [psi]

Se' = 0.5 Sut, si Sut ≤ 200 [kpsi]

Entonces, para este caso: Se' = 5750 [psi]

- k_a se obtiene de la figura 13-25 [40] , correspondiéndole un valor de 0.82
- k_b de igual manera se obtiene de la tabla 13-9 [41] mediante interpolación; le corresponde un valor de 0.9299
- k_c según la tabla 13-10 [42] correspondiente a un 95% de confiabilidad, resulta igual a 0.868
- k_d = 1

---

[39] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.637

[40] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.644

[41] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.645

[42] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.645

- $k_e = 1$
- k_f mediante la tabla 13-11 [43] se tiene que es igual a 1.33

Con los valores de factores antes mencionados, se procede al cálculo del límite de resistencia a la fatiga (Se).

Se = 5750 (0.82)(0.9299)(0.868)(1.33) = 5061.62 [psi]

El valor del factor de seguridad según diseño dinámico es igual a:

$$n_G = \frac{Se}{\sigma} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.77}]$$

Reemplazando los valores antes calculados se obtiene un valor de factor de seguridad de:

$$n_G = 4$$

Sin embargo este valor se ve afectado por ciertos factores definidos por la AGMA según la ecuación [Ec. 4.78].

$$n_G = K_o . K_m . n \qquad [\boldsymbol{Ec.4.78}]$$

En donde: K_o = factor de sobrecarga

K_m = factor de distribución de carga

n = factor de seguridad ordinario

- K_o se obtiene de la tabla 13-12 [44] empleando choque ligero y carga impulsada uniforme, correspondiéndole un valor de 1.25
- K_m resulta de la tabla 13-13 [45] según las características de montaje igual a 1.3

De esta manera se calcula el factor de seguridad ordinario mediante los factores de carga considerados anteriormente.

---

[43] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.646

[44] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.646

[45] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.647

n = 2.46

Según las recomendaciones debe ser n ≥ 2 para un buen funcionamiento a vida infinita, en este caso se puede concluir que el diseño es adecuado.

4.3.4 DISEÑO A FATIGA SUPERFICIAL

Para asegurar una vida satisfactoria los engranes deben diseñarse de manera que los esfuerzos dinámicos que actúan sobre la superficie queden dentro del límite de fatiga superficial.

De igual manera que para el caso anterior se emplean ciertos valores calculados, considerando que varios de ellos solo cambian en su nomenclatura para este tipo de diseño.

Es así que se tiene: Cv = Kv = 0.983

Co = Ko = 1.25

Cm = Km = 1.3

Puesto que ambos engranes son de duralon, se tiene que la dureza de este material es de aproximadamente H_B = 29, según una estimación por medio de la relación de Archard.[46]

Estableciendo la expresión de la resistencia a la fatiga en la superficie con la ecuación [Ec. 4.79]

$$S_C = 0.4\, H_B - 10\ [kpsi] \qquad [\boldsymbol{Ec.4.79}]$$

Reemplazando el valor antes mencionado en la expresión anterior se tiene:

S_C= 1.6 [kpsi]

Además de considerar que la AGMA recomienda que se modifique el límite de fatiga de superficie con la [Ec. 4.80].

---

[46] GIRALDO D., VELEZ J.; (2001); *"Estudio del Desgaste por Deslizamiento en Seco de Algunos Plásticos"*; Documento de investigación; Medellín-Colombia

$$S_H = \frac{C_L . C_H}{C_T . C_R} S_C \qquad [\boldsymbol{Ec. 4.80}]$$

Dónde:

S_H = Limite de fatiga superficial corregido, o resistencia hertziana

C_L = factor de duración o vida

C_H = Factor de relación de dureza. Se emplea 1.0 para engranes rectos

C_T = Factor de temperatura. Se usa 1.0 para temperaturas menores que 250 °F.

C_R = Factor de confiabilidad

Es así que empleando la tabla 13-15 [47] correspondiente a 10^4 ciclos, se tienen:

C_L = 1.5 y C_R = 0.8

Reemplazando los valores antes mencionados en la [Ec. 4.80], se tiene:

$$S_H = \frac{1.5(1)}{1(0.8)} . 14 = 26.25\ [kpsi]$$

El valor del coeficiente elástico C_P para este caso se lo obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C_P = \sqrt{\frac{1}{\pi\left(\frac{1-{\mu_P}^2}{E_P} + \frac{1-{\mu_G}^2}{E_G}\right)}} \qquad [\boldsymbol{Ec. 4.81}]$$

En donde:

μ_P y μ_G = relación de poisson del piñón y del engrane respectivamente.

E_P y E_G = Modulo de elasticidad del piñón y del engrane respectivamente en [Mpsi]

Empleando los valores respectivos para el material empleado se tiene:

---

[47] SHIGLEY J.; (1985); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw-Hill; México; p.652

$$C_P = \sqrt{\frac{1}{\pi\left(\frac{1-0.3^2}{0.145037}+\frac{1-0.3^2}{0.145037}\right)}}$$

Cp = 0.1593

El factor de configuración geométrica I, para engranes rectos, se representa por la ecuación [Ec. 4.82].

$$I = \frac{cos\varphi.sen\varphi}{2}.\frac{m_G}{m_G+1} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.82}]$$

En donde:

Φ =20°, y m_G = relación de velocidad, para este caso igual a 1.

Reemplazando los valores en la [Ec. 4.82], se tiene:

I = 0.0803

Mediante los valores antes mencionados se puede calcular el valor de la carga tangencial permisible, mediante la [Ec. 4.83].

$$W_{tp} = \left(\frac{S_H}{C_P}\right)^2 . Cv.F.d.I \qquad [\boldsymbol{Ec.4.83}]$$

Empleando los valores calculados se tiene:

W_{tp} = 68.76 [lb]

Calculando el factor de seguridad de los engranes con la siguiente expresión:

$$n_G = \frac{W_{tp}}{W_t} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.84}]$$

Y reemplazando los valores antes calculados se tiene:

$$n_G = \frac{68.76}{55.078} = 1.25$$

Considerando los factores de carga dentro del factor de seguridad, se emplea la [Ec.4.85].

$$n = \frac{n_G}{C_o . C_m} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.85}]$$

De esta manera resulta el factor de seguridad:

n = 0.768

De este modo se puede concluir que no existe seguridad contra una falla por fatiga en la superficie, y puede esperarse que los engranes tengan una duración por desgaste algo menor que 10^4 aplicaciones del esfuerzo.

4.3.5 CÁLCULO DE LENGÜETAS

Las lengüetas son elementos de transmisión de movimiento utilizados para fijar piezas como engranes o poleas a sus ejes. Usualmente se elige una lengüeta cuyo tamaño sea un cuarto del diámetro del eje, entonces, se ajusta la longitud de este según la longitud del cubo de la pieza montada y la resistencia que se necesite.

Además, otra función que tiene la lengüeta es la de actuar como un fusible mecánico de modo que falle antes que los demás elementos mecánicos.

Los datos sobre tamaños estándar de lengüetas se encuentran en la tabla 4.24.

Tabla 4.24 Dimensiones de las lengüetas según Norma UNIM 84 [48]

Diámetro del eje [mm]	b [mm]	h [mm]	L [mm]
10-12	4	4	10-30
12-17	5	5	10-40
17-22	6	6	12-50
22-30	8	7	20-70
30-38	10	8	25-90
38-44	12	8	30-120
44-50	14	9	35-140
50-58	16	10	45-180
58-68	18	11	50-200
68-78	20	12	60-220
78-92	24	14	70-280

[48] STRANEO S., CONSORTI R.; (1969); *"El Dibujo Mecánico"*; Ed. Montaner y Simons; 1era Edicion; Madrid; p.293

Para el sistema de basculamiento se requiere seleccionar dos lengüetas, la primera se encuentra alojada en el eje lateral del horno y es la encargada de fijar el piñón conducido (Z = 18), la segunda lengüeta se localiza en el eje basculador y transmite el momento de torsión mediante el piñón conductor (Z = 18).

El material con el que las lengüetas van a ser construidas es el acero AISI 1018 con un límite de fluencia de: Sy = 235 [MPa].

La figura 4.36 representa esquemáticamente la lengüeta y su disposición en el eje.

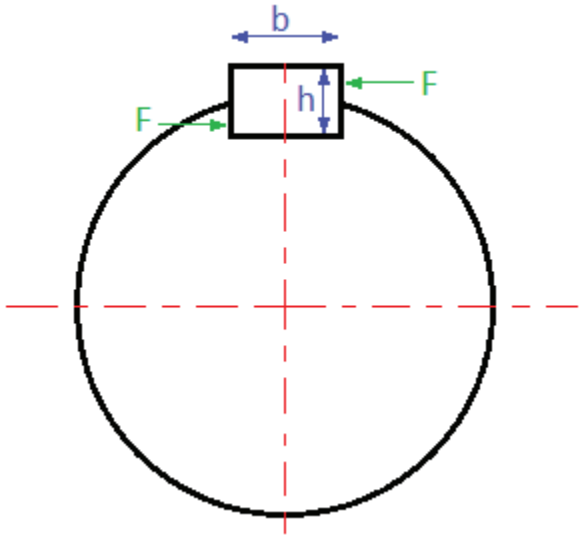


Figura 4.36 Esquema general de la lengüeta y el eje

Fuente: Propia

4.3.5.1 Cálculo de la lengüeta del eje basculador

Se conoce que el diámetro del eje en donde se aloja el engrane basculador es de 21 [mm], con este valor y utilizando la tabla 4.24, se obtienen las dimensiones de la sección de la lengüeta, cuyos valores son:

b = h = 6 [mm]

Para calcular el factor de seguridad se asume una longitud de 25 [mm].

Ahora, la resistencia de una lengüeta está basada en la falla por corte y en la falla por compresión.

La fuerza F que actúa en la superficie de la lengüeta se calcula con la siguiente expresión:

$$F = \frac{T}{r} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.86}]$$

Dónde:

T = Torque actuante en el eje = 8820 [N.mm]

r = Radio del eje = 10.5 [mm]

Aplicando la [Ec.4.86], se tiene:

F = 840 [N]

El esfuerzo cortante se define como:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.87}]$$

Dónde: A es el área expuesta al corte = b x L

El factor de seguridad por cizalladura se define con la [Ec.4.88].

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.88}]$$

Empleando la [Ec.4.87], y reemplazando en la [Ec.4.88], utilizando la teoría de la energía de la distorsión, se tiene:

$$n_s = \frac{0.577 S_y * b * L}{F} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.89}]$$

Por lo tanto, al aplicar la ecuación [Ec. 4.89], se tiene de factor de seguridad por corte:

$$n_s = 24.21$$

El esfuerzo normal se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.90}]$$

Dónde: A es la mitad del área de la cuña = (h/2 * L)

El factor de seguridad por compresión está dado por la expresión:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.91}]$$

Reemplazando la [Ec.4.90] en la [Ec.4.91], se tiene:

$$n = \frac{S_y * h * L}{2.F} \qquad [\boldsymbol{Ec.4.92}]$$

Empleando la ecuación [Ec. 4.92], se obtiene el factor de seguridad por compresión, igual a:

n = 20.98

Comparando los factores de seguridad se concluye que si falla la lengüeta, es debido a la compresión, sin embargo, este factor es bastante alto, lo que garantiza que el diseño es adecuado.

4.4 SELECCIÓN DEL EQUIPO PARA EL SISTEMA DE VACÍO

4.4.1 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LA BOMBA DE VACÍO

Considerando la capacidad en el interior de la cámara de vacío y conociendo que en la región de presión entre 760 y 10 mm de Hg la velocidad de bombeo de las bombas de vacío suele ser prácticamente constante, se puede emplear la siguiente expresión de evacuación de volumen para determinar el tiempo empleado para alcanzar el vacío considerado. [49]

$$t = \left(\frac{V}{S}\right) ln\left(\frac{P_o}{P_f}\right) \qquad [\boldsymbol{Ec.4.93}]$$

Dónde:

[49] LEON Juan; (2001); *"Diseño y Calculo de Recipientes a presión"*

V = Volumen de la cámara = 0.795 x 0.625 x 1 [m^3] = 0.497 [m^3] = 497 [litros]

S = Velocidad de la bomba [L/s]

P_o = Presión Inicial

P_f = Presión final

Para el caso se considera tres bombas, cuyas características se encuentran en el mercado local y se resumen a continuación en la tabla 4.25.

Tabla 4.25 Características de diferentes bombas de vacío

BOMBA MODELO	Potencia [HP]	Velocidad de bombeo		Ultimo vacio [Pa]	Peso [kg]
		[CFM]	[L/s]		
AVP 501	1/3	5	2.36	5	8.9
AVP 502	1/2	5	2.36	3×10^{-1}	11.4
AVP 802	3/4	8	3.78	5×10^{-1}	22.1

Fuente: www.EdissonElectric.com

Empleando la [Ec. 4.93] se obtiene los valores de tiempo de evacuación para cada modelo de bomba de vacío, mismos que se resumen en la tabla 4.26.

Tabla 4.26 Tiempo de evacuación para cada modelo de bomba de vacío

BOMBA MODELO	t [s]	t [min]
AVP 501	210.6	3.51
AVP 502	210.6	3.51
AVP 802	131.63	2.19

Fuente: Propia

De los resultados de la tabla 4.26 se puede determinar que a mayor velocidad de bombeo, menor es el tiempo de evacuación. Sin embargo se debe considerar que el tiempo experimental está afectado por la conductancia, volumen de líneas, geometría de la cámara, fugas, etc.

Para la consideración de la bomba más adecuada, se realiza una matriz de decisión considerando los siguientes parámetros:

1. Costo
2. Velocidad de bombeo
3. Peso de la bomba
4. Consumo de energía

Tabla 4.27 Matriz de Decisión para la Bomba de Vacío

		Modelo					
		AVP 501		AVP 502		AVP 802	
Característica	Factor de Peso	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
Costo	0.4	4	1.6	3	1.2	2	0.8
Velocidad de bombeo	0.2	2	0.4	3	0.6	4	0.8
Peso	0.2	5	1.0	4	0.8	3	0.6
Consumo de energia	0.2	4	0.8	4	0.8	4	0.8
TOTAL	1		3.8		3.4		3.0

Fuente: Propia

Por lo tanto, se selecciona la bomba de 1/3 [HP] y 5 [CFM] cuyo manual se encuentra en el Anexo 3.

Figura 4.37 Bomba de Vacío seleccionada

Fuente: www.EdissonElectric.com

4.4.2 SELECCIÓN DE LOS ACCESORIOS Y LÍNEAS DE VACÍO

Considerando la facilidad de adquisición, disponibilidad y costo como parámetros fundamentales a tener en cuenta, además de que se necesita conectar la cámara con la bomba mediante una línea única, se considera el empleo de un juego de manómetros de carga de refrigerante, cuyas características principales son:

- Manómetro acoplado para la medición de presión
- Acoples normalizados para conexiones de flujo de aire
- Válvulas manuales para abrir o cerrar el flujo de aire
- Facilidad de instalación

Con las características antes mencionadas se decide emplear el juego de manómetros con la consideración de emplear únicamente el manómetro de baja presión y bloquear el de alta presión.

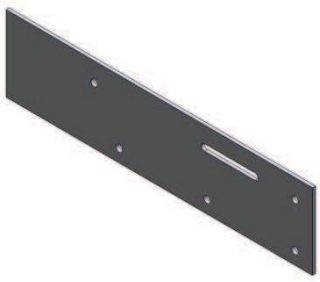
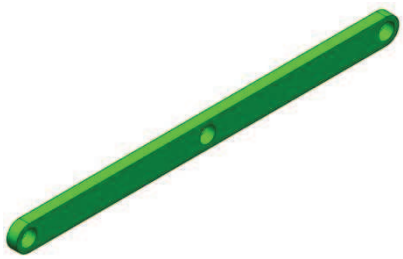
CAPÍTULO V

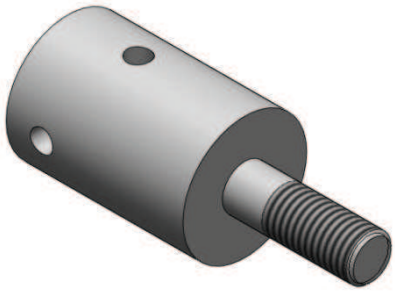
5. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS

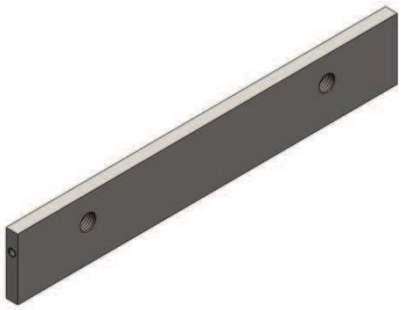
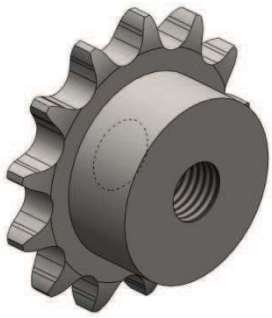
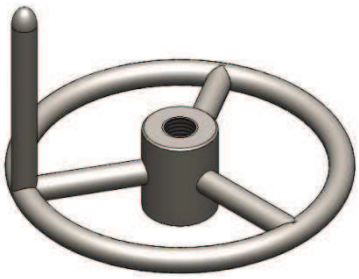
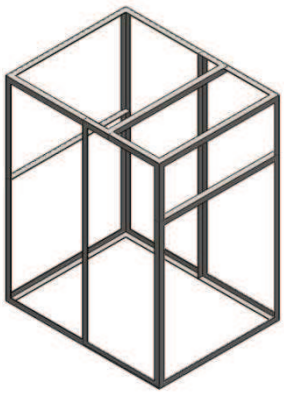
En el presente capitulo se procede a especificar los diferentes procesos utilizados en la construcción y montaje tanto de la cámara de vacío, como de los sistemas de desplazamiento vertical y basculamiento del horno de inducción dentro del prototipo; así como el protocolo de pruebas de los sistemas y del vacío solicitado.

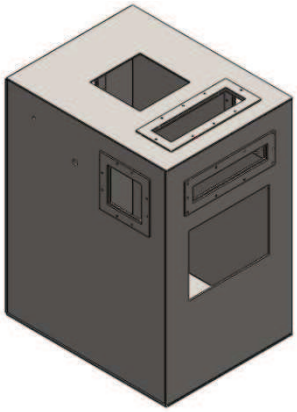
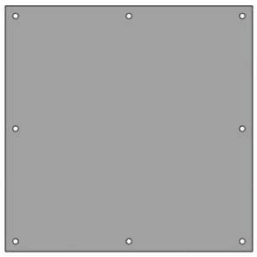
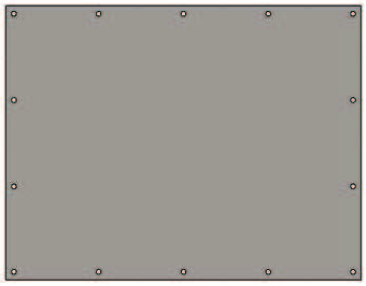
5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS A SER MECANIZADOS

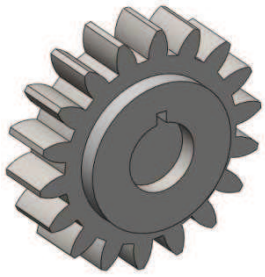
Para la construcción de los dos sistemas y de la cámara de vacío se procede al mecanizado detallado en las hojas de procesos y planos de taller considerando las funciones que cumplen dichos elementos que se describen a continuación:

Elemento	Figura	Función
SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
Placa Lateral Cantidad: 2		Empernadas a la mesa del horno sirven de guía para el desplazamiento del eje impulsor, así como de pivotes de los eslabones que conforman las tijeras.
Eslabones Cantidad: 4		Dispuestos en forma de 2 conjuntos de tijeras, permiten la elevación uniforme del horno mediante el movimiento de circunducción dirigido.

Elemento	Figura	Función
SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
Eslabones Ranurados Cantidad: 2		Sirven como bastidores móviles que permiten la unión de las tijeras en sus extremos para conseguir el movimiento suave de elevación.
Eje Lateral Derecho Cantidad: 1		Conectado a la placa lateral derecha del horno, sirve de unión con el eslabón ranurado derecho para facilitar el basculamiento posterior.
Eje Lateral Izquierdo Cantidad: 1		Conectado a la placa lateral izquierda del horno, sirve de unión con el eslabón ranurado izquierdo para facilitar el basculamiento posterior por medio del engrane montado sobre este.
Eje Impulsor Cantidad: 1		Se desplaza horizontalmente sobre los canales de las placas laterales para impulsar a los extremos de las tijeras que comienzan el movimiento de desplazamiento vertical suave.
Barras Roscadas Cantidad: 2		Desplazan al eje impulsor a través del movimiento rotacional.

Elemento	Figura	Función
SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
Placa Tuerca Cantidad: 1		Fijada entre las placas laterales sirve de tuerca para cada barra roscada que proporciona el desplazamiento vertical del horno, aumentando la fricción para que se fije posiciones y soporte la carga del peso a desplazar.
Catarinas Cantidad: 2		Roscadas en sus manzanas y fijadas en las barras roscadas transmiten el movimiento rotación continuo a través de una cadena.
Volante Cantidad: 1		Fijado en el extremo de una barra roscada inicia el movimiento rotacional suave accionado manualmente por el operario.
CÁMARA DE VACÍO		
Alma Metálica Cantidad: 1		Sirve de soporte para el ensamble correcto de todas las placas de la cámara, reduce los esfuerzos concentrados principalmente en las aristas de la cámara.

Elemento	Figura	Función
CÁMARA DE VACÍO		
Placas de la Cámara Cantidad: 6		Constituyen todo el cuerpo de la cámara de vacío en donde se alojan tanto el sistema de desplazamiento vertical como el de basculamiento del horno.
Puerta de Carga Cantidad: 1		Ubicada en la parte superior de la cámara, sirve para cargar al horno con material para su posterior fusión.
Puerta Frontal Cantidad: 1		Ubicada en la parte frontal de la cámara permite colocar la caja de moldeo sobre una repisa para realizar el colado de las aleaciones de aluminio.
SISTEMA DE BASCULAMIENTO		
Eje Basculante Cantidad: 1		Permite el giro controlado del engrane basculante mismo que es accionado manualmente.

Elemento	Figura	Función
SISTEMA DE BASCULAMIENTO		
Engranes basculador y basculante Cantidad: 2		Transmiten el movimiento rotacional para el basculamiento del horno dentro de la cámara de vacío.
Manzana porta Eje Cantidad: 1		Sirve de soporte sobre la placa desmontable de la cámara para soportar el momento producido por el eje basculante.
Volante Cantidad: 1		Fijado en un extremo del eje basculante, acciona el mecanismo manualmente.

Fuente: Propia

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para el proceso de construcción del prototipo de presiones bajas, así como de los sistemas de desplazamiento vertical y basculamiento del horno de inducción se utilizan las instalaciones de “TALLERES CEMI”, un lugar independiente que cuenta con todas las maquinas, equipos e instrumentos necesarios para construir dicho prototipo.

5.2.1 EQUIPOS, HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE CÁMARA DE VACÍO

Los equipos, herramientas e instrumentos utilizados para la construcción del prototipo se muestran a continuación en las tablas 5.1 a 5.3 con su respectiva codificación para resumir en las tablas de procesos de construcción.

Tabla 5.1 Equipos de mecanizado

Equipos	Codificación
Torno	TO
Fresadora	FR
Taladro de pedestal	TP
Soldadora SMAW	SS
Amoladora-Esmeril	AM-ES
Taladro manual	TM
Cortadora por plasma	CP

Fuente: Propia

Tabla 5.2 Herramientas de ajustaje mecánico

Herramientas	Codificación
Entenallas	En
Rayador	Ra
Granete	Gr
Martillos	Mar
Brocas	Br
Machuelos	Ma
Sierra	Si
Limas	Li
Llaves hexagonales	Lh
Discos de corte y desbaste	Dc-Dd
Bailarinas	Ba
Fresas	Fr
Cuchillas	Cu
Llaves de rachas	Lr
Desarmador plano	Dp

Fuente: Propia

Tabla 5.3 Instrumentos de medida y control

Instrumentos	Codificación
Flexometro	Fl
Calibrador	Ca
Escuadra	Es
Nivel	Ni

Fuente: Propia

5.2.2 MATERIA PRIMA

Los materiales empleados en la construcción del prototipo son de la serie de aceros inoxidables AISI 304 y duralón según los parámetros de diseño considerados en el capítulo anterior.

A continuación se enlista en la siguiente tabla los materiales empleados según su aplicación mecánica:

Tabla 5.4 Materia Prima

Materia Prima	Aplicación
Planchas de Acero Inoxidable AISI 304 – espesor 6mm	Placas de la Cámara de Vacío y accesorios
Angulo Acero Inoxidable AISI 304 – 25 x 25 x 3 mm	Alma metálica
Ejes de Acero Inoxidable AISI 304 – distintos diámetros	Ejes, manzanas, etc.
Duralón – distintos diámetros	Engranajes, empaques
Varilla redonda AISI 1010 – diámetro ½”	Volantes
Eje AISI 1010 – diámetro 40 mm	Manzanas para volantes
Varilla cuadrada AISI 1018 - □ ¼”	Lengüetas

Fuente: Propia

De la misma manera se considera la adquisición de elementos normalizados descritos a continuación:

- Tornillos, tuercas y arandelas de Acero Inoxidable AISI 304 - UNC ½”-13, UNC ¼”-20, M6x1; diferentes longitudes.
- Barra roscada de Acero Inoxidable AISI 304 – M16x2; L=1m.
- Empaques automotrices.

- Catarinas Z = 14, P = ½”.
- Cadena P = ½”.

Igualmente se adquiere:

- Bomba de Vacío: 1/3 HP y 5 CFM.
- Juego de manómetros de carga de refrigerante.
- Vidrios laminados de 6mm de espesor y diferentes medidas.
- Pegas y siliconas para sellar herméticamente la cámara.

5.2.3 ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

Para la construcción de todos los elementos y sistemas que conforman el prototipo es indispensable cumplir con las diferentes etapas de construcción que se rigen a una cierta secuencia.

- Adquisición de materia prima.
- Almacenamiento de la materia prima.
- Trazos sobre la materia prima.
- Ejecución de los procesos tecnológicos de fabricación.
- Eliminación de virutas y aristas vivas.
- Verificación de dimensiones y tolerancias.

5.3 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

Para el caso de la construcción de los elementos mecánicos que conforman el prototipo se toma en cuenta el respectivo diseño descrito en el capítulo IV, las hojas de procesos que se muestran en el Anexo 6 y los planos que se presentan en el Anexo 7.

5.3.1 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS MECANIZADOS

La construcción del prototipo se realiza básicamente en cuatro etapas, las cuales son: construcción del sistema de desplazamiento vertical del horno de inducción, construcción de la cámara de vacío, construcción del sistema de basculamiento, ensamble final e instalación del prototipo junto con la bomba de vacío en el Laboratorio de Fundición de la F.I.M. - E.P.N.

5.3.1.1 Construcción del Sistema de Desplazamiento Vertical del Horno de Inducción

Tabla 5.5 Construcción del Sistema de Desplazamiento Vertical del Horno de Inducción

Elemento	Proceso	Equipos-Herramientas-Instrumentos	Tiempo (min)
Placas Laterales	Corte y desbaste a medidas aproximadas	Fl, CP, AM, Dd	10
	Maquinado de chaveteros pasantes (Ø=1/2" y l= 100mm)	Fl, Ca, Ra, Gr, FR, Br, Fr	30
	Perforado de Ø1/2"	Fl, Ra, Gr, TP, Br	20
Eslabones	Corte y desbaste a medidas aproximadas	Fl, CP, AM, Dd	20
	Perforado de Ø1/2"	Fl, Ra, Gr, TP, Br	20
Eslabones Ranurados	Corte y desbaste a medidas aproximadas	Fl, CP, AM, Dd	10
	Maquinado de chaveteros pasantes	Fl, Ca, Ra, Gr, FR, Br, Fr	30
	Perforado de Ø1/2"	Fl, Ra, Gr, TP, Br	20
Eje Lateral Derecho	Refrentado, cilindrado y chaflanado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	15
	Roscado de eje	Ca, TO, Cu	10
	Perforado transversal pasante de Ø1/4"	Ca, Gr, FR, Br	5
Eje Lateral Izquierdo	Refrentado, cilindrado y chaflanado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	15
	Roscado en extremo del eje	Ca, TO, Cu	10
	Perforado transversal pasante de Ø1/4"	Ca, Gr, FR, Br	5
	Maquinado de chavetero (l=25mm, a=6mm y b=3mm)	Ca, Gr, FR, Br, Fr	10

Elemento	Proceso	Equipos-Herramientas-Instrumentos	Tiempo (min)
Eje Impulsor	Refrentado, cilindrado y chaflanado de los extremos a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	15
	Roscado en extremos del eje	Ca, TO, Cu	10
	Ranurado y perforado a medidas aproximadas	Ca, FR, Fr, Gr, Br	20
Barras roscadas	Corte a medidas aproximadas	Fl, Si, Li	10
	Soldadura de tuerca en extremos	SS, En	10
Placa Tuerca	Corte y desbaste a medidas aproximadas	Fl, AM, Dc, Dd	10
	Perforados pasantes Ø14mm y Ø5mm	Ca, Ra, Gr, TP, Br	10
	Roscados M16 y M6	En, Ma	10
Catarinas	Perforado central Ø14mm	TO, Br	10
	Roscados M16	En, Ma	10
	Perforado transversal Ø5mm	En, Gr, TP, Br	10
	Roscado M6 para prisionero	En, Ma	10
Volante	Maquinado de manzana a medidas aproximadas	TO, Cu, Ca	5
	Perforado pasante Ø14mm	TO, Br	5
	Roscados M16	En, Ma	10
	Perforado transversal Ø5mm	En, Gr, TP, Br	5
	Roscado M6 para prisionero	En, Ma	5
	Barolado varilla redonda Ø 1/2” según medidas aproximadas	En, Mar	20
	Soldadura de nervaduras, manzana y brazo	SS, En, Fl	15
Ensamble	Ajustaje de Pernos en todo el sistema	Lr, Lh	30
	Nivelación de barras roscadas	Ni	15
	Ubicación de cadena en catarinas		10
	Solución de inconvenientes		60

Fuente: Propia

A continuación en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan perspectivas y vistas laterales diferentes del mecanismo construido para observar detalles entre el diseño y la construcción respectivos.

Figura 5.1 Mecanismo de Desplazamiento Vertical; Izquierda: Construcción y Derecha: Diseño

Figura 5.2 Máxima Carrera del Mecanismo; Izquierda: Construcción y Derecha: Diseño

Figura 5.3 Vistas Laterales del mecanismo; Izquierda: Sin accionar y Derecha: Tope de carrera

5.3.1.2 Construcción de la Cámara de Vacío

Tabla 5.6 Construcción de Cámara de Vacío

Elemento	Proceso	Equipos-Herramientas-Instrumentos	Tiempo (min)
Placa lateral derecha	Corte a medidas aproximadas tanto contorno como ventana	Fl ,CP, AM, Dd	30
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno y marco de ventana	SS, Es	20
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	100
Placa lateral izquierda desmontable	Corte a medidas aproximadas tanto contorno como ventana	Fl ,CP, AM, Dd	30
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno y marco de ventana	SS, Es	20
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	100
Placa inferior	Corte a medidas aproximadas	Fl ,CP, AM, Dd	25
	Perforado de agujeros pasantes para mangueras a medidas aproximadas	Fl, Ra, Gr, FR, Br, Ba	120
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno	SS, Es	15
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	80
	Perforado de agujeros Ø5/8”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	25
Placa posterior	Corte a medidas aproximadas	Fl ,CP, AM, Dd	25
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno y marco de ventana	SS, Es	20
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	70
	Perforado de agujeros pasantes para salida de tornillos de mecanismo de desplazamiento vertical a medidas aproximadas	Fl, Ra, Gr, FR, Br, Ba	100
Placa superior	Corte a medidas aproximadas tanto contorno, ventana y puerta de carga	Fl ,CP, AM, Dd	40
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno y marco de ventana	SS, Es	15
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	70

Elemento	Proceso	Equipos-Herramientas-Instrumentos	Tiempo (min)
Placa frontal	Corte a medidas aproximadas tanto contorno, ventana y puerta de carga	Fl ,CP, AM, Dd	40
	Soldadura conjuntamente con ángulos en todo su contorno y marco de ventana	SS, Es	15
	Perforados pasantes alrededor de todo el contorno Ø1/4”	Fl, Ra, Gr, FR, Br	70
Puerta de carga	Corte a medidas aproximadas	Fl ,CP, AM, Dd	15
	Perforado de agujeros	Fl, Ra, Gr, FR, Br	25
Puerta frontal	Corte a medidas aproximadas	Fl ,CP, AM, Dd	15
	Perforado de agujeros	Fl, Ra, Gr, FR, Br	25
Ensamble	Ajustaje de Pernos en toda la cámara	Lr, Lh	60
	Soldadura interior intermitente entre placas y ángulos	SS	250
	Soldadura exterior a lo largo de todos los lados de la cámara	SS	250
	Solución de inconvenientes		60

Fuente: Propia

Las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 ilustran parte del proceso que involucra la construcción de la cámara de vacío.

Figura 5.4 Izquierda: Corte de Placas con Plasma y Derecha: Maquinado de Placas

Figura 5.5 Soldadura de Cámara de Vacío Interna y Externamente

Figura 5.6 Cámara de Vacío Construida

5.3.1.3 Construcción del Sistema de Basculamiento

Para la construcción de este sistema, se debe considerar que el sistema de desplazamiento vertical del horno de inducción se encuentre colocado dentro de la cámara de vacío para fijar la altura de la carrera máxima de dicho mecanismo, y en ese punto concentrar los ejes de los engranes a distancias calculadas para evitar interferencias posteriores entre la conjugación de estos.

Tabla 5.7 Construcción del Sistema de Basculamiento

Elemento	Proceso	Equipos-Herramientas-Instrumentos	Tiempo (min)
Eje basculante	Cilindrado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	10
	Maquinado de chavetero	FR, Fr, Ca	15
	Ajustaje de lengüeta en chavetero	ES, Ca, Mar, Li	15
Engrane basculante	Cilindrado exterior e interior de duralon a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu, Br	15
	Maquinado de engrane M = 4 y Z = 18	FR, Fr	25
	Mortajado de manzana para lengüeta	FR, Fr	15
Engrane basculador	Cilindrado exterior e interior de duralon a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu, Br	20
	Maquinado de engrane M = 4 y Z = 18	FR, Fr	25
	Mortajado de manzana para lengüeta	FR, Fr	15
Eje basculador	Cilindrado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	30
	Maquinado de chavetero	FR, Fr, Ca	15
	Ajustaje de lengüeta en chavetero	ES, Ca, Mar, Li	15
Placa lateral izquierda desmontable	Perforado a medida aproximada	Fl, Ra, Gr, FR, Br, Ba	20
Manzana porta eje basculador	Cilindrado y Refrentado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	10
	Perforado y cilindrado interior a medida aproximada	TO, Br, Cu	15
	Soldadura conjuntamente con placa lateral izquierda desmontable en agujero ciego	SS	10
Bocín fija eje basculador	Cilindrado y Refrentado a medidas aproximadas	Ca, TO, Cu	10
	Perforado y cilindrado interior a medida aproximada	TO, Br, Cu	15
	Perforado axialmente pasante	Ca, FR, Br	5
Volante	Maquinado de manzana a medidas aproximadas	TO, Cu, Ca	5
	Perforado pasante	TO, Br	5
	Perforado transversal Ø5mm	En, Gr, TP, Br	5
	Roscado M6 para prisionero	En, Ma	5
	Barolado varilla redonda Ø 1/2” según medidas aproximadas	En, Mar	20
	Soldadura de nervaduras y manzana	SS, En, Fl	15

Fuente: Propia

A continuación se muestran detalles de la construcción en las figuras 5.7 y 5.8.

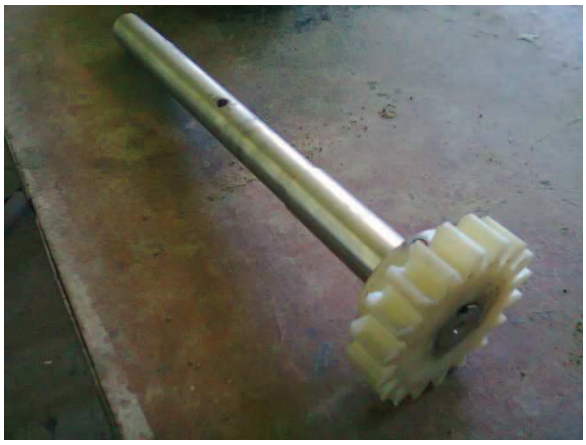


Figura 5.7 Eje acoplado a engrane basculador

Figura 5.8 Engrane basculante acoplado a extremo del horno

5.3.1.4 Ensamble Final e Instalación del Prototipo

En esta parte se realizan los ajustes necesarios para que el prototipo funcione correctamente, es decir, se acoplan tanto el sistema de desplazamiento vertical como el de basculamiento dentro de la cámara, además de conectar las mangueras provenientes del tablero de control hacia el horno de inducción.

Además se conecta la bomba de vacío hacia la cámara mediante un acople colocado del lado de la placa desmontable que facilita todas las conexiones.

La figura 5.9 se muestra detalles de las conexiones de las mangueras así como de su ubicación dentro del prototipo para evitar interferencias posteriores.

Figura 5.9 Conexiones de las mangueras provenientes del tablero de control

Y finalmente la figura 5.10 muestra la cámara de vacío instalada completamente en el Laboratorio de Fundición conjuntamente conectada con la bomba de vacío.

Figura 5.10 Cámara de Vacío instalada en el Laboratorio de Fundición

5.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Con la construcción del prototipo, se debe verificar las especificaciones para las cuales fue diseñada, para demostrar que el diseño es acertado y satisface los requerimientos funcionales.

En el diseño actual, se comprueban los siguientes parámetros:

- Desplazamiento
- Basculamiento
- Empaquetaduras y sellos
- Bomba de vacío
- Fusión en el horno

5.4.1 DESPLAZAMIENTO

Se comprueba el desplazamiento vertical del horno dentro de la cámara, controlando el recorrido establecido previamente.

5.4.2 BASCULAMIENTO

Posteriormente al accionamiento manual del mecanismo de desplazamiento vertical y su posterior fin de carrera se acciona el sistema de basculamiento por medio del volante en dirección anti horaria.

5.4.3 EMPAQUETADURAS Y SELLOS

Se realizan pruebas visuales de estado de empaquetaduras, así como de pegas y masillas colocadas exteriormente a la cámara, en especial en puertas tanto superior como frontal.

5.4.4 BOMBA DE VACÍO

Se enciende la bomba controlando que el nivel de aceite en la mirilla sea el adecuado, también que se encuentre bloqueado el manómetro de alta presión; así como el estado de las mangueras sea el correcto.

5.4.5 FUSIÓN EN EL HORNO

Esta prueba se realiza posteriormente a la elección del modelo a fundir y su correcta ubicación dentro de la cámara, poniendo en funcionamiento el sistema eléctrico controlado por medio del tablero de control del horno en donde previamente fueron encendidas las bombas de agua.

Para la valoración de aceptación o rechazo de las pruebas realizadas en el protocolo, se toma en cuenta la siguiente calificación de evaluación medida respecto al dato teórico establecido en la especificación del sistema.

A continuación en la tabla 5.8 se muestra los criterios de evaluación:

Tabla 5.8 Criterios de evaluación para pruebas de protocolo

CRITERIOS DE EVALUACIÓN	
Aceptado	Rango entre el 70% y 100%
Rechazado	Rango menor al 70%

Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 5.9 se muestra el formato donde se colocan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas a realizar, tanto a presión atmosférica como a baja presión.

Tabla 5.9 Protocolo de Pruebas

PROTOCOLO DE PRUEBAS A BAJA PRESIÓN			
	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE FUNDICIÓN		
FECHA:		**RESPONSABLE:**	**Pag**:1/3

MATERIAL A FUNDIR	

COLADO EN:		**Descripción de las condiciones de la arena y/o coquilla:**
ARENA		
COQUILLA		

MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Lubricación de las barras roscadas		
Accionar del mecanismo		

SISTEMA DE BASCULAMIENTO		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Estado de los engranes		
Basculamiento posterior al recorrido del mecanismo de desplazamiento vertical		

EMPAQUETADURAS Y SELLOS		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Estado de empaques en placa desmontable		
Estado de empaques en puertas		

BOMBA DE VACÍO		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Nivel de aceite		
Estado de mangueras		

FUNCIONAMIENTO	
HORNO DE INDUCCIÓN	
Encendido del horno [Hora]	
Presión de agua [psig]	

BITÁCORA			
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]

PROTOCOLO DE PRUEBAS A BAJA PRESIÓN				
	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE FUNDICIÓN			
FECHA:		**RESPONSABLE:**		**Pag:**2/3

SISTEMA DE BAJA PRESIÓN		
	Tiempo	Presión [psia]
Bomba de vacío (Vacuómetro)		
Apagado del horno [Hora]		
Fusión de la chatarra de Aluminio [min]		

ULTIMOS VALORES DE PRESIÓN Y TIEMPO REGISTRADOS		
VACUÓMETRO	Hora	PRESIÓN [psia]
Colado de metal fundido		
Solidificación		

CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA:

- El Vacuómetro está calibrado a nivel de mar (14.7 psia), por esta razón la apreciación en condiciones de vacío perfecto en Quito [2800 m.s.n.m.] será de: 4[psia]
- Se debe desconectar la manguera de la bomba de vacío antes de apagarla para evitar el ingreso de aceite al momento de igualarse la presión dentro de la cámara y cerrar completamente la válvula del manómetro.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES:

PROTOCOLO DE PRUEBAS EN CONDICIONES AMBIENTALES				
	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE FUNDICIÓN			
FECHA:		**RESPONSABLE:**		**Pag**:3/3

MATERIAL A FUNDIR	

COLADO EN:		**Descripción de las condiciones de la arena y/o coquilla:**
ARENA		
COQUILLA		

MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Lubricación de las barras roscadas		
Accionar del mecanismo		

SISTEMA DE BASCULAMIENTO		
CRITERIO	ACEPTADO	RECHAZADO
Estado de los engranes		
Basculamiento posterior al recorrido del mecanismo de desplazamiento vertical		

FUNCIONAMIENTO	
HORNO DE INDUCCIÓN	
Encendido del horno [Hora]	
Presión de agua [psig]	

BITÁCORA			
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
Apagado del horno [Hora]			
Fusión de la chatarra de Aluminio [min]			
Colado de metal fundido [Hora]			

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES:

5.5 ANÁLISIS DE COSTOS[50]

5.5.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos son aquellos que son específicamente identificables con un producto, función o actividad. Para encontrar el costo total directo del prototipo se consideran los siguientes rubros:

- Costos de materiales
- Costos de mano de obra y maquinado
- Costos de ingeniería

5.5.1.1 Costos de Materiales

El costo de materiales comprende el valor total de la materia prima, los elementos normalizados y los accesorios e insumos; de los costos de accesorios e insumos no se detalla y solo se representa el valor en la tabla 5.12, costos de materiales.

Tabla 5.10 Costos de materia prima

MATERIAL	UNID.	CANT.	VALOR UNITARIO [USD]	IVA	V. UNIT. + IVA [USD]	VALOR TOTAL [USD]
Plancha acero inoxidable AISI 304; 1220x2440x6mm	u	2	820.23	98.43	918.66	1837.32
Angulo acero inoxidable AISI 304; 25x25x3mm	u	3	51.74	6.21	57.95	173.85
Angulo acero AISI 1010; 25x25x3mm	u	1	15.27	1.83	17.1	17.1
Ejes acero inoxidable AISI 304; varios diámetros	kg	8.32	8.60	1.03	9.63	80.12
Grilon; varios diámetros	kg	2.32	14	1.68	15.68	36.38
Placa AISI 1010 e=12mm	kg	1.9	2.97	0.36	3.33	6.33
Acero de transmisión diámetro ½"	kg	3.39	2.85	0.34	3.19	10.82
					Subtotal 1	**2161.92**

Fuente: Propia

[50] BLANK L., TARQUIN A.; (1999); "Ingeniería Económica"; Ed. McGraw Hill; 4ta edición; Colombia; p. 356

Tabla 5.11 Costos de Elementos normalizados

ELEMENTO NORMALIZADO	UNID.	CANT.	VALOR UNITARIO [USD]	IVA	V. UNIT. + IVA [USD]	VALOR TOTAL [USD]
Bomba de vacio 1/3 hp	u	1	215	25.80	240.80	240.80
Manómetro de carga R-12/22/502	u	1	35	4.20	39.20	39.20
Catarina p=1/2”	u	2	4.8	0.58	5.38	10.75
Cadena p=1/2”	u	1	22.36	2.68	25.04	25.04
					Subtotal 2	**315.79**

Fuente: Propia

Por lo tanto, el costo total de materiales directos se muestra en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Costos de materiales

Componente del costo	Valor [USD]
Costo de material prima	2161.92
Costo de elementos normalizados	315.79
Costo de accesorios e insumos	223.95
Costo de materiales	**2701.66**

Fuente: Propia

5.5.1.2 Costos de Maquinado y Mano de obra

Tabla 5.13 Costos de Maquinado y Mano de Obra

MAQUINA Y/O OPERACIÓN	COSTO DE MAQUINADO Y MANO DE OBRA [USD/HORA]	TIEMPO TOTAL [HORAS]	VALOR TOTAL [USD]
Torno	10	12	120
Taladro de Pedestal	6	25	150
Fresadora	15	20	300
Soldadora SMAW	8	5	40
Corte Plasma [Ac. Inox. e=6mm]	4/m. lineal	23.85m	95.4
Montaje	6	35	210
		Subtotal	**915.40**

Fuente: Propia

5.5.1.3 Costos de Ingeniería

Tabla 5.14 Costos de Ingeniería

APLICACIÓN	OPERACIÓN	COSTO DE INGENIERÍA (USD/HORA)	TIEMPO TOTAL (HORAS)	VALOR TOTAL (HORAS)
Cámara de Bajas Presiones	Diseño y selección de elementos mecánicos y elaboración de planos	15	85	1275
			Costo de Ingeniería	**1275**

Fuente: Propia

El costo directo total se presenta en la tabla 5.15.

Tabla 5.15 Costos Directos totales

Componente del costo	Valor [USD]
Costo de materiales	2701.66
Costo de maquinado y mano de obra	915.40
Costo de Ingeniería	1275
TOTAL COSTOS DIRECTOS	**4892.06**

Fuente: Propia

5.5.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos son aquellos que no se atribuyen directamente a una sola función sino que son compartidos por varias, ya que son necesarias para desempeñar el objetivo global.

Para encontrar el costo total indirecto del prototipo se considera únicamente el costo de los materiales indirectos, los mismos que se detallan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Costo indirecto total

MATERIALES INDIRECTOS	UNID.	CANT.	VALOR UNITARIO [USD]	IVA	V. UNIT. + IVA [USD]	VALOR TOTAL [USD]
Broca de Co. ¼"	u	4	7.25	0.87	8.12	32.48
Broca de Co. ½"	u	2	13.13	1.58	14.71	29.42
Broca de Co. 3/8"	u	1	8.32	1.00	9.32	9.32
Broca de Co. 1/8"	u	1	2.52	0.30	2.82	2.82
Cepillo de acero	u	1	1.09	0.13	1.22	1.22
Lima plana para ac. Inox.	u	1	11.07	1.33	12.40	12.40
Prensa en C	u	6	1.62	0.19	1.81	10.89
Disco desbaste ac. Inox.	u	2	3.94	0.47	4.41	8.82
Disco corte ac. Inox.	u	6	2.94	0.35	3.29	19.76
Botador	u	1	2.46	0.30	2.76	2.76
Brocha 1"	u	2	0.35	0.04	0.39	0.78
Electrodos UTP 312-16	kg	3	22.90	2.75	25.65	76.95
Grata ac. Inox. 5/8"	u	1	22.95	2.75	25.70	25.70
Gel decapante	u	2	9.56	1.15	10.71	21.42
Lijas	u	3	0.49	0.06	0.55	1.65
Silicona blanco	u	1	4.12	0.49	4.61	4.61
Sikasil transparente	u	1	3.08	0.37	3.45	3.45
Sikaflex	u	4	14.25	1.71	15.96	63.84
Tinner	lt	2	1.79	0.21	2.00	4.00
Spray plomo	u	1	2.52	0.30	2.82	2.82
Waype	u	25	0.12	0.01	0.13	3.36
					Subtotal	**338.47**

Fuente: Propia

5.5.3 COSTOS TOTALES

Para encontrar el costo total del prototipo se suman los costos directos e indirectos y además se considera un costo adicional denominado costo de improvistos.

Tabla 5.17 Costos totales del prototipo

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR [USD]
Costos Directos	4892.06
Costos Indirectos	338.47
SUBTOTAL	**5230.53**
10% Imprevistos	523.05
COSTO TOTAL DEL PROTOTIPO	**5753.58**

CAPÍTULO VI

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO

Este capítulo describe las pruebas realizadas a las distintas aleaciones de aluminio enfocándose en análisis experimentales establecidos para la cuantificación de porosidades.

6.1 INTRODUCCIÓN

Para el análisis experimental de las porosidades en las aleaciones de aluminio fundido se procede a realizar varias pruebas fundiendo dentro de la cámara y fuera de esta siguiendo el protocolo establecido anteriormente, seguidamente se efectúa pruebas cualitativas y cuantitativas de las probetas, logrando obtener conclusiones sobre este método de fusión y colado.

6.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LA POROSIDAD

Para el análisis de las porosidades de las distintas probetas se adopta los métodos cualitativo y cuantitativo.

6.2.1 ANÁLISIS CUALITATIVO

Para realizar esta prueba se toma como referencia la norma ASTM E3-01: *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*, para lo cual se debe obtener una muestra metalográfica del espécimen fundido, logrando que dicha muestra sea representativa; para muestras extraídas de piezas fundidas, se recomienda realizarla en la zona donde se espera tener una mayor segregación. Después la muestra debe ser pulida mediante lijas abrasivas 80, 240, 320, 400, y 600 dependiendo de la dureza de la muestra; posteriormente se analiza en el microscopio binocular.

En el microscopio se realiza la medición de porosidades de gas, tomando como referencia el poro más grande y el más pequeño; además de rechupes internos. La literatura recomienda realizar las mediciones hasta un aumento de 40X, pero debido al gran tamaño de los poros solo se realiza las mediciones a un aumento de 10X o 20X, según criterios establecidos.

Posteriormente se analiza las muestras por medio de un análisis fotográfico empleando el software AutoCAD relacionando las áreas de porosidades con el área total por el método de áreas equivalentes obteniendo como resultado un porcentaje de poros del área pulida.

6.2.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO [51]

El método de análisis cuantitativo consiste en determinar la densidad de la pieza colada porosa y compararla con la densidad del aluminio dada en libros. El volumen de la pieza porosa se calcula mediante el desplazamiento que experimenta el nivel de agua de un vaso de precipitación cuando se introduce la pieza colada en su interior, considerando que el volumen desplazado de agua en cm^3 es igual al volumen de aluminio en cm^3 ($1cm^3$ H_2O = $1cm^3$ Al) por el principio de Arquímedes.

Para determinar la variación de densidad que tiene la pieza, se debe analizar esta densidad relativa con respecto a la densidad dada en tablas.

Para determinar la densidad relativa se utiliza la ecuación [Ec. 6.1]:

$$\delta_{po} = \frac{m_{po}}{V_{po}} \qquad [\boldsymbol{Ec.\ 6.1}]$$

Dónde:

δ_{po} = densidad relativa de la pieza porosa (g/cm^3)

m_{po} = masa de la probeta porosa (g)

---

[51] HERRERA Juan; "*Control de la porosidades en las piezas coladas: Análisis y experimentación con aleación a base de aluminio*"; Tesis; EPN; 1991; p.130.

V_{po} = volumen de la probeta porosa (cm^3)

Con la densidad relativa de la probeta, se toma la densidad de tablas δ; y se obtiene la variación en densidad, con la ecuación [Ec. 6.2].

$$\%\Delta\delta = \frac{\delta_{po} - \delta}{\delta}\ x\ 100 \qquad [\boldsymbol{Ec.\ 6.2}]$$

La expresión de la variación de la densidad debido a defectos de la probeta es negativa, puesto que la densidad de la pieza porosa disminuye al aumentar el volumen de la probeta por la presencia de los poros, debido a esto para fines de estudio se toma el valor absoluto de la expresión.

6.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento a seguir para determinar la presencia de porosidades se lo divide en dos caminos dependiendo del molde empleado; puesto que el colado en molde de arena produce más defectos que el colado en coquilla por gravedad debido a la humedad retenida en la arena lo que afecta las conclusiones de la presente investigación acerca del análisis de las muestras fundidas y coladas a baja presión.

Debido a lo anteriormente expuesto se emplea los siguientes moldes para el colado del metal fundido:

1. Molde de arena
2. Molde metálico (acero de bajo carbono y hierro gris)

La probeta a colar es un cilindro[52] de 40mm de diámetro y 80 mm de longitud, por cuanto se elabora un modelo en madera para colar en arena y un molde metálico que cumpla con estas dimensiones; Y con fines de experimentación se efectúa también el colado en una lingotera de hierro gris.

---

[52] GARRIDO R.; SÁNCHEZ V.; "*Determinación de la metodología para la obtención de aleaciones de aluminio de fundición maquinables sin poros*"; Tesis; EPN; 2011; p. 100.

6.3.1 COLADO EN ARENA

Para este colado se prepara la arena, añadiendo los aglomerantes y aglutinantes a la mezcla de moldeo y tener la humedad y resistencia necesarias, todos estos parámetros se encuentran en el instructivo para la elaboración de los moldes para el colado a bajas presiones (Anexo 4).

También se prepara la caja de moldeo y el modelo, con las medidas respectivas a la probeta antes mencionada; para poder realizar de una manera adecuada se debe tener en cuenta la contracción volumétrica del metal que para el aluminio es de 1.3 %, según Foseco. [53]

6.3.2 COLADO EN MOLDE METÁLICO

Los moldes metálicos utilizados para las pruebas experimentales son: lingotera (Hierro gris), molde metálico de acero (Acero de bajo carbono) y un tubo de cobre de diámetro interno aproximadamente 40mm. En la figura 6.1 se muestra la lingotera y el molde de acero que son los más utilizados para el colado de las probetas.

Figura 6.1 Moldes metálicos para el colado de las muestras

[53] FOSECO (1999); John R. BROWN; "*Non-Ferrous Foundryman's Handbook*"; eleven edition; Editorial Butterworth Heinemann, Gran Bretaña.

Aunque la lingotera no tiene las dimensiones de la probeta especificada anteriormente, se realiza el colado en este molde; ya que los moldes de hierro gris poseen una buena fluidez y por lo tanto una gran aplicación en la industria; además que fabricar un tubo con las medidas requeridas en hierro gris, es costoso y tiene una gran dificultad.

6.3.3 SELECCIÓN DE MATERIAL A FUNDIR

Otro elemento que se tiene que definir es el metal a fundir; por lo tanto de la gran variedad de chatarra que se encuentra en el mercado se ha escogido alambrón de aluminio (alto contenido de Al puro) y piezas de fundiciones secundarias (Reciclados), de esta manera se trabaja con material base prácticamente libre de defectos (alambrón) y los reciclados que presentan defectos apreciables a simple vista.

Además de la chatarra antes mencionada, al final se realiza la fundición de chatarra de magnesio. Ya que este metal al fundirse en contacto con el medio ambiente reacciona con el oxígeno empieza a inflamarse, considerando que el polvo de magnesio al calentarse o acercarle al fuego se combustiona; por lo que se considera analizar la fusión y colado dentro de la cámara.

La tabla 6.1 describe y enumera las pruebas que se realizan tanto con baja presión y a presión atmosférica.

Tabla 6.1 Pruebas realizadas en la Cámara

	Pruebas		Material	Observación
Arena	I	IA	Reciclados de aluminio	Flameado de la Arena
		IB		
Molde metálico	1	1B	Reciclados de aluminio	Molde sin precalentamiento
	2	2A	Alambrón de Aluminio	Molde sin precalentamiento
		2B		
	3	3A	Reciclados de aluminio	Molde sin precalentamiento
		3B		
	4	4A	Aro de aluminio	Molde sin precalentamiento
		4B		
	5	5B	Alambrón de Aluminio	Molde sin precalentamiento
	6	6A	Reciclados y Alambrón de Aluminio	Molde sin precalentamiento
		6B		
	7	7A	Aro de Magnesio	Uso de sales de cobertura
		7B		sin sales
	8	8A	Aro de Magnesio	Uso de sales de cobertura
		8B		sin sales
A = Fusión a presión atmosférica, **B** = Fusión a bajas presiones				

Fuente: Propia

En la tabla 6.1 las pruebas se las designan de la siguiente forma: los números romanos I, II, III, etc. es la designación para la prueba en arena y los otros números: 1, 2, 3, etc. es para las prueba en molde metálico (Ejem: IA: fusión en arena a presión normal, 2B: fusión en molde metálico a baja presión). La carga en el crisol del horno varía para cada prueba debido a que hay chatarra que es difícil reducirla a pedazos pequeños además de que se debe realizar una única carga para el caso de las pruebas a baja presión ya que es recomendable cerrar la cámara y encender la bomba de vacío desde el momento que comienza a operar el horno de inducción.

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las probetas obtenidas en cada prueba son cortadas de tal manera que se pueda tener un mejor análisis de las causas de los defectos, para esto se considera que el corte atraviese la zona central, que es en donde se concentran mayormente los microrechupes; en cambio las picaduras, no se puede determinar una zona específica donde se pueda hallar en gran cantidad estos defectos, ya que estos están distribuidos en todo el volumen de la probeta debido a su forma, excepto para las probetas cilíndricas.

6.4.1 ANÁLISIS CUALITATIVO

Para este análisis se realiza un corte transversal y otro longitudinal por el centro de las probetas coladas en la lingotera; debido a que no presentan una sección uniforme como las probetas cilíndricas.

6.4.1.1 Muestra IA

La probeta resultante de la prueba no presenta rechupes externos debido a una adecuada preparación de alimentación en el moldeo de arena, posteriormente se analiza la muestra cortando el cilindro en cinco segmentos equidistantes y considerando dicho análisis en el segmento más representativo, el mismo que se aprecia en la figura 6.2 (a).

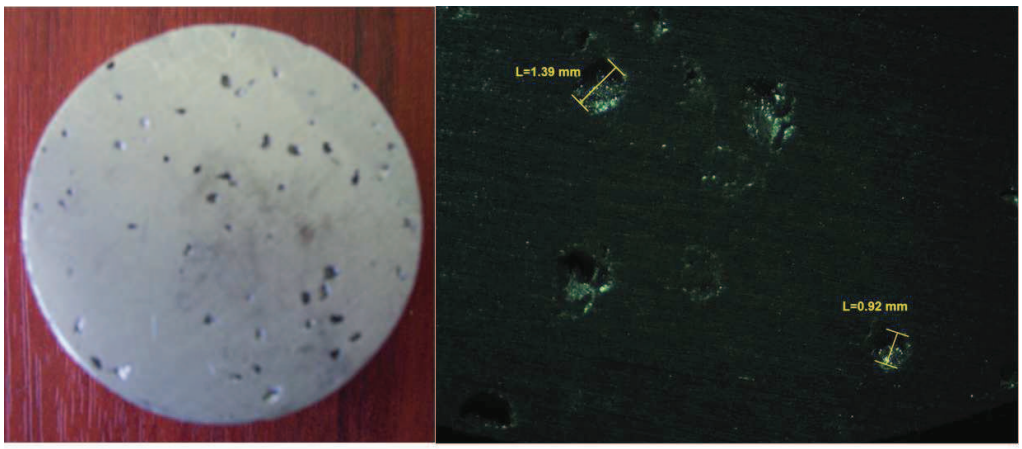


Figura 6.2 (a) Muestra con defectos y (b) Macrografía de la probeta IA a 10X.

Las picaduras presentes tienen un diámetro que varía entre 0.92 y 1.39 mm y la característica de los poros por gas es que presentan una superficie brillante y forma continua.

6.4.1.2 Muestra IB

De la misma manera que la muestra IA no se presenta rechupes externos, sin embargo al realizar los cortes en secciones se aprecia porosidades de gran tamaño, es así que debido a esto se considera únicamente lijar dichas secciones para su inspección visual sin la necesidad del microscopio.

Figura 6.3 (a) Sección representativa de la muestra y (b) Probeta IB cortada en secciones.

En la figura 6.3 se puede observar defectos de gran tamaño no muy comunes en piezas fundidas y de dimensiones extremadamente exageradas, por lo que los poros medidos presentan diámetros aproximados entre 18 mm y 2mm; se puede deducir que estos defectos de porosidad de gas son ásperos y de superficie brillante.

6.4.1.3 Muestra 1B

Para esta muestra la lingotera de hierro fundido es calentada mediante flameado, ubicada dentro de una caja de madera y rodeada de arena de moldeo con el fin de reducir la velocidad de enfriamiento y que esta sea lenta para que al momento del colado a baja presión dicha coquilla este sobre la temperatura ambiente. Después de fundirse la muestra se procede a cortarla por la mitad del lingote

atravesando seccionalmente el rechupe externo, para posteriormente pulir la sección y apreciar sus defectos.

Figura 6.4 Muestra 1B

Esta probeta presenta un pequeño rechupe externo en el centro, posteriormente al corte y pulido se aprecia una gran cantidad de rechupes internos por la contracción del metal. Y no se aprecia picaduras ni sopladuras en la superficie, debido a que todos los defectos son de apariencia opaca y contorno irregular.

6.4.1.4 Muestra 2A

6.4.1.4.1 Sección transversal

En la figura 6.5 se observa la probeta colada posteriormente al corte y pulido teniendo en cuenta que para esta prueba el colado se realizó sobre la lingotera a temperatura ambiente.

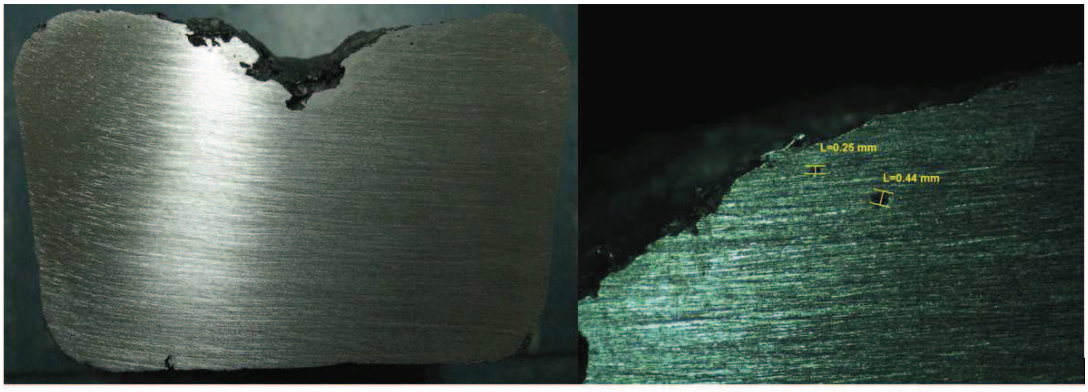


Figura 6.5(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X, de la probeta 2A.

En la figura 6.5 (a) se puede observar un gran rechupe que tiene la probeta en el centro y presenta la forma de un triángulo invertido. Realizando una inspección visual a la superficie pulida se aprecia pocas porosidades gaseosas presentes en la parte superior a ambos extremos del rechupe, dichas porosidades oscilan entre 0.25 – 0.44 mm de diámetro, sin embargo se puede destacar una gran cantidad de escoria en la superficie del lingote, que se originó por la reacción del metal liquido con el medio ambiente.

6.4.1.4.2 Sección longitudinal

En la figura 6.6 (a) se observa en la parte superior del corte, una gran presencia de escoria, y en mayor cantidad hacia el centro de la probeta.

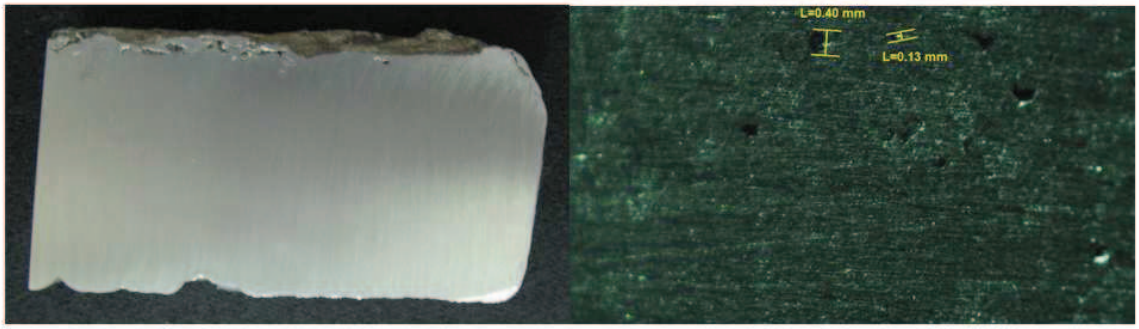


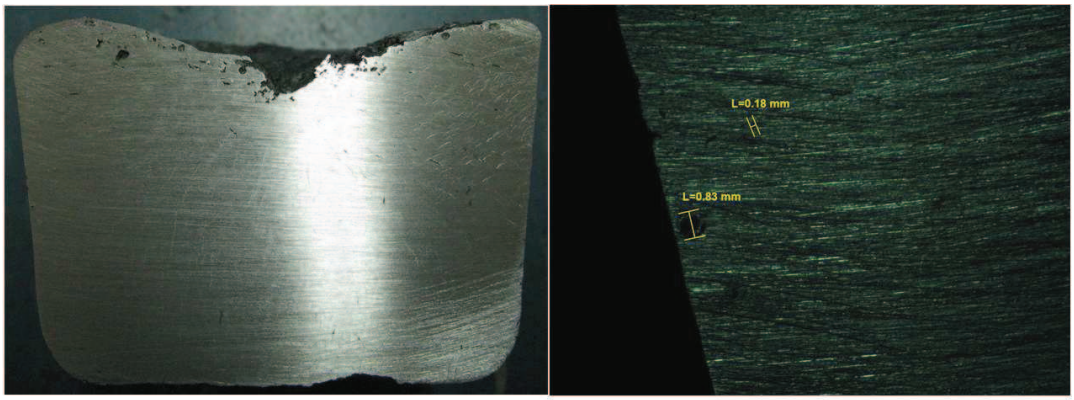
Figura 6.6 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la probeta 2A.

Realizando una inspección visual a la superficie pulida, es una zona sin grandes defectos. En el microscopio se observa poca presencia de picaduras y no de gran tamaño, las cuales tienen un diámetro que varía entre 0.13 - 0.4 mm; además no se observa microrechupes.

6.4.1.5 Muestra 2B

6.4.1.5.1 Sección transversal

Se aprecia que la superficie pulida no presenta gran presencia de porosidades de gas, los pocos que se pueden divisar en la figura 6.7 (b) no son de gran diámetro y están ubicados en la parte superior, distribuidos a los extremos y cuyo diámetro oscila entre 0.18 – 0.83 mm, toda la superficie restante está libre de porosidades.



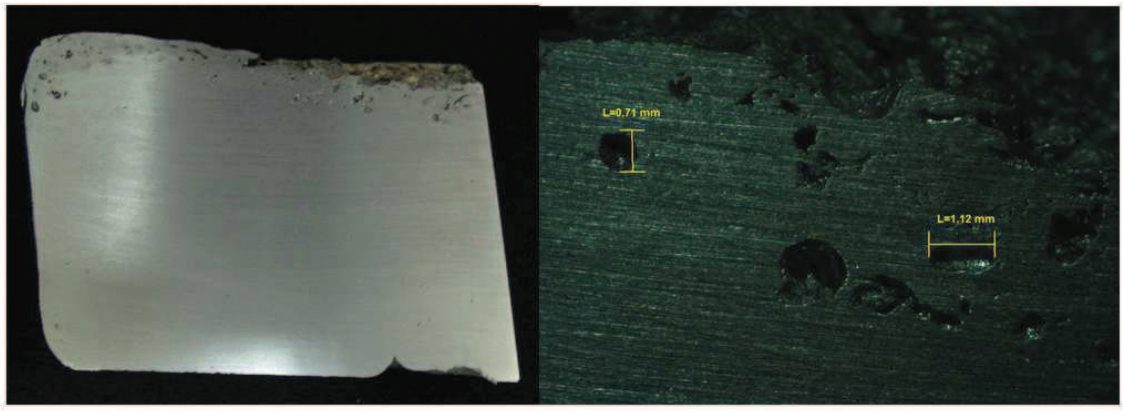
(a) (b)

Figura 6.7(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 2B.

Con una inspección visual se pudo observar microrechupes y con el microscopio se pudo divisar de mejor manera rechupes internos de forma extremadamente largos y delgados, pero dirigidos hacia la superficie al rechupe externo.

Lo que se puede ver en la figura 6.7 (a) es un gran rechupe externo, además de que en la superficie del lingote se observa escoria pero en menor cantidad que la probeta 2A.

6.4.1.5.2 Sección longitudinal



(a) (b)

Figura 6.8 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 2B.

El corte longitudinal de la muestra presenta picaduras de gran tamaño, que oscilan entre 0.35 - 0.71 mm; además se puede divisar sopladuras de una longitud de 1.12 mm la más grande; todos estos defectos gaseosos son superficiales. Existen varios rechupes internos de forma alargada en parte inferior

derecha cercanos al centro de la pieza donde se presenta el rechupe externo, que se puede ver en corte transversal de la probeta. Además estos microrechupes solo se presentan en gran cantidad al acercarse al centro de la probeta, y al irse acercando a la pared del molde van disminuyendo, hasta desaparecer.

6.4.1.6 Muestra 3A

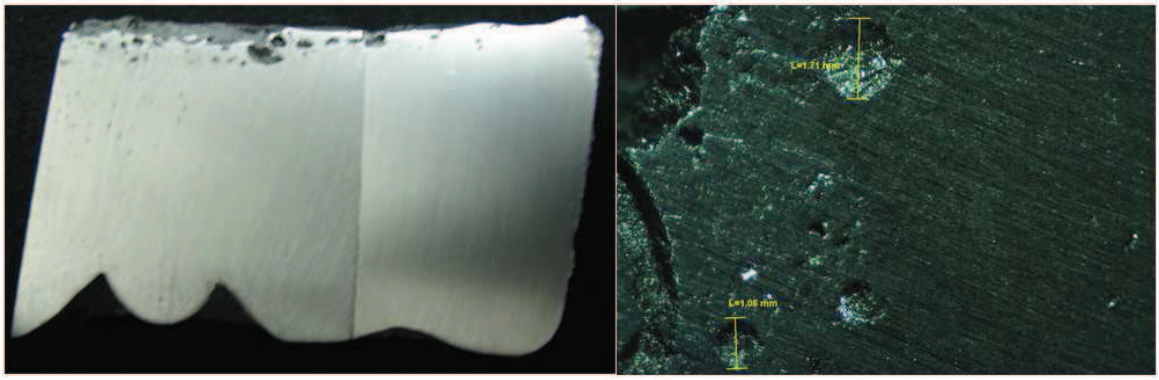
6.4.1.6.1 Sección transversal

Figura 6.9 (a) Corte transversal y (b) Macrografía de la probeta 3A a 10X.

Esta muestra presenta gran presencia de porosidades en la superficie pulida los cuales tienen un diámetro que oscila entre 0.15 - 0.54 mm y están ubicados en toda la superficie de la muestra. Los rechupes internos solo se pueden divisar cerca del rechupe externo. Esta probeta presenta escoria en la superficie claramente apreciable.

6.4.1.6.2 Sección longitudinal

Las picaduras superficiales que presenta la probeta son de gran tamaño y cercanos al centro de la muestra, y tienen un diámetro que varían entre 1.08 – 1.71 mm como se ve en la figura 6.10 (b); además se puede ver picaduras en la parte inferior de la muestra, de diámetro que oscilan entre 0.29 – 0.81 mm. Los microrechupes se pueden divisar en gran cantidad en la parte izquierda de la figura 6.10 (a), cercanos al centro de la muestra; y al realizar una inspección visual los rechupes internos no se presentan cercanos a las paredes del molde.

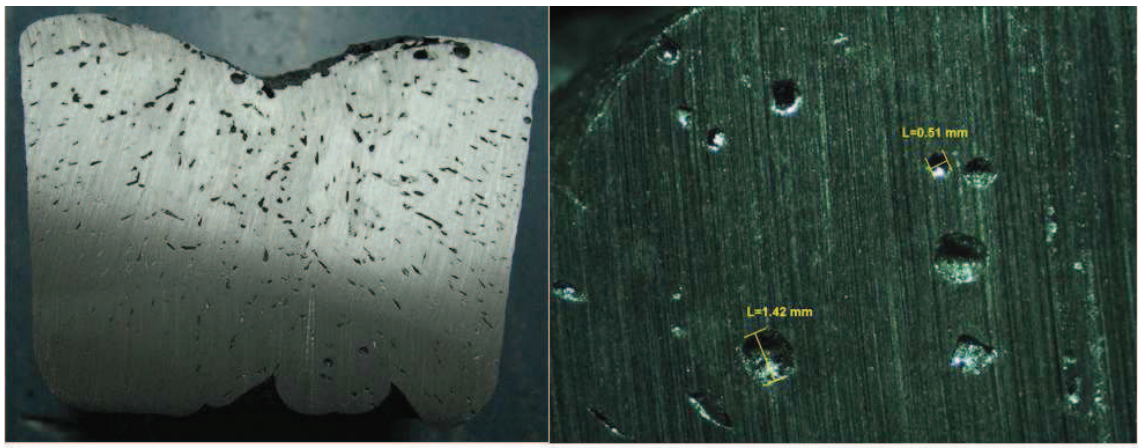


(a) (b)

Figura 6.10 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la muestra 3A.

6.4.1.7 Muestra 3B

6.4.1.7.1 Sección transversal

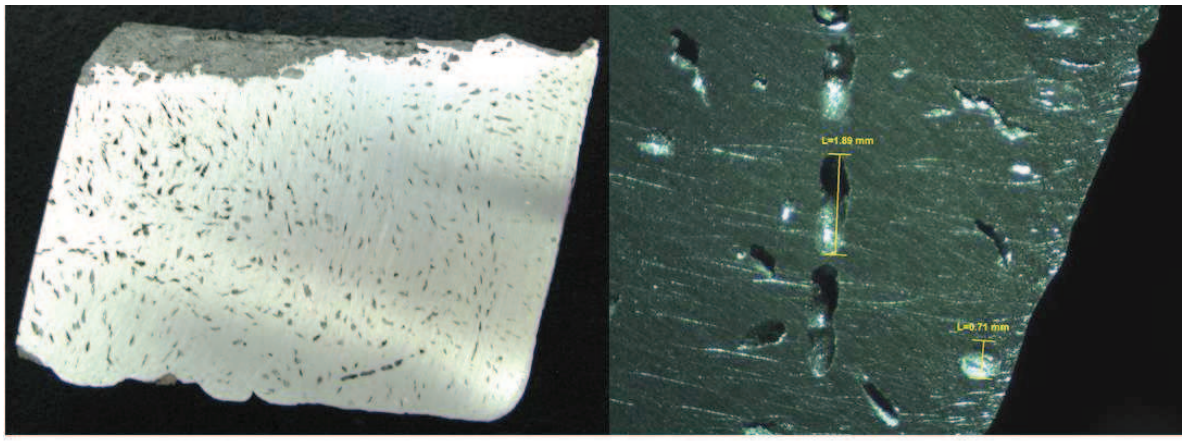


(a) (b)

Figura 6.11 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 3B.

En la figura 6.8 (a) se observa el corte de la muestra en donde la superficie pulida presenta una gran presencia de rechupes internos los mismos que en su mayoría tienen forma alargada; de la misma manera los mismos están direccionados hacia el rechupe externo. Las porosidades gaseosas poseen un diámetro que varía entre 2.98 mm y 0.28 mm, estos están presentes en la parte inferior central y en la parte superior junto al rechupe.

6.4.1.7.2 Sección longitudinal



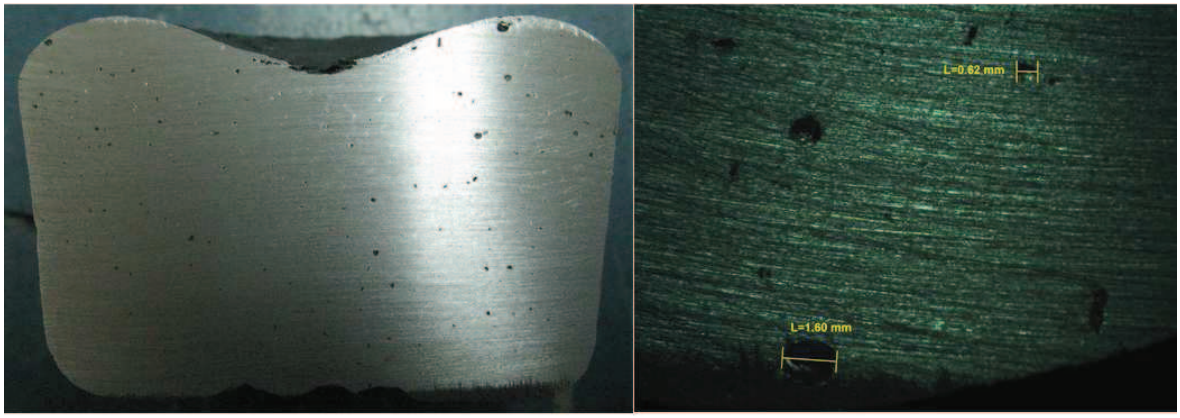
(a) (b)

Figura 6.12 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10 X de la probeta 3B.

La superficie de la probeta presenta gran cantidad de rechupes internos, distribuidos en toda la zona; de forma alargada, similar a la superficie transversal de la figura 6.11 (a). Pero en la superficie si se puede distinguir varias picaduras de diámetro 0.71 mm y varias sopladuras de forma alargada, con la superficie brillante y contorno regular, que tiene una longitud de 1.89 mm.

6.4.1.8 Muestra 4A

6.4.1.8.1 Sección transversal



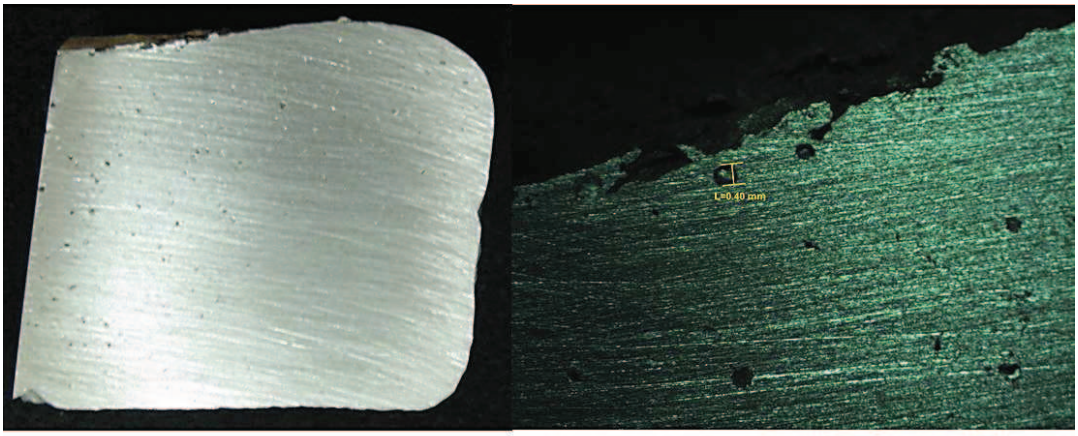
(a) (b)

Figura 6.13 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4A.

La muestra 4A presenta un rechupe externo claramente apreciable, además de una gran cantidad de porosidad de gas difusa en toda la superficie de la muestra

pulida; las porosidades tienen un diámetro que varía entre 0.21 y 1.6 mm, en el microscopio algunos poros aparecen opacos pero de forma redonda, esto debido a que al momento de pulir la muestra se introdujo material en la mayor cantidad de poros.

6.4.1.8.2 Sección longitudinal



(a) (b)

Figura 6.14 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4A.

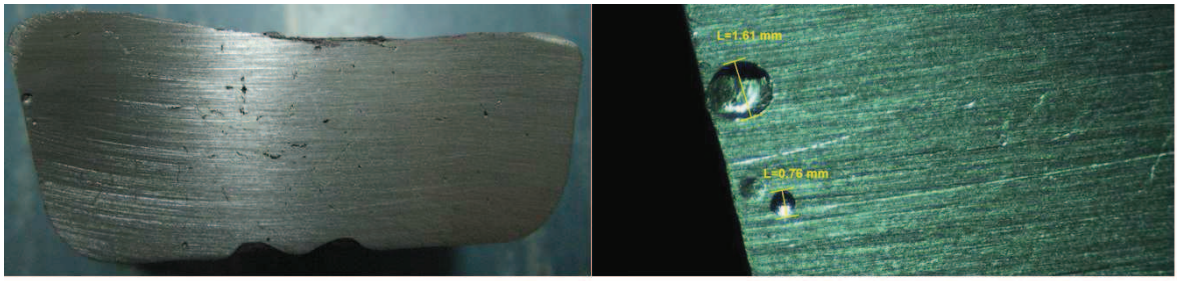
Esta probeta presenta una gran cantidad de picaduras en toda la superficie, los diámetros varían entre 0.35 – 0.56 mm; ubicándose los más grandes cerca a la superficie. Con el microscopio a un aumento de 10X se observó pocos microrechupes, en comparación con otras muestras, se puede decir casi nulo.

La escoria se presenta como una fina capa en la superficie de la probeta, mínima en comparación con otras muestras.

6.4.1.9 Muestra 4B

6.4.1.9.1 Sección transversal

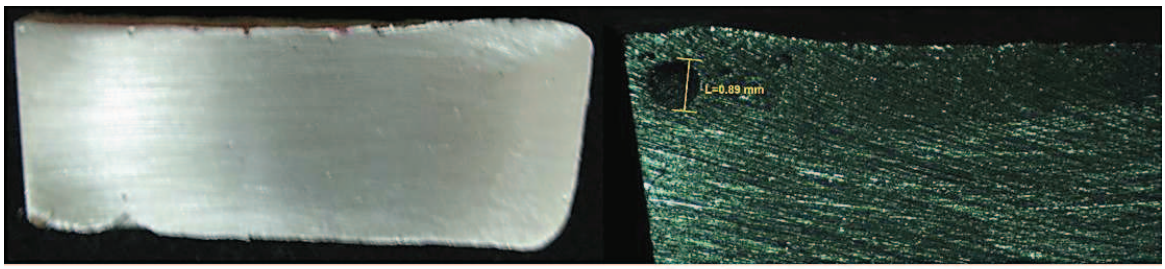
En toda la superficie no se puede divisar gran presencia de poros como la muestra anterior a excepción de unos pocos ubicados en el extremo derecho e inferior de la muestra, estos tienen un diámetro que varía entre 1.61 y 0.76 mm. Además se observa que existe una gran presencia de rechupes internos de forma alargada los mismos que se encuentran ubicados en el centro.



(a) (b)

Figura 6.15(a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4B.

6.4.1.9.2 Sección longitudinal



(a) (b)

Figura 6.16 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 4B.

En la zona pulida se puede observar dos o tres picaduras pero ubicadas solo en la superficie, que tienen un diámetro de 0.89 mm; en el resto de la zona no se observas más porosidades de gas. Los microrechupes se pueden ver que están presentes casi en toda la superficie, pero van disminuyendo desde el centro hacia la pared del molde.

6.4.1.10 Muestra 5B

Esta muestra tiene la particularidad de que el metal fue colado en un tubo de cobre de aproximadamente 2mm de espesor de pared, sin precalentamiento del mismo.

En la figura 6.17 se aprecia picaduras, sopladuras y rechupes internos distribuidos por toda la superficie pulida. Las porosidades más grandes presentan un diámetro de aproximadamente 4mm.

Figura 6.17 Muestra axial de la probeta 5B.

6.4.1.11 Muestra 6A

En el corte de la muestra se puede observar gran presencia de porosidades gaseosas, las mismas que oscilan entre 0.14 – 0.87 mm de diámetro y están distribuidas en el eje central del cilindro; cabe recalcar que dichos poros a pesar de no ser de gran tamaño, están presentes en gran cantidad de la superficie de la muestra. Esta probeta presenta un pequeño rechupe externo, además de unos pocos rechupes internos de dimensiones menores, considerando todas las muestras anteriores.

Como se puede observar en la figura 6.18 (b), la gran cantidad de defectos que tiene la muestra, y casi la mayoría de estos son defectos por gases.

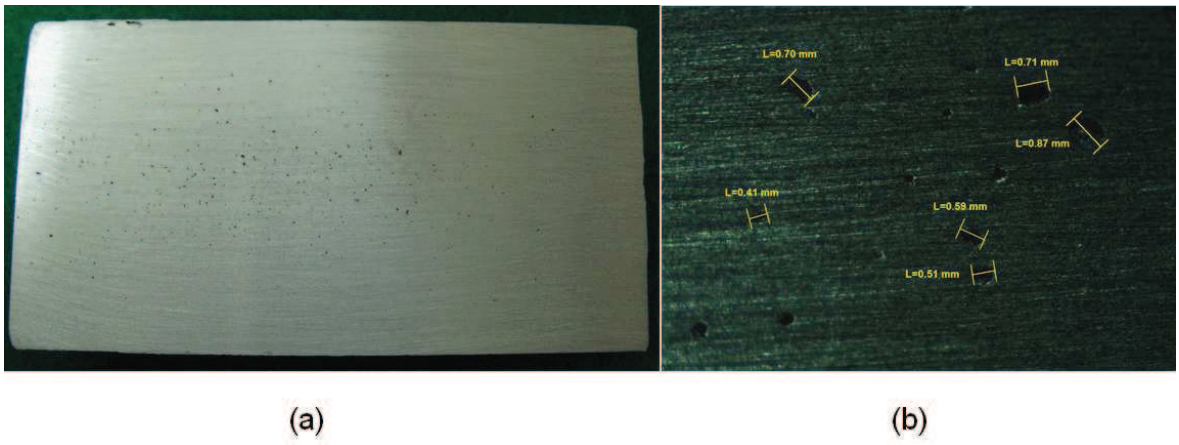
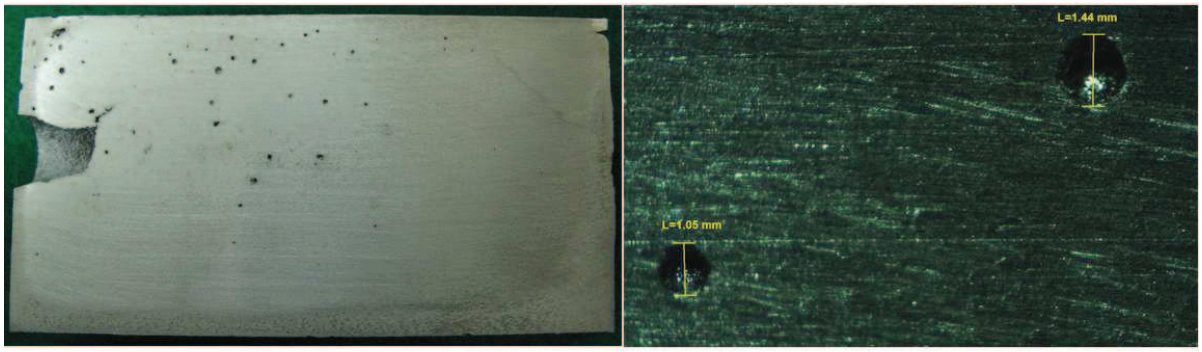


Figura 6.18 (a) Corte axial y (b) Macrografía a 20X de la probeta 6A.

6.4.1.12 Muestra 6B



(a) (b)

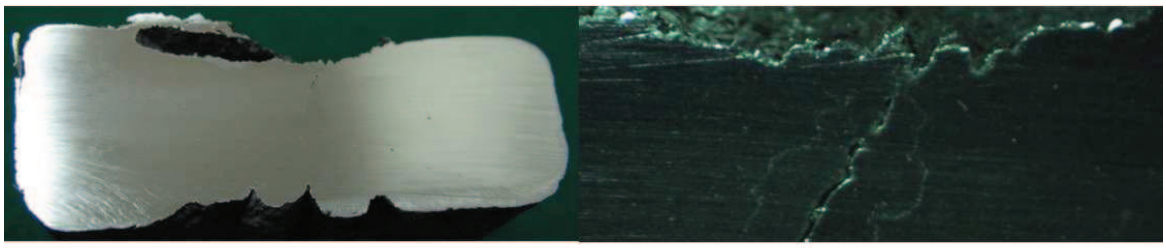
Figura 6.19(a) Corte axial y (b) Macrografía a 20X de la probeta 6B.

En esta muestra los poros gaseosos son un poco más visibles que la muestra 6A, están ubicados en el centro superior derecho de la pieza y presentan un diámetro entre 0.59 – 2.07 mm. En esta probeta si se puede observar un gran rechupe externo, ubicado en la parte central del cilindro, además de unos pocos rechupes internos que están ubicados cercanos a los poros de gas.

Los poros de gas de esta muestra la gran mayoría presentan un diámetro mayor en comparación con la muestra 6B.

6.4.1.13 Muestra 7B

6.4.1.13.1 Sección transversal



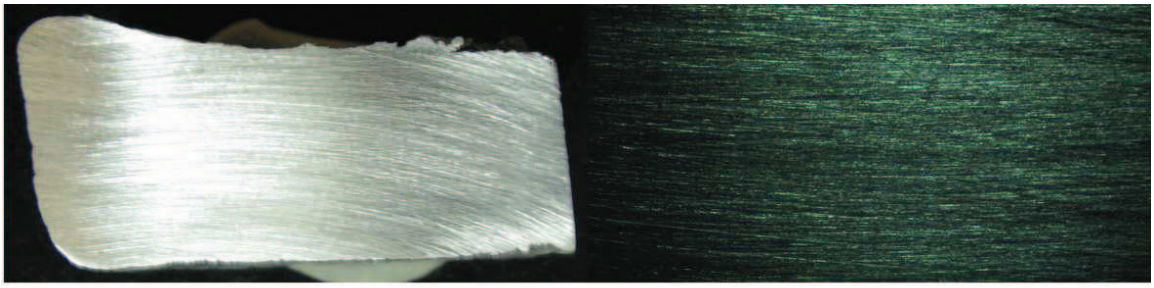
(a) (b)

Figura 6.20 (a) Corte transversal y (b) Macrografía a 10X de la probeta 7B.

En esta muestra realizando una inspección visual no se observa ningún poro causado por gases; al realizar una revisión en el microscopio a un aumento de 10X y 20X, tampoco se observa picaduras ni sopladuras; en si esta probeta esta sin ningún defecto a causa de gases. Tampoco se encuentra microrechupes

distribuidos en toda la zona, solo se puede divisar un rechupe interno en la parte central de la muestra que va desde la parte inferior hasta la superior, en la figura 6.20 (b) se puede ver el rechupe en la parte superior.

6.4.1.13.2 Sección longitudinal



(a) (b)

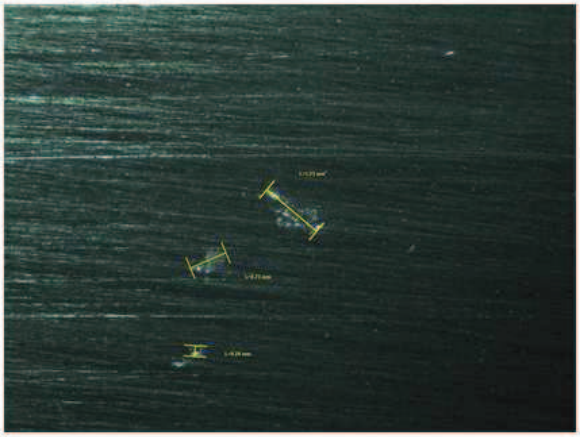
Figura 6.21 (a) Corte longitudinal y (b) Macrografía a 20X de la probeta 7B.

En esta sección de la probeta tampoco se observa ningún poro a causa de gas en la superficie, y al observarla en el microscopio al mismo aumento que la sección transversal, no se observó ningún poro a causa de gases. Además esta zona está exenta de microrechupes; por lo que es una superficie bastante limpia de defectos como se puede ver en la figura 6.21 (b).

6.4.1.14 Muestra 8A

Esta muestra con una simple vista presenta gran variedad de picaduras en todo la superficie como se puede ver en la figura 6.22, que tienen un diámetro que varía entre 0.2 – 0.5 mm, aunque en la superficie (último lugar en solidificar) se presentan los poros más grandes; y además presenta sopladuras que tienen una longitud que oscilan entre 0.2 – 1.23 mm.

(a)



(b)

Figura 6.22 (a) Corte axial y (b) Macrografía a 10X de la probeta 8A

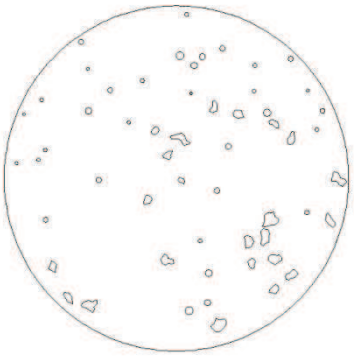
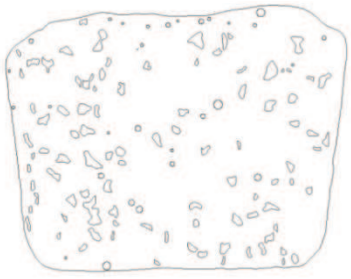
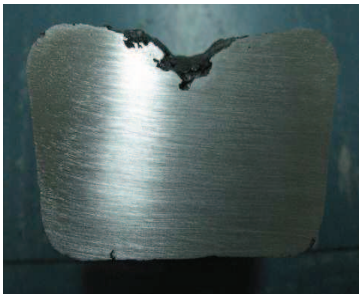
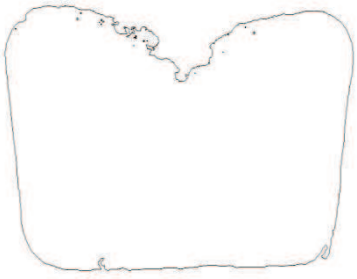
6.4.1.15 Análisis Fotográfico

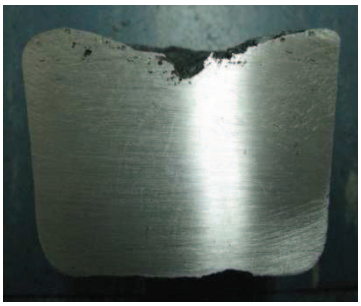
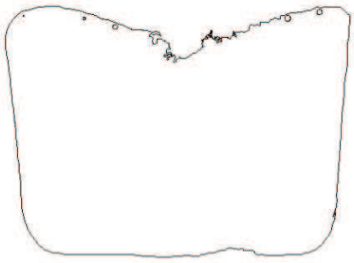
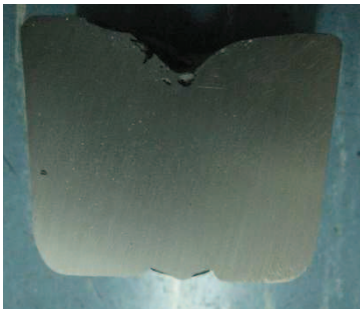
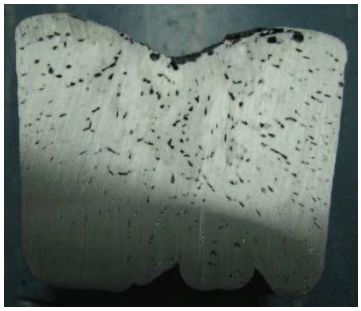
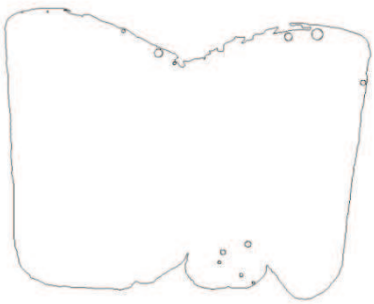
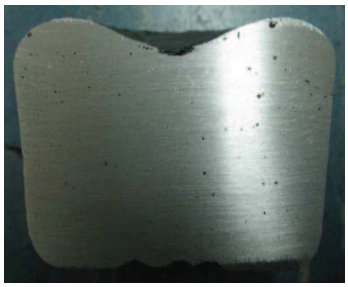
Para el caso del análisis fotográfico se realiza un diagrama digital de la fotografía tomada del corte de la probeta por medio del software AutoCAD, obteniéndose como resultado un área total de las porosidades en dicha superficie; posteriormente se calcula el porcentaje del área de las porosidades con relación al área total.

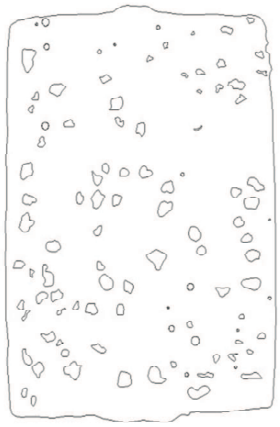
Cabe aclarar que dicho porcentaje de porosidad, es únicamente representativo solo para dicha área más no para todo el volumen de la probeta; además nos ayuda a diferenciar entre defectos internos que presenta la muestra.

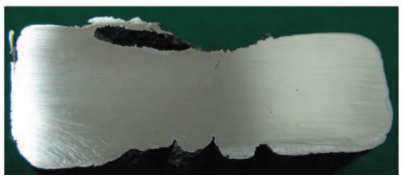
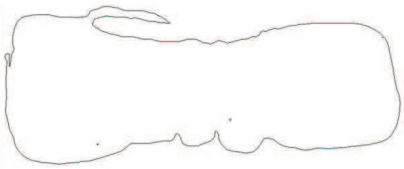
A continuación se detalla las tablas 6.2 y 6.4 en donde se presenta tanto la fotografía digital como el diagrama digital de cada una de las secciones de las muestras y su respectivo porcentaje de porosidades. En la siguiente tabla solo se detalla las secciones transversales y axiles de algunas de las muestras, ya que las probetas cilíndricas solo se les realizan un corte axial.

Tabla 6.2 Porosidades de la sección transversal por medio del Análisis Fotográfico

Muestra	Foto Digital Real	Diagrama Digital	Porosidades [%]
IA			2.7
IB			26.25
1B			6.62
2A			0.03

Muestra	Foto Digital Real	Diagrama Digital	Porosidades [%]
2B			0.09
3A			0.37
3B			0.34
4A			0.39
4B			0.24

Muestra	Foto Digital Real	Diagrama Digital	Porosidades [%]
5B			6.89
6A			0.21
6B			0.15

Muestra	Foto Digital Real	Diagrama Digital	Porosidades [%]
7B			0.08
8B			0.094

Cabe resaltar que en el diagrama digital solo se ha considerado las porosidades y no los rechupes internos. La tabla 6.3 resume los valores de áreas totales y áreas de porosidades para cada una de las muestras.

Tabla 6.3 Porcentaje de Áreas de Porosidades de la sección transversal para cada Probeta

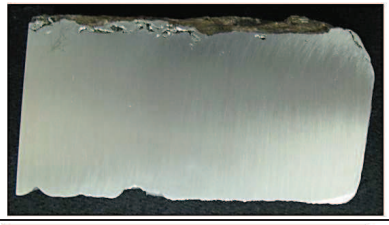
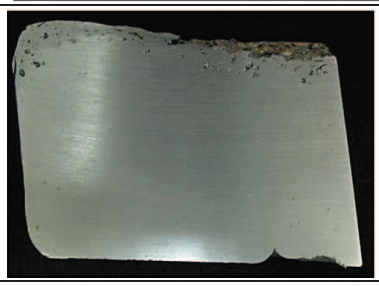
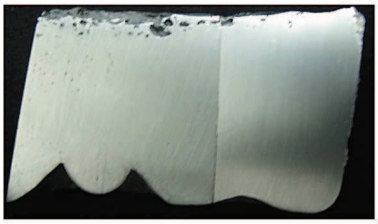
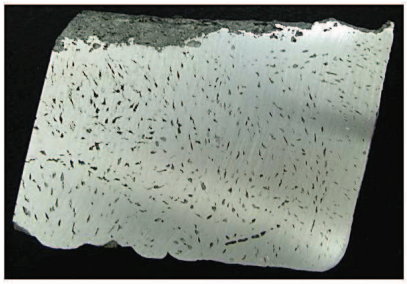
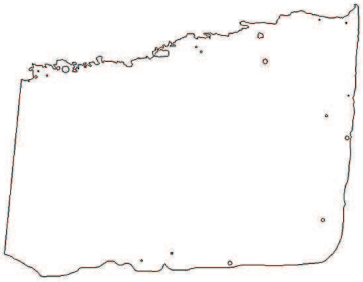
Probetas	Area Total (u^2)	Area de porosidades (u^2)	Porcentaje de Porosidades (%)
IA	1786.37	48.20	2.70
IB	1932.31	507.30	26.25
1B	3014.70	199.45	6.62
2A	1165.74	0.31	0.03
2B	1006.89	0.94	0.09
3A	1298.31	4.83	0.37

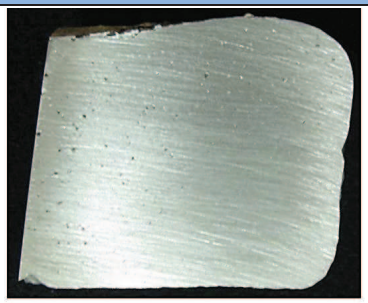
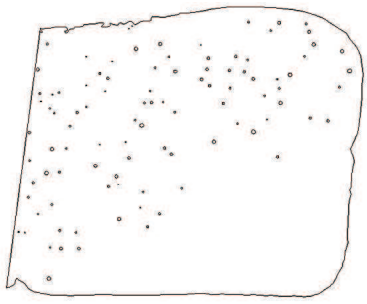
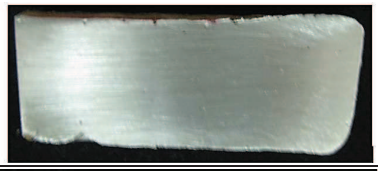
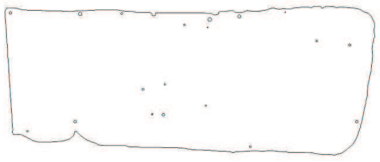
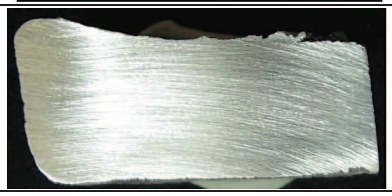
3B	930.25	3.19	0.34
4A	971.39	3.77	0.39
4B	1344.32	3.27	0.24
5B	2635.44	176.24	6.69
6A	2185.80	4.62	0.21
6B	1913.05	2.86	0.15
7B	27327.77	2.13	0.08
8A	33661.63	31.68	0.094

Fuente: AutoCAD

De la misma manera para la sección longitudinal se dibuja el diagrama digital a partir de la fotografía digital. Como se dijo anteriormente el porcentaje de porosidad gaseosa, es solo representativa para esta área.

Tabla 6.4 Porosidades de la sección longitudinal por medio del Análisis Fotográfico

Muestra	Foto digital real	Diagrama digital	Porosidades [%]
2A			0.242
2B			0.488
3A			0.577
3B			0.173

Muestra	Foto Digital Real	Diagrama Digital	Porosidades [%]
4A			0.484
4B			0.164
7B			0.003

En la tabla 6.4 se representó solo los diagramas digitales solo de las secciones longitudinales de las probetas que fueron coladas en la lingotera, porque a estas probetas se les realizo dos cortes para el análisis cualitativo. Por tanto para las probetas de forma cilíndrica, solo basta con realizar un análisis en la sección axial de la misma.

En la tabla 6.5 se presenta el porcentaje del área de porosidades de las secciones longitudinales.

Tabla 6.5 Porcentaje de Áreas de Porosidades de la sección longitudinal para cada Probeta

Probetas	Area Total (u^2)	Area de porosidades (u^2)	Porcentaje de Porosidades (%)
2A	16754.50	40.476	0.242
2B	15472.60	75.510	0.488
3A	35610.75	205.630	0.577
3B	35523.41	61.563	0.173
4A	13343.81	64.583	0.484
4B	19196.56	31.553	0.164
7B	13288.55	0.339	0.003

Fuente: AutoCAD

6.4.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Para el análisis cuantitativo de las muestras se determina la variación de densidad que presenta la probeta utilizando la ecuación 6.2; cabe resaltar que el resultado que refleja este porcentaje incluye tanto a picaduras, sopladuras, microrechupes y otros defectos.

Las densidades de referencia para poder calcular la variación de densidad se obtienen en base a un análisis químico de las muestras, realizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN, empleando el Espectrómetro de chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN; en base a la determinación del porcentaje de aleantes de las probetas se puede determinar la densidad de referencia o teórica de los libros.

A continuación se presentan los resultados:

Tabla 6.6 Análisis Químico de las muestras representativas

Metales	Muestras (%)		
	3B	4A	6B
Silicio (Si)	4,775	6,852	2,432
Zinc (Zn)	8,199	0,012	0,62
Hierro (Fe)	0,909	0,005	0,708
Cobre (Cu)	1,646	0,005	1,073
Manganeso (Mn)	0,136	0,002	0,141
Magnesio (Mg)	0,193	0,219	1,24
Níquel (Ni)	0,078	0,002	0,0135
Cromo (Cr)	0,025	0,002	0,013
Plomo (Pb)	0,069	0,005	0,029
Estaño (Sn)	0,023	0,002	0,013
Titanio (Ti)	0,022	0,145	0,021
Plata (Ag)	0,003	0,001	0,001
Galio (Ga)	0,02	0,028	0,023
Aluminio (Al)	83,84	92,65	93,48

Fuente: Departamento de Metalurgia extractiva, EPN.

Para realizar este análisis se considera las muestras que se desconocía sobre la procedencia de la chatarra utilizada; además de que para cada grupo de muestras se tiene la misma chatarra. Por ejemplo para las pruebas: IA, IB, 1B, 3A y 3B se

utiliza los reciclados del laboratorio; se seleccionó una de estas muestras para el análisis.

Para las pruebas: 2A, 2B, 5B se empleó alambrón de aluminio; para estas muestras no se realizó el análisis debido a que se considera que era la chatarra de alambre conductor y según esta aplicación se busca la aleación correspondiente en el Metals Handbook.

En las pruebas: 4A y 4B la chatarra que se emplea fue un aro de una llanta de un automóvil, para este caso como se desconoce la composición, se eligió una de estas muestras para el análisis.

La última muestra elegida fue de las pruebas 6A y 6B ya que la chatarra utilizada fue una mezcla de alambrón de Aluminio y reciclados.

Las probetas 7B, 8A; que son chatarra de un aro de magnesio, no se puede realizar el análisis por chispa en laboratorio de metalurgia, debido a la eleva inflamación del material; sin embargo se puede obtener la densidad según esa aplicación en los libros.

Con los datos de los aleantes de la tabla 6.6 se ingresa en el Metals Handbook-volume II para encontrar aleaciones de aluminio de similares composiciones y emplear dichas aleaciones como patrón para determinar la densidad referente para estas muestras.

Tabla 6.7 Densidades de referencia obtenidas del Metals Handbook volume II

Muestra	Material	Aleación de Aluminio	Densidad (g/cc)
2A	Alambre de aluminio	6101	2.69
3B	Reciclados	7076	2.82
4A	Aro de aluminio	4043	2.68
6B	Reciclados y alambrón	6066	2.71
7B	Aro de Magnesio	AM60A	1.80

Fuente: Metals Handbook volume II (1990) – *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*; ASM International; 10th Edition; USA.

Con estas densidades obtenidas, se realiza los cálculos de la variación de la densidad, con la ecuación 6.2 y los resultados se resumen en la tabla 6.8.

Para las probetas de magnesio, se realizaron dos pruebas: 7,8; obteniendo 4 probetas pero solo se realiza el análisis de 2, una de colada a bajas presiones y la otra en presión normal.

Tabla 6.8 Cálculo de la Variación de densidad para cada una de las muestras

Muestra	Masa de la muestra (g)	Volumen desplazado (cc)	Densidad Relativa (g/cc)	Densidad referente (g/cc)	Variación de la densidad (%)
AA	224.80	90	2.50	2.82	11.426
AB	166.5	80	2.08	2.82	26.197
1B	325.37	130	2.50	2.82	11.247
2A	265.75	100	2.66	2.69	1.208
2B	312.10	120	2.60	2.69	3.315
3A	592.47	220	2.69	2.82	4.502
3B	392.10	150	2.61	2.82	7.305
4A	398.95	160	2.49	2.68	6.961
4B	361.45	140	2.58	2.68	3.665
5B	196	80	2.45	2.69	8.922
6A	297.35	110	2.70	2.71	0.252
6B	288.67	110	2.62	2.71	3.164
7B	190.7	110	1.73	1.80	3.687
8A	195.35	110	1.78	1.80	1.338

Fuente: Propia

6.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.4.3.1 Muestra IA

En esta muestra se tiene un porcentaje de densidad del 11.43%, sin embargo el análisis fotográfico indica 2.7%. En la macrografía se puede apreciar que las porosidades presentes son de color brillante pero de forma irregular; estos poros son producidos por la presencia de gases debido a la humedad de la arena. Aunque la arena fue dejada secar por un día y calentado por flameado se observó que la arena todavía retenía humedad.

6.4.3.2 Muestra IB

La muestra de esta prueba presenta gran presencia de defectos teniendo una variación de densidad del 26.18% que concuerda con los grandes defectos internos que presenta la probeta en todo su volumen. Esta prueba fue realizada a baja presión (1 psi), lo que influyó para que la probeta presente mayores defectos que la prueba IA.

Al ingresar la colada en el molde de arena los gases que se generan tratan de escapar y resultan atrapados durante la solidificación debida básicamente a un moldeo insuficiente. La presión reducida dentro de la cámara provoca que los gases generados ingresen al metal líquido debido a una diferencia de presión dentro de la cámara y la masa de metal líquido.

Después de esta prueba se aprecia que aunque se deje secar la arena un tiempo mayor al establecido, siempre existe algo de humedad retenida que afectará a la pieza fundida. Teniendo en cuenta esto se decidió realizar las siguientes pruebas solo en molde metálico para que la humedad de la arena no influya en el análisis de la porosidad que presenta la probeta.

6.4.3.3 Muestra 1B

Para esta prueba se observa una gran presencia de defectos, así mismo presenta una variación de densidad del 11.25%. El molde fue rodeado por arena y calentado causando una solidificación más lenta debida básicamente a la transferencia de calor entre el molde y el medio, provocando una gran variedad de defectos internos; el rango de solidificación que presenta la aleación de aluminio es muy amplio demandando mayor cantidad de metal liquido por intervalo de tiempo, lo que provoca un frente de solidificación dendrítico o nucleación independiente.

Por lo tanto al provocar uno de estos dos frentes debido al enfriamiento lento se producen estas cavidades en la solidificación debida básicamente a que el espaciamiento entre los brazos dendríticos adyacentes decrece con el incremento de la taza de enfriamiento.

Así mismo en la macrografía se puede observar pocas porosidades gaseosas, posiblemente la gran cantidad de rechupes internos provocó que los gases atrapados en la colada se desplacen hacia estas cavidades.

6.4.3.4 Muestra 2A

6.4.3.4.1 Sección transversal

La muestra transversal presenta una superficie limpia de defectos, por lo que la variación de densidad es de 1.21%; el análisis fotográfico indica un porcentaje de porosidades del 0.03%.

En la macrografía se observan pocos poros gaseosos de un diámetro que oscila entre 0.25 – 0.44 mm. La poca cantidad de porosidades se pudo dar debido a que el alambrón no presentaba ningún defecto interno siendo un material a ser fundido bastante limpio; además que no se tuvo un elevado sobrecalentamiento del metal líquido.

6.4.3.4.2 Sección longitudinal

La sección longitudinal de la muestra 2A, presenta una superficie con poca picaduras en toda la zona y con un diámetro 0.40 mm la más grande; además para el análisis fotográfico tiene un porcentaje de porosidades de 0.24%. Los microrechupes se presentan poco cantidad hasta casi nulos, por lo que tuvo un enfriamiento rápido.

Algo que destacar es la gran cantidad de escoria en la superficie de la muestra, en si por la interacción del metal líquido con el aire.

6.4.3.5 Muestra 2B

6.4.3.5.1 Sección transversal

En la sección transversal de la muestra se presenta una variación de densidad del 3.32% y 0.09% de porosidades por medio del diagrama digital; aunque la muestra tiene poca presencia de poros pero de un diámetro mayor a la de la probeta 2A, los poros de esta muestra varían entre 0.18 – 0.83 mm de diámetro, y estos están presentes solo en la superficie de la muestra.

A diferencia de la muestra 2A esta presenta una gran variedad de rechupes internos alargados y delgados en la parte superior.

6.4.3.5.2 Sección longitudinal

En esta sección longitudinal, la gran mayoría de poros de gas (picaduras, sopladuras) están ubicados solo en la superficie de la muestra y de mayor diámetro que en la probeta 2A; y estos defectos pueden ser eliminado con la utilización de mazarotas o con sobredimensiones para poder eliminar esta zonas, ya que los demás de la superficie presenta pocas picaduras. En el análisis fotográfico presenta un porcentaje de densidad del 0.48%.

Y como una característica de la fusión a baja presión, esta muestra presenta microrechupes, ubicados cercanos al centro de la probeta y casi nulos al acercarse a la pared del molde; como no existe sobrecalentamiento del molde, las zonas cercanas a la pared tienen una solidificación rápida y la contracción es suplida por las zonas cercanas al centro de la probeta, y es ahí donde se forma los microrechupes.

6.4.3.6 Muestra 3A

6.4.3.6.1 Sección transversal

Esta sección de la muestra tiene una superficie con pocas picaduras y presenta una variación de densidad de 4.5% y 0.37% de porosidades obtenidas del diagrama digital. Aunque los poros que presenta no son muy grandes, pero en mayor cantidad que la muestra 2A; estos presentan un diámetro que varía entre 0.15 – 0.54 mm dispersos en toda el área.

Además del rechupe externo, no se aprecia la presencia de microrechupes; por lo que no tuvo problemas de enfriamiento lento.

6.4.3.6.2 Sección longitudinal

En esta sección longitudinal, presenta grandes picaduras ubicadas en la superficie (1.08 mm), y van disminuyendo de tamaño en el fondo de la probeta

(0.29 mm; y debido a esto tiene un alto porcentaje de porosidades en el análisis fotográfico de 0.57%, con respecto a la sección transversal de la probeta 2A.

Además presenta microrechupes cercanos al centro de la probeta, debido a la contracción.

6.4.3.7 Muestra 3B

6.4.3.7.1 Sección transversal

En esta sección transversal de la muestra se hace característico que en las pruebas a bajas presiones, existe presencia de rechupes internos. Los poros de gas que presenta esta muestra no son muchos, pero presentan un gran tamaño que varía entre 0.54 – 2.98 mm de diámetro, ubicados en la superficie. Se puede concluir que la variación de densidad de la muestra es de 7.31% y se debe más a los rechupes internos que a la porosidad de gas; esto también se puede apreciar en el análisis fotográfico, que de todos los defectos que se presentan, solo el 0.34% del área corresponden a poros, lo demás se observa que corresponde a rechupes internos.

Los rechupes internos se deben al frente de solidificación tipo dendrítico o nucleación independiente; ya que se produjo un enfriamiento rápido (coquilla fría), otra razón para la formación de estos tipos de frente es que la aleación tiene un amplio rango de solidificación.

6.4.3.7.2 Sección longitudinal

En la sección longitudinal se presenta gran variedad de microrechupes similar a la sección transversal de la misma muestra, estos microrechupes están distribuidos en toda la zona, pero se presenta en mayor cantidad cercano al centro de la pieza o rechupe externo.

Además de las picaduras superficiales que tiene la muestra son pocos, presenta sopladuras, que se formaron por gases que se no pudieron emerger al disminuir la solubilidad en el momento de la solidificación y quedaron atrapados.

6.4.3.8 Muestra 4A

6.4.3.8.1 Sección transversal

Esta sección transversal de la muestra indica gran cantidad de porosidades, mismas que presentan un diámetro que varía entre 0.38 – 1.6 mm presentes en toda el área. Su variación de densidad es de 6.96% y esto se debe a gran parte de las porosidades gaseosas presentes. El diagrama digital indica una gran presencia de poros en la superficie, dando como resultado un 0.39% de este tipo de defectos.

Esta muestra no presenta microrechupes en ninguna parte de la superficie, por lo que tuvo un enfriamiento rápido; en general las muestras coladas a presión atmosférica, presentan en menor cantidad los microrechupes que las coladas a baja presión.

6.4.3.8.2 Sección longitudinal

Esta sección tiene una presencia de picaduras considerable, distribuidos en toda el área; y el tamaño que presentan también es muy variable que va desde 0.35 mm de diámetro hasta 0.65 mm, y teniendo un porcentaje de 0.48% del análisis fotográfico. En general todos estas picaduras presentes, son por gases que provienen del hidrogeno del aire del medio ambiente que ingresaron a la metal liquido al momento de colar.

Y como se observó en la sección transversal de la probeta 4A, en esta zona también se realizó una inspección visual, sin poder divisar ningún microrechupe.

6.4.3.9 Muestra 4B

6.4.3.9.1 Sección transversal

Las porosidades de esta sección de la muestra tienen un gran diámetro, pero en menor cantidad que la muestra 4A, los diámetros de sus porosidades varían entre 0.35 mm y 1.6 mm, ubicados en los contornos de la superficie. En el análisis de fotográfico el porcentaje del área de poros es de 0.24%. Como característica de la prueba a baja presión, se aprecia microrechupes, en toda la zona de la muestra.

6.4.3.9.2 Sección longitudinal

En esta sección longitudinal las picaduras presentes son muy pocas, pero de un diámetro mayor que las presentadas en la probeta 4A; que además están distribuidas sobre la superficie de la muestra, y esto se lograr eliminar con mazarotas, porque lo demás de las superficie no presenta en gran cantidad picaduras.

Los microrechupes son algo característico presentes en las muestras a baja presión, aunque en algunos casos en menor o mayor cantidad, pero nunca falta en estas muestras.

6.4.3.10 Muestra 5B

Esta es la única prueba que se empleó como molde un tubo de cobre; en vista de los resultados obtenidos no se realizó la prueba a presión atmosférica. Tampoco se logró obtener una probeta sin defectos o en menor cantidad; esta muestra tiene un porcentaje de densidad del 8.92%, en la inspección visual se observa que gran parte de los defectos son poros de gas y pocos por rechupes internos, además presenta un 6.69% de porosidades en el análisis fotográfico.

La gran cantidad picaduras y sopladuras en la superficie se debe, principalmente al gas producido por la reacción del metal fundido con las paredes del molde.

6.4.3.11 Muestra 6A

En esta prueba se empleó otro molde metálico, siendo este molde de acero de bajo carbono. Las porosidades que se presentan son en gran cantidad y se encuentran distribuidos en la línea media de la muestra; además estos poros tienen un diámetro que varía entre 0.27 y 0.5 mm. La variación de densidad es del 0.25% y 0.21% para el análisis fotográfico, además se presenta pocos rechupes internos.

6.4.3.12 Muestra 6B

En esta probeta se puede apreciar un gran rechupe externo, en el centro de la muestra. Las porosidades presentes son en menor cantidad, pero tienen un diámetro mayor que la muestra 6A; presentándose un diámetro máximo de 2.07

mm. La variación de densidad es mayor que la probeta anterior, siendo del 3.16%; aunque en el análisis fotográfico la probeta 6A tiene mayor porcentaje de área de poros que para esta muestra que es del 0.15%.

La muestra presente rechupes internos, característico de las pruebas a baja presión, pero en menor cantidad que las pruebas anteriores que fueron realizadas en lingotera de hierro fundido.

6.4.3.13 Muestra 7A

6.4.3.13.1 Estudio preliminar

El material a fundir para esta prueba es chatarra de un aro de magnesio, que según especificaciones del *Metals Handbook volumen II – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials;* las aleaciones que se usan para aros de magnesio son las del tipo: AM60A y AM60B; que para la primera tiene los siguiente aleantes: 5% Al, 0.13% Mn, 0.5% Si, 0.35 Cu%, 0.2% Zn, 0.03% Ni y resto Mg (93%); y la segunda tiene los mismos aleantes, pero añadiéndole Hierro.

Para esta prueba se utiliza un molde metálico, debido a que si se utiliza un molde de arena, el metal fundido reacciona con la humedad de la arena al momento de colarse, por lo que puede producir inflamación de la colada.

Para fundir a presión atmosférica se necesita de sales de cobertura[54], para evitar que la colada reaccione con el oxígeno del aire (inflamación de la colada); estas sales tienen la siguiente composición: $MgCl_2$, KCl, CaF_2, $BaCl_2$ y MgO; y deben cumplir con los siguientes funciones:

- No interactuar con el magnesio o sus aleantes
- Temperatura de fusión de la sal menor que el del magnesio
- Tener buena fluidez para cubrir la superficie de la masa fundida

[54] TITOV N., YU. STEPANOV A.; "*Tecnología del Proceso de Fundición*"; Editorial Mir, Moscú; 1981

Sin embargo debido a que estas sales no están disponibles en el mercado se emplea sales de cobertura del galvanizado en caliente, que son las sales a base de cloruro de amonio y cloruro de zinc; que elimina el óxido de cinc fundido y tienen un punto bajo de fusión[55] (283° para $ZnCl_2$ y 338° para NH_4Cl), menor que la del magnesio. Esta sal cubre a la chatarra hasta un centímetro por encima del nivel del material y una vez fundido el magnesio se separa la sal del metal fundido y se puede realizar el colado.

En la figura 6.23 se puede ver la sal empleada para fundir las aleaciones de magnesio a presión atmosférica.

Figura 6.23 Sales de cobertura para el galvanizado en caliente

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos de las dos pruebas de fusión de magnesio a presión atmosférica y con sales de cobertura, se presenta a continuación:

Se tuvo ciertos problemas al realizar la primera prueba (7A), debido a que al momento de fundirse la sal, se produjo la inflamación de la colada (la sal fundida se iba al fondo del horno), desprendido llamaradas. Al instante de fundir el magnesio una pequeña cantidad de sal de la parte superior no se fundió, y al momento de colar la sal que no se fundió se quedó en el crisol y la sal fundida se introdujo en el molde. La cantidad de magnesio que se coló en el molde fue menor a la carga de chatarra cargada en el horno; Aunque este fenómeno se

[55] http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_cinc/26/03/2013.

puede reducir con la sal, pero por desconocimiento de las técnicas de su aplicación, no se obtiene resultados esperados.

Con la experiencia de la prueba 7A, la segunda prueba (8A) la carga de metal introducida al horno fue mayor y la misma cantidad de sal (20 – 40 g). Para esta prueba se tuvo la iniciativa de que al momento que el material este fundido mezclar la colada, para poder separar la sal (lo que no sucedió en la prueba 7A); aunque en el momento de mezclar (empleando un palo de madera), se desprendió llamas de la colada por un momento hasta lograr separar la sal fundida; se pudo apreciar que gran parte de la sal se quedó pegada en las paredes del crisol. Al momento de colar, con el mismo trozo de madera se retuvo a la sal en el crisol, para poder colar solo el metal fundido.

Los resultados obtenidos de las dos pruebas de fusión de magnesio a baja presión y con sales de cobertura, se presenta a continuación:

La primera prueba (7B), Durante el proceso de calentamiento del metal, no se observa ninguna reacción del magnesio (aunque solo se puede observar la parte superior de la chatarra); al llegar el punto de fusión la colada tiene un color naranja y gris, la presión absoluta de vacío al instante del colado fue de 1 Psi.

La segunda prueba (8B), mientras el material comenzó a calentarse empezó a producirse una pequeña llama en toda la chatarra. Al tratar de colar, el material que se había incinerado impedía salir el metal líquido, se abrió la cámara y hubo una mayor incineración de la chatarra, por lo que se retiró las partes de la chatarra que se inflamaron y se pudo colar algo de metal.

Se puede concluir que al fundir una aleación de magnesio a baja presión, esta reacciona con el oxígeno en menor proporción, es decir que la llama que se produce es de menor tamaño que al fundirse a presión atmosférica. Por lo que para tener unos resultados óptimos al fundir al vacío se debe tener rangos de vacío mucho menores a los obtenidos en la presente investigación.

Además se concluye que no solo se trata de evacuar el aire de la cámara para poder fundir magnesio, sino que además se debe crear una atmosfera

protectora[56], a base de hexafluoruro de azufre, dióxido de carbono y aire; aunque también es recomendable usar argón.

6.4.3.14 Muestra 7B

6.4.3.14.1 Sección transversal

La sección transversal de esta probeta, realizando una inspección visual no se observa picaduras, al utilizar el microscopio a un aumento 10X y 20X, se observó porosidades de gas, pero de un tamaño bien reducido; por lo que al inspeccionar la superficie a un aumento mayor 40X, estos poros presentan un diámetro de 0.09 mm, y que además no existe mucha presencia de estos; debido a esto en el análisis fotográfico tiene un porcentaje de porosidad de 0.08%.

Aunque la probeta si presento un rechupe interno, en el centro de la muestra que va desde la parte inferior hasta la superior; y este es el principal defecto que hace que disminuya la densidad relativa de la probeta, siendo menor a la de la probeta 8A.

En el rechupe interno se puede ver claramente, como fueron avanzando los frentes de solidificación, desde las paredes del molde hasta encontrarse en el centro, y en si las partes superiores se solidificación primero que las inferiores, impidiendo que el metal liquido supla las contracción de las zonas inferiores.

6.4.3.14.2 Sección longitudinal

Esta sección de la muestra es similar a la sección transversal, debido a que en su superficie no se observa picaduras, ni otro defecto causado por gas; tiene un porcentaje de 0.03% en el análisis fotográfico. A diferencia de la sección anterior, esta sección no presenta rechupes internos, la superficie está en su totalidad libre de defectos.

---

[56] Metals HandBook, Volumen II (1990) - *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials;* ASM International; 10th edition; USA.

6.4.3.15 Muestra 8A

Esta muestra presenta picaduras distribuidas en toda la zona, de diferentes tamaños, pero además en la superficie se presenta sopladuras de 1.18 mm de longitud; estos gases atrapados en el metal se introdujeron en el momento de vaciar en el molde la colada, ya que durante la fusión las sal le protege del aire de la atmosfera. Esta muestra tiene un porcentaje de 0.094% en el análisis fotográfico. No presenta microrechupes en toda el área.

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- De la construcción:

- El diseño, la construcción y el funcionamiento del prototipo cubre todos los parámetros fundamentales establecidos por el laboratorio.

- El diseño previo de cada uno de los elementos mecánicos construidos permite garantizar su correcto desempeño durante el funcionamiento del prototipo.

- El prototipo construido es de fácil montaje, desmontaje y mantenimiento, por lo que no se requiere de mano de obra calificada para operarlo.

- El prototipo construido resulta eficiente y ergonómico, por lo cual a no dudarlo, constituye una buena contribución al laboratorio de fundición para la elaboración de estudios y prácticas.

- Generales:

- De todas las pruebas realizadas; en la prueba 4, se obtuvo un resultado óptimo; ya que la muestra 4B tiene una variación de densidad de 3.67% menor que la de la muestra 4A, que es de 6.96%; aunque la prueba 4B tiene mayor cantidad se rechupes internos.

- Se pudo concluir que el enfriamiento es más lento con la cámara cerrada que abierta la cámara (ambos molde sin precalentamiento), debido a una mayor circulación de aire; y esto se vislumbra en las probetas coladas de la misma prueba, donde las muestras a bajas presiones (2B, 3B, 4B, 6B) tienen mayor presencia de microrechupes que las muestras a presión atmosférica (2A, 3A, 4A, 6A).

- Al fundir magnesio a baja presión, hubo una menor inflamación de la chatarra, que al fundirse a presión atmosférica. Y además en las macrografías hubo una contundente reducción de porosidades de gas, en la muestra 7B, en sus dos secciones; en comparación con la muestra 8A.

- La mayoría de poros de gas presentes en las muestras coladas a baja presión, son atrapados en el proceso de colado del metal líquido en el molde; y además por la interacción de la colada con la humedad residual en las paredes del molde producen gases como el hidrogeno, que son solubles en el aluminio fundido.

- Las porosidades de gran tamaño presentes en las probetas coladas a baja presión, ubicadas en la superficie de las muestras; se debe a que estas burbujas por su gran tamaño tratan emerger y son impedidas de salir por la capa de óxido que se forma rápidamente sobre la superficie, por el enfriamiento rápido.

- El uso de bajas presiones para reducir la formación de porosidades gaseosas en aleaciones de aluminio, es un método muy costoso (tecnología de vacío); que al aplicar este método, en algunas probetas si se pudo observar la reducción de porosidades de gas; aunque en estas mismas muestras presentaron gran cantidad de microrechupes.

7.2 RECOMENDACIONES

- De la construcción:

- Inspeccionar siempre los componentes principales del prototipo antes de su puesta en marcha.

- Para apagar la bomba de vacío se debe desconectar primero la manguera que la conecta con el prototipo, puesto que al momento de igualarse la presión dentro de la cámara con la atmosférica, se succiona el aceite de la bomba al interior.

- Recordar que antes de poner en marcha la bomba de vacío, el nivel de aceite se encuentre por el recomendado del fabricante para de esta manera aumentar la vida útil de dicha bomba.

- Se podría mejorar la funcionalidad del prototipo para realizar otro tipo de estudios e investigaciones posteriores, como un diseño cilíndrico para la cámara.

• Generales:

- Continuar con el estudio de reducción de porosidades que se plantea en esta investigación, pero utilizando rangos de vacío mayores a los utilizados en la misma, presiones inferiores a 1 Psi (68.95 mbar), en la medida de lo posible cercanos al rango 0.08-0.2 inHg[57].

- Utilizar sales de cobertura al fundir a baja presión el aluminio, ya que de esta forma se evita que se forma la capa de óxido en la superficie; permitiendo la salida de las burbujas de gas (atrapadas durante el colado en el molde), que tratan de subir a la superficie y son impedidas por esta capa protectora.

- Emplear el uso de enfriadores al fundir a baja presión, para tener un enfriamiento más rápido y mejor control de los microrechupes que se presentan en las probetas coladas por este método.

- Para fundir aleaciones de magnesio inyectar gases inertes (Dióxido de carbono, Argón) en la cámara después de haber extraído el aire y lograr un atmosfera controlada para fundir el metal.

- Al fundir a bajas presiones utilizar los moldes metálicos (coquilla) y no molde de arena en verde, debido a la humedad que retiene la misma; que aunque se realice el proceso de secado de la arena se vuelve una operación más tediosa y extremadamente demorosa. Además que de la arena seca, se podrían desprender pequeños granos y afectar a la forma final de la pieza fundida.

---

[57] Metals Handbook volume XV (1988) – Casting; ASM International; 9th Edition; USA.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVNER S.; (1988); *"Introducción a la Metalurgia Física"*; Segunda Edición; Editorial McGraw Hill; México.

2. TITOV N., STEPANOV A.; (1981); *"Tecnología del Proceso de Fundición";* Editorial Mir; Moscú.

3. ZAMORA R.; (2005); *"Estudio Experimental de la Formación de Porosidad por Atrapamiento de Aire durante la Etapa Lenta de Inyección en Maquinas de Fundición a Alta Presión"*; Universidad Politécnica de Cartagena; Tesis Doctoral.

4. HOWARD E.; (1962); *"Tratado Practico de Fundición"*; Segunda Edición; Editorial Aguilar S. A.; España.

5. HOFFMAN D., THOMAS J.; (1998); *"Handbook of Vacuum Science and Technology"*; Printed in the United States of America.

6. RIBA C.; (2002); "*Diseño Concurrente*", ETSEIB – UPC.

7. TIMOSHENKO S. y WOINOWSKY-KRIEGER S.; (1970); "*Teoría de Placas y Laminas*"; Ed. URMO; España.

8. BEER F., JOHNSTON R.; (2001); "*Mecánica de Materiales*"; Ed. McGraw-Hill; México.

9. FEODOSIEV V. I.; (1988); "*Resistencia de Materiales*"; Tercera Edición; Editorial Mir-Moscú; Rusia.

10. SHIGLEY J.; (2006); "*Diseño en Ingeniería Mecánica*"; Ed. McGraw-Hill; México.

11. DEUTSCHMAN A., MICHELS W; (1975); "*Diseño de Máquinas – Teoría y Práctica*"; Ed. Continental S.A.

12. STRANEO S., CONSORTI R.; (1969); "*El Dibujo Mecánico*"; Ed. Montaner y Simons; 1era Edición; Madrid.

13. HERRERA J.; "*Control de la porosidades en las piezas coladas: Análisis y experimentación con aleación a base de aluminio*"; Tesis; EPN; 1991.

14. GARRIDO R.; SÁNCHEZ V.; "*Determinación de la metodología para la obtención de aleaciones de aluminio de fundición maquinables sin poros*"; Tesis; EPN; 2011.

15. GIRALDO D., VÉLEZ J.; (2001); "*Estudio del Desgaste por Deslizamiento en Seco de algunos Plásticos*"; Articulo de Investigación; Medellín-Colombia.

16. GÁLVEZ José; (2008); "*Diseño, Fabricación e Instalación de un Equipo en Alto Vacío para preparar muestras de Películas delgadas de semiconductores"*; Pontificia Universidad Católica del Perú; Tesis.

17. LEÓN Juan; (2001); "*Diseño y Calculo de Recipientes a Presión".*

18. ROARK; "*Formulas Stress & Strain*"; Flat Plates; Case N° 8.

19. PISARENKO G., YAKOVLEV A.; (1979); "*Manual de Resistencia de Materiales*"; Editorial Mir Moscú; Rumania.

20. ORDOÑEZ Stella; "*Técnicas Experimentales de Metalurgia*"; Dpto. de Ingeniería Mecánica; Universidad Santiago de Chile.

21. SEVILLA R., RUS CARLBORG G., MARTÍNEZ E. (2007); "Placas Delgadas Mediante Métodos Clásicos"; Editorial FuenteNueva; España.

22. PANTENELLA A. y ACTIS M. (2008); "*Placas Planas Rectangular de Espesor Delgado*"; Editorial UNPL; Argentina.

23. FOSECO (1999); John R. BROWN; "*Non-Ferrous Foundryman's Handbook*"; eleven edition; Editorial Butterworth Heinemann, Gran Bretaña.

24. Metals Handbook volume II (1990) – *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*; ASM International; 10th Edition; USA.

25. Metals Handbook volume XV (1988) – *Casting;* ASM International; 9th Edition; USA.

26. ASTM International E3-11 (2011): *"Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens"*; United States.

27. BLANK L., TARQUIN A.; (1999); "*Ingeniería Económica*"; Ed. McGraw Hill; 4ta edición; Colombia.

28. VELASTEGUI Tito; (2009); *"Elementos de Maquinas"*; EPN; 2da Edición; Quito;

29. TECNOVAC; *"Curso de Vacío";* Tecnología de vacío S.L.

30. Instituto Tecnológico Metalmecánico (AIMME);(2009) Observatorio Tecnológico del Metal (OTE); *"Procesos de Fusión y Colada del Titanio y Aleaciones";* Valencia-España.

31. VACUUBRAND (2010); "*Tecnología de Sistemas de Vacío-Catalogo 2010*"; Alemania.

32. Revista BETICO; Catalogo General (2004): "*Vacío-Presión-Líquidos*"; Rietschle Thomas.

33. Artículo de Investigación (2009): Revista Metalúrgica: "*Equipo de fusión al vacío para la determinación cuantitativa del gas atrapado en piezas fundidas*"; J.J. Hernández-Ortega, R. Zamora, F. Faura, J. López; Volumen 45; Madrid.

34. IVAN BOHOMAN C.A.; Catálogo de productos; Acero Inoxidable AISI 304, Planchas.

35. http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_cinc/26/03/2013.

36. Software SolidWorks Office Premium 2011, USA.

ANEXOS

ANEXO 1

COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

1.1 Composición Química

1.2 Propiedades Mecánicas Típicas para Planchas Laminadas en Frio

1.3 Propiedades Físicas

1.1 Composición Química

1.2 Propiedades Mecánicas Típicas para Planchas Laminadas en Frio

1.3 Propiedades Físicas

ANEXO 2

CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS PLACAS DE LA CÁMARA DE VACÍO EN BASE A CIERTOS CRITERIOS

2.1 Cálculo del Espesor de las Placas de la Cámara de Vacío mediante Semejanza a una Viga doblemente empotrada.

2.2 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Placas Rectangulares con todos sus Lados Empotrados según Roark.

2.3 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Flexión de Placas Rectangulares con sus Cuatro Lados Empotrados propuesto por Feodosiev.

2.4 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Flexión de Placas Rectangulares Empotradas en todo el Contorno según el criterio de Timoshenko y Woinowsky-Krieger.

2.1 Cálculo del Espesor de las Placas de la Cámara de Vacío mediante Semejanza a una Viga doblemente empotrada. [58]

El problema del espesor de la cámara de vacío puede ser resuelto analizando la zona más crítica de dicha cámara. Como se aprecia en la siguiente figura, en la cara superior de la cámara, se tiene una zona critica, considerando que la placa más afectada es la superior debido a la consideración de que la presión atmosférica actúa de manera perpendicular al centro de la tierra; esto debido a que sirve de unión para dos agujeros de forma cuadrilátera, el uno que sirve de compuerta para cargar al horno y el otro que a su vez permite visualizar el interior de la cámara, a manera de visor.

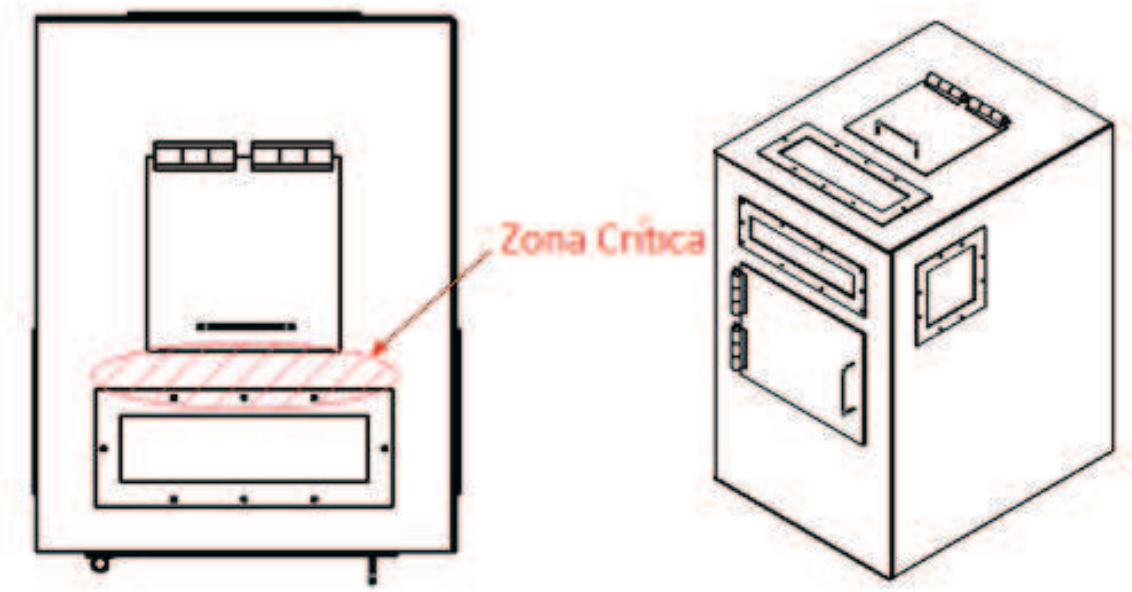


Figura A 1 Geometría de identificación de la Zona Crítica

Fuente: Propia

Es necesario mencionar que esta aproximación de cálculo se hace pensando en el debilitamiento que sufre la pared de la cámara producto de los orificios antes mencionados, es así que este análisis sugiere una buena aproximación de cálculo.

---

[58] GÁLVEZ José; (2008); *"Diseño, Fabricación e Instalación de un Equipo en Alto Vacío para preparar muestras de Películas delgadas de semiconductores"*; Pontificia Universidad Católica del Perú; Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico.

El caso de estudio se puede aproximar al de una viga doblemente empotrada soportando una presión uniformemente distribuida, siendo esta la presión atmosférica.

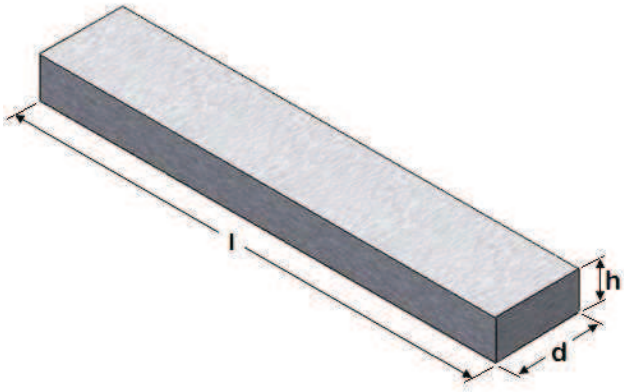


Figura A 2 Geometría de la Zona Crítica y semejanza a una Viga

Fuente: Propia

En donde:

l = 625 [mm]

d = 100 [mm]

h = espesor [mm]

Consideraciones para el cálculo:

1. La placa es plana de espesor uniforme, de material homogéneo e isotrópico.
2. La viga es recta, y en el caso de que existiera alguna curvatura, esta ha de estar contenida en el plano de flexión y su radio de curvatura ha de ser por lo menos 10 veces al canto de la viga.
3. La sección transversal de la viga es uniforme.
4. La viga tiene por lo menos un plano longitudinal de simetría.
5. Todas las cargas y reacciones son perpendiculares al eje de la viga y se encuentran en el plano longitudinal de simetría.

6. Las cargas de trabajo no sobrepasan el límite elástico.

La carga distribuida por toda la superficie (figura A 3 (a)) se la puede reducir a un plano principal (figura A 3 (b)), para de esta manera realizar los cálculos mediante una carga lineal. [59]

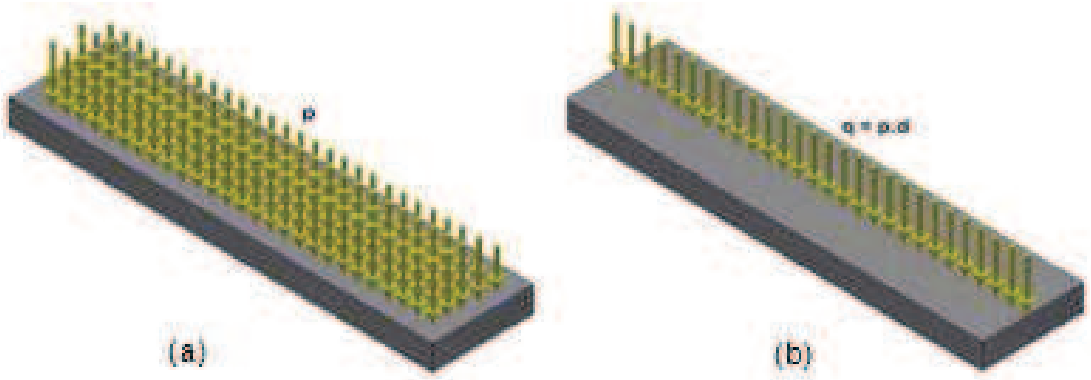


Figura A 3 Carga Distribuida por toda la Superficie de la Zona Critica

Fuente: PISARENKO G., YAKOVLEV A.; (1979); *"Manual de Resistencia de Materiales"*; Editorial Mir Moscú; Rumania; p. 101

En donde:

p = Presión Atmosférica a 2800 [m] = 72.809 [kPa] = 72.809 (10^{-3}) [MPa]

q = p.d = $72.809\ (10^{-3})\ \frac{N}{mm^2}\ .(100\ mm) =\ 7.2809\ \frac{N}{mm}$

De esta manera la carga lineal que actúa sobre la viga resulta de la siguiente manera:

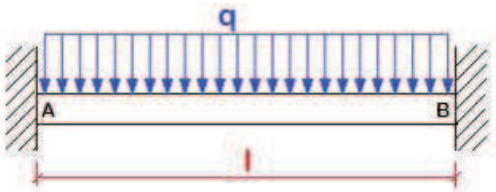


Figura A 4 Carga Lineal que actúa sobre la Viga

Fuente: Propia

[59] PISARENKO G., YAKOVLEV A.; (1979); *"Manual de Resistencia de Materiales"*; Editorial Mir Moscú; Rumania; p. 101

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre de la viga de la siguiente figura, las fuerzas y momentos en los extremos A y B deben ser iguales debido a la simetría de la carga además de la geometría, satisfaciendo la ecuación de equilibrio $\left(\sum F_y = 0\right)$.

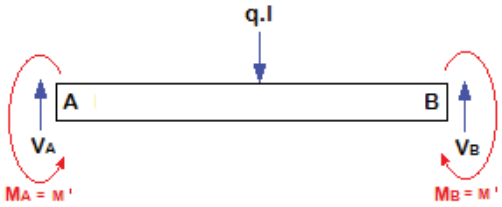


Figura A 5 Diagrama de Cuerpo Libre de la Viga

Fuente: Propia

$$\sum F_y = 0$$

Por simetría: $V_A = V_B$

$$V_A = V_B = \frac{q.l}{2} = 2275.28\ [N]$$

La viga es estáticamente indeterminada de primer grado, donde M' es redundante, usando el segmento de la viga mostrada en la siguiente figura, el momento interno M se puede expresar en términos de M' según la [Ec.A-2.1].

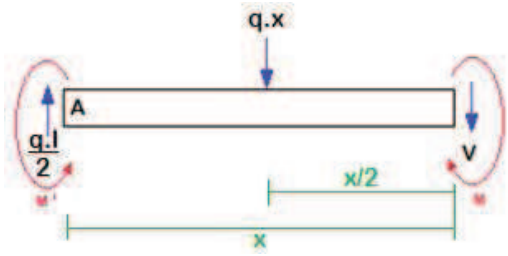


Figura A 6 Diagrama de Cuerpo Libre de un segmento de la Viga desde el extremo A

Fuente: Propia

$$\boldsymbol{M = \frac{q.l}{2}\, x - \frac{q.x^2}{2} - M'} \qquad [\boldsymbol{Ec.A - 2.1}]$$

Empleando las ecuaciones [Ec.A-2.2], [Ec.A-2.3] y [Ec.A-2.4] correspondientes para deflexiones de vigas estáticamente indeterminadas baja carga distribuida y extremos empotrados [Hibbeler (1997), p. 631].

$$EI\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{q.l}{2}x - \frac{qx^2}{2} - M' \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.2}]$$

$$EI\frac{dv}{dx} = \frac{q.l}{4}x^2 - \frac{qx^3}{6} - M'x + c_1 \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.3}]$$

$$EIv = \frac{q.l}{12}x^3 - \frac{qx^4}{24} - \frac{M'x^2}{2} + c_1\,x + c_2 \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.4}]$$

Según las condiciones de frontera se determinan las incógnitas c_1 y c_2 como se ilustra a continuación:

$$v = 0\ en\ x = 0\ \rightarrow\ c_2 = 0$$

$$\frac{dv}{dx} = 0\ en\ x = 0\ \rightarrow\ c_1 = 0$$

$$v = 0\ en\ x = l\ \rightarrow\ M' = \frac{q.l^2}{12}$$

A continuación se tienen los diagramas de Fuerza Cortante y de Momento Flector:

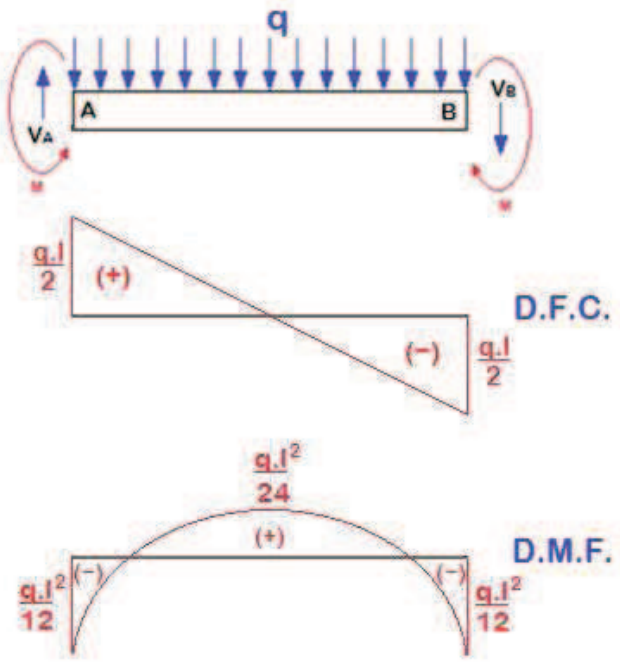


Figura A 7 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector para la Viga

Fuente: PISARENKO G., YAKOVLEV A.; (1979); *"Manual de Resistencia de Materiales"*; Editorial Mir Moscú; Rumania; p. 352

Reemplazando los valores correspondientes en la siguiente tabla para los extremos y el punto medio de la viga se tiene:

Tabla A 1 Cargas y Momentos para las diferentes posiciones de estudio

Extremo A	Punto medio de la viga	Extremo B
x = 0	x = l/2	x = l
V = 2275.28 [N]	V = 0 [N]	V = -2275.28 [N]
M = -237008.46 [N.mm]	M = 118504.23 [N.mm]	M = -237008.46 [N.mm]

Fuente: Propia

La sección transversal es simétrica por lo que el eje centroidal pasa por el centroide de la sección. Por lo que:

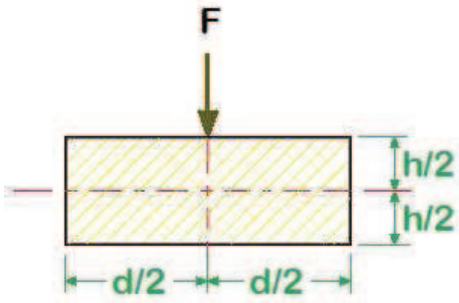


Figura A 8 Sección Transversal de la Viga

Fuente: Propia

$$I_z = \frac{1}{12}.d.h^3$$

$$I_z = \frac{1}{12}.100.h^3$$

$$I_z = 8.333h^3\ [mm^4]$$

La distribución de esfuerzos cortantes en esta sección será máxima en el eje centroidal, mientras que los esfuerzos normales producidos por flexión son máximos en los extremos y nulos en el eje centroidal, tal como se ilustra en la siguiente figura.

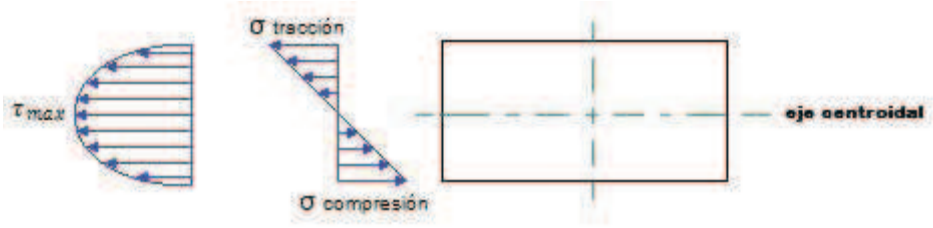


Figura A 9 Distribución de Esfuerzos para la Sección de la Viga

Fuente: Propia

El esfuerzo normal por flexión de una viga se calcula mediante la ecuación [Ec.A-2.5], mientras que el esfuerzo cortante máximo se calcula con la ecuación [Ec.A-2.6]. [60]

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}.c}{I_z} \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.5}]$$

$$\tau_{max} = \frac{3.V}{2.A} \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.6}]$$

En donde para el caso a considerar con la nomenclatura empleada, se reemplazan las constantes siguientes:

$$c = \frac{h}{2} = distancia\ al\ centroide\ de\ la\ seccion\ [mm]$$

$$A = 100\ h = area\ de\ la\ seccion\ rectangular\ [mm^2]$$

Tabla A 2 Distribución de Esfuerzos para los diferentes puntos de análisis de la viga

	Parte Superior		Eje Centroidal		Parte Inferior	
	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]
Extremo A x = 0	$\frac{-14221.08}{h^2}$	0	0	$\frac{34.13}{h}$	$\frac{-14221.08}{h^2}$	0
Centro x = l/2	$\frac{7110.54}{h^2}$	0	0	0	$\frac{7110.54}{h^2}$	0
Extremo B x = l	$\frac{-14221.08}{h^2}$	0	0	$\frac{-34.13}{h}$	$\frac{-14221.08}{h^2}$	0

[60] SHIGLEY J.;(1989); *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Ed. McGraw Hill; 4ta edición; México; p. 54 y p. 67

Conociendo que el factor se seguridad está dado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{S_y}{|\sigma_{max}|} \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.7}]$$

Empleando el mismo valor de factor de seguridad escogido en el Capítulo 4 de: n = 1.4 y reemplazándolo en la ecuación [Ec.A-2.7]; el valor del espesor resulta de:

$$h = 8.15\ mm$$

2.2 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Placas Rectangulares con todos sus Lados Empotrados según Roark [61]

Es necesario considerar el cálculo de los esfuerzos y máxima deflexión que se originarían si consideramos las paredes de la cámara como si no tuviesen ningún orificio, es decir placas planas macizas.

Este cálculo es necesario puesto que bajo la consideración anterior, la presión que se aplicará a las paredes ofrecerá una aproximación bastante significativa del espesor de dichas planchas.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la presión se define como fuerza por unidad de área, para este caso de estudio la presión se mantiene constante, sin embargo, el área sobre la cual trabaja la presión ha variado considerablemente respecto al caso de análisis anterior, como consecuencia a esto, la fuerza se incrementa de manera proporcional al área de contacto.

Es evidente entonces, que es necesario estudiar el caso de la misma placa superior de la cámara, en donde actúa perpendicularmente la presión atmosférica, siendo este el caso critico. De esta manera las dimensiones corresponden a 795 [mm] x 625 [mm], como se aprecia en la figura A 10.

---

[61] ROARK; *"Formulas Stress & Strain";* Flat Plates; Case No. 8; p.508

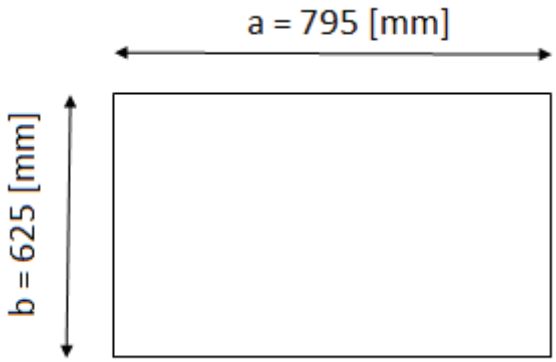


Figura A 10 Placa Plana Rectangular

Fuente: Propia

Los esfuerzos y deflexiones máximos se presentan en el centro de la placa y son calculados mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma_{max} = \frac{\beta_2 . q . b^2}{h^2} \qquad [\boldsymbol{Ec. A - 2.8}]$$

$$y_{max} = \frac{\propto . q . b^4}{E . h^3} \qquad [\boldsymbol{Ec. A - 2.9}]$$

Así mismo, las constantes β_2 y α se obtienen mediante la tabla A 3

Tabla A 3 Coeficientes para Cálculos de Placas Planas Rectangulares de Roark

a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞
β_2	0.1386	0.1794	0.2094	0.2286	0.2406	0.2472	0.2500
α	0.0138	0.0188	0.0226	0.0251	0.0267	0.0277	0.0284

Fuente: ROARK; *"Formulas Stress & Strain";* Flat Plates; Case No. 8; p.508

Reemplazando los valores de constantes disponibles de datos, como son: q = 72.809 (10^{-3}) [MPa], a = 795 [mm], b = 625 [mm], E = 193 [GPa] y mediante los datos obtenidos de la relación a/b, se pueden calcular los valores de σ_{max} y y_{max} en función del espesor h:

Es así que: para el valor de la relación a/b = 1.272; mediante interpolación con los valores de la tabla anterior, se obtienen los valores de: β_2 = 0.1902 y α = 0.0202; y se tienen de resultados:

$$\sigma_{max} = \frac{5409.48}{h^2}\ [MPa] \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.10}]$$

$$y_{max} = \frac{1162.78}{h^3}[mm] \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.11}]$$

Con el valor de σ_{max}, además de conocer el factor de seguridad que para este caso se escoge n = 1.4 y el valor de Sy para el Acero Inoxidable AISI 304; mediante la [Ec. A-2.7], se obtiene el valor del espesor t:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

$$1.4 = \frac{300}{\frac{5409.48}{h^2}}$$

Despejando el valor del espesor, resulta: h = 5.02 [mm]

Reemplazando el valor del espesor obtenido anteriormente, en la [Ec. A-2.11], se obtiene un valor de deflexión máxima de: y_{max} = 9.19 [mm], que sin embargo es demasiado alto considerando que las deflexiones del eje neutro de la placa deben ser de máximo 10% del espesor según la teoría propuesta, es por esto que se procede a recalcular el espesor en base a una deflexión máxima del 10% del espesor h; es así que se procede a plantear la [Ec. A-2.11] de la siguiente manera:

$$0.1\,h = \frac{1162.78}{h^3}$$

De esta manera se obtiene un valor de: h = 10.38 [mm], el mismo que resulta bastante adecuado con respecto a la teoría de placas.

2.3 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Flexión de Placas Rectangulares con sus Cuatro Lados Empotrados propuesto por Feodosiev [62]

El cálculo de placas rectangulares resulta bastante complicado, ante todo, porque las flechas y las tensiones en las placas no simétricas son funciones, no de un solo argumento, sino de dos argumentos independientes. En el caso de una placa rectangular, en calidad de argumentos se eligen generalmente las magnitudes x e y correspondientes al sistema de coordenadas cartesianas. La ecuación diferencial de la placa no circular es una ecuación en derivadas parciales y se resuelve, generalmente, mediante series. Sin embargo este problema se lo puede extender a algunos resultados experimentales de la teoría de las placas rectangulares.

En el caso de que la placa se encuentre empotrada en sus cuatro lados, la flecha máxima ocurrirá en el centro de la placa, cuyo valor será igual a:

$$w_{max} = \propto \frac{P.a^4}{E.h^3} \qquad [\boldsymbol{Ec.A-2.12}]$$

En donde:

P = 72.809 (10^{-3}) [MPa]

a = 625 [mm]

E = 193 [GPa]

α depende de la relación b/a obtenido de la tabla A 4

b = 795 [mm]

h = espesor de la placa

---

[62] FEODOSIEV V. I.; (1988); *"Resistencia de Materiales"*; Ed. MIR - Moscu; 3era Edicion; Rusia; p. 332

Tabla A 4 Coeficientes para Cálculos de Placas Planas Rectangulares según Feodosiev

a/b	1	1.25	1.50	1.75	2	∞
α	0.0138	0.0199	0.0240	0.0264	0.0277	0.0284

Fuente: FEODOSIEV V. I.; (1988); *"Resistencia de Materiales"*; Ed. MIR - Moscú; 3era Edicion; Rusia; p. 334

Según la relación a/b; se tiene un valor de 1.272, y mediante interpolación usando la tabla anterior se obtiene un valor de α = 0.02026

Ahora reemplazando los valores anteriores en la expresión de la flexión máxima en el centro de la placa, asumiéndose un 10% del espesor como límite, se tiene de resultado:

$$0.1\,h = \ 0.02026\frac{72.809(10^{-3})(625)^4}{(193000)h^3}$$

Y despejando el valor de t se obtiene de resultado:

h = 10.39 [mm]

2.4 Cálculo del Espesor de las Placas por el Método de Flexión de Placas Rectangulares Empotradas en todo el Contorno según el criterio de Timoshenko y Woinowsky-Krieger [63]

Para el caso de una placa rectangular uniformemente cargada, las flechas y los momentos en este caso son simétricos con respecto a los ejes de coordenadas indicados en la Figura A 11.

[63] TIMOSHENKO S. y WOINOWSKY-KRIEGER S.; (1975); *"Teoría de Placas y Laminas"*; Ed. Urmo; 3era Edicion; Rusia; p. 225

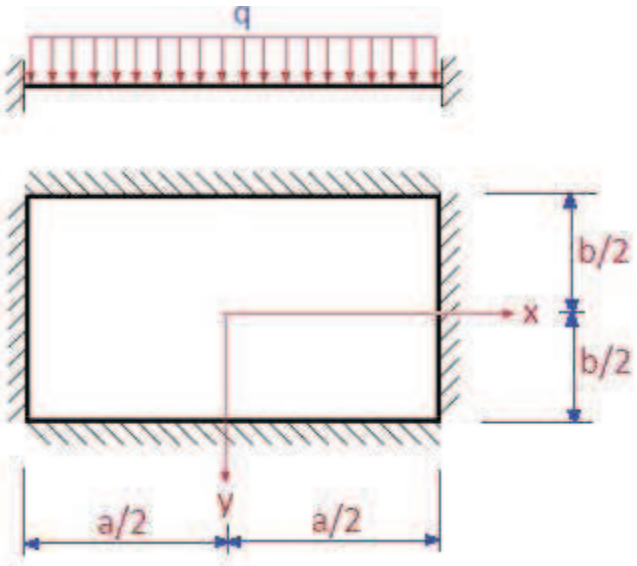


Figura A 11 Placa Rectangular cargada Uniformemente empotrada en todo su contorno

Fuente: Propia

Es por esta razón que para este caso se procede a realizar el cálculo de la flexión máxima de la placa crítica en base a la siguiente tabla:

Tabla A 5 Coeficientes para Cálculos de Placas Planas Rectangulares según Feodosiev

b/a	$(w)_{x,y=0}$
1.0	0.00126 $q.a^4/D$
1.1	0.00150 $q.a^4/D$
1.2	0.00172 $q.a^4/D$
1.3	0.00191 $q.a^4/D$
1.4	0.00207 $q.a^4/D$
1.5	0.00220 $q.a^4/D$
1.6	0.00230 $q.a^4/D$
1.7	0.00238 $q.a^4/D$
1.8	0.00245 $q.a^4/D$
1.9	0.00249 $q.a^4/D$
2.0	0.00254 $q.a^4/D$
∞	0.00260 $q.a^4/D$

Fuente: TIMOSHENKO S. y WOINOWSKY-KRIEGER S.; (1975); *"Teoría de Placas y Laminas"*; Ed. Urmo; 3era Edicion; Rusia; p. 230

En donde:

b/a = 1.272

a = 625 [mm]

q = 72.809 (10^{-3}) [MPa]

$$D = \frac{E.h^3}{12\ (1-v)} = \frac{193000\ h^3}{12(1-0.3)} = 22976.191\ h^3$$

Mediante interpolación empleando la tabla anterior, se obtiene que para un valor de b/a = 1.272, la expresión a usar resulta: 0.001857 q.a^4/D.

Igualmente que para los casos anteriores propuestos por los autores citados, se procede a realizar el cálculo de la flexión en el centro de la placa, empleando 10% del espesor como límite máximo; es así que se tiene:

$$0.1\ h = \ 0.001857 \frac{72.809(10^{-3})(625)^4}{(22976.191)h^3}$$

Posteriormente despejando el valor del espesor de la placa se tiene de resultado:

h = 9.73 [mm]

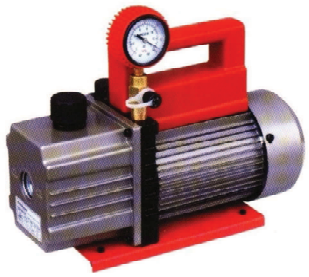
ANEXO 3

BOMBA DE VACÍO

Edisson

Vacuum Pump

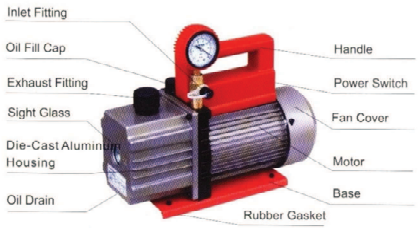
OPERATING MANUAL



Edisson
11490 N.W.39 ST.
MIAMI,FL.33178
www.EdissonElectric.com
PH. (305) 463-9998 FAX (305) 463-9161

Please read the operating manual carefully before using and reserve it porperly

I. Pump Components



II. Operating Manual

1.Before using your vacuum pump

In all cases, motors are designed for operating voltages plus or minus 10% of the normal rating. Single voltage motors are supplied fully connected and ready to operate.

(1)Check to be sure the voltage and frequency at the outlet match the specifications on the pump motor decal. Check the ON-OFF switch to be sure it is in the OFF position before you plug the pump into an outlet. Remove and discard the exhaust plug from the end of the pump's handle.

(2)The pump is shipped without oil in the reservoir. Before starting the pump, fill it with oil. Remove the OIL FILL cap and add oil until oil just shows in the bottom of the sight glass. The approximate oil capacity of the pump is 220~380ml. (reference the technical data).

(3)Replace the OIL FILL cap and remove the cap from one of the inlet ports. Turn the motor switch to ON. When the pump runs smoothly, replace the cap on the inlet port. This may take from two to 30 seconds depending on the ambient temperature. After the pump runs for approximately one minute, check the sight glass for proper oil level should be even with the sight glass OIL LEVEL line. Add oil if necessary.

Note: When the pump is running, the oil level should be even with the line on the sight glass. Under filling will result in poor vacuum performance. Over filling can result in oil blowing from the exhaust.

2.To shut down your pump after use

To help prolong pump life and promote easy starting, follow these procedures for shutdown.

(1)Chose the manifold valve between the pump and the system.

(2)Remove the hose from the pump inlet.

(3)Cap the inlet port to prevent any contamination or loose particles from entering the port.

III.To Maintain Your High Vacuum Pump

1.Vacuum pump oil:

The condition and type of oil used in any high vacuum pump are extremely important in determining the ultimate attainable vacuum. We recommends the use of High Vacuum pump Oil. This oil has been specifically blended to maintain maximum viscosity at normal running temperatures and to improve cold weather starts.

2.Oil change procedure

(1)Be sure the pump is warmed up.

(2)Remove the OIL DRAIN cap. Drain contaminated oil into a suitable container and dispose of properly. Oil can be forced from the pump by opening the inlet and partially blocking the exhaust with a cloth while the pump is running .Do not operate the pump for more than 20 seconds using this method.

(3) When the flow of oil has stopped, tilt the pump forward to drain residual oil.

(4)Replace the OIL DRAIN cap. Remove the OIL FILL cap and fill the reservoir with new vacuum pump oil until the oil just shows at the bottom of the sight glass. The approximate oil capacity of the pump is 220~380ml.(reference the technical data).

(5)Be sure the inlet ports are capped, then turn on the pump. Allow it to run for one minute, then check the oil level. If the oil is below the sight glass OIL LEVEL line, add oil slowly(with the pump running)until the oil reaches the OIL LEVEL line. Replace the OIL FILL cap, making sure the inlet is capped and the drain cap is tight.

(6)a) If the oil is badly contaminated with sludge that forms when water is allowed to collect in the oil, you may need to remove the oil reservoir cover and wipe it out.

b) Another method of dealing with heavily contaminated oil is to force the oil from the pump reservoir. To do this ,allow the pump to run until it is warmed up. While the pump is still running, remove the oil drain cap. Slightly restrict the exhaust.

This will back-pressure the oil reservoir and force the oil from it, carrying more contaminants. When the oil ceases to flow, turn off the pump.

Repeat this procedure as required until the contamination is removed.

Replace the OIL DRAIN cap and refill the reservoir to the proper level with fresh pump oil.

IV. Troubleshooting Guide

Your pump has been designed for dependable use and long life. If something should go wrong, however, the following guide will help you get pump back into service as quickly as possible.

If disassembly of the pump is required, please check your warranty. The warranty may be voided by misuse or customer tampering which results in the pump being inoperable.

1.Failure to start

Check the line voltage. The pumps are designed to start at ±10% line voltage (loaded)at 41°F.At extremes, however, switching between the start and run windings may occur.

2.Oil leakage

(1) Be sure the oil is not a residual accumulation from spillage, etc.

(2)If leakage exists, the module cover gasket or the shaft seal may need replacing. If leakage exists in the area of the oil drain plug, you may need to reseal the plug using a commercial pipe thread sealer.

3.Failure to pull a good vacuum

(1)Be sure the vacuum gauge and all connections are in good condition and leakfree.You can confirm leakage by monitoring the vacuum with a thermistor gauge while applying vacuum pump oil at connections or suspected leak points. The vacuum will improve briefly while the oil is sealing the leak.

(2)Be sure the pump oil is clean. A badly contaminated pump may require several oil flushes.

(3)Be sure the oil is at the proper level. For maximum pump operation, the oil must be even with the OIL LEVEL line on the sight glass when the pump is running. Do not overfill-operating temperatures will cause the oil to expand ,so it will appear at a higher level than when the pump is not running. To check the oil level, start the pump with the inlet capped, Check the oil level in the sight glass. Add oil if necessary.

V.Technical Parameter

Item No.		AVP501		AVP502		AVP802	
Voltage		220V/50Hz	110V/60Hz	220V/50Hz	110V/60Hz	220V/50Hz	110V/60Hz
1.Flow Rate	l/min	115	138	115	138	184	220
	CFM	4.2	5.0	4.2	5.0	6.5	8.0
2.Ultimate Vacuum		5Pa		$3x10^{-1}$ Pa		$5x10^{-1}$ Pa	
		150 microns		30 microns		40 microns	
3.Stage		1		2		2	
4.Power		1/3HP		1/2HP		3/4HP	
5.Inlet Port		1/4" Flare		1/4" Flare		1/4" Flare	
6.Oil Capacity		250 ml		340 ml		550ml	
7.Dimensions(mm)		322X124X224		340X138X240		385X140X280	
8.Weight(kg)		8.9kg		11.4kg		22.1kg	

ANEXO 5

DATOS RESUMIDOS DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS REALIZADO PARA CADA PRUEBA E INSTRUCTIVO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MOLDES PARA EL COLADO DE LAS PROBETAS

Resumen de datos Representativos de los Protocolos de Pruebas

Prueba: IA			
Encendido del Horno [Hora]:			5:00
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
5:00	1600	0	200
5:15	2000	5	200
5:26	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			5:47
Fusión [min]:			47
Colado [Hora]:			5:48

Prueba: IB			
Encendido del Horno [Hora]:			3:55
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
3:55	1600	0	200
4:05	1800	0	200
4:20	2000	5	200
4:35	2100	5	300
4:40	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:50
Fusión [min]:			55
Colado [Hora]:			4:51

BOMBA DE VACÍO	
Hora	Presión [psi]
3:55	3.5
4:10	2
4:20	1.5
4:38	1

Prueba: 2A			
Encendido del Horno [Hora]:			4:22
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
4:22	1600	0	200
4:26	1800	0	200
4:38	2000	5	200
5:00	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			5:06
Fusión [min]:			44
Colado [Hora]:			5:07

Prueba: 2B			
Encendido del Horno [Hora]:			3:25
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
3:25	1600	0	200
3:30	1800	0	200
3:40	2000	5	200
3:58	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:10
Fusión [min]:			45
Colado [Hora]:			4:11

BOMBA DE VACÍO	
Hora	Presión [psi]
3:29	3.5
3:38	2.5
3:48	2
4:10	1

Prueba: 3A			
Encendido del Horno [Hora]:			4:09
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
4:09	1600	0	200
4:17	1800	0	200
4:33	2000	5	200
4:48	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:52
Fusión [min]:			43
Colado [Hora]:			4:53

Prueba: 3B			
Encendido del Horno [Hora]:			2:50
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
2:50	1600	0	200
3:00	1800	0	200
3:06	2000	5	200
3:27	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			3:43
Fusión [min]:			53
Colado [Hora]:			3:44

BOMBA DE VACÍO	Hora	Presión [psi]
	2:55	3.5
	3:05	2.5
	3:12	2
	3:20	1

Prueba: 4A			
Encendido del Horno [Hora]:			3:18
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
3:18	1600	0	200
3:31	2000	5	200
3:54	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:00
Fusión [min]:			42
Colado [Hora]:			4:01

Prueba: 4B			
Encendido del Horno [Hora]:			4:15
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
4:15	1600	0	200
4:31	1900	5	200
4:40	2000	5	200
5:05	2100	5	300
Apagado del Horno [Hora]:			5:08
Fusión [min]:			53
Colado [Hora]:			5:09

BOMBA DE VACÍO	Hora	Presión [psi]
	4:15	3
	4:40	2
	4:58	1.5
	5:05	1

Prueba: 6A			
Encendido del Horno [Hora]:			4:38
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
4:38	1600	0	200
4:44	1800	0	200
4:50	2000	5	200
5:02	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			5:06
Fusión [min]:			28
Colado [Hora]:			5:07

Prueba: 6B			
Encendido del Horno [Hora]:			3:28
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
3:28	1600	0	200
3:40	1800	0	200
3:58	2100	5	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:10
Fusión [min]:			42
Colado [Hora]:			4:11

BOMBA DE VACÍO	Hora	Presión [psi]
	3:34	2.5
	3:51	1.5
	4:10	1

Prueba: 1B			
Encendido del Horno [Hora]:			5:54
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
5:54	1600	0	200
6:02	1800	0	200
6:25	2000	5	200
6:40	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			6:48
Fusión [min]:			52
Colado [Hora]:			6:49

BOMBA DE VACÍO	Hora	Presión [psi]
	5:57	3.5
	6:13	2.5
	6:19	2
	6:25	1

Prueba: 5B			
Encendido del Horno [Hora]:			3:53
Presión de agua [psi]:			60
Hora	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Voltaje [V]
3:53	1600	0	200
3:57	1800	0	200
4:07	2000	5	200
4:18	2100	5	300
4:30	2200	10	300
Apagado del Horno [Hora]:			4:34
Fusión [min]:			41
Colado [Hora]:			4:35

BOMBA DE VACÍO	Hora	Presión [psi]
	3:53	3
	4:00	2
	4:15	1.52
	4:33	1

INSTRUCTIVO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MOLDES DE LAS PROBETAS PARA EL COLADO A BAJAS PRESIONES.

1. OBJETIVO

Establecer los pasos a seguir en el proceso de elaboración de moldes por el método de moldeo manual en verde para la fabricación de las probetas cilíndricas para el colado a presiones bajas.

2. ALCANCE

Abarca el proceso de moldeo manual en verde en dos cajas y 2 modelos por cada una, una a caja destina a ser fundida a la presión de Quito y la otra a ser fundida a presiones bajas.

3. JUSTIFICACIÓN

Para lograr una correcta evaluación del proceso de colado a presiones bajas, es necesario que las dos cajas tengas los mismos parámetros de moldeo; como es tiempo de secado, porcentaje de humedad, etc.

4. RESPONSABILIDADES

La persona encargada del procedimiento de fundición es el responsable de hacer cumplir la presente instrucción.

La persona que moldea la mezcla tiene la responsabilidad de cumplir lo establecido en esta instrucción.

5. REFERENCIAS

No se aplica.

MATERIALES

- Grafito en polvo.
- Mezcla de moldeo.

- Arena Sílice.

EQUIPOS

- No se aplica.

INSTRUMENTOS

- Espátula.
- Lanceta.
- Cuchara.
- Punzón.
- Martillo.
- Guías de ensamblaje.
- Regla metálica.
- Pulverizador.
- Brocha.
- Cajas de moldeo.
- Pala.
- Apisonador de madera.

PREPARACIÓN PARA COMENZAR LA ACTIVIDAD

Preparación de los modelos.

- Revisar las dimensiones de los modelos cilíndricos (Diámetro 40mm y 80mm de largo); y comprobar los ángulos de salida de los modelos.

Preparación de la mezcla de moldeo.

- Se debe preparar la mezcla de moldeo a ser utilizada, y tiene que cumplir con las siguientes características:

Humedad: 6 – 8 %

Bentonita: 5 -7 %

Resistencia al Corte: 1 – 2 psi

Resistencia a la Compresión: 4.5 – 5.5 psi

Preparación de la caja de moldeo.

- Limpiar la caja de moldeo de los residuos de mezclas anteriores y óxido.

SECUENCIA ORDENADA DE LAS OPERACIONES A REALIZAR.

1) Colocar unas alzas en la caja inferior, de la mitad del diámetro; colocar los modelos de forma adecuada y cubrir con arena de moldeo, utilizando un tamiz de malla cuadrada de 5mm.

2) Rellenar la caja inferior con la mezcla de moldeo hasta la mitad de su altura. Apisonar la mezcla con ayuda del apisonador de madera, y nuevamente se coloca la mezcla de moldeo hasta lograr que la mezcla apisonada quede por encima a la superficie de la caja de moldeo.

3) Se elimina la mezcla sobrante que se encuentra por encima de los bordes de la caja de moldeo utilizando una regla metálica. Y se debe comprobar la dureza de la arena entre el rango de 70 – 80 Green Hardiness B; para asegurar una homogeneidad de la mezcla apisonada.

4) Se elimina la mezcla sobrante del lado contrario con la regla metálica, hasta que quede rasante con la altura de la caja, teniendo mucho cuidado los alrededores de los modelos. Y nuevamente se comprueba la dureza.

5) Se procede a colocar grafito en polvo sobre los modelos.

6) Se clava en la mezcla de moldeo, el tubo de alimentación o bebedero de 1 in aproximadamente.

7) Se coloca la parte superior de la caja sobre la inferior, posteriormente se cubre

con la mezcla de moldeo pasando primeramente por el tamiz.

8) Se procede apisonar la mezcla con mucho cuidado alrededor del tubo de alimentación, y posteriormente se coloca más mezcla de moldeo hasta lograr que la mezcla apisonada quede por encima a la superficie de la caja de moldeo.

9) Se elimina la mezcla con la regla metálica, hasta que iguale la altura de la caja superior. Y se debe comprobar la dureza de la arena entre el rango de 70 – 80 Green Hardiness B.

10) Se retira el tubo de alimentación, con mucho cuidado y elaborar la copa de vertido con la espátula.

11) Golpear suavemente los modelos, y extraer los modelos son mucho cuidado.

12) Elaborar con la espátula la base de la mazarota y la garganta, que es el conducto para que el metal fundido llegue a los modelos. Se recomienda que la garganta sea de menor ancho que el tubo de alimentación, y así disminuir la velocidad de llenado.

13) Se ensambla el molde.

Realizar los pasos del 1 al 13, para la otra caja de moldeo.

FRECUENCIA DE EJECUCIÓN.

La presente actividad tiene una frecuencia que depende de la producción que se planifique.

ANEXO 6

HOJAS DE PROCESO

ANEXO 7

PLANOS