

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN EN FUNDICIÓN DE  
ALUMINIO PARA BRAZOS DEL SISTEMA DE FRENO DE UN  
ASCENSOR, MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER (MSc)  
EN DISEÑO PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**JUAN GABRIEL CANGÁS HERRERA**

**juancangas@gmail.com**

**EDGAR ALEXANDER VALVERDE PAREDES**

**alexvalverde16@hotmail.com**

**DIRECTOR: DR. VICTOR MANUEL CÁRDENAS**

**Victor.cardenas@epn.edu.ec**

**Quito, Julio 2014**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Juan Gabriel Cangás Herrera y Edgar Alexander Valverde Paredes, declaramos 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.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Juan Cangás Herrera

---

Alexander Valverde Paredes

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Gabriel Cangás Herrera y Edgar Alexander Valverde Paredes bajo mi supervisión.

---

**Dr. Víctor Manuel Cárdenas**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

- A todas las personas que colaboraron en la elaboración de este proyecto; de manera especial al ingeniero Wilson Cangás.
- A los ingenieros Ricardo Soto y Carlos Díaz por su colaboración.
- Al doctor Víctor Cárdenas por su acertada dirección

JUAN

## **DEDICATORIA**

- A mi hija, que tan solo con tenerla a mi lado me dio la motivación necesaria para culminar este proyecto.

JUAN

## **DEDICATORIA**

- Hada e Isabella, el motor que inspira y motiva el movimiento.

ALEX

## **DEDICATORIA**

- Paola, el engranaje que articula.

ALEX

## CONTENIDO

RESUMEN .....	1
PRESENTACIÓN.....	3
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>4</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>4</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	4
1.2 INTRODUCCIÓN A LOS ASCENSORES.....	5
1.2.1 NORMATIVA APLICABLE .....	6
1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ASCENSORES.....	7
1.2.2.1 Ascensores electromecánicos o Eléctricos. ....	7
1.2.2.2 Ascensores oleodinámicos o hidráulicos.....	9
1.2.2.3 Ascensores autoportantes (sin sala de máquinas) .....	11
1.2.2.4 De acuerdo al uso: .....	12
1.2.2.5 De acuerdo al tipo de actuador: .....	12
1.2.2.6 De acuerdo a la velocidad: .....	12
1.2.2.7 De acuerdo a la capacidad:.....	12
1.2.2.8 De acuerdo a la sala de máquinas: .....	13
1.2.2.9 De acuerdo al tipo de cabina:.....	13
1.2.2.10 Residencial:.....	13
1.2.3 PARTES DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO .....	13
1.2.3.1 Ducto del ascensor.....	15
1.2.3.2 Circuito de tracción.....	15



1.2.3.3	Circuito de elevación .....	16
1.3	SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO.....	16
1.3.1	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO .....	18
1.3.1.1	Bobina electromagnética .....	20
1.3.1.2	Disco de freno .....	20
1.3.1.3	Brazos de freno .....	21
1.3.1.4	Pastillas de freno .....	21
<b>CAPÍTULO 2</b>	.....	<b>23</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	.....	<b>23</b>
2.1	ALEACIONES DE ALUMINIO .....	23
2.1.1	APORTE DE LOS ELEMENTOS ALEANTES .....	24
2.1.2	DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS.....	25
2.1.3	PROPIEDADES DE LAS PRINCIPALES ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN .....	26
2.1.3.1	Aleación aluminio-cobre .....	26
2.1.3.2	Aleación aluminio-cobre-silicio .....	27
2.1.3.3	Aleación aluminio-silicio .....	27
2.1.3.4	Aleación aluminio-magnesio.....	28
2.1.3.5	Aleación aluminio-magnesio-silicio.....	29
2.1.3.6	Aleación aluminio-zinc-magnesio .....	30
2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN $AlSi_7Mg$ .....	30

2.3	SOLIDIFICACIÓN DE MATERIALES METÁLICOS .....	32
2.1.4	METALES PUROS .....	33
2.1.5	ALEACIONES EN GENERAL .....	35
2.1.5.1	Efecto de las velocidades de enfriamiento .....	38
2.1.6	ALEACIONES EUTÉCTICAS .....	38
2.1.7	SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL.....	39
2.1.8	TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN .....	40
2.1.9	SOLIDIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES ALUMINIO .....	42
2.1.9.1	Estabilidad de la interfaz .....	42
2.1.9.2	Crecimiento en la solidificación .....	43
2.1.9.3	Desarrollo de la solidificación en aleaciones de aluminio.....	46
2.1.9.4	Contracción en las aleaciones de aluminio .....	47
2.4	FUNDICIÓN .....	50
2.1.10	PROCESOS DE FUNDICIÓN.....	51
2.1.10.1	Fundición en molde desechable.....	52
2.1.10.2	Fundición con molde permanente .....	53
2.1.10.3	Fundición en arena.....	53
2.1.10.4	Fundición en coquilla.....	54
2.1.10.5	Fundición por inyección.....	55
2.1.10.6	Procesos de fundición especiales .....	55
2.1.11	FUNDICIÓN POR GRAVEDAD EN MOLDE PERMANENTE .....	56
2.1.11.1	Fases del proceso de fundición por gravedad en molde permanente .....	59

2.1.11.2 Características del proceso de fundición por gravedad en molde permanente .....	59
2.1.12 CALENTAMIENTO Y VACIADO.....	60
2.1.12.1 Calentamiento del metal.....	61
2.1.12.2 Vaciado del metal fundido .....	62
2.1.12.3 Análisis del vaciado .....	63
2.1.12.4 Ley de Continuidad .....	65
2.1.12.5 Fluidez.....	66
2.5 DEFECTOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN .....	67
2.1.13 DEFECTOS DEBIDOS A LA CONTRACCIÓN.....	68
2.1.13.1 Rechupes .....	69
2.1.14 TENSIONES INTERNAS, GRIETAS Y DEFORMACIONES .....	73
2.1.15 DEFECTOS DEBIDOS A LOS GASES .....	76
2.1.15.1 Sopladuras, porosidad y ampollas .....	76
2.1.16 INCLUSIONES .....	78
2.1.17 SEGREGACIONES .....	78
2.1.17.1 Segregación centrípeta o directa.....	79
2.1.17.2 Segregación inversa.....	80
2.1.17.3 Segregación por gravedad. ....	80
2.1.18 DEFECTOS DEBIDOS A LA ALEACIÓN FRÍA .....	80
2.6 PROCESO DE CONFORMADO PARA BRAZOS DE FRENO DE ASCENSOR .....	83
2.1.19 RUGOSIDADES SUPERFICIALES .....	85

2.7	MATERIALES DE FRICCIÓN PARA FRENOS .....	88
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>94</b>
<b>ANÁLISIS DE LOS BRAZOS DEL SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR, MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS .....</b>		<b>94</b>
3.1	CONSIDERACIONES INICIALES – ANÁLISIS MECÁNICO .....	95
3.1.1	DISTRIBUCIÓN DE CARGAS SOBRE EL BRAZO DE FRENO.....	96
3.1.2	DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA EL BRAZO DE FRENO .....	97
3.1.3	CÁLCULO DEL PAR DE FRENADA DE UN ASCENSOR.....	99
3.1.3.1	Desaceleración angular.....	102
3.1.4	ANÁLISIS DEL MECANISMO DE FRENO - ZAPATA EXTERIOR ARTICULADA SIMÉTRICA.....	104
3.1.5	ACCIÓN DEL RESORTE DE COMPRESIÓN REGULABLE EN EL BRAZO DE FRENO .....	107
3.1.6	INFLUENCIA DEL ENTORNO DE TRABAJO .....	111
3.1.7	MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE BRAZOS DE FRENO .....	112
3.1.7.1	Selección del material .....	113
3.2	ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL BRAZO DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO .....	123
3.2.1	MODELADO SÓLIDO DEL MECANISMO DE FRENO .....	124
3.2.2	EXPORTACIÓN Y MALLADO .....	125
3.2.3	CONDICIONES DE FRONTERA Y FUERZAS NODALES.....	126

3.2.4 MATERIAL Y CONDICIONES GLOBALES .....	129
3.2.5 VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	130
3.2.5.1 Análisis de Desplazamientos.....	131
3.2.5.2 Análisis de Esfuerzos .....	132
3.2.5.3 Factor de Seguridad .....	134
3.2.6 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE LA SOLUCIÓN .....	135
3.2.7 ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE LOS BRAZOS DE FRENO MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST.....	137
3.2.8 SIMULACIÓN DEL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE LA PIEZA MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST.....	138
3.2.9 CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN DE LA SOLIDIFICACIÓN .....	139
3.2.10 SOLUCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS .....	140
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>147</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DEL BRAZO DE FRENO.....</b>	<b>147</b>
4.1 LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE LA FUNDICIÓN DE LOS BRAZOS DE FRENO .....	147
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST .....	150
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>158</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>158</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>160</b>

ANEXOS .....	164
ANEXO A .....	A
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO .....	A
ANEXO B .....	B
FOTOGRAFÍAS DE UN MECANISMO DE FRENO ELÉCTRICO.....	B
ANEXO C .....	C
ANÁLISIS DE CONVERGENCIA - RESULTADOS SIMULACIÓN “AUTODESK SIMULATION MULTIPHYSICS 2013” .....	C
ANEXO D .....	D
SIMULACIÓN CON DISTINTOS PUNTOS Y VELOCIDADES DE INYECCIÓN DE LA COLADA Y GRÁFICOS DE DEFECTOS PRODUCIDOS DURANTE EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DEL ELEMENTO .....	D

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la aleación AlSi <sub>7</sub> Mg.....	31
Tabla 2.2. Composición Química de la aleación AlSi <sub>7</sub> Mg.....	31
Tabla 2.3. Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido. ....	49
Tabla 2.4. Rugosidad según el proceso de fabricación de la pieza.....	86
Tabla 2.5. Relación entre la clase de rugosidad y la Rugosidad Ra .....	87
Tabla 2.6. Área del material de fricción que requiere una potencia de frenado promedio dada. ....	90
Tabla 2.7. Características de materiales de fricción para frenos y embragues. ....	91

### CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Datos de entrada para la determinación del par de frenada.....	102
Tabla 3.2. Datos de entrada adicionales .....	103
Tabla 3.3. Resumen de resultados del cálculo del par de frenada de un ascensor. ....	103
Tabla 3.4. Datos de entrada para la determinación de las reacciones debidas a la acción del sistema de freno.....	106
Tabla 3.5. Reacciones producto de la acción del sistema de freno.....	107
Tabla 3.6. Constantes a emplear para estimar la resistencia a la tensión de algunos aceros para resortes. ....	109

Tabla 3.7. Configuración del resorte de compresión empleado en el sistema de frenos del ascensor eléctrico objeto del estudio.....	110
Tabla 3.8. Función, restricciones, objetivos y variables libres para el brazo de freno. .....	114
Tabla 3.9. Propiedades de los materiales para un diseño en base a esfuerzos límites para minimizar la masa (costo, energía, impacto medioambiental).....	116
Tabla 3.10. Materiales para la elaboración de brazos de freno de ascensor .....	119
Tabla 3.11. Ventajas, desventajas y aplicaciones para las aleaciones de aluminio	120

#### **CAPÍTULO 4**

Tabla 4.1. Relación velocidad de inyección versus tiempo de llenado de la pieza..	147
Tabla 4.2. Resumen de resultados obtenidos mediante el software Click2Cast .....	155



## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Ascensor eléctrico.....	8
Figura 1.2. Ascensor hidráulico, acción directa.....	10
Figura 1.3. Ascensor sin sala de máquinas.....	11
Figura 1.4. Esquema de un ascensor eléctrico .....	14
Figura 1.5. Freno electromagnético de un ascensor eléctrico.....	17
Figura 1.6. Elementos del sistema de freno de un ascensor eléctrico .....	18
Figura 1.7. a) Freno de contracción externa zapata rígida, b) Freno de contracción externa zapata articulada .....	19

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.....	34
Figura 2.2. Solidificación de metales.....	35
Figura 2.3. (a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel; (b) curva de enfriamiento asociada para una composición Ni-Cu 50-50%. .....	36
Figura 2.4. Estructura cristalina característica de fundición para una aleación, mostrando la segregación de los componentes en el centro de la fundición. ....	37
Figura 2.5. (a) Enfriadores externos para favorecer la solidificación rápida del metal fundido en una zona delgada de la fundición y (b) resultado probable si no se usan los enfriadores.....	39
Figura 2.6. Representación esquemática de los principales tipos de solidificación a) columnar y b) equiaxial .....	46

Figura 2.7. Contracción de una fundición cilíndrica durante la solidificación y enfriamiento.....	48
Figura 2.8. a) Molde abierto; b) Molde cerrado .....	51
Figura 2.9. Fundición por gravedad en molde permanente .....	56
Figura 2.10. Proceso de fundición en molde permanente: (1) el molde se precalienta y se recubre; (2) Se insertan los corazones, de ser el caso y se cierra el molde; (3) el metal fundido se vacía en el molde; (4) se abre el molde y (5) pieza terminada .....	58
Figura 2.11. Primera regla de los círculos inscritos, espesores uniformes.....	70
Figura 2.12. Segunda regla de los círculos inscritos, aumento de espesor en función de la altura.....	71
Figura 2.13. Radios de unión para dos paredes de espesor desigual en prolongación .....	72
Figura 2.14. Radios de unión para dos paredes de espesor desigual que forman cierto ángulo.....	72
Figura 2.15. Radios de unión para dos paredes que forman una T .....	73
Figura 2.16. Ejemplos para corregir la formación de grietas y deformaciones en las piezas fundidas .....	75
Figura 2.17. Representación esquemática de estructuras fundidas en (a) frente plano, una fase, y (b) frente plano, dos fases. ....	79

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1. Esquema representativo del sistema de freno de un ascensor eléctrico y su movilidad relativa. $\omega$ , velocidad angular del disco de freno; F, fuerza ejercida por el resortes.....	96
--	----

Figura 3.2. Diagrama de Cuerpo Libre del brazo de freno .....	97
Figura 3.3. Diagrama para el Cálculo del par de frenada .....	100
Figura 3.4. a) Freno con zapata exterior articulada simétrica, b) desgaste del revestimiento de fricción del freno .....	104
Figura 3.5. Estrategia para la selección de materiales .....	113
Figura 3.6. Esfuerzo de fluencia, $\sigma_f$ , en función de la densidad, $\rho$ . Las líneas guía de las constantes $\sigma_f/\rho$ , $\sigma_f^{2/3}/\rho$ , $\sigma_f^{1/2}/\rho$ , se utilizan para diseños de minimización de peso, límite elástico.....	115
Figura 3.7. Selección de los materiales que cumplen con los parámetros de diseño .....	118
Figura 3.8. Modelo de ensamble del mecanismo de freno electromagnético de un ascensor eléctrico, "Autodesk Inventor Professional 2013".....	124
Figura 3.9. Resultado de la importación y mallado sólido, "Autodesk Simulation Multiphysics 2013".....	125
Figura 3.10. Esquema general de las condiciones de frontera del brazo de freno, para el análisis por elementos finitos.....	126
Figura 3.11. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 1.....	127
Figura 3.12. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 2.....	128
Figura 3.13. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 3.....	128
Figura 3.14. Aplicación de las cargas nodales en el modelo tridimensional.....	129
Figura 3.15. Definición del material utilizado en la simulación. ....	130
Figura 3.16. Distribución de desplazamientos totales en el brazo de freno. ....	131
Figura 3.17. Modelo tridimensional deformado, escala aumentada 10%. ....	132

Figura 3.18. Equivalencia de esfuerzos considerada por el software “Autodesk Simulation Multiphysics 2013” .....	133
Figura 3.19. Distribución de esfuerzos a lo largo del brazo de freno.....	134
Figura 3.20. Distribución del factor de seguridad para el brazo de freno .....	135
Figura 3.21. Precisión del esfuerzo de von Mises. ....	136
Figura 3.22. Refinado local del mallado, modelo tridimensional del brazo de freno.	137
Figura 3.23. Freno de ascensor con inyección de colada en la cara lateral del elemento a través de un alimentador .....	141
Figura 3.24. . Flujo de material durante el proceso de llenado.....	142
Figura 3.25. Límite de llenado del material con velocidad de inyección de 0.15 m/s .....	142
Figura 3.26. Aire atrapado durante el proceso de llenado con velocidad de inyección de 0.15 m/s.....	143
Figura 3.27. Juntas frías producidas en el brazo de freno con velocidad de inyección de 0.15 m/s.....	143
Figura 3.28. Aire atrapado durante el llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s .....	144
Figura 3.29. Juntas frías durante el llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s .....	144
Figura 3.30. Porosidades durante el proceso de solidificación con velocidad de inyección de 0.16 m/s.....	145
Figura 3.31. Aire atrapado durante el llenado con velocidad de inyección de 0.17 m/s .....	145

Figura 3.32. Juntas frías durante el llenado con velocidad de inyección de 0.17 m/s .....	146
Figura 3.33. Porosidades durante el proceso de solidificación con velocidad de inyección de 0.17 m/s.....	146

#### **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1. Relación entre la velocidad de inyección y el tiempo de llenado.....	148
Figura 4.2. Diagrama de temperaturas durante el proceso de llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s.....	151
Figura 4.3. Tiempo de llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s .....	152
Figura 4.4. Vectores de velocidad del flujo de material durante el proceso de llenado .....	152
Figura 4.5. Diagrama del proceso de solidificación-material líquido con velocidad de inyección de 0.16 m/s.....	153
Figura 4.6. Módulo de solidificación con velocidad de inyección de 0.16 m/s.....	153
Figura 4.7. Tiempo de solidificación .....	154
Figura 4.8. Diagrama de temperaturas durante el proceso de solidificación.....	154

## RESUMEN

El presente trabajo contiene el estudio del proceso de fundición de aluminio para brazos del sistema de freno de un ascensor eléctrico mediante elementos finitos, con la utilización del software Click2Cast.

Se realiza un marco teórico sobre temas inherentes al objeto de este trabajo, como son los procesos de fundición, aleaciones de aluminio, defectología en los procesos de fundición y solidificación de metales, así como una introducción a los ascensores y a sus partes constitutivas.

Así mismo, el presente proyecto contiene el análisis de esfuerzos mecánicos a los que se encuentra sometido el brazo del sistema de freno de un ascensor, mediante el método de elementos finitos, utilizando el software Autodesk Simulation Multiphysics 2013, para lo cual se realiza el cálculo de las distintas reacciones físicas que se originan en el proceso de frenado del ascensor, mismas que constituyen las cargas nodales y condiciones de frontera aplicadas en el software citado.

Con base a lo expuesto en líneas anteriores, en este proyecto se simula las etapas de llenado y solidificación en el proceso de fundición de la aleación de aluminio  $AlSi_7Mg$ , para lo cual, como parte del análisis se determina el punto adecuado de inyección de la colada, así como de la velocidad y consecuentemente del tiempo de llenado óptimos.

La determinación de los parámetros de fundición son analizados en base a las imperfecciones físicas producidas durante la etapa de llenado y solidificación, generadas por el aire atrapado, puntos fríos y contracciones producidas durante la etapa de solidificación. Para esto se realiza la variación en el tiempo de llenado y el ángulo de inyección de la colada.

Además, se realiza la simulación seleccionando diferentes puntos de inyección de la colada, con el objetivo de determinar la sección más adecuada, de forma que no se genere turbulencia en el flujo del material líquido durante el llenado, variable que aumenta la posibilidad de defectos por aire atrapado. El análisis concluye con la comparación de los valores de tiempo de llenado obtenidos mediante el software Click2Cast y los calculados mediante la aplicación de fórmulas que permiten predecir el comportamiento del proceso de fundición.

## PRESENTACIÓN

El proceso de solidificación de elementos y piezas obtenidas por el método de manufactura denominado fundición es uno de los factores determinantes de la microestructura final del material fundido y por ende, de las propiedades mecánicas del elemento finalmente requerido. Las múltiples variables que intervienen en el cambio de fase líquido – sólido, y su compleja interrelación, dificultan la predicción del resultado final, adquiriendo por ello relevante importancia la simulación, con la asistencia de un software especializado, de este fenómeno.

Con el desarrollo de la informática es cada vez más generalizado el uso de modelos predictivos virtuales, a tal punto que es prácticamente imposible concebir el desarrollo de proyectos de ingeniería sin la intervención de una computadora.

Lo anteriormente mencionado, muestra claramente la importancia de poder simular el proceso de solidificación de metales y anticipar resultados, para así poder controlar y diseñar los mismos en función de los requerimientos de las piezas terminadas y del material que lo constituye, posibilitando de esta forma la toma de decisiones de manera rápida y económica.



# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Los modelos virtuales son herramientas fundamentales en el desarrollo de procesos de manufactura en general; estos representan la realidad de una manera simplificada permitiendo un tratamiento más sencillo del problema que se desea resolver, pudiéndose anticipar el comportamiento del sistema en estudio sin la necesidad de construir o producir costosos modelos reales o a escala.

La solidificación es uno de los procesos metalúrgicos que más frecuentemente intervienen en la fabricación de piezas metálicas. El cambio de fase líquido a sólido de un metal o de una aleación metálica está presente en varios procedimientos industriales tales como la colada continua, la obtención de piezas por moldeo y la soldadura. Durante la solidificación, el material experimenta sucesivos cambios de fase que serán los causantes de la microestructura final del mismo y cuyo conocimiento es fundamental para determinar las propiedades físicas del material y, por ende, de la pieza. Variaciones en la composición química, el tratamiento del líquido y la velocidad de enfriamiento ocasionan cambios en la microestructura, y su control permite adecuar las características mecánicas del producto a las necesidades preestablecidas en el diseño.

En el estudio de la solidificación de un material metálico en un molde se pueden distinguir tres aspectos: el térmico, el metalúrgico y el mecánico; los tres fuertemente acoplados entre sí.

En el presente proyecto se analiza la solidificación de un modelo virtual, brazo de freno de un ascensor, fabricado de fundición de aluminio, en el programa de elementos finitos Click2Cast.

## **1.2 INTRODUCCIÓN A LOS ASCENSORES**

El transporte vertical nace con la necesidad de las personas por desplazar objetos, o a sí mismos, de un lugar a otro más elevado. Lógicamente sólo se tuvo conciencia de que el transporte de personas era posible cuando todos los procesos que conlleva ésta acción atendieron a un mínimo de seguridad.

Dicho esto, el hombre ha construido diversos tipos de elevadores, siendo el más común por su utilización diaria el ascensor. Pero cabe destacar que, dependiendo de la carga transportada, también se pueden definir otros tipos de elevadores, tales como el monta cargas, monta coches, monta platos, monta camillas etc.

Es necesario remarcar que cualquier dispositivo que transporte verticalmente una carga puede considerarse un elevador, esto engloba desde las poleas o planos inclinados que se utilizaban en la antigüedad hasta sus equivalentes de hoy en día: las escaleras mecánicas y ascensores inclinados.

### **1.2.1 NORMATIVA APLICABLE**

Se pueden citar las siguientes normas y disposiciones de seguridad, nacionales e internacionales, para la planificación e instalación de ascensores, montacargas y montaplatos.

- CPE INEN 018:00, Código de seguridad de ascensores para pasajeros. Requisitos de seguridad.
- Norma Ecuatoriana de Construcción, Capítulo 15, Parte 15-3, Instalaciones Electromecánicas.
- Norma Internacional ISO 4190/2, Edición 2001. Montacargas.
- Norma Internacional ISO 4190/1, Edición 1999. Montaplatos.
- Norma Internacional ISO 4190/1, Edición 1999. Selección de ascensores de personas y montacargas para edificios residenciales.
- Norma Internacional ISO 4190/1, Edición 1999. Ascensores de personas, montacamillas y montacargas.
- Norma ANSI/ASME A17.3, Edición 1996, Código de seguridad para ascensores y escaleras mecánicas.
- Norma Europea EN 81-1, Edición 1998. Normas de seguridad para la construcción e instalación de ascensores de personas, montacargas y montaplatos. Parte I. Ascensores eléctricos.
- Norma Europea EN 81-2, Edición 1998. Normas de seguridad para la construcción e instalación de ascensores de personas, montacargas y montaplatos. Parte II: ascensores hidráulicos.

- Directiva Europea 95/16/CE, Edición 1995. Aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas a los ascensores.

## **1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ASCENSORES**

La clasificación más sencilla divide los ascensores en 3 tipos según su sistema de tracción:

### **1.2.2.1 Ascensores electromecánicos o Eléctricos.**

Son los más instalados en edificios de viviendas multifamiliares. Necesitan una máquina de tracción y una sala de máquinas, ubicadas arriba o debajo de la instalación, figura 1.1, este tipo de ascensores se subdividen en:

#### *1.2.2.1.1 De una velocidad*

Los ascensores de una velocidad arrancan y paran a la misma velocidad, de forma que la parada es más brusca y la nivelación menos precisa. Este hecho determina que la velocidad típica de este tipo de ascensores sea de 0.63 m/s como máximo.

#### *1.2.2.1.2 De dos Velocidades*

En este caso el ascensor antes de parar reduce su velocidad mejorando considerablemente las desventajas del caso anterior. Las dos velocidades típicas de estos ascensores suelen ser 1.00 y 0.25 m/s, aunque también se pueden encontrar ascensores a 0.63 y 0.15 m/s. El ascensor de 2 velocidades llevará a cabo el

recorrido con menores desaceleraciones y, por tanto, con mayor confort para los pasajeros.



*Figura 1.1. Ascensor eléctrico<sup>1</sup>*

#### *1.2.2.1.3 Con Variación de Frecuencia*

La tendencia actual es la integración de un variador de frecuencia que permita regular la velocidad del ascensor para optimizar la marcha del mismo y conseguir que el usuario recorra la distancia requerida en el menor tiempo posible y con el máximo confort. Estos ascensores tienen la trayectoria de su velocidad curva permitiendo una arrancada y parada más suave y confortable, y una nivelación aún más exacta respecto al de 2 velocidades.

---

<sup>1</sup> Archi EXPO. (2013). *Ascensores eléctricos*.

Recuperado de <http://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/ascensor-electrico-2073.html>

Otras ventajas son que esa curva de velocidad se puede regular, los consumos son más bajos al hacer arrancadas más suaves y, por tanto, el desgaste de los frenos y el sufrimiento de los componentes mecánicos es menor.

### **1.2.2.2 Ascensores oleodinámicos o hidráulicos.**

Son aquellos que se instalan en recorridos cortos, entre 4 y 5 paradas. Su instalación es requerida en monta autos que generalmente cubren el trayecto de 2 a 3 niveles, con buenos resultados de funcionamiento.

Si bien estos elevadores no llevan máquina de tracción, ya que su funcionamiento depende de una central oleodinámica, la que en el interior de su tanque lleva una bomba sumergida en aceite para controlar el movimiento del ascensor, o plataforma para el caso de los monta autos, su sala de máquinas debe estar perfectamente dimensionada y habilitada para la instalación de la central y el control de maniobras.<sup>2</sup>

Este tipo de ascensores se subdividen en:

#### *1.2.2.2.1 De acción directa.*

El pistón impulsa directamente el chasis de la cabina. Se observa que, en este caso, por cada metro que se desplace el émbolo del pistón también lo hace la cabina. Existen, a su vez, dos tipos de acción de este tipo:

---

<sup>2</sup> Ascensores MP (2006), Curso de formación de ascensores. *MP ASCENSORES*, 10 - 144. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/90131824/Curso-Formacion-Ascensores>

- Tiro directo lateral: el pistón está apoyado en el foso, cerca de alguna de sus paredes, de forma que empuja al bastidor de la cabina desde la parte posterior
- Tiro directo central: el pistón está enterrado y empuja el bastidor de la cabina desde abajo.



*Figura 1.2. Ascensor hidráulico, acción directa*<sup>3</sup>

#### *1.2.2.2.2 De acción indirecta*

Esta vez la cabina es impulsada por el pistón por medio de cables o cadenas.

La instalación más usual es con una suspensión o desmultiplicación 2:1, es decir, la

---

<sup>3</sup> Ascensores Recalde. (2013). *Ascensor Hidráulico*. Recuperado de <http://www.ascensoresrecalde.com/pag.php?id=7>

cabina se desplaza el doble de la distancia de la que lo hace el émbolo del pistón. La suspensión 4:1 con dos poleas móviles y una fija es menos utilizada.<sup>4</sup>

### 1.2.2.3 Ascensores autoportantes (sin sala de máquinas)

Esta clase de elevadores son muy requeridos en lugares donde, dada la arquitectura del edificio, deba prescindir de la sala de máquinas. El ascensor autoportante aumenta las posibilidades de una correcta, económica y fácil instalación, ya que la máquina de tracción en su conjunto completo, va colocada en forma estructural dentro del mismo ducto del ascensor.



*Figura 1.3. Ascensor sin sala de máquinas<sup>5</sup>*

---

<sup>4</sup> Ascensores MP (2006), Curso de formación de ascensores. *MP ASCENSORES*, (10 – 144). Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/90131824/Curso-Formacion-Ascensores>



Por su lado, la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC Capítulo 15, Parte 15-3, Instalaciones Electromecánicas clasifica a los ascensores en:

**1.2.2.4 De acuerdo al uso:**

- Para el transporte de personas
- Para propósitos especiales para uso de personas (montacamillas, silla de ruedas).
- Para servicio
- Montacoches

**1.2.2.5 De acuerdo al tipo de actuador:**

- Eléctricos
- Hidráulicos

**1.2.2.6 De acuerdo a la velocidad:**

- De baja velocidad: Hasta 1,75 m/s (105 m/min)
- De alta velocidad: Mayores a 1,75 m/s. (105 m/min)

**1.2.2.7 De acuerdo a la capacidad:**

- De baja capacidad: Hasta 1000 kg.
- De mediana capacidad: Entre 1000 kg y 2000 kg.
- De alta capacidad: Sobre los 2000 kg.

---

<sup>5</sup> Arquigráfico. (2013). *Ascensores Autoportantes*.

Recuperado de <http://www.arquigrafico.com/tipos-de-ascensores-para-las-edificaciones/>

**1.2.2.8 De acuerdo a la sala de máquinas:**

- Con sala de máquinas
- Sin sala de máquinas (MRL)

**1.2.2.9 De acuerdo al tipo de cabina:**

- Panorámicos
- No panorámicos

**1.2.2.10 Residencial:**

Un ascensor residencial se considera a aquel que reúne las siguientes características:

- a) Ubicarse dentro de una residencia unifamiliar,
- b) Tener un recorrido máximo: 15 m,
- c) Capacidad máxima: 6 pasajeros,
- d) Velocidad máxima: 1,0 m/s,
- e) Número máximo de paradas: 4, y
- f) De uso privado <sup>6</sup>

**1.2.3 PARTES DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO**

El presente proyecto, aborda el análisis y funcionamiento del sistema de frenos de un ascensor eléctrico, por cuanto, es preciso profundizar conceptos básicos respecto de este tipo de equipos.

---

<sup>6</sup> Instalaciones Electromecánicas, Norma Ecuatoriana de Construcción NEC Capítulo 15. (pp. 155-156). § Parte 15-3 (2013).

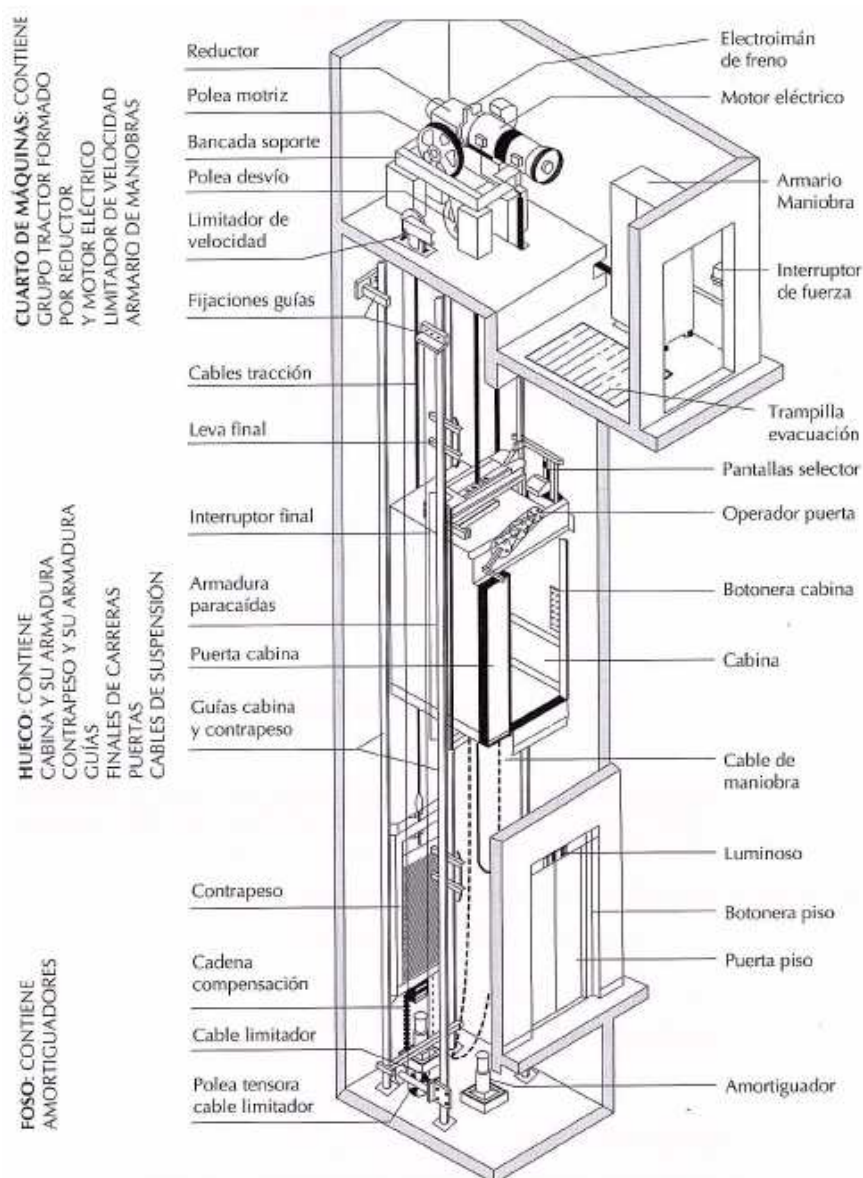


Figura 1.4. Esquema de un ascensor eléctrico <sup>7</sup>

Los grupos tractores de los ascensores eléctricos están normalmente formados por un grupo motor, acoplado a un reductor de velocidad, en cuyo eje de salida va montada la polea acanalada que arrastra los cables por adherencia, o bien

<sup>7</sup> Miraverte, A. (2007). *Elevadores: Principios e innovaciones*. (pp. 62). Barcelona: Reverté S.A

un tambor en el que se enrollan los cables, aunque éste último sistema ya prácticamente no se utiliza.<sup>8</sup>

Partiendo de la instalación típica presentada en la figura 1.4 se describe los diferentes elementos del ascensor eléctrico.

### **1.2.3.1 Ducto del ascensor**

El ducto es el espacio, exclusivamente destinado al desplazamiento del ascensor y del contrapeso.

El ducto del ascensor está compuesto por:

- El espacio cerrado, para que circulen cabina y contrapeso.
- Puertas de acceso
- Guías metálicas de cabina y contrapeso
- Amortiguadores, situados en el extremo inferior del recorrido de la cabina así como en el contrapeso

### **1.2.3.2 Circuito de tracción**

Es el grupo tractor de elementos que mueven los cables del ascensor. Dentro del circuito de tracción podemos distinguir los siguientes elementos:

- Motor eléctrico
- Freno electromecánico

---

<sup>8</sup> Miraverte, A. (2007). *Elevadores: Principios e innovaciones*. (pp. 58-74). Barcelona: Reverté S.A

- Transmisión tornillo sinfín – corona
- Polea de tracción
- Polea desviadora
- Ejes, soportes de tornillo sinfín corona y rodamientos
- Carcasa metálica

### **1.2.3.3 Circuito de elevación**

El circuito de elevación está compuesto por:

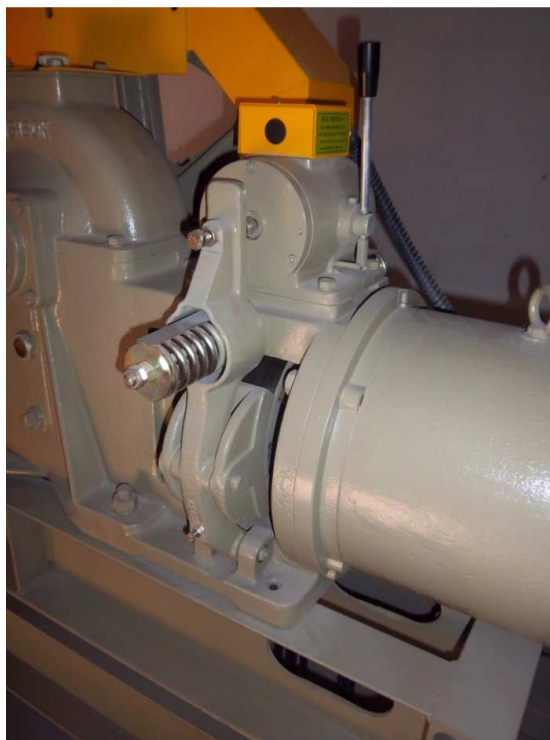
- Elementos de suspensión de la cabina y contrapeso, cables de acero
- Cabina, habitáculo donde se elevan personas o cargas en general
- Contrapeso, que equilibra el peso de la cabina en vacío y a la mitad de la carga a transportar
- Circuito de paracaídas o freno de emergencia
- Circuitos auxiliares, tales como instalaciones eléctricas, sistema de control

## **1.3 SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO**

El sistema de freno es un dispositivo electromagnético, eléctrico o mecánico que siendo parte de la máquina del ascensor, se usa para aplicar una fuerza controlada que permite parar y mantener estática a la misma. Todo ascensor

eléctrico, suspendido por cables de tracción, debe estar provisto con un sistema de frenos que actúe automáticamente en el caso de que:

- a) El ascensor se encuentre estático
- b) Actúe cualquiera de los circuitos de seguridad
- c) Se presente pérdida del suministro de energía eléctrica, y
- d) Se presente pérdida del suministro de energía eléctrica en los circuitos de seguridad del control.



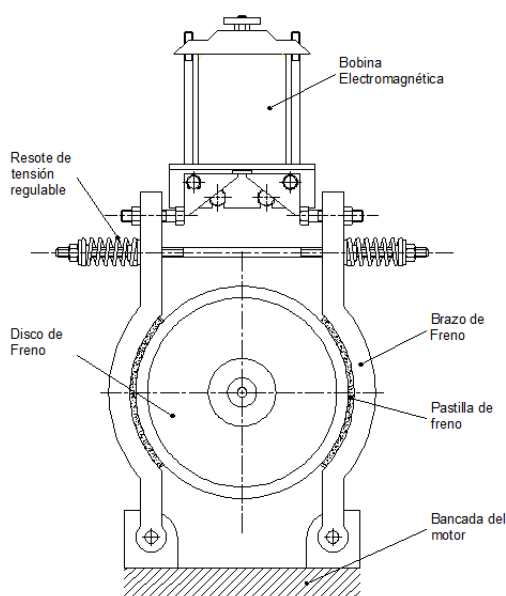
*Figura 1.5. Freno electromagnético de un ascensor eléctrico*

El sistema de freno de un ascensor eléctrico debe ser capaz, por si solo de detener la máquina, cuando la cabina baja a su velocidad nominal y con el 125% de su carga nominal.

Así mismo, todos los elementos mecánicos del freno que participen en la fijación del esfuerzo de frenado sobre el tambor o disco deben ser de doble ejemplar y cada uno de ellos, en el supuesto del que el otro no actuara, deben ser capaces de forma individual de ejercer la acción suficiente para desacelerar la cabina con su carga nominal.<sup>9</sup>

### 1.3.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO

El sistema de freno de un ascensor eléctrico, así como en otros elementos de máquinas, absorben energía cinética o potencial en el proceso de detener una pieza que se mueve, o reducir su velocidad.



*Figura 1.6. Elementos del sistema de freno de un ascensor eléctrico*

<sup>9</sup> Instalaciones Electromecánicas, Norma Ecuatoriana de Construcción NEC Capítulo 15. (pp. 166). § Parte 15-3 (2013).

El trabajo de fricción que se genera por la aplicación de una fuerza produce una variación de la energía del eje sin fin del reductor y por consiguiente la energía absorbida por el freno se disipa en forma de calor.

En esencia, para el sistema de freno de un ascensor eléctrico, generalmente se utiliza un freno de zapata de contracción externa que consta de un bloque denominado zapata que actúa sobre la superficie lateral de un cilindro denominado tambor, mismo que se encuentra sólidamente unido al elemento que se quiere frenar. La zapata de contracción externa puede unirse al brazo de freno o palanca ya sea de forma rígida o articulada, conforme se ilustra en la siguiente figura:

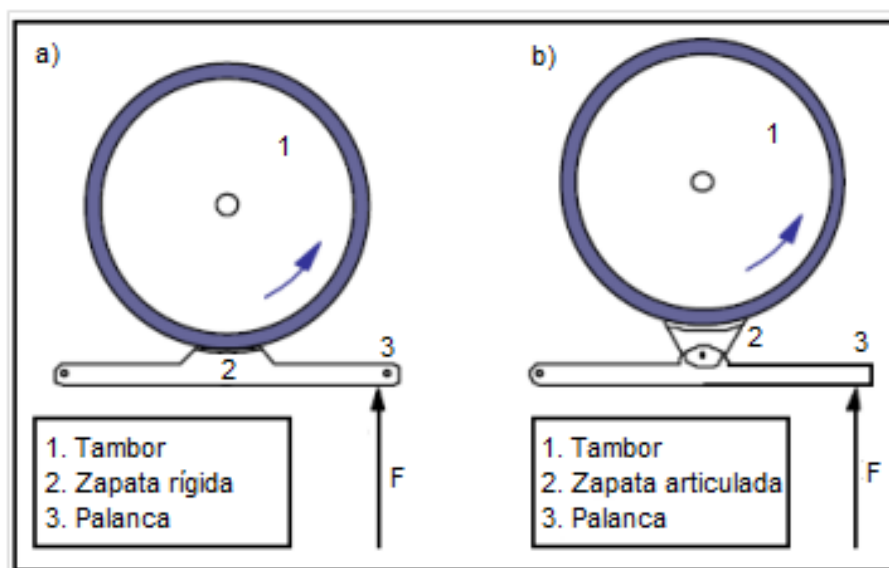


Figura 1.7. a) Freno de contracción externa zapata rígida, b) Freno de contracción externa zapata articulada <sup>10</sup>

<sup>10</sup> Ascensores MP (2006), Curso de formación de ascensores. MP ASCENSORES, (pp. 10 – 144). Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/90131824/Curso-Formacion-Ascensores>



### **1.3.1.1 Bobina electromagnética**

La simplicidad en el diseño de este tipo de bobina representa un alto grado de eficiencia en su operación y facilidad en su instalación y mantenimiento. Su funcionamiento es relativamente sencillo, cuando la bobina es energizada las dos partes de la armadura comprimen los resortes y estos abren los brazos del disco de freno, liberándolo y permitiendo el accionamiento del motor y el consecuente movimiento de la cabina del ascensor, por otro lado, cuando la bobina no se encuentra energizada, la acción de resortes de tensión regulables aprietan los brazos de freno contra el disco para aplicar el máximo par de freno, ya sea en operación normal o en caso de una falla de energía.

### **1.3.1.2 Disco de freno**

El disco de freno constituye la superficie contra la cual interactúan las pastillas del sistema de freno del ascensor, debido a que el disco gira solidario con el eje sinfín del reductor.

Ese rozamiento entre discos y pastillas produce la transformación de energía cinética en energía calorífica, provocando una reducción de la velocidad.

Los discos de freno no sólo deben producir la transformación de energía sino que además deben conseguir que el calor producido sea transmitido a la atmósfera lo más rápidamente posible, de lo contrario, las temperaturas a las que operaría el sistema serían muy elevadas llegando incluso al colapso.

El material escogido para fabricar los discos de freno, por lo general, para ascensores y otros tipos de máquinas como vehículos, es la fundición gris de grafito laminar, ya que garantiza una estabilidad de las prestaciones durante el periodo de vida de los discos. Existen también, discos de materiales compuestos en matriz de carbono, usados en competición y en los frenos de los aviones, aunque debido al alto costo que tienen no son viables para otros tipos de maquinaria.<sup>11</sup>

#### **1.3.1.3 Brazos de freno**

El brazo de freno constituye el elemento estructural del sistema de freno del ascensor, ya que este elemento es el encargado de soportar las sollicitaciones mecánicas generadas tanto por la bobina electromagnética en su acción de abrir y cerrar el sistema de freno, así como, las generadas por el efecto de fricción entre las pastillas y el tambor de freno que origina la disminución de la velocidad del sistema tractor del ascensor.

Consecuencia de lo anteriormente señalado, el adecuado diseño de este elemento es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema de frenos y por ende del ascensor.

#### **1.3.1.4 Pastillas de freno**

La pastilla de freno es el elemento denominado material de fricción, el cual al entrar en contacto con el disco de freno produce la desaceleración del sistema en

---

<sup>11</sup> Lillo Huarún, S. P. (2006). Comportamiento termomecánico en un disco de freno macizo y uno auto-ventilado. (pp. 10-11). (Título de Ingeniería, Universidad Austral de Chile). Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfci1729c/doc/bmfci1729c.pdf>

movimiento; para el caso de la máquina de tracción de un ascensor eléctrico, éste elemento va instalado en el interior de los brazos de freno, solidario al disco de freno.

El proceso de transferencia de calor que ocurre en una pastilla durante la operación de frenado, tiene la particularidad de ser inestable o transitorio, es decir, los fenómenos varían con el tiempo y la posición del elemento en cuestión. Durante el frenado, el perfil de temperatura a través de pastilla es transitorio, y por consiguiente, el flujo de calor está asociado a la difusividad térmica.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Lillo Huarún, S. P. (2006). Comportamiento termomecánico en un disco de freno macizo y uno auto-ventilado. (pp. 8-9). (Título de Ingeniería, Universidad Austral de Chile). Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfci1729c/doc/bmfci1729c.pdf>

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ALEACIONES DE ALUMINIO

Los factores de importancia en la selección del aluminio y de sus aleaciones son su elevada relación resistencia peso, su resistencia a la corrosión frente a diversos productos químicos, su elevada conductividad eléctrica y térmica, su no toxicidad, su reflectividad, su apariencia, su facilidad de conformado y su maquinabilidad.<sup>13</sup>

Con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas, el aluminio puede alearse principalmente con silicio (Si), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn), pudiendo añadirse además titanio (Ti) y cromo (Cr).

Algunas aleaciones pueden recibir un tratamiento térmico para mejorar las propiedades mecánicas, siempre y cuando las aleaciones tengan como agente aleante principal un elemento o elementos cuya solubilidad sólida en el aluminio aumente considerablemente al elevar la temperatura. Esta característica hace posible una distribución más uniforme y eficaz de los elementos componentes de la aleación, obteniéndose un aumento en la resistencia y dureza, ya que la pieza

---

<sup>13</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 157-158). México: Prentice Hall.

fundida tendrá una estructura más homogénea.<sup>14</sup>

### 2.1.1 APORTE DE LOS ELEMENTOS ALEANTES

Los principales elementos aleantes del aluminio y las propiedades que modifican son las siguientes:

- Cromo (Cr): Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos como el cobre, manganeso, magnesio.
- Cobre (Cu): Aumenta la colabilidad, incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- Hierro (Fe): Incrementa las propiedades mecánicas, mejora la resistencia al agrietamiento en caliente, disminuye la tendencia a la adhesión en la fundición a presión.
- Magnesio (Mg): Mejora notablemente la resistencia y la dureza en las aleaciones.
- Manganeso (Mn): Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la calidad de embutición.
- Silicio (Si): El efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del colado, mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las

---

<sup>14</sup> Vicente Galván, L., Soriano Cubells, M. & Elson Zaragoza, C. (2002). *Materiales metálicos*. (pp. 78-80). Valencia: Editorial UPV.

piezas fundidas.

- Estaño (Sn): Mejora las características de antifricción y la maquinabilidad. Debido a esto, se utiliza en aleaciones destinadas a cojinetes. El estaño puede influenciar la respuesta al endurecimiento de ciertas aleaciones de aluminio.
- Titanio (Ti): Refina la estructura del grano del aluminio, usualmente adicionado como boruro de titanio,  $TiB_2$ , preferiblemente en concentraciones mayores que la estequiométrica. Reduce la tendencia al agrietamiento.
- Níquel (Ni): Se emplea conjuntamente con el cobre para mejorar las propiedades a altas temperaturas. También reduce el coeficiente de expansión térmica.
- Zinc (Zn): Aumenta la resistencia y la dureza de la aleación, sin embargo, aumenta la posibilidad de corrosión bajo tensión <sup>15</sup>

### **2.1.2 DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS**

Las designaciones de las aleaciones de aluminio fundidas están formadas por cuatro dígitos, donde, el primer dígito indica el grupo de aleación principal, así:

1xx.x – Aluminio (99.00% mínimo);

---

<sup>15</sup> Estudio y ensayo de materiales (2008), *Aluminio y sus Aleaciones*, (pp. 7). Universidad Católica Argentina. Recuperado de [studioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/aluminio-y-aleaciones.pdf](http://studioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/aluminio-y-aleaciones.pdf)

2xx.x – Aluminio-cobre;

3xx.x – Aluminio-silicio, con cobre y/o magnesio;

4xx.x – Aluminio-silicio;

5xx.x – Aluminio magnesio;

6xx.x – Serie no utilizada;

7xx.x – Aluminio-zinc;

8xx.x – Aluminio-estaño.

En la serie 1xx.x, los segundos y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio. Para las otras series, los dígitos segundo y tercero no tienen un significado numérico. El cuarto dígito indica la forma del producto. <sup>16</sup>

## **2.1.3 PROPIEDADES DE LAS PRINCIPALES ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN**

### **2.1.3.1 Aleación aluminio-cobre**

La inclusión del cobre incrementa las propiedades mecánicas manteniendo una buena maquinabilidad y baja densidad una buena resistencia al calor y una menor resistencia a los agentes atmosféricos que las aleaciones sin cobre, así como su aplicación en temple de precipitación, sin embargo reduce la resistencia a la

---

<sup>16</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 160). México: Prentice Hall.

corrosión y no pueden ser soldadas por las microgrietas y poros que se generan. La capa que se forma de óxido de aluminio no es gruesa ni dura por el contenido de Cu.

En general, las aleaciones más utilizadas industrialmente son las que presentan una concentración de cobre entre el 4 y 6% ya que son las que responden más favorablemente a los tratamientos de endurecimiento.

### **2.1.3.2 Aleación aluminio-cobre-silicio**

Las aleaciones ternarias Al-Cu-Si suelen contener entre el 2 al 5% de cobre y entre el 2 al 10% de silicio. No obstante, el porcentaje de elementos suele variar según las propiedades deseadas. El cobre contribuye principalmente al aumento de la resistencia mecánica, mientras que el silicio mejora la colabilidad de la aleación.

Aleaciones hipereutectoides con contenidos de silicio superiores al 12% se utilizan en la industria de la automoción.<sup>17</sup>

### **2.1.3.3 Aleación aluminio-silicio**

En relación a las condiciones del proceso de fundición, al añadir silicio se obtiene un aumento en la fluidez de la colada, así como un incremento en la resistencia a la corrosión. Las aleaciones Al-Si presentan alta ductilidad y resistencia al impacto mecánico, bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad eléctrica y calorífica; sin embargo, por la naturaleza abrasiva del silicio la aleación presenta dificultad para su mecanizado. Los problemas para mecanizar las piezas

---

<sup>17</sup> Gil Mur, F.J., Manero Planella, J. M. (2005). *Metalografía*. (pp. 89 - 95). Catalunya: Edición UPC.



pueden ser mejoradas al añadir a la cuchara de colada cloruro sódico o una mezcla de fluoruro y cloruro sódico. Esta operación incorpora una pequeña cantidad de sodio, inferior al 0,01% a la aleación pero suficiente para variar la concentración eutéctica del 11,6% al 13% y bajar la temperatura eutéctica de 577 °C a 570 °C.

Las aleaciones Al-Si modificadas con esta adición resultan con un grano extremadamente fino en lugar de las agujas o láminas en que cristaliza el silicio en las aleaciones sin modificar. Esta mejora en la estructura micrográfica se traduce en una notable mejora de las propiedades mecánicas de aleaciones modificadas, y concretamente, de su ductilidad, resistencia al impacto, resistencia mecánica e incluso de su resistencia a la corrosión.<sup>18</sup>

Estas aleaciones al presentar una elevada resistencia a la corrosión son utilizadas en las piezas de uso marítimo, presentando además buenas cualidades de moldeo para elementos que presentan una forma con cierto grado de dificultad.

#### **2.1.3.4 Aleación aluminio-magnesio**

Estas aleaciones presentan alta resistencia mecánica y a la corrosión especialmente al agua de mar, tienen muy buena soldabilidad; sin embargo, suele sufrir agrietamientos intercristalinos y de corrosión bajo tensión tras tratamientos térmicos inadecuados como los producidos en el proceso de soldadura.

Es posible realizar un temple de precipitación. Las aleaciones Al-Mn son más

---

<sup>18</sup> Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A. & Glazoff, M.V. (2007). *Casting aluminium alloys*. (pp. 326 – 367). Oxford UK: Elsevier.

ligeras que el aluminio con un peso específico de  $2.6 \text{ gr/cm}^3$ . Presentan excelente estabilidad en placas durante y después del mecanizado, así como una estabilidad dimensional.<sup>19</sup>

#### **2.1.3.5 Aleación aluminio-magnesio-silicio**

Las aleaciones Al-Si-Mg se caracterizan por su buena colabilidad y la posibilidad de obtener buenas propiedades mecánicas, en piezas fabricadas en fundición por gravedad.

En la práctica habitual para obtener buenas propiedades mecánicas se aplican los siguientes tratamientos al metal líquido: afino de grano, mediante la adición de aleación madre (elemento principal de la aleación), modificación del silicio eutéctico, mediante adición de estroncio y/o sodio y desgasificado, para reducir el nivel de hidrógeno en el metal líquido.

Conviene señalar que las propiedades mecánicas de esta aleación son inferiores, en piezas fabricadas en moldes de arena respecto a las fabricadas en moldes metálicos, como consecuencia de la menor velocidad de solidificación.<sup>20</sup>

Este tipo de aleaciones pueden ser fundidas en espesores de 4 a 12 mm aproximadamente, para ser utilizados en elementos estructurales sujetos a

---

<sup>19</sup> Gil Mur, F.J., Manero Planella, J. M. (2005). *Metalografía*. (pp. 89 - 95). Catalunya: Edición UPC.

<sup>20</sup> Loizaga, A., De la Fuente, E., Niklas, A., Barrenengoa, J. & Fernández-Calvo, A.I. (2010). Optimización de las propiedades mecánicas de las aleaciones AlSi7Mg moldeadas en arena. *REVISTA DE METALURGIA*, 46 (64-70), (pp. 1 - 7). Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1160/1171>

vibraciones, o aros para neumáticos de automóviles.

### **2.1.3.6 Aleación aluminio-zinc-magnesio**

La característica más notable de las aleaciones Al-Zn-Mg es su capacidad para el endurecimiento en frío y en caliente, en estado fundido, sin necesidad de un previo recocido en solución.

Este tipo de aleaciones muestran valores especialmente favorables para el alargamiento a la rotura.<sup>21</sup>

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN AlSi<sub>7</sub>Mg**

La aleación AlSi<sub>7</sub>Mg seleccionada para el análisis de la pieza objeto de este estudio, es obtenida a través de un proceso de fundición, al que se le somete a un tratamiento térmico posterior para la obtención de propiedades específicas.

Esta aleación es utilizada en elementos como aros de automóviles, bloques de cilindros de enfriamiento por agua, carcasas de bombas y de transmisiones, instalaciones de energía nuclear, y elementos en los que sean necesarias características de soldabilidad, alta resistencia a la corrosión y al esfuerzo.

En la tabla 2.1 se citan las principales propiedades mecánicas de esta aleación, asimismo, en la tabla 2.2 se describen la composición química de la aleación AlSi<sub>7</sub>Mg.

---

<sup>21</sup> Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A. & Glazoff, M.V. (2007). *Casting aluminium alloys*. (pp. 386-390) Oxford UK: Elsevier.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la aleación AlSi<sub>7</sub>Mg.

Parámetro	Valor
Módulo de Young	71400 MPa
Relación de Poison	0.33
Límite de fluencia	185.95 MPa
Resistencia última de tensión	227.02 MPa
Densidad	2614.60 Kg/m <sup>3</sup>

Elaboración: Propia

Fuente: Mallo Gallardo, M. (1999). *Conformación de metales*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

Tabla 2.2. Composición Química de la aleación AlSi<sub>7</sub>Mg.

Elemento	Cantidad (%)
Silicio	6,5 – 7,5
Hierro	0,20
Cobre	0,20
Manganeso	0,10
Magnesio	0,25 – 0,45
Cromo	---
Níquel	---
Zinc	0,10
Titanio	0,20
Otros elementos	0.15

Elaboración: Propia

Fuente: *Standard specification for aluminum-alloy permanent mold castings*, ASTM B108 § B108M (2012).

## 2.3 SOLIDIFICACIÓN DE MATERIALES METÁLICOS

La solidificación involucra el regreso del metal fundido al estado sólido. El proceso de solidificación difiere, dependiendo de si la fundición contiene un elemento puro o una aleación.<sup>22</sup>

Una vez vaciado el metal fundido en el molde, ocurren una serie de eventos durante la solidificación y enfriamiento de la fundición hasta la temperatura ambiente. Estos eventos influyen en el tamaño, forma, uniformidad y composición química de los granos formados en toda la fundición, lo que a su vez tiene influencia en sus propiedades generales. Los principales factores que afectan estos eventos son: el tipo de metal fundido, las propiedades térmicas del metal y el molde, la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la fundición, y la forma del molde.<sup>23</sup>

A partir de la morfología de solidificación es posible determinar la forma en la que se origina y avanza la formación de los cristales que crecen a partir de la colada. Por una parte, se tiene la solidificación exógena o dirigida desde afuera, en la que el crecimiento de los cristales comienza en la superficie límite del metal hacia el molde. Así también, se tiene la solidificación endógena en la cual la formación de cristales se da desde el molde hacia la superficie límite del metal, debiendo señalar que el tipo de solidificación influye en las características de la pieza.

---

<sup>22</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

<sup>23</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 160). México: Prentice Hall.

Por otro lado, entre los defectos asociados a la solidificación se tiene la porosidad producida por contracciones, por gases atrapados o por ambos, el rechupe interno, la junta fría, las grietas en caliente, el macrorechupe y la segregación.

#### **2.1.4 METALES PUROS**

Dado que un metal puro tiene un punto de solidificación claramente definido se solidifica a temperatura constante, que constituye su punto de congelación o punto de fusión.

Después que la temperatura del metal fundido baja a su punto de solidificación, la temperatura se mantiene constante mientras el calor latente de fusión se disipa. El frente de solidificación -interfaz sólido líquido- se mueve a través del metal fundido, solidificándose a partir de las paredes del molde hacia el centro.<sup>24</sup>

Los puntos de fusión de los metales puros son bien conocidos y están documentados. El proceso ocurre en un tiempo determinado como se muestra en la figura 2.1, conocida como curva de enfriamiento. La solidificación real toma un tiempo llamado tiempo local de solidificación, durante el cual el calor latente de fusión del metal escapa fuera del molde. El tiempo total de solidificación se determina desde el momento de vaciar el metal en el molde hasta su completa solidificación. Después que la fundición se ha solidificado completamente, el enfriamiento continúa a una velocidad indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

---

<sup>24</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 160). México: Prentice Hall.

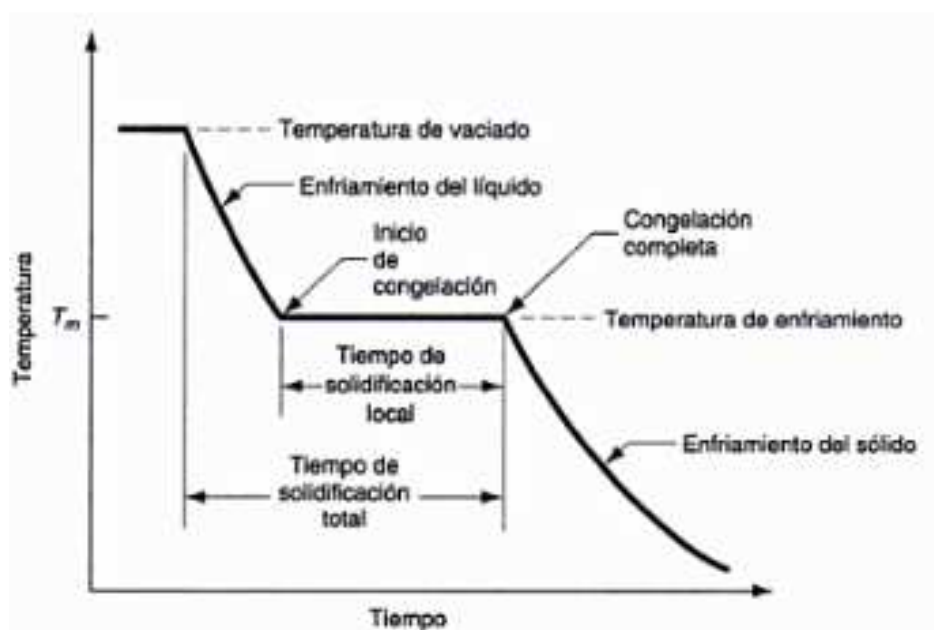


Figura 2.1. Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición

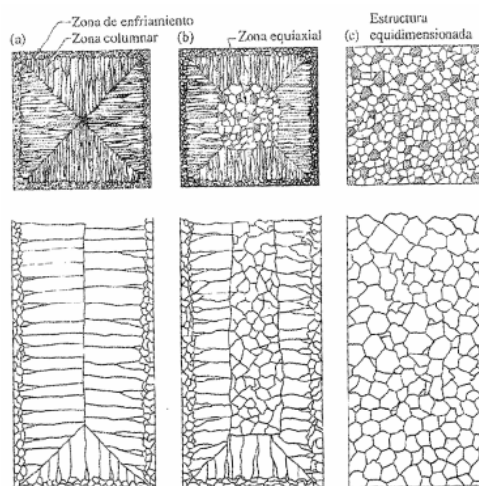
A manera de ejemplo, la estructura de grano de un metal puro fundido en un molde cuadrado se presenta en la figura 2.2.

En las paredes del molde, que están a temperatura ambiente, el metal se enfría con rapidez, este enfriamiento causa que los granos de la película sean finos, equiaxiales y orientado aleatoriamente. Los granos crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor a través del molde.<sup>25</sup>

Conforme se reduce la fuerza impulsora de la transferencia térmica al alejarse de las paredes del molde, los granos se hacen equiaxiales grandes. Aquellos granos que tengan orientaciones sustancialmente distintas quedan bloqueados contra un crecimiento adicional. Este desarrollo de los granos se conoce como nucleación

<sup>25</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

homogénea, lo que quiere decir que los granos crecen sobre sí mismos, a partir de la pared del molde.<sup>26</sup>



*Figura 2.2. Solidificación de metales*

Al continuar el enfriamiento se forman más granos y el crecimiento ocurre en direcciones alejadas de la transferencia de calor.

### **2.1.5 ALEACIONES EN GENERAL**

En las aleaciones la solidificación se inicia cuando la temperatura se reduce por debajo de la temperatura liquidus, y es completa cuando alcanza la temperatura solidus. Dentro de este rango de temperatura, la aleación está en estado blando o pastoso con dendritas columnares. El rango exacto depende del sistema de aleación y de su composición en particular, en la figura 2.3 se muestra el diagrama de fase y la curva de enfriamiento para una composición dada.

<sup>26</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 242-243). México: Prentice Hall.



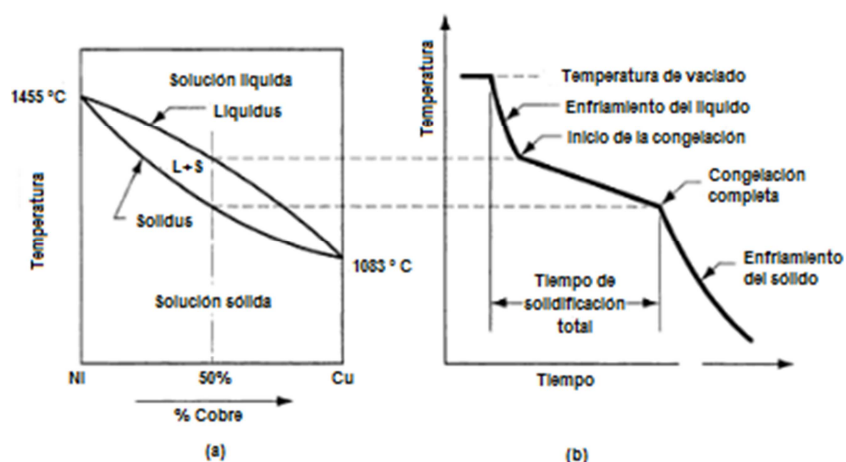


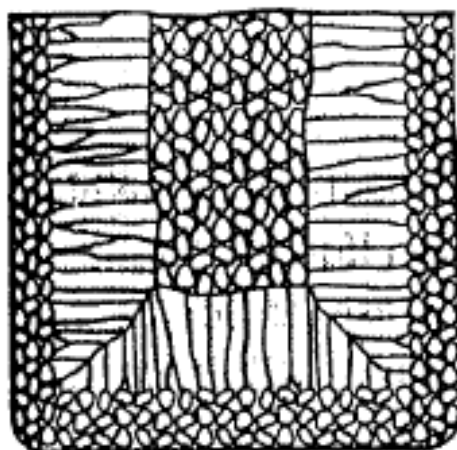
Figura 2.3. (a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel; (b) curva de enfriamiento asociada para una composición Ni-Cu 50-50%.

Otro factor que influye en la solidificación de las aleaciones es la composición de las dendritas que al iniciar su formación son favorecidas por el metal que tiene el punto de fusión mayor. Al continuar la solidificación, las dendritas crecen y se genera un desbalance entre la composición del metal solidificado y el metal fundido remanente. Este desbalance de composición se manifiesta finalmente como segregación de elementos en las fundiciones terminadas. La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica.

A nivel microscópico, la composición química varía a través de cada grano individual, esto se debe a que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción más alta de uno de los elementos de la aleación. Finalmente, el último metal que solidifica en cada grano es el que quedó atrapado en las ramas de las dendritas, cuya composición es aún más desbalanceada, dando como resultado una variación en composición química dentro de cada grano de la fundición.

A nivel microscópico, la composición química varía a través de la fundición en sí. Como las regiones de la fundición que se solidificaron primero son más ricas en un componente que en otro, la composición de la aleación fundida remanente queda modificada cuando ocurre la solidificación en el interior. Se genera entonces, una segregación general a través de la sección transversal de la fundición, llamada algunas veces segregación de lingote.<sup>27</sup>

El tipo de estructura de solidificación depende de la composición del eutéctico -simetría del diagrama de fases-. Conforme se reduce el tamaño del grano se incrementan la resistencia y la ductilidad de la aleación fundida, se reduce la microporosidad y disminuye la tendencia al desgarramiento en caliente durante la solidificación.



*Figura 2.4. Estructura cristalina característica de fundición para una aleación, mostrando la segregación de los componentes en el centro de la fundición.*

---

<sup>27</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

### 2.1.5.1 Efecto de las velocidades de enfriamiento

Bajas velocidades de enfriamiento (del orden de  $10^2$  K/s) o tiempos de solidificación local largos dan como resultado estructuras dendríticas gruesas con grandes espaciamentos entre los brazos dendríticos. A velocidades más rápidas de enfriamiento (del orden de  $10^4$  K/s) o tiempo de solidificación local cortos, la estructura se hace más fina con un menor espaciamiento entre brazos dendríticos. Para velocidades de enfriamiento aún más elevadas (del orden de  $10^6$  K/s) las estructuras desarrolladas son amorfas.<sup>28</sup>

Conforme se reduce el tamaño de grano, se incrementa la resistencia y la ductilidad de la aleación fundida, se reduce la microporosidad y disminuye la tendencia de la pieza fundida a agrietarse durante la solidificación. La falta de uniformidad en el tamaño y distribución del grano dan como resultado fundiciones con propiedades anisotrópicas.<sup>29</sup>

### 2.1.6 ALEACIONES EUTÉCTICAS

Las aleaciones eutécticas constituyen una excepción del proceso general de solidificación de las aleaciones. Una aleación eutéctica tiene una composición particular en la cual las temperaturas solidus y liquidus son iguales, en consecuencia, la solidificación ocurre a una temperatura constante y no en un rango de temperaturas.

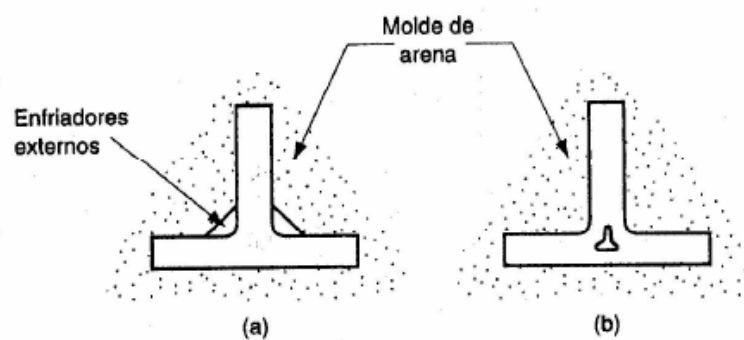
---

<sup>28</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

<sup>29</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 243-245). México: Prentice Hall.

### 2.1.7 SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL

Para minimizar los efectos de la contracción es conveniente que las regiones de la fundición más distantes de la fuente de metal líquido se solidifiquen primero y que la solidificación progrese de estas regiones hacia la mazarota. De esta forma, el metal fundido continuará disponible en las mazarotas para prevenir los vacíos de contracción durante la solidificación. La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov al diseño de la fundición, a su orientación dentro del molde y al diseño del sistema de mazarotas.<sup>30</sup>



*Figura 2.5. (a) Enfriadores externos para favorecer la solidificación rápida del metal fundido en una zona delgada de la fundición y (b) resultado probable si no se usan los enfriadores*

Para promover la solidificación direccional generalmente se usan enfriadores, sumideros de calor internos o externos que causan un enfriamiento rápido en ciertas regiones de la fundición. Los enfriadores internos son pequeñas partes de metal

<sup>30</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

colocadas dentro de la cavidad del molde antes del vaciado, cuyo objetivo es que el metal fundido solidifique primero alrededor de estas partes; por lo general, estos enfriadores se fabrican del mismo metal que la fundición.<sup>31</sup>

Los enfriadores externos son insertos metálicos en las paredes de la cavidad del molde que remueven el calor del metal fundido más rápidamente, a fin de promover la solidificación. Se usan a menudo en secciones de la fundición que son difíciles de alimentar, encontrando así un enfriamiento rápido que lo hace solidificar en estas secciones mientras la conexión con el metal líquido está todavía abierta.

### 2.1.8 TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN

Durante las primeras etapas de la solidificación, se empieza a formar una película delgada solidificada en las paredes frías del molde y conforme pasa el tiempo, dicha película se hace más gruesa.<sup>32</sup>

El tiempo de solidificación es función del volumen de la fundición y de su área superficial (regla de Chvorinov); esto es,

$$TST = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (2.1)$$

Donde:

TST: Tiempo de solidificación total, [min];

---

<sup>31</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

<sup>32</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 250). México: Prentice Hall.

V: Volumen de fundición, [cm<sup>3</sup>];

A: Área superficial de la fundición, [cm<sup>2</sup>];

n: Exponente, toma usualmente un valor de 2; y

C<sub>m</sub>: Constante del material del molde, [min/cm<sup>2</sup>]. Su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal.

El valor de C<sub>m</sub> para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operación previas con el mismo material de molde, metal fundido y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la parte sea muy diferente.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen/área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja, este principio ayuda en el diseño de las mazarotas del molde.

Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición, por tanto, el Tiempo de Solidificación Total para la mazarota debe exceder el Tiempo de Solidificación Total de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales. Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen/área más

grande, podemos estar seguros de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción.<sup>33</sup>

### **2.1.9 SOLIDIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES ALUMINIO**

Debido a que en una aleación están involucrados uno o más elementos que afectan las características del metal, durante la solidificación se formará más de una fase sólida a partir del líquido homogéneo. Por otra parte, las fases sólidas formadas presentarán una composición química diferente a la del líquido que precede.

Durante la solidificación, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance a un orden de largo alcance, es decir, a una estructura cristalina.

La solidificación requiere de dos pasos: nucleación y crecimiento. La nucleación ocurre cuando se forma una pequeña porción sólida dentro del líquido. El crecimiento del núcleo ocurre cuando los átomos del líquido se van uniendo al sólido hasta que se acabe el líquido.<sup>34</sup>

#### **2.1.9.1 Estabilidad de la interfaz**

La extracción de calor del líquido hacia los alrededores creará fluctuaciones de temperatura y promoverá una velocidad de crecimiento con variaciones locales que producen protuberancias infinitesimales sobre la interfaz sólido-líquido.

---

<sup>33</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 248 - 255). México: Prentice Hall.

<sup>34</sup> Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (pp. 195). México: International Thomson.

Cuando una protuberancia cristalina se forma sobre el sólido en crecimiento, ocurre un aumento en el gradiente de concentración, por lo tanto la protuberancia perderá calor más rápido que las regiones planas asociadas. Por esto, la protuberancia se proyectará más dentro del líquido a medida que transcurre el tiempo.<sup>35</sup>

### **2.1.9.2 Crecimiento en la solidificación**

Una vez formados los núcleos, el crecimiento ocurre conforme los átomos se integran a la superficie del sólido.

La naturaleza del crecimiento del sólido dependerá de la forma en que se vaya extrayendo el calor del sistema.

Deben extraerse dos tipos de calor: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El calor específico es el calor necesario para cambiar en un grado la temperatura de una unidad de peso de material.

El calor específico deberá ser eliminado primero, ya sea por radiación hacia la atmósfera circundante, o por conducción a través del molde que contiene el material, hasta que el líquido se enfríe a su temperatura de solidificación. Antes de que se complete la solidificación deberá eliminarse de la interfase sólido-líquido el calor

---

<sup>35</sup> Cubero, S., Tagliaferro, L. (2002). *Modificación de la morfología del silicio en la aleación de aluminio a356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento*. (pp. 7-8) (Tesis de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela). Recuperado de <http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/2567/1/CD%20Tesis%20I2002%20C962.pdf>



latente de fusión. La manera en la cual se libere este calor determinará el mecanismo de crecimiento de los núcleos y la estructura final.<sup>36</sup>

#### *2.1.9.2.1 Crecimiento Planar*

Cuando un líquido bien inoculado se enfría en equilibrio, la temperatura del líquido es mayor que la temperatura de solidificación, y la temperatura del sólido está en o por debajo de esa temperatura.

Durante la solidificación, el calor latente de fusión es eliminado por conducción desde la interfase sólido-líquido, a través del sólido y hacia los alrededores. Cualquier pequeña protuberancia que empiece a crecer en la interfase estará rodeada de líquido con una temperatura mayor a la de solidificación.

El crecimiento de la protuberancia se detendrá hasta que el resto de la interfase la alcance. Este mecanismo de crecimiento se conoce como crecimiento planar, y ocurre por el desplazamiento de la interfase sólido-líquido lisa o plana hacia el líquido.

#### *2.1.9.2.2 Crecimiento Dendrítico*

Cuando la nucleación es débil, el líquido se subenfria antes de que se forme el sólido. Bajo estas condiciones, una protuberancia sólida pequeña, llamada dendrita se forma en la interfase. Conforme crece la dendrita, el calor latente de fusión pasa al líquido subenfriado, elevando su temperatura hacia la temperatura de solidificación.

---

<sup>36</sup> Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (pp. 199). México: International Thomson.

En los troncos de las dendritas primarias también pueden crecer brazos secundarios y terciarios para acelerar la liberación del calor latente de transformación.<sup>37</sup>

#### *2.1.9.2.3 Crecimiento celular*

Se manifiesta en presencia de un subenfriamiento constitucional sobre una distancia mucho menor que el diámetro promedio de grano, los granos crecen como una serie de subgranos redondeados, cuyos ejes longitudinales son paralelos en una dirección.

#### *2.1.9.2.4 Crecimiento celular-dendrítico*

A medida que el subenfriamiento constitucional aumenta, el crecimiento también ocurre a lo largo de direcciones normales a la interfaz sólido-líquido, resultando en granos con superficies irregulares.

#### *2.1.9.2.5 Crecimiento equiaxial-dendrítico*

Cuando el grado de subenfriamiento constitucional es muy grande, las puntas de los subgranos en crecimiento pueden romperse, esto es consecuencia de las corrientes convectivas presentes en el líquido.<sup>38</sup>

---

<sup>37</sup> Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (pp. 199). México: International Thomson.

<sup>38</sup> Cubero, S., Tagliaferro, L. (2002). *Modificación de la morfología del silicio en la aleación de aluminio a356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento*. (pp. 8-12) (Tesis de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela). Recuperado de <http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/2567/1/CD%20Tesis%20I2002%20C962.pdf>

### 2.1.9.3 Desarrollo de la solidificación en aleaciones de aluminio

Los tipos posibles de solidificación de las aleaciones de aluminio influyen con prioridad en las características del fundido. Alternando las condiciones de enfriamiento en el molde se puede influir sobre el curso de la solidificación de tal manera que, por ejemplo, en un enfriamiento rápido (fundición en coquilla), puede tener lugar un desplazamiento del tipo de solidificación, de aspecto esponjoso al rugoso. Las aleaciones solidifican en forma pastosa, tienen tendencia, cuando el enfriamiento es rápido, a la formación de un tipo endógeno de aspecto de caparazón.

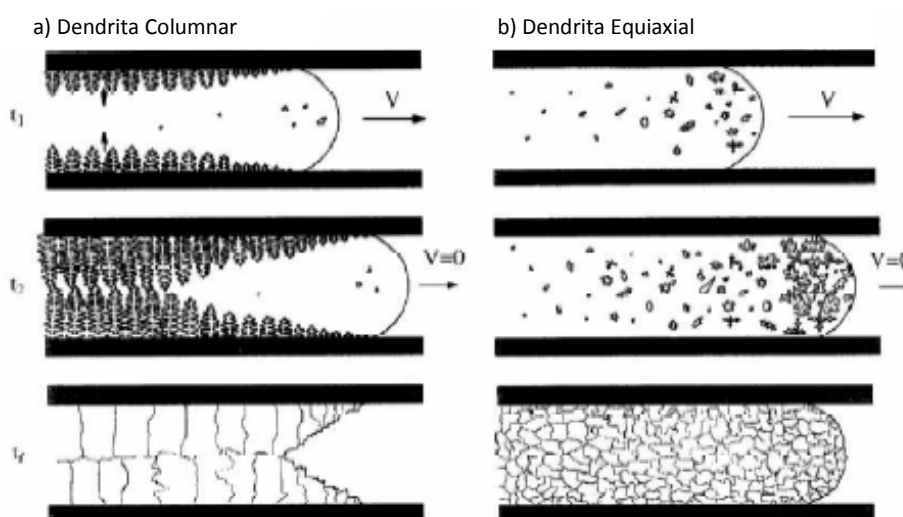


Figura 2.6. Representación esquemática de los principales tipos de solidificación a) columnar y b) equiaxial <sup>39</sup>

<sup>39</sup> Garrido Meneses, A.R., Sánchez Taco, V.H. (2011). *Determinación de la metodología para la obtención de aleación de aluminio de fundición maquinable sin porosidades*. (pp. 33) (Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional). Recuperado de <http://eelalnx01.epn.edu.ec/bitstream/15000/3955/1/CD-3708.pdf>

#### 2.1.9.4 Contracción en las aleaciones de aluminio

Se entiende por contracción a la que se produce de forma lineal en las piezas coladas una vez que se ha terminado la solidificación.

En las aleaciones de aluminio la contracción se halla entre el 1,25% y el 1,40%; en el aluminio puro 1,75%. En las piezas fundidas la contracción suele ser considerablemente menor, debido a los obstáculos que aparecen como consecuencia de los cambios bruscos de forma y sobre todo a causa de los noyos.<sup>40</sup>

Las contracciones ocurren en tres pasos:

1. Contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación;
2. Contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación, y
3. Contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

Los tres pasos pueden explicarse con referencia a una fundición cilíndrica hipotética hecha en un molde abierto, figura 2.7.

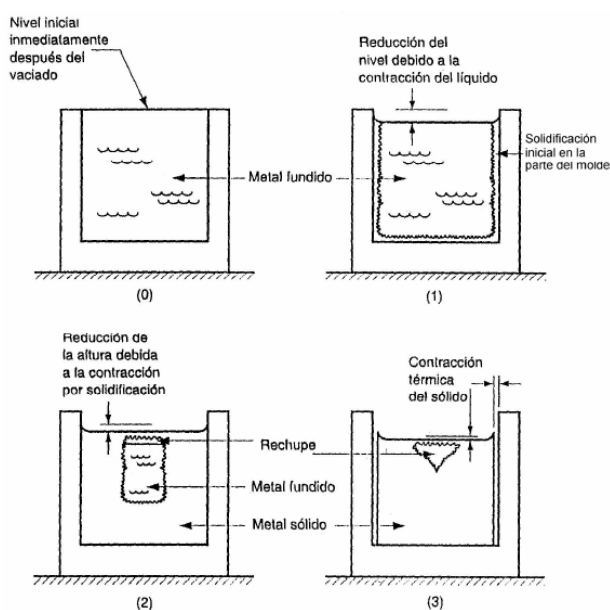
El metal fundido inmediatamente después del vaciado se muestra en la parte (0) de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación, causa que la altura del

---

<sup>40</sup> Hufnagel, J. (Ed). (2004). *Manual del aluminio*. (pp 389). Barcelona: Reverté S.A.

líquido se reduzca desde el nivel inicial, (1) de la figura. La cantidad de esta concentración líquida es generalmente alrededor del 0.5%.

La concentración de solidificación que se observa en la parte (2) tiene dos efectos, primero, la concentración causa una reducción posterior de la altura de la fundición; segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se restringe, esta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la fundición. Esta cavidad de encogimiento es llamada rechupe. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría, (3) de la figura.



*Figura 2.7. Contracción de una fundición cilíndrica durante la solidificación y enfriamiento*

La contracción por solidificación ocurre en casi todos los metales por que la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida. La transformación de fase que acompaña la solidificación causa una reducción en el volumen por unidad de peso del metal. <sup>41</sup>

*Tabla 2.3. Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido.*

<b>Contracción volumétrica debida a:</b>		
<b>Metal</b>	<b>Contracción por solidificación %</b>	<b>Contracción térmica del sólido %</b>
<b>Aluminio</b>	7.0	5.6
<b>Aleaciones de aluminio</b>	7.0	5.0
<b>Fundición de hierro gris</b>	1.8	3.0
<b>Fundición de hierro gris al alto carbono</b>	0	3.0
<b>Fundición de acero al bajo carbono</b>	3.0	7.2
<b>Cobre</b>	4.5	7.5
<b>Bronce (Cu-Sn)</b>	5.5	6.0

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Groover, M. (1997). Fundamentos de manufactura moderna. México: Prentice Hall.*

La contracción por solidificación, debe considerarse para sobredimensionar las cavidades de los moldes. Para hacer los modelos y los moldes más grandes que la pieza, se usan reglas especiales de contracción que consideran una ligera

<sup>41</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 252 - 253). México: Prentice Hall.

elongación en proporción adecuada. Estas reglas varían en elongación desde menos de 1/8 pulgada a 5/8 pulgada por pie de longitud con respecto a una regla normal, dependiendo del metal a fundir.

## **2.4 FUNDICIÓN**

El proceso de fundición es una alternativa de fabricación que representa condiciones tecnológicas y económicas atractivas, ya que permite la obtención de piezas que cumplen, por lo general, con las principales exigencias requeridas en el diseño de acuerdo con las solicitudes mecánicas a las que serán sometidas.

Entre las principales propiedades de la fundición de aluminio destaca la alta resistencia a la fatiga, elevada calidad y precisión en las dimensiones superficiales, excelente capacidad de mecanizado y múltiples posibilidades de tratamiento superficial.

Las características fundamentales que deben ser consideradas en relación a los elementos que serán fundidos son: la forma, masa, dimensiones, tolerancias, dificultad, terminado superficial, aleación, características mecánicas, número de piezas y el tiempo establecido para su entrega. En aplicación de estos parámetros se determinará las exigencias técnicas relacionadas con la colada, como son los puntos de alimentación, ataques, inclinación de desmoldeo y solidificación.

Cabe destacar también que, los procesos de fundición son capaces de producir piezas de formas complejas y de gran tamaño; además, permiten utilizar

mayor variedad de materiales en forma competitiva en comparación con otros procesos.

Los factores involucrados de mayor interés en este proceso son el flujo del metal fundido en la cavidad del molde, la solidificación y enfriamiento del metal en el molde y la influencia del tipo de material del molde.<sup>42</sup>

### 2.1.10 PROCESOS DE FUNDICIÓN

En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido, después, se vierte directamente en la cavidad del molde.

En un molde abierto, el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un molde cerrado, el sistema de vaciado permite el flujo de metal fundido desde fuera del molde hasta la cavidad; este tipo de molde es la forma más importante de producción en operaciones de fundición.

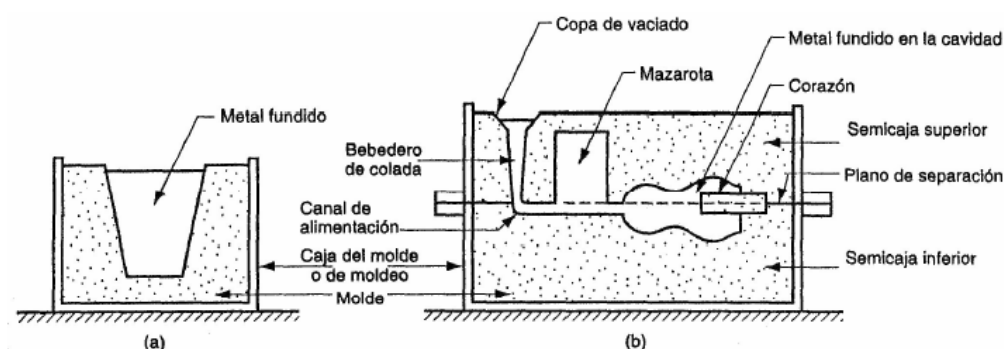


Figura 2.8. a) Molde abierto; b) Molde cerrado

<sup>42</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 264 - 287). México: Prentice Hall.



Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.

Ahora bien, como se ha expuesto anteriormente, tan pronto como el material fundido en el molde empieza a enfriarse, conforme desciende la temperatura, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición.

Dependiendo del método de fundición, y del metal que se usa, pueden necesitarse procesamientos posteriores, entre éstos, se encuentran el desbaste del metal excedente de la fundición, la limpieza de la superficie, la inspección del producto y el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, puede requerirse maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y la microestructura metalúrgica asociada.

Los procesos de fundición, de acuerdo al tipo de molde que se usa, se dividen en: 1) fundición en molde desechable y 2) procesos de fundición con molde permanente.<sup>43</sup>

#### **2.1.10.1 Fundición en molde desechable**

En la fundición con molde desechable (o no permanente), el molde donde solidifica el metal debe ser destruido para remover la fundición.

---

<sup>43</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 264 - 287). México: Prentice Hall.

Los procesos de fundición más comunes son la fundición en arena, el molde en cáscara, el molde en yeso, el molde cerámico y la fundición por revestimiento.

La fundición en arena es el ejemplo más prominente de los procesos de molde consumible. En este tipo de fundición se vacía metal líquido dentro del molde hecho de arena, después que el metal se endurece, se sacrifica el molde a fin de recuperar la fundición.

#### **2.1.10.2 Fundición con molde permanente**

En la fundición de molde permanente, el costo de los dados, matrices y del equipo son relativamente elevados, pero los procesos son económicos para grandes corridas de producción.

La pérdida por desperdicio es baja y la precisión dimensional es relativamente alta, con buenos detalles superficiales. La fundición en dados es el proceso más conocido en este grupo.<sup>44</sup>

Por otra parte, en relación a los procedimientos de fabricación, los procesos de fundición se dividen en:

#### **2.1.10.3 Fundición en arena**

El molde es fabricado con ayuda de un modelo, con costos bajos y facilidad para realizar modificaciones en la forma y tamaño de la pieza. Es aplicable para la

---

<sup>44</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 264, 296). México: Prentice Hall.

fabricación de piezas aisladas, complejas y en general para producir piezas de forma geométrica intrincada.

Como se indicó en proceso de fundición de molde desechable, la fundición en arena es el proceso más utilizado, casi todas las aleaciones pueden fundirse mediante este proceso. La fundición en arena consiste en vaciar un metal fundido en un molde de arena, dejarlo solidificar y romper el molde para remover la fundición.<sup>45</sup>

#### **2.1.10.4 Fundición en coquilla**

Utilizada especialmente para piezas de dimensiones y masas intermedias, en la que exista una gran demanda.

En relación a la forma del elemento, para piezas complicadas se puede utilizar coquillas mixtas, en las cuales los machos o partes intermedias son realizados en arena o las partes externas del molde que no tengan posibilidad de desmoldarse.

En casos como pistones se utiliza también machos sinterizados, de sales solubles en agua o de carbón. Se obtiene además mayor precisión en las dimensiones, mejor rendimiento en la colada, mejores características mecánicas y calidad superficial que las obtenidas en arena.

Además de la fundición en coquilla por gravedad, se tiene la fundición en coquilla a baja presión. En este procedimiento se introduce la fundición líquida desde abajo con una escasa sobrepresión y velocidad regulada para que rellene el molde.

---

<sup>45</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 261). México: Prentice Hall.

Con este procedimiento es posible obtener más fácilmente una solidificación dirigida con menor recorrido del material. <sup>46</sup>

#### **2.1.10.5 Fundición por inyección**

Este proceso presta ventajas económicas en fabricación en serie de piezas de dimensiones muy pequeñas o intermedias.

En este tipo de procedimientos no es posible realizar las salidas o inclinaciones de desmoldeo con núcleos de arena por la elevada presión de la colada.

Las ventajas que presenta este procedimiento son: la exactitud de dimensiones, excelente calidad superficial, espesor pequeño de paredes, uniformidad en los elementos fabricados en serie, alta velocidad de fabricación y la durabilidad de los moldes.

#### **2.1.10.6 Procesos de fundición especiales**

Son desarrollados posteriormente a los procedimientos clásicos y trabajan por lo tanto con moldes de un solo uso como permanentes.

A este tipo pertenece la fundición compuesta, la fundición por centrifugación, el moldeo de precisión, la microfusión, el moldeo con molde gasificado, moldeo en vacío o con molde magnético.

---

<sup>46</sup> Hufnagel, J. (Ed). (2004). *Manual del aluminio*. (pp 429-433). Barcelona: Reverté S.A.

### 2.1.11 FUNDICIÓN POR GRAVEDAD EN MOLDE PERMANENTE

En razón que los brazos de freno, generalmente, son fabricados mediante el proceso fundición por gravedad en molde metálico (o coquilla), es preciso singularizar este procedimiento.

La fundición por gravedad en molde metálico, es el proceso más sencillo de fundición en este tipo de molde; en éste el metal fundido se vierte dentro de la cavidad y solo se utiliza la fuerza de la gravedad para garantizar que toda la cavidad se llene del metal.

Los moldes usualmente se fabrican por moldeo y posteriormente se mecanizan para darles las dimensiones y el acabado final.

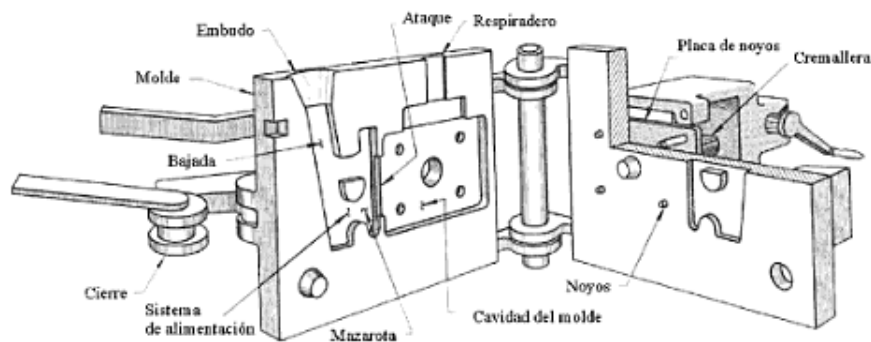


Figura 2.9. Fundición por gravedad en molde permanente <sup>47</sup>

En este tipo de fundición se usa un molde metálico construido en dos secciones que están diseñadas para cerrar y abrir con precisión y facilidad. Los

<sup>47</sup> Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L & Real Romero, J.C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. (pp. 175). España: Editorial Visión Net.

moldes se hacen comúnmente de acero o hierro fundido. La cavidad junto con el sistema de vaciado se forma por maquinado en las dos mitades del molde a fin de lograr una alta precisión dimensional y un buen acabado superficial.

Los metales que se funden en molde permanente, entre otros, son: aluminio, magnesio, aleaciones de cobre y hierro fundido; sin embargo, el hierro fundido requiere una alta temperatura de vaciado, 1250 °C a 1500 °C, lo cual acorta significativamente la vida del molde. Las temperaturas más altas de vaciado para el acero, hacen inapropiado el uso de moldes permanentes para este metal, a menos que se hagan en moldes de material refractario.

En este proceso es posible usar corazones para formar las superficies interiores del producto de fundición. Los corazones pueden ser metálicos, pero su forma debe permitir la remoción de la fundición, o deben ser mecánicamente desmontables para permitir esta operación.

En el proceso de fundición en molde permanente, figura 2.10, los moldes se precalientan primero para prepararlos, y se rocía la cavidad con uno o más recubrimientos. El precalentamiento facilita el flujo del metal a través del sistema de vaciado y de la cavidad. Los recubrimientos ayudan a disipar el calor y a lubricar la superficie del molde para separar fácilmente la fundición.

Tan pronto como solidifica el metal, el molde se abre y se remueve la fundición. A diferencia de los moldes desechables los moldes permanentes no se

retraen, así que deben abrirse antes de que ocurra la contracción por enfriamiento a fin de prevenir el desarrollo de grietas en la fundición.

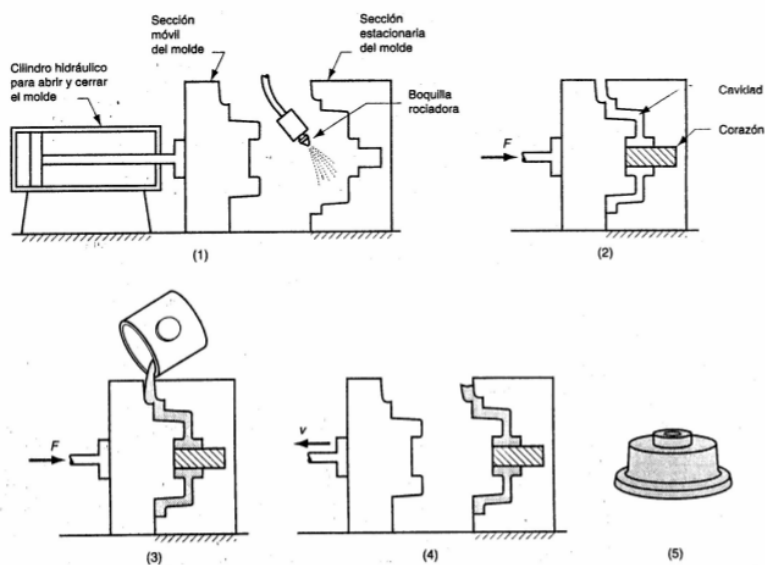


Figura 2.10. Proceso de fundición en molde permanente: (1) el molde se precalienta y se recubre; (2) Se insertan los corazones, de ser el caso y se cierra el molde; (3) el metal fundido se vacía en el molde; (4) se abre el molde y (5) pieza terminada <sup>48</sup>

Además, la solidificación más rápida causada por el molde metálico genera una estructura de grano más fino, de esta forma pueden producirse fundiciones más resistentes.

El proceso está limitado generalmente a metales de bajo punto de fusión. La manufactura de formas geométricas más simples que las fundidas en molde de arena (debido a la necesidad de abrir el molde) constituye otra limitación, además del

<sup>48</sup> Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L & Real Romero, J.C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. (pp. 176). España: Editorial Visión Net.

costo. Debido al costo sustancial del molde, el proceso se adapta mejor a producciones de alto volumen que pueden automatizarse.

#### **2.1.11.1 Fases del proceso de fundición por gravedad en molde permanente**

Las fases del proceso de fundición en coquilla por gravedad se describen a continuación:

1. Primera fase: Dosificar el metal; una cuchara de colada se sumerge en el baño de aluminio y toma el volumen necesario para el llenado del molde.
2. Segunda fase: Llenado del molde; se realiza por la alimentación del metal fundido a través del o los canal de alimentación.
3. Tercera fase: Mazarotas; sirven para compensar la contracción del metal de la pieza en el momento de la solidificación.

#### **2.1.11.2 Características del proceso de fundición por gravedad en molde permanente**

Las características principales de la fundición en coquilla por gravedad se detallan a continuación:

1. En este proceso el molde es desmontable.
2. Este proceso se lo utiliza para producción en serie, piezas de tamaño pequeño y mediano.
3. Los agujeros y vaciados de pieza fundida se pueden obtener mediante noyos, los cuales pueden ser metal o hecho a base arena.



4. Se reduce el mecanizado de las piezas fundidas
5. Mejora las propiedades tanto físicas y mecánicas de las piezas fundidas.
6. La solidificación de las piezas fundidas es más rápida que en el proceso de colado en arena, por lo cual produce un tamaño de grano más fino.
7. Proceso apto para la fundición de aleaciones de bajo punto de fusión, sobre todo aluminio.
8. Precisión y buen acabado superficial.
9. Muy buenas propiedades mecánicas y metalúrgicas (mejores que la fundición en arena).<sup>49</sup>

#### **2.1.12 CALENTAMIENTO Y VACIADO**

Para desarrollar la operación de colado del material fundido, el metal se calienta a temperatura ligeramente mayor que su punto de fusión y después se vacía en la cavidad del molde para que solidifique.

Después de que se ha alcanzado la temperatura de punto de fusión es necesario aplicar más calor para poder transformar el metal o la aleación del estado sólido al líquido. Durante este período la temperatura no aumenta y la cantidad de calor generada, destinada solamente a disgregar el estado sólido, se llama calor latente de fusión.<sup>50</sup>

---

<sup>49</sup> Arias Espín, W. D. (2007). *Diseño y construcción de un equipo para colado en molde permanente*. (pp. 12-14) (Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/599/1/CD-0999.pdf>

<sup>50</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 244 - 247). México: Prentice Hall.

### 2.1.12.1 Calentamiento del metal

La energía calorífica requerida para calentar el metal a la temperatura necesaria de fusión es la suma de:

1. Calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión;
2. Calor de fusión para convertir el metal de sólido a líquido, y;
3. Calor para elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado.

Esto se puede expresar como:

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_o) + H_f + C_t (T_p - T_m) \} \quad (2.2)$$

Donde:

H: Calor total requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión, [J];

$\rho$ : Densidad, [g/cm<sup>3</sup>];

$C_s$ : Calor específico en peso para el material sólido, [J/g-°C];

$T_m$ : Temperatura de fusión del metal, [°C];

$T_o$ : Temperatura inicial, generalmente la temperatura ambiente, [°C];

$H_f$ : Calor de fusión, [J/g];

$C_t$ : Calor específico en peso del metal líquido, [J/g-°C];

$T_p$ : Temperatura de vaciado, [°C] y

V: Volumen del metal que se calienta, [cm<sup>3</sup>]

### **2.1.12.2 Vaciado del metal fundido**

La introducción del metal fundido en el molde y su flujo dentro del sistema de vaciado, es un paso crítico en el proceso de fundición, ya que, el metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde, incluida la región más importante que es la cavidad principal, los factores que afectan la operación de vaciado son la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia.

La temperatura de vaciado es la temperatura del metal fundido al momento de su introducción en el molde. La diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura a la que empieza la solidificación se la denomina sobrecalentamiento. Este término se usa también para la cantidad de calor que debe removerse del metal fundido entre el vaciado y el inicio de la solidificación.

La velocidad de vaciado se refiere a la velocidad volumétrica a la que se vierte el metal fundido dentro del molde. Si la velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad; en el otro extremo, si la velocidad de vaciado es excesiva la turbulencia puede convertirse en un problema serio.

El flujo turbulento debe evitarse durante el vaciado por varias razones, en primer lugar, tiende a acelerar la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando así la calidad de la fundición.

La turbulencia también agrava la erosión del molde, que es el desgaste gradual de las superficies del molde debido al impacto del flujo del metal fundido. Es importante considerar que los metales fundidos son químicamente mucho más reactivos que a temperatura ambiente, por consiguiente, el desgaste causado por el flujo de estos metales en el molde es significativo especialmente bajo condiciones turbulentas.<sup>51</sup>

### 2.1.12.3 Análisis del vaciado

Para realizar el análisis de vaciado, una relación importante es el teorema de Bernoulli, el cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y fricción) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye son iguales; de forma que se puede escribir la siguiente ecuación:

$$h_1 + \frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_{1-2} \quad (2.3)$$

Donde:

h: Altura, [cm];

P: Presión en el líquido, [N/cm<sup>2</sup>];

$\rho$ : Densidad, [g/cm<sup>3</sup>];

v: Velocidad de flujo, [cm/s];

---

<sup>51</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 244 - 247). México: Prentice Hall.

g: Constante de la aceleración gravitacional, [cm/s<sup>2</sup>] y

F: Pérdidas de carga debidas a la fricción, [cm]

Los puntos 1 y 2 indican dos puntos cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli planteada inicialmente se puede simplificar despreciando las pérdidas por fricción y asumiendo que el sistema permanece a presión atmosférica en toda su extensión, de forma que:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) puede usarse para determinar la velocidad del metal fundido en la base del bebedero de colada.

Definimos un punto (1) en la parte superior del bebedero y un punto (2) en la base. Si el punto (2) se usa como referencia, entonces la altura en ese punto es cero ( $h_2 = 0$ ) y  $h_1$  es la altura (longitud) del bebedero.

Cuando se vierte el metal en la copa de vaciado y fluye hacia abajo, su velocidad inicial en la parte superior es 0 ( $v_1 = 0$ ). Entonces se obtiene:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.5)$$

Que se puede resolver para la velocidad del flujo:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (2.6)$$

#### 2.1.12.4 Ley de Continuidad

Esta Ley, establece que la velocidad volumétrica del flujo permanece constante a través del líquido. La Ley de continuidad puede expresarse como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.7)$$

Donde:

Q: Velocidad de flujo volumétrico, [cm<sup>3</sup>/s];

v: Velocidad [cm/s], y;

A: Área de la sección transversal del líquido, [cm<sup>2</sup>];

Los subíndices se refieren a cualquiera de los dos puntos en el sistema de flujo. Entonces un incremento en el área produce un decremento en la velocidad y viceversa.

Las ecuaciones anteriores indican que el bebedero debe ser ahusado, de forma que el área de la sección transversal del canal debe reducirse conforme el metal se acelera durante su descenso; de otra manera, puede aspirar aire dentro del líquido debido al incremento de la velocidad del metal que fluye hacia la base del bebedero y conducirlo a la cavidad del molde.

Para prevenir esta condición, se diseña el bebedero con un ahusamiento de manera que la velocidad volumétrica de flujo  $v \cdot A$  sea la misma en la parte superior y en el fondo del bebedero.

Si se considera que el canal alimentador de la base del bebedero a la cavidad del molde es, la velocidad volumétrica de flujo a través del sistema de vaciado y dentro de la cavidad del molde permanece constante, por consiguiente, se puede estimar el tiempo requerido para llenar una cavidad de volumen V como sigue:

$$MFT = \frac{V}{Q} \quad (2.8)$$

Donde:

MFT: Tiempo de llenado, [s];

V: Volumen de la cavidad del molde, [cm<sup>3</sup>] y

Q: Velocidad volumétrica de flujo [cm<sup>3</sup>/s]

El tiempo de llenado del molde calculado en base a esta ecuación debe considerarse como el tiempo mínimo, debido a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible constricción del flujo en el sistema de vaciado.<sup>52</sup>

#### **2.1.12.5 Fluidéz**

Las características del metal fundido se describen frecuentemente con el término fluidez, la cual representa una medida de la capacidad del metal para llenar el molde antes de enfriarse. La fluidez es inversa a la viscosidad; al incrementarse la viscosidad, la fluidez decrece.

---

<sup>52</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 244 - 247). México: Prentice Hall.

Los factores que afectan la fluidez son la temperatura de vaciado, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y el calor transferido a los alrededores. Una temperatura mayor con respecto al punto de solidificación del metal incrementa el tiempo que el metal permanece en estado líquido permitiéndole avanzar más antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas como la formación de óxido, la porosidad gaseosa y la penetración del metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que componen el molde. Ese último problema causa que la superficie de la fundición incorpore partículas de arena que la hacen más rugosa y abrasiva de lo normal.

La composición también afecta la fluidez, particularmente en lo que respecta a los mecanismos de solidificación del metal. Los metales que se solidifican a temperatura constante tienen mejor fluidez (por ejemplo metales puros y aleaciones eutécticas). Cuando la solidificación ocurre en un intervalo de temperaturas, como es el caso de muchas relaciones, la porción parcialmente solidificada interfiere en el flujo de la porción líquida, reduciendo así la fluidez. La composición del metal determina, además de los mecanismos de solidificación, el calor de fusión, la cantidad de calor requerida para que el metal pase del estado líquido al sólido. Un mayor calor de fusión tiende a incrementar la medida de la fluidez en la fundición.<sup>53</sup>

## **2.5 DEFECTOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN**

La técnica moderna exige cada vez mejores características mecánicas y de

---

<sup>53</sup> Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. (pp. 244 - 247). México: Prentice Hall.



utilización de las piezas fundidas. El avance en este campo se ha podido conseguir gracias a los numerosos trabajos de investigación encaminados a obtener piezas sanas, económicas y resistentes con aleaciones de todo tipo. Esto ha requerido una estrecha coordinación entre modelistas, fundidores y proyectistas, para mejorar las condiciones de moldeo, colada y diseño de piezas, con el objetivo de eliminar los posibles defectos de la fundición.

Como existe una gran variedad de ellos (rechupes, tensiones internas, deformaciones, roturas, porosidades, etc.), a continuación se explican los más destacados, tratando de conocer sus posibles causas y la forma de corregirlos.

### **2.1.13 DEFECTOS DEBIDOS A LA CONTRACCIÓN**

En razón a sus características de dilatación térmica, los metales se contraen durante la solidificación y enfriamiento. La contracción, causa cambios dimensionales y, algunas veces agrietamientos, mismos que son resultado de los siguientes tres sucesos:<sup>54</sup>

- a. Contracción del metal fundido al enfriarse.
- b. Contracción del metal durante el cambio de fase de líquido a sólido (calor latente de fusión).
- c. Contracción del metal solidificado conforme su temperatura baja hasta la ambiental.

---

<sup>54</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 250). México: Prentice Hall.

La contracción excesiva significa que las dimensiones de la pieza diferirán de las esperadas, esta disminución de volumen que experimenta la aleación puede dar paso a los siguientes defectos:

#### **2.1.13.1 Rechupes**

Un rechupe ya sea grande o pequeño, resulta de los distintos valores de contracción del metal mientras este pasa del estado líquido al sólido. Un rechupe es una cavidad asimétrica o área esponjosa, limitada por una superficie de cristales dendríticos, y una depresión de rechupe sobre la superficie de una pieza es un descenso del verdadero plano de la superficie del molde.

Una de las formas para evitar la aparición de rechupes es con el uso de mazarotas o la solidificación dirigida.

A continuación se explican las reglas a que debe seguirse en el diseño de las piezas con vistas a eliminar las acumulaciones de masa o puntos calientes que, al solidificar en último lugar, pueden dar origen a rechupes.<sup>55</sup>

1.- Evitar las concentraciones locales de masas, de forma tal que los espesores se mantengan tan uniformes como sea posible en toda la pieza. Esto es factible de realizar utilizando la primera regla de los círculos inscritos, según la cual, los diámetros de los círculos inscritos en las distintas secciones rectas de la pieza deben ser iguales o muy poco diferentes.

---

<sup>55</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 38) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>.

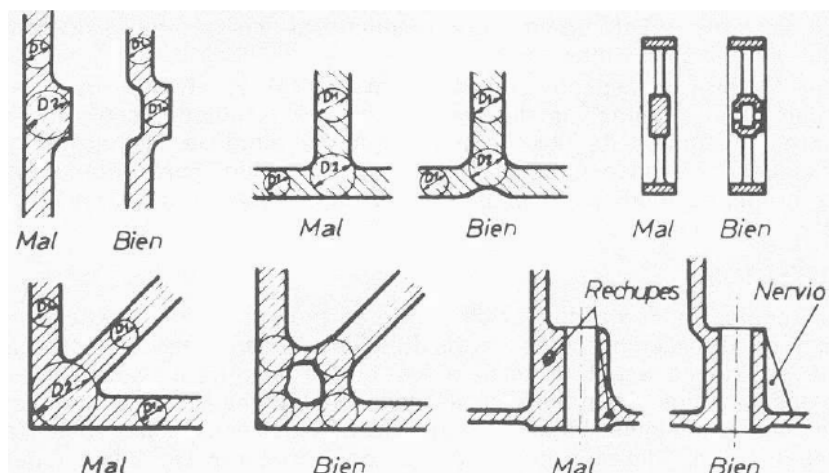
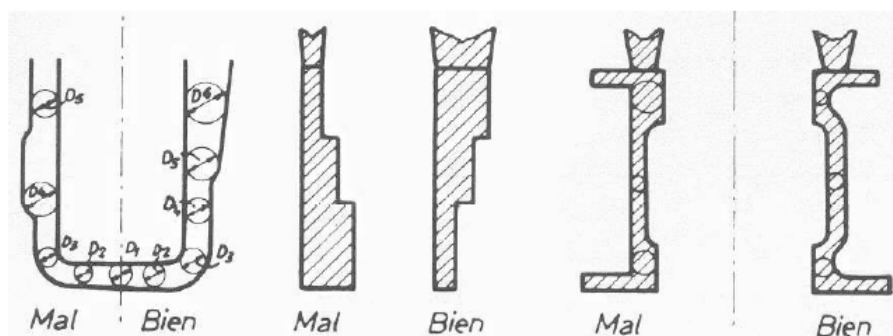


Figura 2.11. Primera regla de los círculos inscritos, espesores uniformes

2.- Para los casos en los que mantener la uniformidad de los espesores sea imposible, se debe procurar que las secciones transversales vayan aumentando de espesor en función de la altura (colocando la pieza en posición de colada). Al respecto, la segunda regla de los círculos inscritos, indica que: Si no es posible mantener los espesores constantes, se procurará que su aumento sea progresivo de abajo hacia arriba en la posición de moldeo, o bien, los diámetros de los círculos inscritos en las secciones rectas de la pieza deben crecer lentamente desde la sección más baja de la pieza, en la posición del molde hacia arriba. Adoptando este trazado, se consigue una solidificación dirigida de abajo a arriba, que hace el efecto de una mazarota.<sup>56</sup>

<sup>56</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 39) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>



*Figura 2.12. Segunda regla de los círculos inscritos, aumento de espesor en función de la altura*

3.- Cuando una pieza presenta ángulos, la velocidad de solidificación en los vértices de los ángulos salientes, es mayor que la de las zonas adyacentes. Este fenómeno se presenta debido a que un volumen de metal situado en el vértice tiene mayor superficie de contacto con el molde y, por tanto, mayor velocidad de enfriamiento que otro volumen igual más alejado de él. El efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo.

En los ángulos entrantes sucede todo lo contrario, es decir, que la velocidad de solidificación es mucho menor en el vértice que en las zonas adyacentes. Para esta condición, según solidifica la pieza, un volumen de metal líquido situado en el vértice, no tiene prácticamente superficie de contacto con el molde, por tanto, su velocidad de enfriamiento será muy inferior a la de otro volumen igual situado en una zona más alejada. Aquí también el efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo. En consecuencia, en las piezas con ángulos agudos entrantes, se originan

zonas calientes que pueden producir rechupes y grietas, por tanto, dichos ángulos deben evitarse en las piezas moldeadas.

Estos efectos se pueden evitar en parte empleando diseños adecuados de las piezas, en los que se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes), sustituyéndolos por radios de unión adecuados o uniones progresivas.<sup>57</sup>

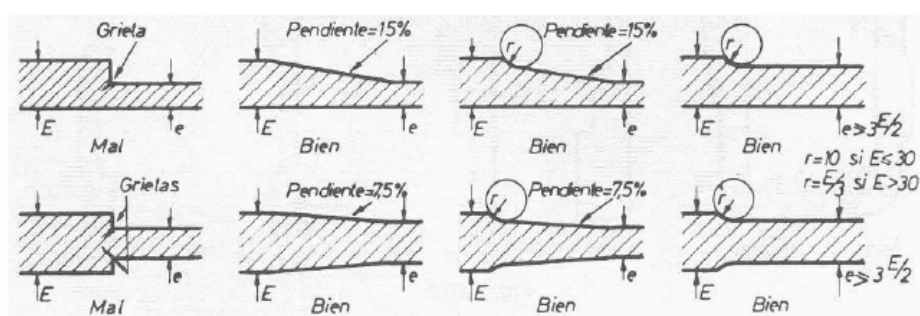


Figura 2.13. Radios de unión para dos paredes de espesor desigual en prolongación

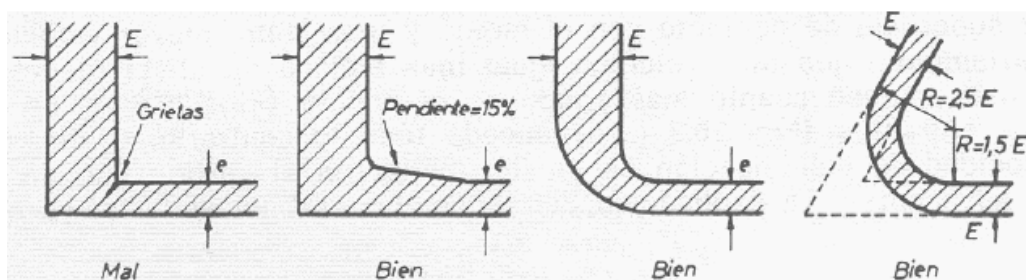


Figura 2.14. Radios de unión para dos paredes de espesor desigual que forman cierto ángulo

<sup>57</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 40-41) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>.

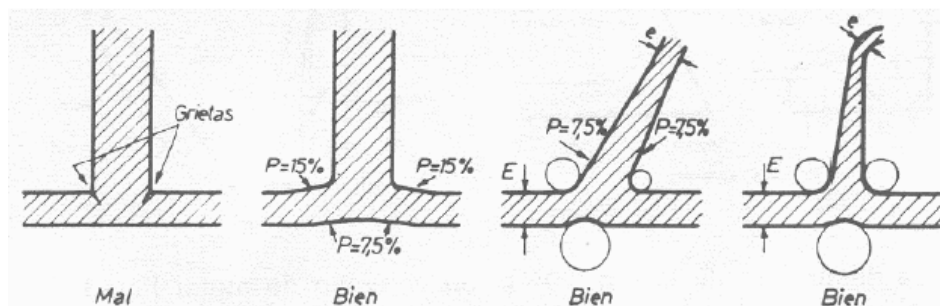


Figura 2.15. Radios de unión para dos paredes que forman una T

### 2.1.14 TENSIONES INTERNAS, GRIETAS Y DEFORMACIONES

Para que una pieza moldeada esté exenta de tensiones internas, tanto durante su enfriamiento como después del mismo, es necesario, que toda su masa se conserve isotérmica, desde el final de la solidificación hasta que alcance la temperatura ambiente. Para conseguirlo se deben utilizar sistemas de alimentación que no generen grandes diferencias de temperatura en las distintas zonas de las piezas, al mismo tiempo los moldes se deben construir de forma que no impidan la libre contracción.

Cuando se producen tensiones internas, los esfuerzos resultantes son capaces de producir roturas, grietas y deformaciones, este fenómeno es especialmente intenso cuando el metal está aún en estado pastoso (dendritas + líquido) o inmediatamente después de la solidificación, cuando su resistencia es todavía muy baja. Las grietas pueden ser superficiales o internas.

Una grieta formada durante el enfriamiento de la pieza tiene generalmente la superficie de rotura decolorada, pudiendo variar de azulada a rojiza.

Una fractura limpia o recién hecha indica una grieta originada por causas mecánicas o tensiones externas, una vez se ha enfriado completamente la pieza.

Estos efectos pueden evitarse, en cierto modo, si se tienen en cuenta las siguientes reglas:

- Diseñar las piezas de forma que se mantengan los espesores constantes y se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes) sustituyéndolos por radios de unión adecuados o uniones progresivas.
- Comenzar el llenado del molde por las partes más delgadas y acelerar el enfriamiento de las más voluminosas con enfriadores externos o internos.
- Emplear molde y machos lo suficientemente deformables para que cedan a la contracción.
- Adoptar sistemas que permitan a las piezas deformarse libremente, con el fin de que no generen ninguna rigidez local.

Sin embargo, y a pesar de tomar las debidas precauciones, la mayor parte de las piezas fundidas, después de frías, están sometidas a tensiones internas, que pueden originar roturas o deformaciones en servicio.

Cuando las piezas son de precisión (bancadas de máquinas - herramientas, camisas de motores, carros, deslizadera, etc.) deben conservar perfectamente su forma y dimensiones durante su vida de servicio; para ello es necesario que estas piezas estén exentas de tensiones internas. Para conseguirlo, las piezas son

sometidas antes del mecanizado, a un tratamiento térmico de estabilización o recocido contra tensiones.<sup>58</sup>

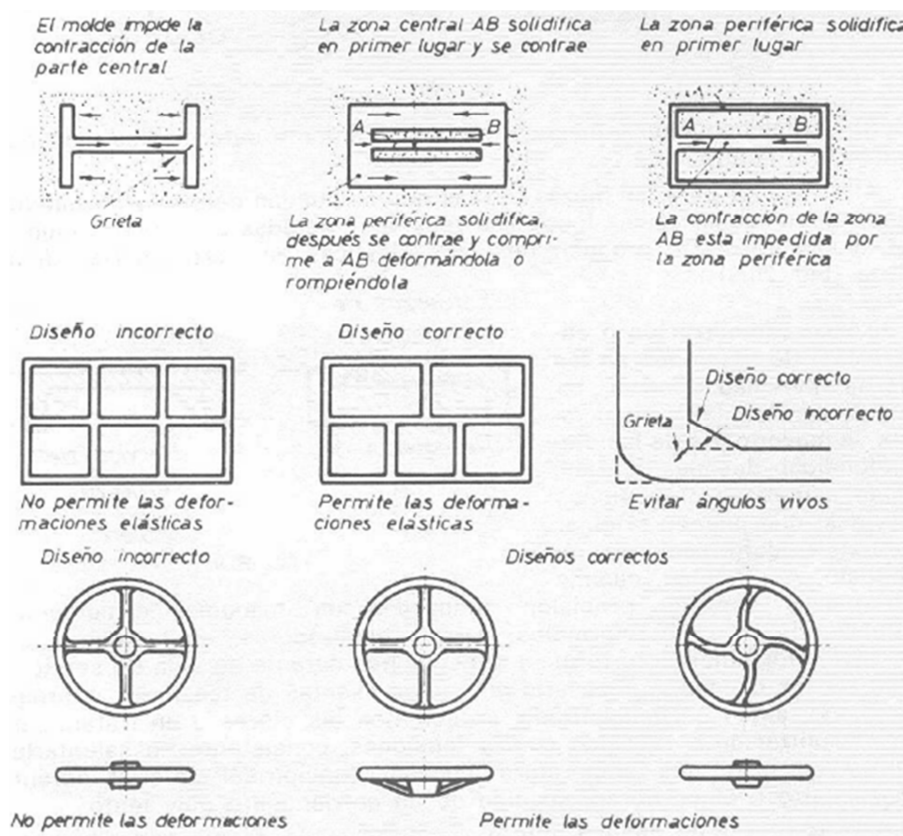


Figura 2.16. Ejemplos para corregir la formación de grietas y deformaciones en las piezas fundidas

También se puede conseguir la estabilización natural, dejando que las piezas envejecan a la intemperie, durante uno o dos años, pero esto evidentemente carece de toda razonabilidad técnica y económica.

<sup>58</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 43) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>.



### 2.1.15 DEFECTOS DEBIDOS A LOS GASES

Durante el proceso de vaciado del metal fundido en la cavidad del molde, se produce un desprendimiento gaseoso procedente de las siguientes fuentes:

- Del metal, que como cualquier otro líquido, disuelve gases en cantidad limitada, dependiendo de la temperatura y presión. Estos gases los absorbe la atmósfera del horno durante la fusión y los desprende durante la solidificación. Los más frecuentes son: H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>.
- De los materiales empleados en la confección del molde y de los machos. Cuando la evacuación de los gases no se completa, algunos pueden quedar atrapados en la aleación después de solidificar, en forma de porosidades o sopladuras.<sup>59</sup>

#### 2.1.15.1 Sopladuras, porosidad y ampollas

Estos defectos, son cavidades redondas, de forma esférica, aplastada o bien alargada, producto de la generación o acumulación de gases o aire encerrado durante el proceso de solidificación del metal en el interior de la cavidad moldeada.

Las sopladuras producidas por burbujas de gas encerradas en el metal se encuentran rara vez en la superficie inferior de la pieza. Pueden presentarse como una lisa y uniforme depresión sobre los lados o en la parte superior, o bien como una

---

<sup>59</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 43) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>.

serie de irregulares depresiones en la parte alta de la pieza, especialmente cuando se trata de piezas que tienen superficies planas.

Las sopladuras de machos se muestran generalmente sobre la superficie en contacto con los machos o cerca de ella.

La porosidad es producida por el vapor o gas que atraviesa el metal en estado líquido, y puede ir acompañada de lodo, sedimentos o tierra (escoria del molde). Es un defecto que se clasifica como sopladura, aunque a veces parezca un rechupe y sea considerado como tal.

Las ampollas son sopladuras con una tenue película de hierro sobre ellas, que aparecen en las superficies de las piezas.

Estos defectos pueden evitarse siguiendo las indicaciones detalladas a continuación:

- Disponiendo la colada de forma que los gases puedan ascender libremente y salir a través de la mazarota.
- Pinchando respiraderos en los lugares adecuados del molde.
- Atacando la arena del molde de forma que la permeabilidad sea máxima.
- Colocando los machos de forma que sus conductos de evacuación estén en comunicación con el exterior.
- Empleando una temperatura de colada lo más baja posible y dejando la aleación en reposo durante un cierto tiempo, para que se desprenda la mayor cantidad de gases.

- Efectuando la fusión y la colada en vacío.<sup>60</sup>

### 2.1.16 INCLUSIONES

Son partículas no metálicas de materiales mezclados en la aleación, que inevitablemente se encuentran en el metal fundido en el momento de la colada, o que accidentalmente pueden incorporarse durante ella. Si estas inclusiones están en la superficie de la pieza, quedan generalmente separadas durante la limpieza de la misma, dejando tan solo los huecos.

También pueden producirse por inclusiones en la cuchara y que no han sido perfectamente disueltas por el metal. Estas inclusiones pueden producir discontinuidades en la masa metálica, afectando las características mecánicas de la pieza fundida. A las procedentes del metal se les denomina naturales o endógenas y a las otras, accidentales o exógenas. Las primeras suelen estar formadas por óxidos, silicatos y sulfuros, mientras que las segundas están constituidas por trozos de material refractario, escorias, arena, óxidos y partículas metálicas, procedente de las paredes del molde.

### 2.1.17 SEGREGACIONES

Como consecuencia del proceso de solidificación, las aleaciones en estado sólido presentan cierta heterogeneidad en su composición química, que se conoce con el nombre de segregación. Este fenómeno provoca que ciertos elementos de la

---

<sup>60</sup> García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (pp. 44-45) (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>.

aleación o las impurezas, se concentren en determinadas regiones de las piezas fundidas. Este fenómeno se da especialmente con las aleaciones que contienen grafito.

Se pueden considerar tres tipos fundamentales de segregación:

### 2.1.17.1 Segregación centrípeta o directa

En situaciones donde el frente de solidificación se aleja de una superficie de la fundición como una de frente plano, figura 2.17, los constituyentes con menor punto de fusión en la aleación en solidificación son empujados hacia el centro. En consecuencia, este tipo de fundición tiene más elevada concentración de elementos de aleación en su centro que en sus superficies.<sup>61</sup>

Este tipo de segregación se forma por las impurezas que rebajan el punto de solidificación y que se concentran en la zona líquida que solidifica en último lugar.

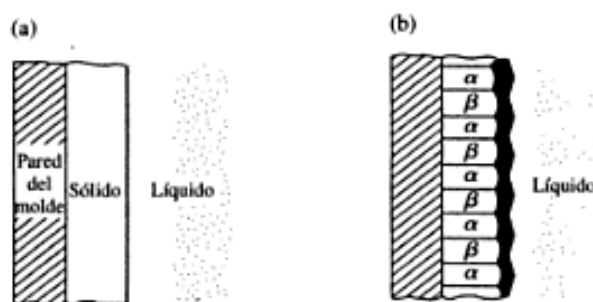


Figura 2.17. Representación esquemática de estructuras fundidas en (a) frente plano, una fase, y (b) frente plano, dos fases.

<sup>61</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 246). México: Prentice Hall.

### **2.1.17.2 Segregación inversa.**

En estructuras dendríticas como las que se encuentran en aleaciones de solución sólida, el centro de la fundición tiene una menor concentración de elementos de aleación. La razón está en que el metal líquido (que tiene una concentración más alta de elementos de aleación) entra en las cavidades desarrolladas debido a contracción por solidificación en los brazos dendríticos, que se han solidificado con anterioridad.<sup>62</sup>

Este tipo de segregación se en las zonas exteriores por los elementos que disminuyen la temperatura de fusión.

### **2.1.17.3 Segregación por gravedad.**

Las inclusiones o compuestos de densidad más elevadas se hunden, y los elementos más ligeros flotan hacia la superficie. Por ejemplo, en las aleaciones (plomo-estaño) que tienen una diferencia de densidad apreciable entre las fases líquida y sólida, se forman primeramente unos cristales de estaño que, por ser menos densos que el plomo líquido, tienden a subir a la superficie.

## **2.1.18 DEFECTOS DEBIDOS A LA ALEACIÓN FRÍA**

Cuando la aleación en el momento de colada está demasiado fría, o cuando los conductos de alimentación no se han dispuesto convenientemente, existe el peligro de que el molde no se llene totalmente y la pieza quede incompleta.

---

<sup>62</sup> Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. (pp. 246). México: Prentice Hall.

Los pliegues y arrugas que presentan en la superficie algunas piezas, son también imputables a la aleación fría.

Si se interrumpe el llenado del molde y acto seguido se continúa, existe el peligro de que la parte que penetra primero en el molde solidifique y no se una con la segunda, dando lugar a una unión fría.

Así mismo, el *“International Committee of Foundry Technical Associations”* presenta la siguiente clasificación para los defectos que pudieran presentarse en el proceso de fundición:

a. Proyecciones metálicas, formadas por aletas, rebabas o proyecciones masivas como ondulaciones y superficies ásperas.

b. Cavidades, formadas por cavidades redondeadas o ásperas internas o expuestas, incluyendo sopladuras, porosidad o cavidades de contracción.

c. Discontinuidades, como son grietas, grietas en caliente o en frío, y porosidades de contracción. Si al metal en solidificación se le restringe en su libre contracción, puede ocurrir el agrietamiento y el desgarramiento. Aunque están involucrados muchos factores en el agrietamiento, un tamaño de grano grande y la presencia de segregados de bajo punto de fusión a lo largo de las fronteras de grano (intergranular) incrementa la tendencia al agrietamiento por calor. El punto frío es una interface en una fundición que carece de una fusión completa debido a la unión de dos corrientes de metal líquido provenientes de puertas diferentes.

d. Superficie defectuosa, como son pliegues, traslapes, cicatrices, capas de arena adheridas y cascarilla de óxido.

e. Fundición incompleta, como son las faltas de llenado (debidas a una solidificación prematura), volumen insuficiente de metal vaciado y fugas (debido a pérdida de metal del molde después del vaciado). Se pueden obtener fundiciones incompletas si el metal fundido está a una temperatura demasiado baja o si se vacía muy lentamente.

f. Dimensiones o formas incorrectas, debido a factores como una inadecuada tolerancia de contracción, un error en el montaje del modelo, una contracción irregular, un modelo deformado o una fundición torcida por la liberación de esfuerzos residuales.

g. Inclusiones, que se forman durante la fusión, solidificación y moldeo, por lo general, de naturaleza no metálica, se consideran como perjudiciales porque actúan como elevadores de esfuerzo y reducen la resistencia de la fundición. Se pueden filtrar partículas de hasta 30  $\mu\text{m}$  durante el procesamiento del metal fundido. Durante la fusión se pueden formar inclusiones cuando el metal fundido reacciona con el entorno (por lo general oxígeno) o con el material del crisol o del molde. Reacciones químicas entre los componentes del metal fundido pueden producir inclusiones; las escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido, también se convierten en inclusiones. El desmoronamiento de las superficies del molde y del corazón también produce inclusiones.

## **2.6 PROCESO DE CONFORMADO PARA BRAZOS DE FRENO DE ASCENSOR**

Los procedimientos de fabricación de un elemento pueden ser clasificados en:

- Fabricación por deformación o moldeo, denominado procedimiento de conformación sin pérdida de material, ya que a lo largo de los procesos no se desperdicia ni se pierde parte alguna del material con el que se trabaja.
- Fabricación por separación y corte, llamado procedimiento de conformación con pérdida de material, ya que a lo largo de los procesos se desperdicia o pierde alguna parte del material con el que se trabaja.
- Procedimiento de fabricación mediante unión de piezas.

El conformado por moldeo se clasifica en:

- Sinterización, en donde la materia prima se reduce a polvo, se vierte y comprime en el molde reproduciendo la pieza deseada.
- Fundición, en el cual el principio fundamental se basa en la fusibilidad del material y consiste en verter metal fundido en un molde de arena o metálico con la forma de la pieza que se requiere obtener. El elemento resulta del enfriamiento y solidificación del metal fundido. Mediante este procedimiento se puede conformar materiales metálicos como acero, fundiciones férreas blancas y grises, bronce, latón, aleaciones de aluminio, magnesio y zinc de moldeo, y algunas aleaciones refractarias de base titanio, niobio, vanadio, molibdeno o wolframio.



El proceso de transformación consiste en una serie de operaciones que parten de un material en bruto y modifican su forma hasta convertirla en una pieza elaborada para darle una utilidad industrial. Para obtener esta utilidad se debe cumplir con los siguientes requisitos imprescindibles:

- Debe ser fiel al diseño establecido
- Coste razonable de material y energía
- Debe superar el control de calidad que garantice su fiabilidad
- Debe quedar lista para ser montada en un conjunto

La secuencia de operaciones a seguir para realizar este método de conformado se puede resumir en:

- Diseñar la pieza que se desea fabricar en la que se especifiquen dimensiones y materiales, así como el procedimiento más idóneo.
- Construir un modelo, que suele ser de madera o yeso.
- Se construye el molde. Si la pieza es hueca se fabrican también los machos que recubren los huecos interiores, en caso de existir.
- Alcanzar la temperatura de fusión de la materia prima.
- Se llena el molde del material fundido.
- Se procede al desmolde, o extracción de la pieza del molde una vez solidificada.
- Se enfría la pieza.

- Se eliminan las partes correspondientes al canal de alimentación, bebedero, etc.
- Se limpia y mecaniza superficialmente si es necesario.

Los procesos de moldeo se clasifican según la naturaleza del molde y el método de vertido. Según el molde pueden ser permanentes (de hierro colado, acero o grafito) o de molde perdido (arena y arcilla); y según el método de vertido, puede ser por gravedad o por presión. La elección del método depende de la complejidad de la pieza, el grado de tolerancia respecto a las medidas establecidas, el número de piezas a fabricar, coste del molde, acabado, entre las principales.

#### **2.1.19 RUGOSIDADES SUPERFICIALES**

Las imperfecciones superficiales en un elemento pueden ser clasificadas en:

Rugosidades que son el producto de las huellas de la herramienta empleada para fabricar la pieza.

Ondulaciones causadas por los desajustes de las máquinas herramienta utilizadas en el mecanizado del elemento.

Imperfecciones mixtas, aparición conjunta de rugosidades y ondulaciones.

Las rugosidades superficiales son el conjunto de irregularidades de la superficie, que han sido definidas convencionalmente en una en una superficie donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.



Los valores de la rugosidad Ra se clasifican en una serie de intervalos Nx, en el cual x es un número entre 1 y 12, pudiendo agruparse según la apreciación visual o táctil en los siguientes grados:

- N1-N4 La superficie es especular.
- N5-N6 Las marcas de mecanizado no se aprecian ni con la vista ni con el tacto.
- N7-N8 Las marcas de mecanizado se aprecian con la vista pero no con el tacto.
- N9-N12 Las marcas se aprecian con la vista y con el tacto.

*Tabla 2.5. Relación entre la clase de rugosidad y la Rugosidad Ra*

<b>Clase de Rugosidad</b>	<b>Ra μm</b>
50	N12
25	N11
12.5	N10
6.3	N9
3.2	N8
1.6	N7
0.8	N6
0.4	N5
0.2	N4
0.1	N3
0.05	N2
0.025	N1

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Poveda Martínez, S., (2001). Acabados Superficiales.*

El elemento analizado posee cuatro agujeros que serán realizados luego del proceso de fundición mediante taladrado, con el objetivo de disminuir la complejidad de la pieza y para que el flujo del material fundido sea uniforme dentro de la cavidad. Luego de un desmolde manual la pieza debe ser pulida manualmente para eliminar los sobrantes del metal o rebabas realizando un proceso de inspección visual y metrológico para obtener un acabado que permita su utilización. La rugosidad obtenida de un proceso de fundición en coquilla es N6 y N8, conforme la tabla 2.4, rugosidad adecuada para la utilización del elemento.

## **2.7 MATERIALES DE FRICCIÓN PARA FRENOS**

Los forros de las zapatas en los frenos de tambor, o de las pastillas en los frenos de disco, se construyen de un conglomerado sintético formado por materiales muy dispares que se pueden clasificar en cuatro grupos:

- a) Componentes básicos: los materiales de este grupo forman la parte resistente del forro y constituyen su estructura. Actualmente, están constituidos por fibras metálicas, fibras de vidrio, fibras minerales y fibras orgánicas.
- b) Componentes de rozamiento: estos materiales se utilizan para favorecer el coeficiente de fricción entre el forro y la superficie del tambor, algunos son polímeros reticulados como el espato pesado. También se utilizan otros como la pizarra en polvo, el caolín, los carbonatos, algunos silicatos y óxidos de aluminio.
- c) Cargas: estos materiales se utilizan como refuerzo de la estructura básica y como abaratamiento del producto aunque también tienen funciones activas como evitar el endurecimiento excesivo del forro, estabilizar el forro térmicamente, evitar la

adherencia entre el forro y el tambor. Para estos fines se utiliza óxido de calcio, óxido de magnesio, el óxido de cinc y los óxidos de hierro, junto con virutas y polvos metálicos de hierro, cobre, latón, bronce y cinc.

- d) Aglomerantes: la misión de los productos de este grupo es unir todos los componentes formando un cuerpo sólido y cohesionado. Como aglomerantes se usan principalmente resinas fenólicas, caucho natural y caucho sintético.

Los forros de freno se montan sobre la estructura de la zapata en los frenos de tambor con remaches, que quedan hundidos en el espesor del forro para evitar su roce contra el tambor, o pegados con resinas vitrificadas de gran adherencia.

En las pastillas de los frenos de disco, el forro siempre va pegado al soporte metálico.<sup>63</sup>

Un material de fricción para freno o embrague debe tener las siguientes características, en un grado que depende de la severidad del servicio:

- Coeficiente de fricción alto y uniforme.
- Propiedades que no sean afectadas por las condiciones ambientales, como la humedad.
- Capacidad para soportar altas temperaturas, junto con una buena conductividad y difusividad térmica, así como un alto calor específico.
- Buena resistencia.
- Alta resistencia al desgaste, rayado y raspadura.

---

<sup>63</sup> Marti Parera, A. (1993). *Frenos ABS*. (pp. 43-44) Barcelona: Marcombo S.A.

- Compatible con el medio ambiente.
- Flexibilidad.<sup>64</sup>

Tabla 2.6. Área del material de fricción que requiere una potencia de frenado promedio dada.

Relación del área con la potencia de frenado promedio, in <sup>2</sup> /(Btu/s)				
Ciclo de trabajo	Aplicaciones comunes	Frenos de banda y de tambor	Frenos de disco	Frenos de disco y yugo
Poco frecuente	Frenos de emergencia	0.85	2.8	0.28
Intermitente	Elevadores, grúas y malacates	2.8	7.1	0.70
Trabajo pesado	Excavadores, prensas	5.6 – 6.9	13.6	1.41

Elaboración: Propia

Fuente: Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (pp. 841). Ciudad: Mc Graw Hill

La manufactura de materiales de fricción resulta un proceso muy especializado y es aconsejable consultar los catálogos y manuales de los fabricantes, así como a los fabricantes mismos, cuando es necesario seleccionar materiales de fricción para aplicaciones específicas. La selección implica considerar muchas características, así como los tamaños estándar disponibles.

<sup>64</sup> Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (pp. 841). Ciudad: Mc Graw Hill.

El forro de trama de algodón se produce como un cinturón de tela impregnado con resinas y polimerizado. Se emplea sobre todo en maquinaria pesada y a menudo se suministra en rollos de hasta 50.24 m de longitud. Los espesores disponibles varía de 3.175 mm a 25.4 mm.

*Tabla 2.7. Características de materiales de fricción para frenos y embragues.*

Material	Coeficiente de fricción f	Presión máxima, psi	Temperatura máxima		Velocidad máxima, pie/min	Aplicaciones
			Instantánea, °F	Continua, °F		
<b>Cermet</b>	0.32	150	1500	750		Frenos y embragues
<b>Metal sinterizado (seco)</b>	0.29 – 0.33	300 – 400	930 – 1020	570 – 660	3600	Embragues y frenos de disco de yugo
<b>Metal sinterizado (húmedo)</b>	0.06 – 0.08	500	930	570	3600	Embragues
<b>Asbesto moldeado rígido (seco)</b>	0.35 – 0.41	100	660 -750	350	3600	Frenos y embragues de tambor
<b>Asbesto moldeado rígido (húmedo)</b>	0.06	300	660	350	3600	Embragues industriales
<b>Zapatillas de asbesto moldeado rígido</b>	0.31 – 0.49	750	930 – 1380	440 – 660	4800	Frenos de disco
<b>Que no sea asbesto moldeado rígido</b>	0.33 – 0.63	100 – 150		500 – 750	4800 – 7500	Embragues y frenos
						<b>Continúa...</b>



<b>Asbesto moldeado semirrígido</b>	0.37 – 0.41	100	660	300	3600	Embragues y frenos
<b>Asbesto moldeado flexible</b>	0.39 – 0.45	100	660 – 750	300 – 350	3600	Embragues y frenos
<b>Hilo y alambre de asbesto arrollado</b>	0.38	100	660	300	3600	Embragues de automóvil
<b>Hilo y alambre de asbesto tejido</b>	0.38	100	500	260	3600	Embragues y frenos industriales
<b>Algodón tejido</b>	0.47	100	230	170	3600	Embragues y frenos industriales
<b>Papel resiliente húmedo</b>	0.09 – 0.15	400	300		PV<500000 psi – pie/min	Embragues y bandas de transmisión

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Budynas, R., Nisbett, K. (2006). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. (pp. 842). México: Mc Graw Hill*

Un forro de trama de asbesto se fabrica de manera similar al de algodón y también contiene partículas metálicas. No es tan flexible como el forro de algodón y está disponible en un rango menor de tamaños. Junto con el forro de algodón, el de asbesto se utilizaba mucho como material de freno para maquinaria pesada. Los forros de asbesto moldeado contienen fibra de asbesto y modificadores de fricción; se usa un polímero termofijo, con calor, para formar un producto moldeado rígido o semirrígido. Su utilización principal es en frenos de tambor.

Las zapatas de asbesto moldeado son similares a los forros moldeados, pero no tienen flexibilidad; se emplean para embragues y frenos.

Las zapatas de material sinterizado se hacen de una mezcla de partículas de cobre y/o hierro con modificadores de fricción, moldeados a alta presión y luego calentados a una temperatura elevada para fundir el metal; se usan en frenos y embragues para aplicaciones de trabajo pesado.

Las zapatas de cermet son similares a las de metal sinterizado y tienen un contenido sustancial de material cerámico.

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS DE LOS BRAZOS DEL SISTEMA DE FRENO DE UN ASCENSOR, MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

La utilización de métodos de aproximación por elementos finitos para resolver modelos matemáticos que describen los fenómenos físicos, permite simular distintos procesos en el campo de la ingeniería con la suficiente aproximación, reduciendo considerablemente la fase de experimentación, que conlleva a la disminución de costos de fabricación, aumentando la productividad y calidad de los productos y disminuyendo los defectos que podrían producirse; lo que permite tener una mayor competitividad.

El método de elementos finitos -MEF- consiste en dividir el sistema en partes o elementos, para un estudio más sencillo y luego reconstruirlo, ensamblando la contribución de cada elemento y prediciendo el comportamiento global. El análisis puede ser dividido en problemas asociados con Sistemas discretos y, Sistemas continuos.

Los sistemas discretos tienen una división natural en elementos claramente diferenciables. Los sistemas continuos no pueden ser divididos en forma natural en unidades simples, dando así un análisis más complejo. Estos sistemas se dividen en elementos que no presentan diferencias claras. Este análisis se realiza por medio del

concepto infinitesimal, lo que lleva a un modelo matemático que se expresa en ecuaciones diferenciales, generalmente en derivadas parciales.

El principio del método de elementos finitos MEF consiste en reducir un problema dado con infinitos grados de libertad a un problema finito en el que se trabaje con un número finito de variables, asociadas a ciertos puntos característicos a los que se les denomina nodos. La segmentación de los continuos se realiza en elementos arbitrarios.

Uno de los conceptos fundamentales para el MEF es la discretización, que consiste en transformar la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de interpolación, la que consiste en una aproximación de los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. El MEF ha sido generalizado, y es capaz de resolver casi cualquier problema de diseño mecánico, transferencia de calor, mecánica de fluidos, magnetismo, etc. siempre y cuando sea posible formularlo como un sistema de ecuaciones.

### **3.1 CONSIDERACIONES INICIALES – ANÁLISIS MECÁNICO**

Como se ha descrito anteriormente, el principio de funcionamiento de un sistema de frenado es la reducción de la energía cinética y/o potencial para transformarla en energía calorífica. Con esta transformación de energía se consigue la reducción de la velocidad, en este caso, del ascensor.

En este sentido, previo a realizar el análisis por elementos finitos del sistema de freno de un ascensor eléctrico, es preciso realizar el análisis mecánico de éste,

con la finalidad de determinar las condiciones de borde o frontera, propias del sistema.

### 3.1.1 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS SOBRE EL BRAZO DE FRENO

El frenado es una de las principales funciones de control en el transporte, y es por esto que muchas de las investigaciones en el campo de la ingeniería están dirigidas al desarrollo, diseño y optimización de estos sistemas.

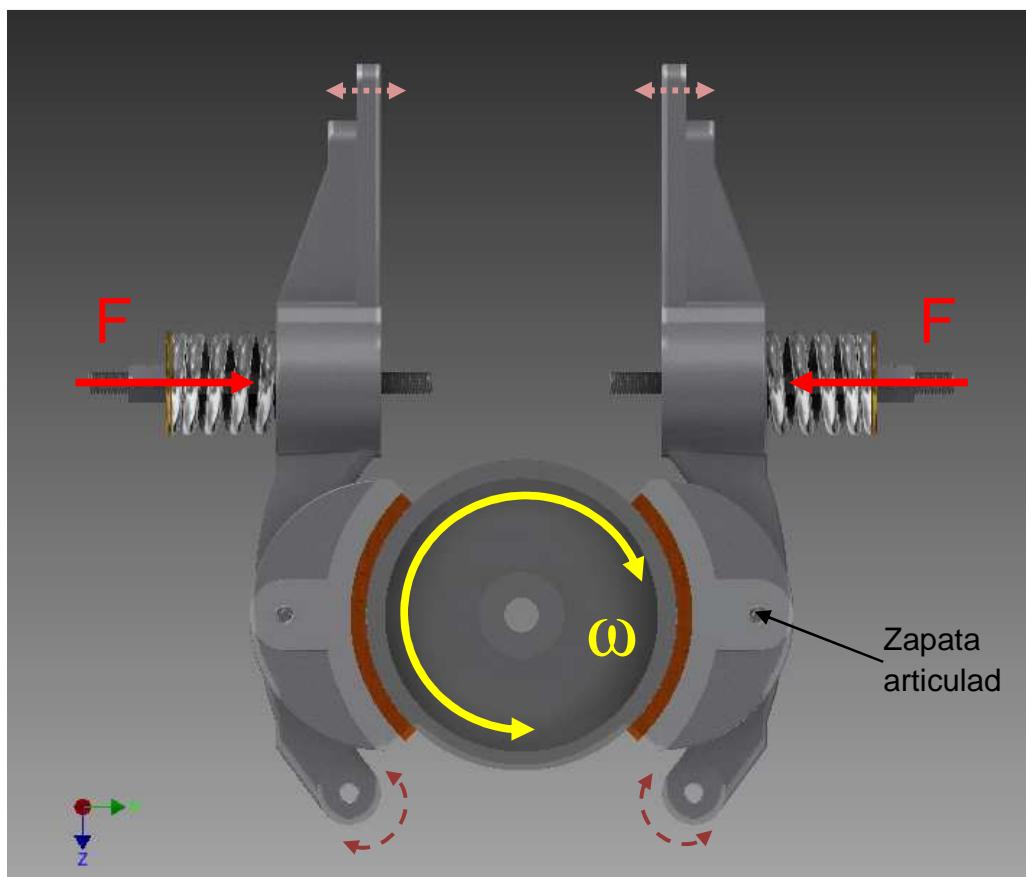


Figura 3.1. Esquema representativo del sistema de freno de un ascensor eléctrico y su movilidad relativa.  $\omega$ , velocidad angular del disco de freno;  $F$ , fuerza ejercida por el resortes

En la figura 3.1 se muestran los elementos principales que constituyen un sistema de freno típico de un ascensor eléctrico, sin incluir la bobina electromagnética, siendo el brazo de freno el elemento estructural del sistema que se encargan de soportar la acción de las cargas originadas cuando el sistema entra en funcionamiento.

### 3.1.2 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA EL BRAZO DE FRENO

Cuando el sistema de frenos entra en funcionamiento los elementos, indicados en la figura 3.1, producen y/o transmiten al brazo de freno las fuerzas mostradas en la figura 3.2.

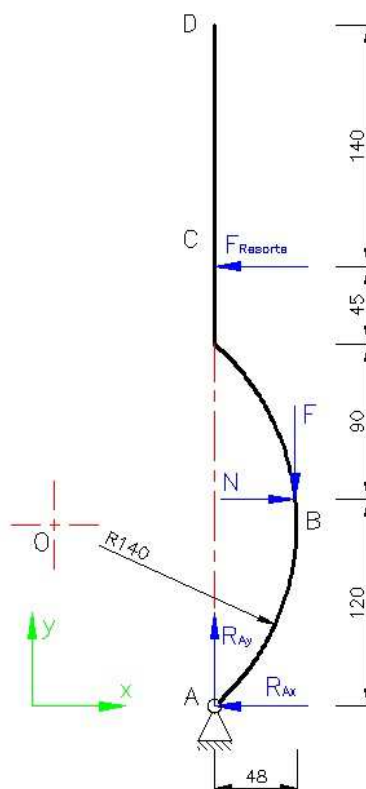


Figura 3.2. Diagrama de Cuerpo Libre del brazo de freno

Donde:

$F_{\text{Resorte}}$ : Fuerza máxima debida al accionamiento del resorte de compresión

F: Fuerza debida a la fricción entre el disco y la pastilla de freno

N: Normal de contacto entre el disco y la pastilla de freno.

$R_{Ax}$ ,  $R_{Ay}$ : Reacciones

Cabe señalar que las fuerzas denominadas como F y N son generadas como efecto del frenado del ascensor y, éstas son transmitidas desde el punto de contacto entre el disco y la pastilla de freno al brazo de freno a través de la zapata articulada del sistema de freno.

Como consecuencia de la aplicación de las cargas mostradas en la figura 3.2, el brazo de freno se encuentra sometido a una combinación de los siguientes esfuerzos:

- Flexión en el eje “y”, producto de las cargas denominadas como  $F_{\text{Resorte}}$ , F y N
- Compresión y flexión en el eje “x”; producto de la carga denominada como F

De esta forma, al realizar el análisis estático del brazo de freno del ascensor eléctrico, a partir de su diagrama de cuerpo libre, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_x = 0$$

$$N = F_{Resorte} + R_{Ax} \quad (3.1)$$

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{Resorte} = \frac{120*N + 48*F}{255} \quad (3.2)$$

### 3.1.3 CÁLCULO DEL PAR DE FRENADA DE UN ASCENSOR

El par de frenada se compone de dos partes: la componente estática necesaria para bloquear al sistema después de la detención, y la componente dinámica para absorber la energía cinética de todas las partes móviles del sistema.

El par de frenada debe ser calculado en el caso más desfavorable que resulta cuando el ascensor se encuentra en el piso más inferior. En la figura 3.3 se presenta el diagrama para realizar dicho cálculo.

Dado que el freno electromagnético se aplica a velocidad prácticamente nula, el par de frenado mecánico bajo condiciones normales de operación será aproximadamente igual al par estático. En el caso de un corte de energía eléctrica cuando la cabina alcanza el piso inferior con la carga equivalente al 125% de la carga nominal, el freno deberá ser capaz de detener la cabina de forma fiable y de conseguir que la cabina alcance la cota del piso inferior de forma suave. Por lo tanto, ambos pares, el estático y el dinámico, deben tomarse en consideración.<sup>65</sup>

---

<sup>65</sup> Miraverte, A. (2007). *Elevadores: Principios e innovaciones*. (pp. 85-89) Barcelona: Reverté S.A.



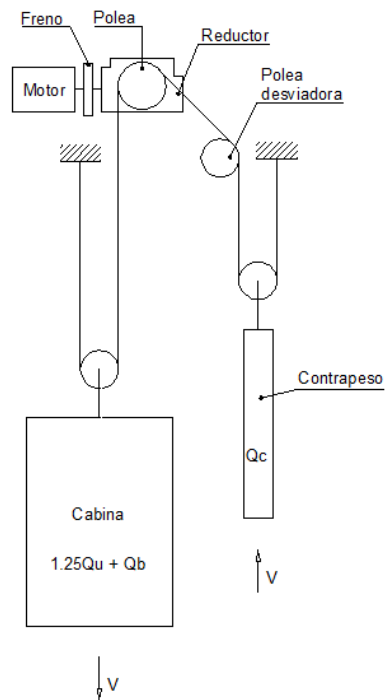


Figura 3.3. Diagrama para el Cálculo del par de frenada

Donde:

$Q_u$ : Capacidad del ascensor, [kg];

$Q_b$ : Peso de la cabina, [kg];

$Q_c$ : Peso del contrapeso, [kg] y

$v$ : Velocidad, [m/s]

Del análisis de la figura 3.3, el par estático toma la siguiente expresión:

$$M_{est} = \frac{(1.25Q_u + Q_b - Q_c) \times g_n \times D_T \times \eta_S}{(2 \times i_G)} \quad [N \cdot m] \quad (3.3)$$

Donde:

$n$ : Revoluciones por minuto del motor;

$I_m$ : Momento de inercia del Motor, [ $\text{kg m}^2$ ];

$D_T$ : Diámetro de la polea de arrastre, [m];

$g_n$ : Aceleración de la gravedad, [ $\text{m/s}^2$ ];

$\eta_s$ : Eficiencia mecánica del sistema, se obtiene del producto entre la eficiencia del sistema de poleas  $\eta_p$  y, de la eficiencia entre el motor y la polea  $\eta_m$

$$\eta_s = \eta_p \times \eta_m \quad (3.4)$$

$I_G$ : Relación de transmisión

$$I_G = \frac{n}{n_v} \quad (3.5)$$

El momento dinámico toma la siguiente expresión:

$$M_{din} = I \times \varepsilon \quad (3.6)$$

Con

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.7)$$

Siendo

$I_1$ : Momento de inercia del rotor y tornillo sinfín, [ $\text{kg m}^2$ ];

$I_2$ : Momento de inercia de rueda del tornillo sinfín y polea, [kg m<sup>2</sup>] y

$I_3$ : Momento de inercia de todas las partes del sistema que se mueven linealmente, [kg m<sup>2</sup>];

El par de frenado total requerido es:

$$M_T = M_{est} + M_{din} \quad (3.8)$$

### 3.1.3.1 Desaceleración angular

El tiempo de frenada  $t_f$  puede calcularse en base a la relación de desaceleración. Esta relación debe especificarse en función de la distancia de frenada bajo condiciones de operación.

$$t_f = \frac{\pi \times n}{30 \varepsilon} \quad (3.9)$$

En esta línea, una vez planteadas las ecuaciones necesarias para el cálculo del par de frenada de un ascensor, a continuación se presentan los datos que permiten resolver las citadas ecuaciones.

*Tabla 3.1. Datos de entrada para la determinación del par de frenada.*

Descripción	Valor	Unidades
Capacidad Ascensor (Qu)	600	Kg
Peso de la cabina (Qb)	890	Kg
Peso del Contrapeso (Qc)	1160	Kg
Continúa....		

<b>Velocidad (v)</b>	1	m/s
<b>rpm del motor (n)</b>	1460	Rpm
<b>Momento de inercia del motor (Im)</b>	0,205	kg m <sup>2</sup>
<b>Diámetro de la polea de tracción (Dt)</b>	0,5	m

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Especificaciones técnicas para un ascensor eléctrico (Ver anexo A)*

*Tabla 3.2. Datos de entrada adicionales*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Factor del cable</b>	1	
<b>Aceleración gravedad (g<sub>n</sub>)</b>	9.81	m/s <sup>2</sup>

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Miraverte, A. (2007). Elevadores: Principios e innovaciones. Barcelona: Reverté S.A*

En consecuencia, y una vez resueltas las ecuaciones respectivas se obtienen los siguientes resultados:

*Tabla 3.3. Resumen de resultados del cálculo del par de frenada de un ascensor.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Momento estático</b>	25.13	N-m
<b>Momento dinámico</b>	66.94	N-m
<b>Par de frenada total</b>	92.07	N-m

*Elaboración: Propia*

### 3.1.4 ANÁLISIS DEL MECANISMO DE FRENO - ZAPATA EXTERIOR ARTICULADA SIMÉTRICA

El mecanismo de freno del ascensor analizado en este proyecto, corresponde al mecanismo de un freno con zapata articulada simétrica, en el cual las fuerzas o cargas se crean por medio del contacto entre la superficie de un cilindro que gira (disco de freno), y un material de fricción denominado banda (pastilla de freno), el cual cubre la cara cilíndrica interna de la zapata, que constituye el eslabón que recibe la fuerza de accionamiento, transmitiéndola al brazo de freno en dos componentes, la normal de contacto y la fuerza producto de la fricción.

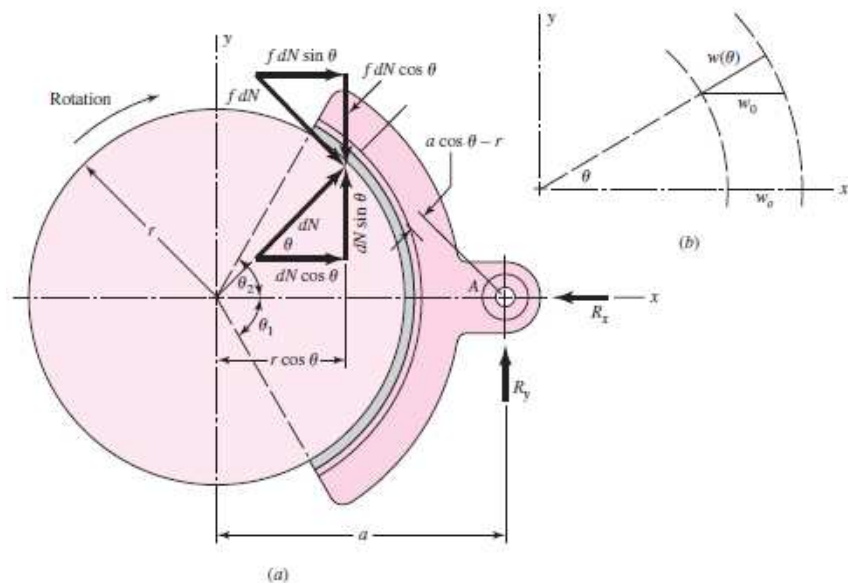


Figura 3.4. a) Freno con zapata exterior articulada simétrica, b) desgaste del revestimiento de fricción del freno <sup>66</sup>

<sup>66</sup> Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (pp. 822). México: Mc Graw Hill

Para el presente análisis se considera que la presión a lo largo de la zapata es proporcional a las deformaciones, éstas, a su vez, son proporcionales a los esfuerzos (en este caso de contacto) entre la zapata de freno y el tambor.

El mecanismo de freno con zapata articulada simétrica es un caso especial, ya que, el pivote se halla situado simétricamente, de modo tal que es nulo el momento de las fuerzas de fricción con respecto al punto de articulación.

La configuración geométrica de tal freno se muestra en la figura 3.4. Para obtener la relación de distribución de presión se supone que el revestimiento se desgasta siempre de tal manera que conserva su forma cilíndrica.

Del análisis del esquema simplificado de las fuerzas que actúan en el mecanismo de freno, presentado en la figura 3.4, y en razón de la simetría se determina lo siguiente:

$$R_x = -N \quad (3.10)$$

$$R_y = -fN \quad (3.11)$$

$$T = afN \quad (3.12)$$

Donde:

$R_x$ : Reacciones debidas a la acción del sistema de freno, [kg]

$R_y$ : Reacciones debidas a la acción del sistema de freno, [kg];

N: Normal de contacto, [kg];

f: Coeficiente de fricción

a: Distancia geométrica, [m];

T: Par de frenada, [kg m];

Así mismo, una vez planteadas las ecuaciones necesarias para determinar las diferentes reacciones debidas a la acción del sistema de freno, a continuación se presentan los datos que permiten resolver las citadas ecuaciones.

*Tabla 3.4. Datos de entrada para la determinación de las reacciones debidas a la acción del sistema de freno.*

Descripción	Valor	Unidades
<b>Distancia geométrica (a)</b>	0.15	m
<b>Diámetro del disco de freno</b>	0.18	m
<b>* Coeficiente de fricción del material de freno</b> (zapatas de asbesto moldeado rígido)	0.35	
<b>Par de frenada total</b>	92.07	N-m

*Elaboración: Propia*

\* Fuente: Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

México: Mc Graw Hill.

En consecuencia, y una vez resueltas las ecuaciones respectivas se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.5. Reacciones producto de la acción del sistema de freno

Descripción	Valor	Unidades
Normal de contacto	1753,68	N
Reacción, $R_x$	1753,68	N
Reacción, $R_y$	613,19	N

Elaboración: Propia

Finalmente, al trasladar las reacciones  $R_x$  y  $R_y$  al diagrama de cuerpo libre presentado en la figura 3.2; así como, al resolver las ecuaciones (3.1) y (3.2) se obtiene lo siguiente:

$$R_x = N = 1753.68 [N]$$

$$R_y = F = -fN = 613.79 [N]$$

$$F_{Resorte} = 940.8 [N]$$

La carga correspondiente a  $F_{Resorte}$ , obtenida del análisis anterior, representa la carga máxima que el resorte de compresión regulable debe ejercer sobre el sistema de freno del ascensor para detener la cabina de forma segura y confortable.

### 3.1.5 ACCIÓN DEL RESORTE DE COMPRESIÓN REGULABLE EN EL BRAZO DE FRENO

Como se ha descrito anteriormente, uno de los elementos que intervienen en el funcionamiento del sistema de frenos de un ascensor es precisamente el resorte



de compresión regulable, la fuerza ejercida por este componente es la encargada de mantener el elemento de fricción del freno en contacto con el disco de freno, produciendo así el efecto de frenado del ascensor.

Para determinar la fuerza máxima que el resorte de compresión utilizado en el sistema de freno objeto de este estudio es capaz de ejercer, es necesario definir las siguientes ecuaciones: <sup>67</sup>

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (3.13)$$

Donde:

$S_{ut}$ : Resistencia última a la tensión, [N/m]

A y m: Constantes del resorte

d: Calibre del resorte

$$S_y = 0.75S_{ut} \quad (3.14)$$

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (3.15)$$

Donde:

$S_y$ : Resistencia a la fluencia, [N/m]

$S_{sy}$ : Resistencia a la fluencia de torsión, [N/m]

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{c} \quad (3.16)$$

---

<sup>67</sup> Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (pp. 518-519). México: Mc Graw Hill

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.17)$$

Donde:

$K_s$ : Factor de multiplicación del esfuerzo cortante

$C$ : Índice del resorte

$D$ : Diámetro medio del resorte

Finalmente, la fuerza máxima ejercida por el resorte se determina por:

$$F_{max} = \frac{S_{sy}\pi d^3}{8K_s D} \quad (3.18)$$

*Tabla 3.6. Constantes a emplear para estimar la resistencia a la tensión de algunos aceros para resortes.*

<b>Material</b>	<b>ASTM núm.</b>	<b>Exponente, <i>m</i></b>	<b>Diámetro, mm</b>	<b>A, MPa</b>
<b>Alambre de piano</b>	A228	0.145	0.10 – 6.5	2211
<b>Alambre T y R en aceite</b>	A229	0.187	0.5 – 12.7	1855
<b>Alambre estirado duro</b>	A227	0.190	0.7 – 12.7	1783
<b>Alambre al cromo vanadio</b>	A232	0.168	0.8 – 11.1	2005
<b>Alambre al cromo silicio</b>	A401	0.108	1.6 – 9.5	1974
		0.146	0.3 – 2.5	1867
<b>Alambre inoxidable</b>	A313	0.263	2.5 – 5	2065

**Continúa...**

		0.478	5 – 10	2911
<b>Alambre de bronce fosforado</b>	B519	0	0.004 – 0.022	1000
		0.028	0.022 – 0.075	913
		0.064	0.075 – 0.30	932

*Elaboración: Propia*

*Fuente:* Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

(pp. 507) México: Mc Graw Hill

Igualmente, una vez planteadas las ecuaciones necesarias para determinar la fuerza máxima que el resorte de compresión puede ejercer en el sistema de freno, a continuación se presentan los datos que permiten resolver las citadas ecuaciones.

*Tabla 3.7. Configuración del resorte de compresión empleado en el sistema de frenos del ascensor eléctrico objeto del estudio.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Calibre (d)</b>	9,525	mm
<b>Diámetro exterior</b>	50,8	mm
<b>Número total de espiras</b>	9 (ambos extremos cerrados y aplanados)	
<b>Material</b>	Alambre estirado duro	A = 1783 Mpa m = 190

*Elaboración: Propia*

Entonces, una vez resueltas las ecuaciones planteadas, la fuerza máxima que el resorte de compresión regulable puede ejercer sobre el sistema de freno es de:

$$F_{max} = 3710 [N]$$

Como es evidente  $F_{max} > F_{Resorte}$ , es decir, la fuerza máxima que el resorte de compresión regulable puede ejercer sobre el sistema de freno es mayor que la fuerza real requerida por dicho sistema, esto, debido a los requerimientos de seguridad de este elemento por parte del fabricante.

En consecuencia, a partir de la experiencia en el montaje y regulación del resorte de compresión dentro del sistema de frenos de un ascensor eléctrico se determina que este jamás aplica toda su carga al sistema, es decir que el valor calculado de  $F_{max}$  no será aplicado en su totalidad al brazo de freno, por lo cual, para el análisis por elementos finitos se utilizará el valor correspondiente a  $F_{Resorte} = 940.8 [N]$ .

### **3.1.6 INFLUENCIA DEL ENTORNO DE TRABAJO**

El circuito de tracción, del cual forma parte el sistema de freno de un ascensor eléctrico, como regla general se ubica en el cuarto de máquinas, mismo que puede encontrarse en la parte superior del ducto del ascensor así como también en la parte inferior de este.

Cualquiera que sea la ubicación del cuarto de máquinas, este debe garantizar, entre otros aspectos, un adecuado sistema de ventilación, ya sea mecánico o natural, con el fin de evacuar el aire caliente que se genera como efecto del accionamiento de cada uno de los elementos que forman el circuito de tracción, de manera especial se debe considerar que el sistema de frenos absorbe toda la

energía mecánica de rotación del ascensor y la disipa principalmente en forma calor. Todo esto, de forma tal que la temperatura dentro del cuarto de máquinas se mantenga en condiciones recomendadas por el fabricante.

Claro está que, en zonas donde existen condiciones climatológicas extremas, como son elevada o muy baja temperatura y una humedad relativa inadecuada, el sistema de ventilación (aire acondicionado) debe garantizar que el ambiente en el cuarto de máquinas se mantenga en los niveles recomendados por el fabricante.

Así mismo, otra condición importante que se debe garantizar en el cuarto de máquinas o en el lugar asignado para la ubicación del circuito de tracción, es un ambiente limpio y libre de residuos líquidos o sólidos de cualquier índole.

En consecuencia, si el entorno en el cual el sistema de freno de un ascensor es adecuado y cumple con las especificaciones dadas por el fabricante, así como con las recomendaciones dadas en el numeral 15.3.10 “SALA DE MÁQUINAS” de la Norma Ecuatoriana de Construcción, Capítulo 15, Parte 15-3, Instalaciones Electromecánicas, éste no debería influenciar de ninguna forma el correcto desempeño del sistema de freno.

### **3.1.7 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE BRAZOS DE FRENO**

En este tema, debido a que las fábricas de este tipo de elementos mantienen como confidencial sus procesos productivos, ya que, no se ha encontrado información específica al respecto de materiales utilizados para la producción de

brazos de frenos de ascensor, para el presente proyecto, se realiza un procedimiento de selección de materiales para determinar el material más adecuado.

### 3.1.7.1 Selección del material

Para seleccionar el material adecuado para la fabricación de brazos de freno, se sigue el procedimiento ilustrado en la figura 3.5.

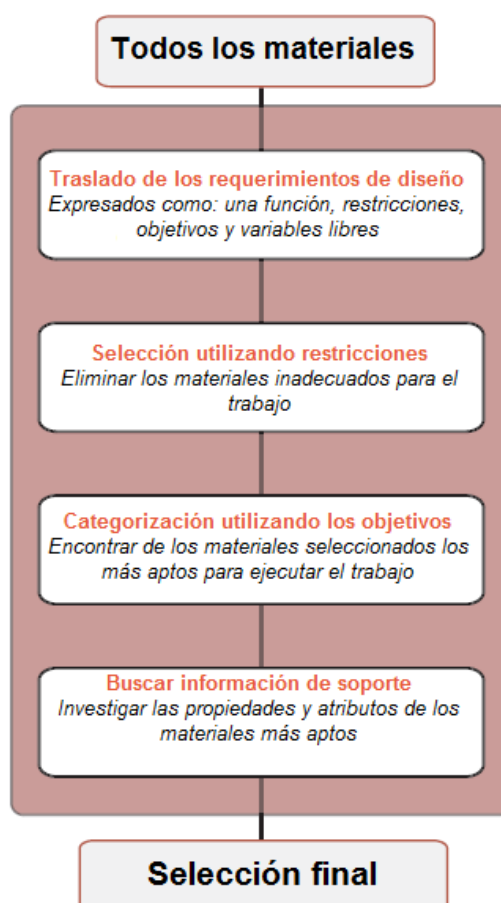


Figura 3.5. Estrategia para la selección de materiales<sup>68</sup>

<sup>68</sup> Ashby, M. (2005). *Materials selection in mechanical desing*. (pp. 82). Oxford: ELSILVER Butterworth-Heinemann.

### 3.1.7.1.1 Traslado de los requerimientos de diseño

Tomando en consideración la funcionalidad del sistema de frenos de un ascensor eléctrico, en la tabla 3.8, se resumen los requerimientos de diseño.

Tabla 3.8. Función, restricciones, objetivos y variables libres para el brazo de freno.

<b>Función</b>	Brazo de freno para ascensor eléctrico
<b>Restricciones</b>	<p>Longitud y geometría general del elemento</p> <p>Esfuerzos, el material debe soportar con un margen de seguridad adecuado las cargas de diseño.</p> <p>Rigidez, el material no debe deformarse bajo las cargas de diseño</p> <p>Proceso de producción: fundición</p>
<b>Objetivo</b>	Minimizar la masa
<b>Variables libres</b>	Selección del material

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Ashby, M. (2005). Materials selection in mechanical desing. (pp. 83) Oxford: ELSILVER Butterworth-Heinemann.*

Entonces, en atención a la función, objetivo y las restricciones planteadas, la selección del material se lo realiza en base al esquema propuesto en la figura 3.6.

Para realizar la selección de materiales, con el procedimiento propuesto en esta sección, es necesario seleccionar la línea guía, de las indicadas en la figura 3.6, que dependen de las propiedades de los materiales  $\sigma_f/\rho$ ,  $(\sigma_f/\rho)^{2/3}$  y  $(\sigma_f/\rho)^{1/2}$ , de la

funcionalidad del elemento mecánico que se desea fabricar, así como del objetivo propuesto, minimizar la masa.

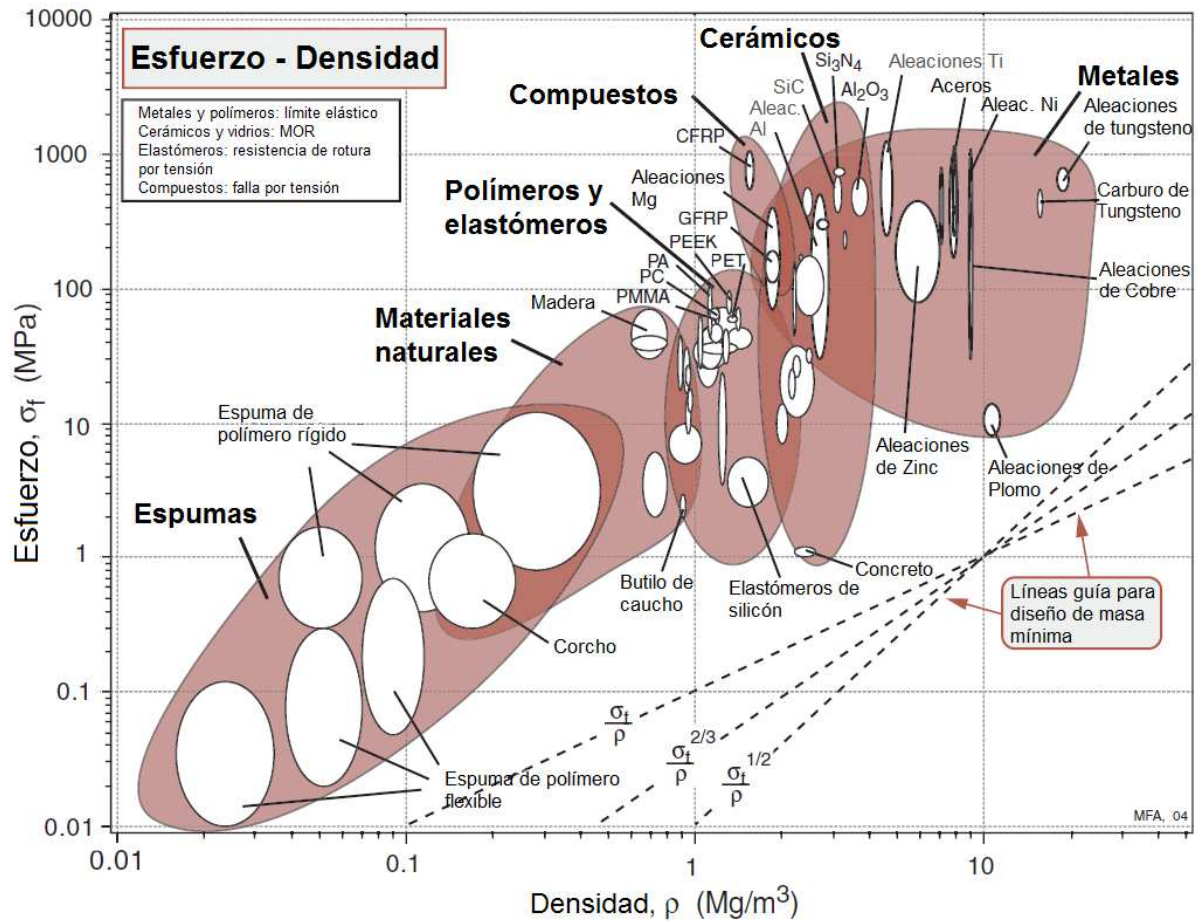


Figura 3.6. Esfuerzo de fluencia,  $\sigma_f$ , en función de la densidad,  $\rho$ . Las líneas guía de las constantes  $\sigma_f/\rho$ ,  $\sigma_f^{2/3}/\rho$ ,  $\sigma_f^{1/2}/\rho$ , se utilizan para diseños de minimización de peso, límite elástico.<sup>69</sup>

<sup>69</sup> Ashby, M. (2005). *Materials selection in mechanical desing*. (pp. 54). Oxford: ELSILVER Butterworth-Heinemann.



En la tabla 3.9 se presentan las propiedades de materiales característicos para diferentes elementos mecánicos.

*Tabla 3.9. Propiedades de los materiales para un diseño en base a esfuerzos límites para minimizar la masa (costo, energía, impacto medioambiental)*

<b>Funciones y Restricciones</b>	<b>Maximizar</b>
<b>Barra (riostra a tensión)</b>	
Rigidez y longitud especificada; área de la sección libre	$\sigma_f/\rho$
<b>Eje (cargado a torsión)</b>	
Carga, longitud y forma especificada, área de la sección libre	$\sigma_f^{2/3}/\rho$
Carga, longitud, y radio exterior especificado; espesor de la pared libre	$\sigma_f/\rho$
Carga, longitud y espesor de la pared especificado; radio exterior libre	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<b>Viga (cargada a flexión)</b>	
Carga, longitud y forma especificada; área de la sección libre	$\sigma_f^{2/3}/\rho$
Carga, longitud y altura especificada; ancho libre	$\sigma_f/\rho$
Carga, longitud y ancho especificado; altura libre	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<b>Columna (puntal a compresión)</b>	
Carga de pandeo, longitud y forma especificada; área de la sección libre	$\sigma_f/\rho$
<b>Panel (placa plana, cargada a flexión)</b>	
Rigidez, longitud y ancho especificada; espesor libre	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<b>Chapa (placa plana, comprimido en el plano , falla por pandeo)</b>	
Carga de colapso, longitud y ancho especificado, espesor libre	$\sigma_f^{1/2}/\rho$
<b>Continúa...</b>	

<b>Cilindro con presión interna</b>	
Distorsión elástica, presión y radio especificado; espesor de la pared libre	$\sigma_f/\rho$
<b>Cascarón esférico con presión interna</b>	
Distorsión elástica, presión y radio especificado; espesor de la pared libre	$\sigma_f/\rho$
<b>Volantes, Discos Giratorios</b>	
Energía de almacenamiento máxima por unidad de volumen; velocidad dada	$\sigma_f$
Energía de almacenamiento máxima por unidad de masa; ninguna falla	$\sigma_f/\rho$

*Elaboración: Propia*

*Fuente: Ashby, M. (2005). Materials selection in mechanical desing. (pp. 509) Oxford: ELSILVER Butterworth-Heinemann.*

En consecuencia, tal cual lo descrito en la sección correspondiente al diagrama de cuerpo libre del brazo de freno del ascensor, éste se encuentra sometido básicamente a cargas de flexión, y por tanto, su comportamiento mecánico es semejante a una viga cargada a flexión; de igual forma, las cargas que actúan sobre el elemento son conocidas, así como la longitud y forma general se encuentra especificada. Por lo tanto, para la selección de materiales, se utiliza la línea guía correspondiente a las propiedades del material  $(\sigma_f/\rho)^{2/3}$  para una viga cargada a flexión cuya carga, longitud y forma están especificadas.

#### *3.1.7.1.2 Selección de materiales utilizando restricciones*

Para una selección imparcial de materiales, en la fase inicial de esta etapa, es necesario considerar a todos los materiales disponibles, de allí, se realiza la selección de materiales, descartando los materiales que no puedan “realizar el

trabajo”, en razón de que uno o más de sus atributos constituyen un limitante respecto de las restricciones de diseño inicialmente planteadas.

En la figura 3.7 se presenta el proceso de selección de los materiales que cumplen con los requerimientos de diseño.

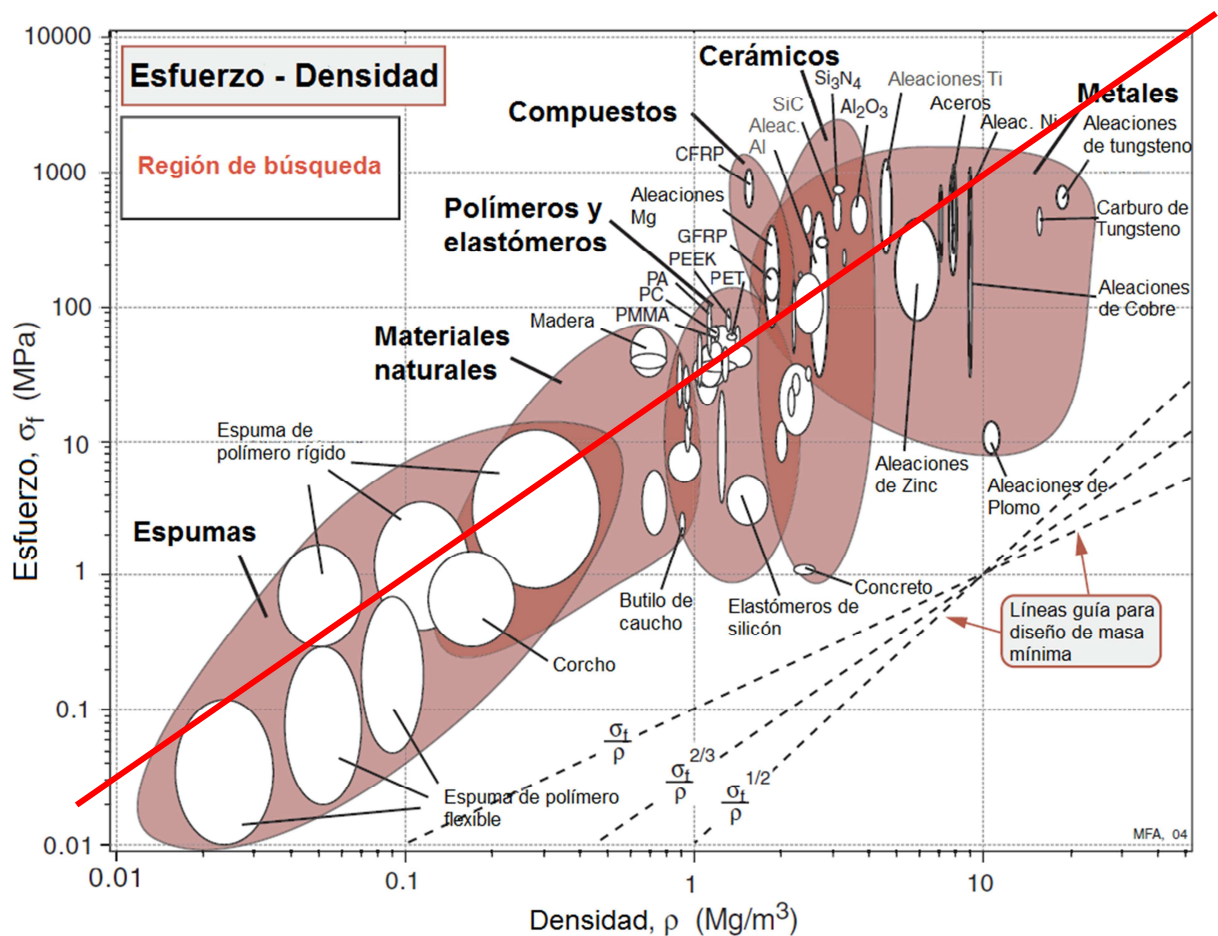


Figura 3.7. Selección de los materiales que cumplen con los parámetros de diseño

La línea guía, correspondiente a las propiedades del material  $(\sigma_f/\rho)^{2/3}$ , debe desplazarse hacia arriba de la figura 3.7 “Esfuerzo de fluencia,  $\sigma_f$ , en función de la

densidad  $\rho$ ", manteniendo la inclinación hasta que un razonablemente pequeño grupo de materiales es aislado sobre ésta.

### 3.1.7.1.3 Categorización de materiales utilizando los objetivos

El siguiente paso consiste en buscar, de los materiales que cumplen con las restricciones de diseño, a aquellos que maximizan el desempeño del elemento mecánico (brazo de freno). Así, el mejor material para la fabricación de brazos de freno para un ascensor eléctrico es aquel que tenga una baja densidad con un esfuerzo de fluencia lo más alto posible, con un costo accesible.

En la tabla 3.10 se enlistan los materiales que cumplen con las condiciones de diseño planteadas para el brazo de freno.

*Tabla 3.10. Materiales para la elaboración de brazos de freno de ascensor*

Material	Observaciones
<b>Espumas de polímero rígido</b>	El material no es apto para producción de elementos mecánicos por el proceso fundición, propiedades del material pueden variar ampliamente con la temperatura.
<b>Aleaciones de magnesio</b>	Maquinado relativamente fácil, sin embargo, las partículas de magnesio (pequeñas virutas) se oxidan rápidamente por lo cual debe tenerse cuidado para evitar riesgos de incendio.
<b>Continúa...</b>	

<b>Aleaciones de aluminio</b>	Poseen buenas propiedades mecánicas, se mecanizan con facilidad, buena resistencia a la corrosión.
<b>Aleaciones de Titanio</b>	Propiedades mecánicas superiores a las del acero; resistente a la corrosión; costoso.
<b>Aceros</b>	Excelente resistencia mecánica, sin embargo, su densidad es elevada, además se necesita tratamientos posteriores para prevenir la corrosión lo que aumenta el costo.

*Elaboración: Propia*

En consecuencia, para la fabricación de los brazos de freno para ascensores se sugiere el uso de aleaciones de aluminio.

#### *3.1.7.1.4 Información de soporte de los materiales seleccionados*

Una vez determinado el material para la fabricación de los brazos de freno de un ascensor eléctrico, aleación de aluminio, es importante, en esta instancia, puntualizar el tipo de aleación a utilizar.

*Tabla 3.11. Ventajas, desventajas y aplicaciones para las aleaciones de aluminio*

<b>Tipo de aleación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Aluminio-cobre</b>	Facilidad de mecanización a alta velocidad en piezas torneadas complejas, fácil desprendimiento de viruta.	Riesgo de corrosión por su contenido de cobre.  No es posible la soldadura por la aparición de microgrietas y poros.	Elementos estructurales que requieran elevadas características mecánicas, en aeronáutica, piezas forjadas para bicicletas (mariposas, bielas, frenos, etc.); para la construcción de herrajes, tornillos,  <b>Continúa...</b>

			pernos, remaches para ser aplicados en estado de temple antes del envejecimiento térmico (natural o artificial); palas forjadas para hélices de helicópteros, armamento; troqueles, moldes de calzado, maquinaria, herramientas, tuberías para cartolas de camiones, tubos estirados para flechas de tiro con arco, etc.
<b>Aluminio-cobre-silicio</b>	Funden fácilmente, buena maquinabilidad, se pueden producir piezas de forma complicada.	Riesgos de corrosión por su contenido de cobre.	Cajas de bombas, piezas de aviones, cárteres, pistones de automóviles.
<b>Aluminio-silicio</b>	Buena soldabilidad, ductilidad y sellado, excelente resistencia a la corrosión.	Baja resistencia mecánica y baja maquinabilidad.	Fabricación de piezas de motores alternativos (bloque motor, culatas, pistones) a menudo se emplean estas aleaciones con composiciones especiales no normalizadas de alto contenido en silicio.
<b>Aluminio-magnesio</b>	Aleación de alta resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión, buena resistencia a muy bajas temperaturas, por el contenido de magnesio se puede cortar con láser sin ningún problema.	Esta aleación suele sufrir agrietamientos intercristalinos y de corrosión bajo tensión tras tratamientos térmicos inadecuados (soldadura).	Recubrimiento de fachadas; mobiliario, equipos de música e informática; carrocerías de autobuses, puertas de vagones de ferrocarril, embellecedores de marcos de automóviles, pulsadores de luz; construcciones navales en general y aquellas que necesiten buenas características mecánicas de soldadura y anticorrosivas en ambiente marino; construcción de recipientes para líquidos como gasolinas, industrias químicas, tanques, silos de almacenamiento de cereales; tuberías para intercambiadores de calor y condensadores; construcción de bandejas para congelar pescado; carrocería de vehículo todo terreno; señales de tráfico, estructuras metálicas, aplicaciones criogénicas.
<b>Aluminio-silicio-magnesio</b>	Estas aleaciones posee valores de resistencia, dureza y maquinabilidad considerablemente mayores a las demás aleaciones. En este grupo, la aleación AlSi7Mg es la más resistente y de mejor maquinabilidad a costa de una menor facilidad de moldeo.	Poseen una buena aptitud a la soldadura pero pierde casi un 30% de la carga de rotura en la zona soldada.	Perfiles de secciones complejas para estructuras de autobuses y vehículos livianos y vagones de ferrocarril, estructuras metálicas, postes eléctricos, báculos de iluminación, plataformas, tuberías, aplicaciones en la industria eléctrica, química y mecánica; en industria textil, bobinas, piezas de máquinas, bridas, pernos, tornillos, tuercas; perfiles para arquitectura, puertas, ventanas, muros cortina, mobiliario, peldaños, barandillas, verjas enrejadas, barreras, cercados, disipadores de calor, módulos

Continúa...

	<p>electrónicos, carcasas para motores eléctricos, sistemas de ensamblado, elementos especiales para maquinaria, carrocerías de camión, instalaciones neumáticas, tubos de riego, calefacción y refrigeración. Se aplica en la industria para la fabricación de moldes, troqueles, maquinaria, herramientas, industria naval, piezas de bicicletas, muebles, oleoductos, puentes, torres y postes, construcción de calderas, aplicaciones aeroespaciales, cobertura de rotores de helicópteros, etc, sistemas hidráulicos, equipamiento de minas, tecnología nuclear, mástiles y timones para barcos (especialmente para agua dulce).</p>
<p><b>Aluminio-zinc-magnesio</b></p>	<p>La característica más relevante de este grupo es su capacidad de auto templarse sin necesidad de solubilización, seguido de un envejecimiento térmico natural (diversas semanas) o artificial (diversas horas), hecho que facilita la fabricación de piezas de grandes dimensiones con buenas características mecánicas, tenacidad, maquinabilidad y estabilidad dimensional.</p> <p>El proceso de fundición para la obtención este tipo de aleación requiere el acompañamiento obligatorio de atmósfera reductora o fundentes que generen aislamiento del material con el oxígeno.</p> <p>Piezas de grandes dimensiones, aros para vehículos de competición</p>

*Elaboración: Propia*

*Fuente:* Gil Mur, F.J., Manero Planella, J. M. (Ed). (2005). *Metalografía*. Catalunya: Edicione UPC, Morral, F. Jimeno, E & Molera, P. (1985). *Metalurgia General*. Barcelona: Reverté S.A., Hufnagel, J. (2004). *Manual del aluminio*. Barcelona: Reverté S.A. & Alu-Stock (2007), Aleaciones de Aluminio. *ALU-STOCK S.A.*

Por tanto, en razón de que las aleaciones aluminio-silicio-magnesio presentan una amplia gama de aplicaciones, entre los cuales se destaca la fabricación de

elementos especiales para maquinaria, entre otros; se selecciona este tipo de aleación para la fabricación del brazo de freno para el sistema de freno del ascensor eléctrico.

En esta línea, en razón de que la aleación AlSi7Mg es una de las más resistentes y de mejor maquinabilidad de este grupo el análisis del elemento mecánico se realiza utilizando las propiedades inherentes a este material.

### **3.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL BRAZO DE FRENO DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO**

El análisis de esfuerzos por elementos finitos del brazo de freno de un ascensor eléctrico se lo realiza con la ayuda del software computacional “Autodesk Simulation Multiphysics 2013”.

Se plantea entonces el siguiente procedimiento: modelar por medio de un programa de elementos finitos el estado de esfuerzos en el brazo de freno, producto del accionamiento del sistema de freno del ascensor (zapata – tambor), y verificar entonces la distribución de dichos esfuerzos a lo largo del brazo de freno.

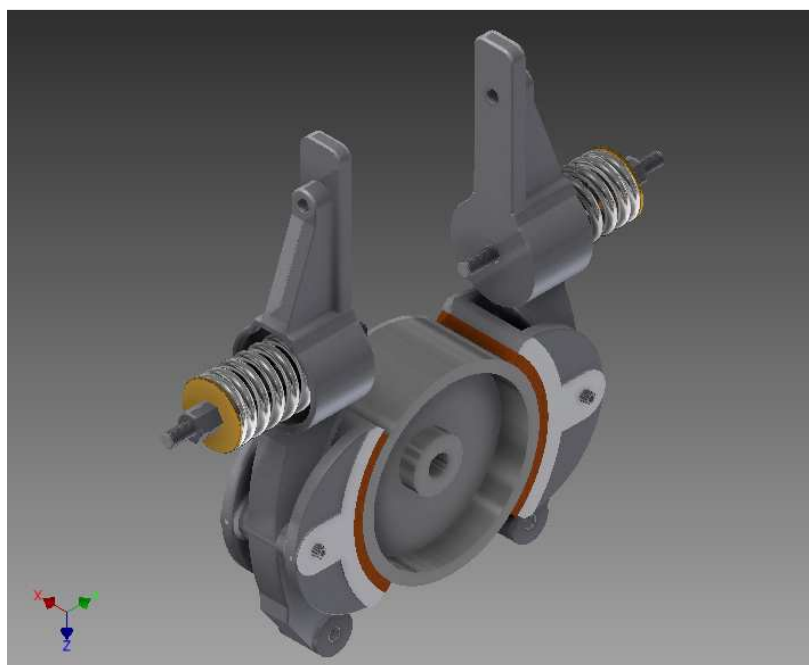
Para realizar el análisis computacional se deben seguir las siguientes etapas:

1. Modelado sólido del mecanismo de freno
2. Exportación y mallado superficial
3. Determinación de las condiciones de frontera (apoyos), fuerzas nodales (reacciones).



4. Definición de materiales y determinación de las condiciones globales de cálculo.
5. Revisión de la geometría, condiciones de frontera y cargas del modelo.
6. Visualización y análisis de resultados.
7. Análisis de convergencia de la solución

### 3.2.1 MODELADO SÓLIDO DEL MECANISMO DE FRENO

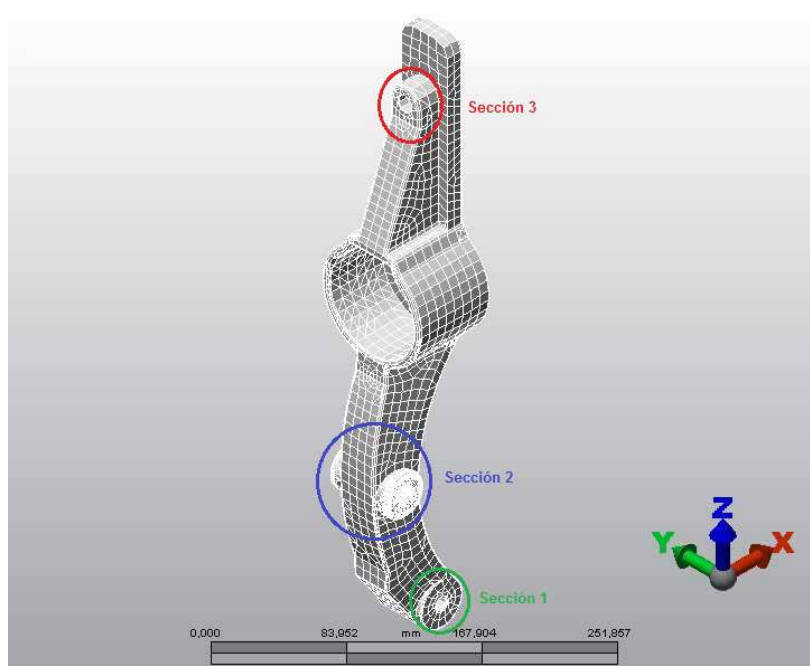


*Figura 3.8. Modelo de ensamble del mecanismo de freno electromagnético de un ascensor eléctrico, "Autodesk Inventor Professional 2013".*

Para el modelado sólido se utiliza el programa "Autodesk Inventor Professional 2013", para el efecto, se toma la geometría de un mecanismo de freno electromagnético de un ascensor eléctrico, su configuración general se muestran en la figura 3.8.

### 3.2.2 EXPORTACIÓN Y MALLADO

El software “Autodesk Simulation Multiphysics 2013” posee un complemento para la importación y mallado superficial de conjuntos sólidos desde distintos programas CAD 3D, entre ellos “Autodesk Inventor Professional 2013”.



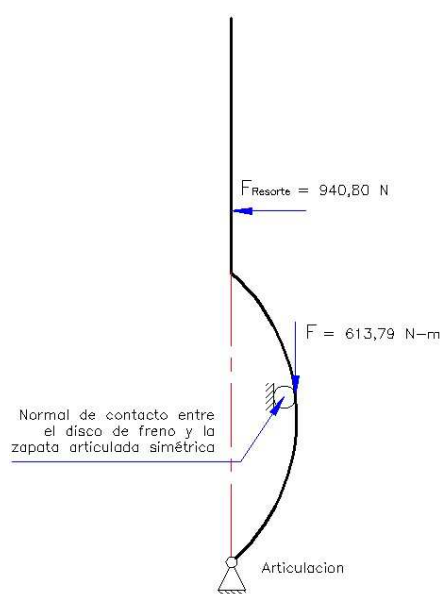
*Figura 3.9. Resultado de la importación y mallado sólido, “Autodesk Simulation Multiphysics 2013”*

La exportación se realiza únicamente del brazo de freno, más no de todo el ensamble, ya que el análisis objeto del presente documento se basa en el brazo del sistema de freno del ascensor. En el proceso de mallado se toma especial atención en la definición del tamaño de los elementos, de manera que el mallado sólido garantice resultados exactos. En la figura 3.9 se muestran los resultados de la exportación y mallado sólido.

En la figura 3.9, adicionalmente, se definen las secciones correspondiente a las restricciones de los grados de libertad del modelo, así, la sección 1 corresponde a la junta articulada entre el brazo de freno y la bancada del motor; la sección 2 corresponde al punto de pivote de la zapara articulada simétrica y, la sección 3 corresponde al punto de acción de la bobina electromagnética, en su efecto de abrir y cerrar el sistema de freno.

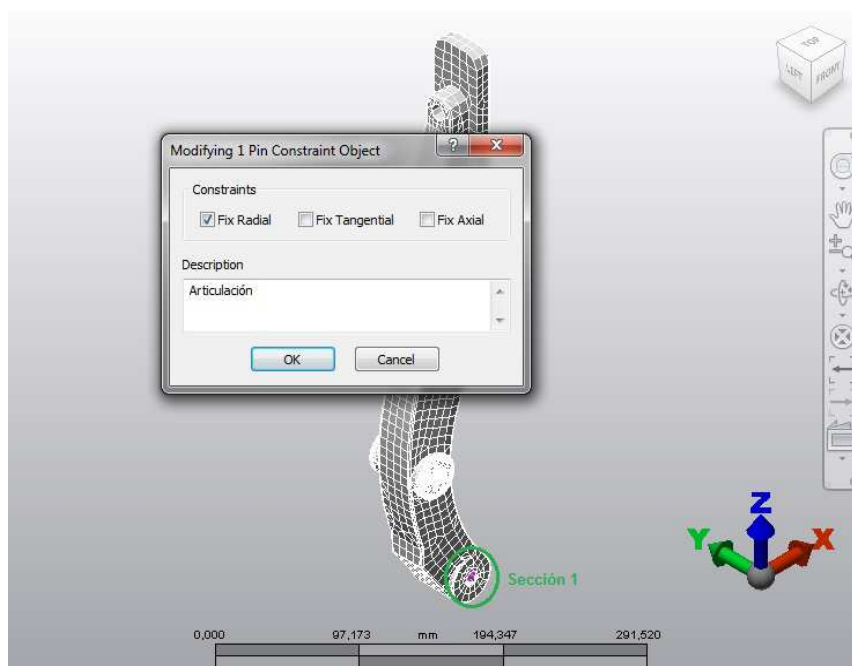
### 3.2.3 CONDICIONES DE FRONTERA Y FUERZAS NODALES

Las condiciones de frontera del brazo de freno se obtienen a partir de la funcionalidad de este elemento mecánico, es decir, de la forma en la que el elemento se encuentra montado en el sistema de freno y de sus condiciones particulares de trabajo.



*Figura 3.10. Esquema general de las condiciones de frontera del brazo de freno, para el análisis por elementos finitos*

Dichas condiciones están representadas en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 3.2, del cual, para el análisis por elementos finitos se realiza las consideraciones mostradas en la figura 3.10. Con estos antecedentes, en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se muestran las condiciones de frontera correspondientes a los grados de libertad de las secciones 1, 2 y 3, respectivamente.



*Figura 3.11. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 1*

Para la Sección 2, el efecto que el disco de freno transmite al brazo se divide en dos parte; en primer lugar, el efecto resultante del contacto entre el disco de freno y la zapata (normal de contacto,  $N$ ) se ingresa en la simulación como una restricción de traslación en la dirección de acción de la fuerza normal  $N$ ; en segundo lugar, la fuerza resultante de la fricción entre el disco de freno y la zapata ( $F$ ) se ingresa en la simulación como una carga distribuida en los nodos correspondientes.

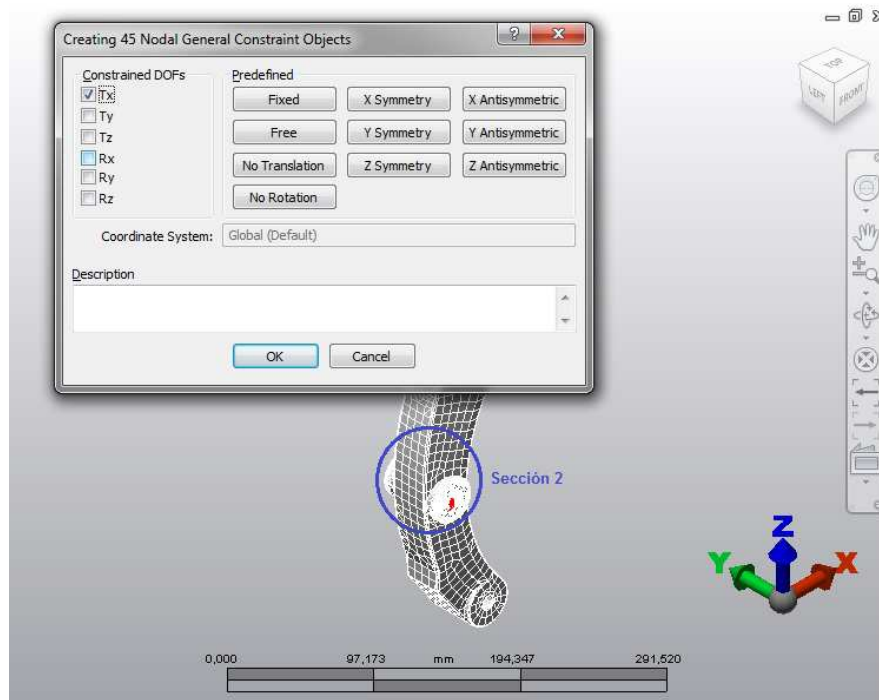


Figura 3.12. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 2

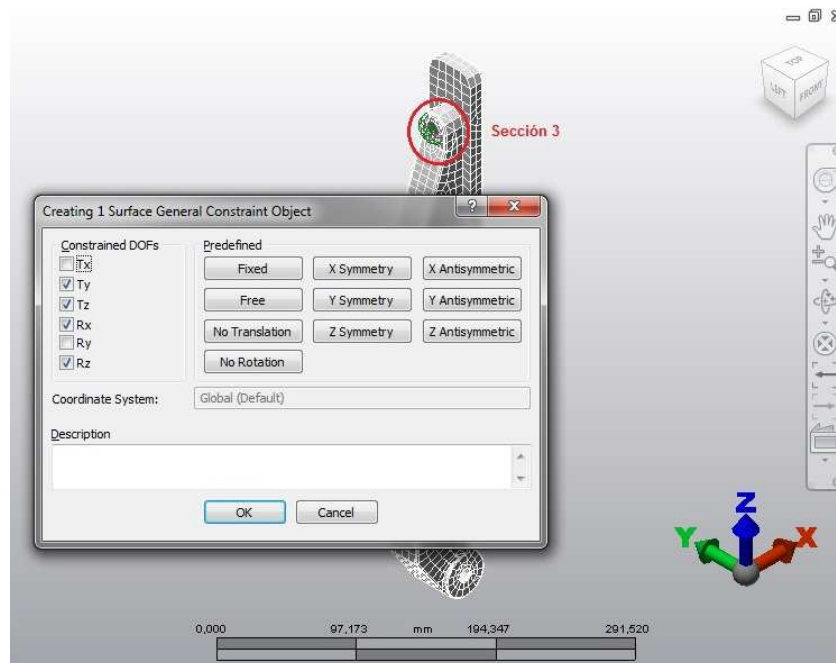
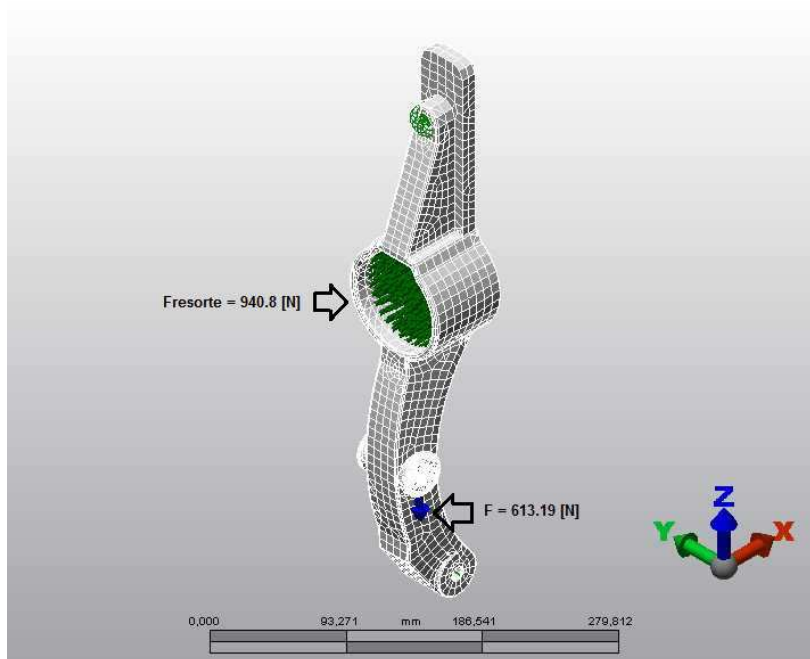


Figura 3.13. Condiciones de frontera para el brazo de freno, Sección 3

Por otra parte, las fuerzas nodales necesarias para realizar el análisis por elementos finitos del brazo de freno considerado en el presente proyecto, se muestran en la figura 3.14.



*Figura 3.14. Aplicación de las cargas nodales en el modelo tridimensional*

La carga  $F$ , resultante del análisis mecánico realizado en la sección 3.1 de este capítulo, como se explicó anteriormente se aplica como carga distribuida en los nodos respectivos. Así mismo, la fuerza que produce el resorte de compresión,  $F_{\text{Resorte}}$ , es aplicada en el modelo en el área de acción de este elemento.

### **3.2.4 MATERIAL Y CONDICIONES GLOBALES**

Como resultado de la selección de materiales realizada en este capítulo los brazos de freno se pueden fabricar de fundición de aleación de aluminio, su rigidez

se garantiza por medio del diseño de la forma constructiva optimizada. Para el presente análisis se utilizan los datos disponibles en la de biblioteca de materiales del programa “Autodesk Simulation Multiphysics 2013” que corresponden a la aleación de aluminio selecciona, AISi<sub>7</sub>Mg.

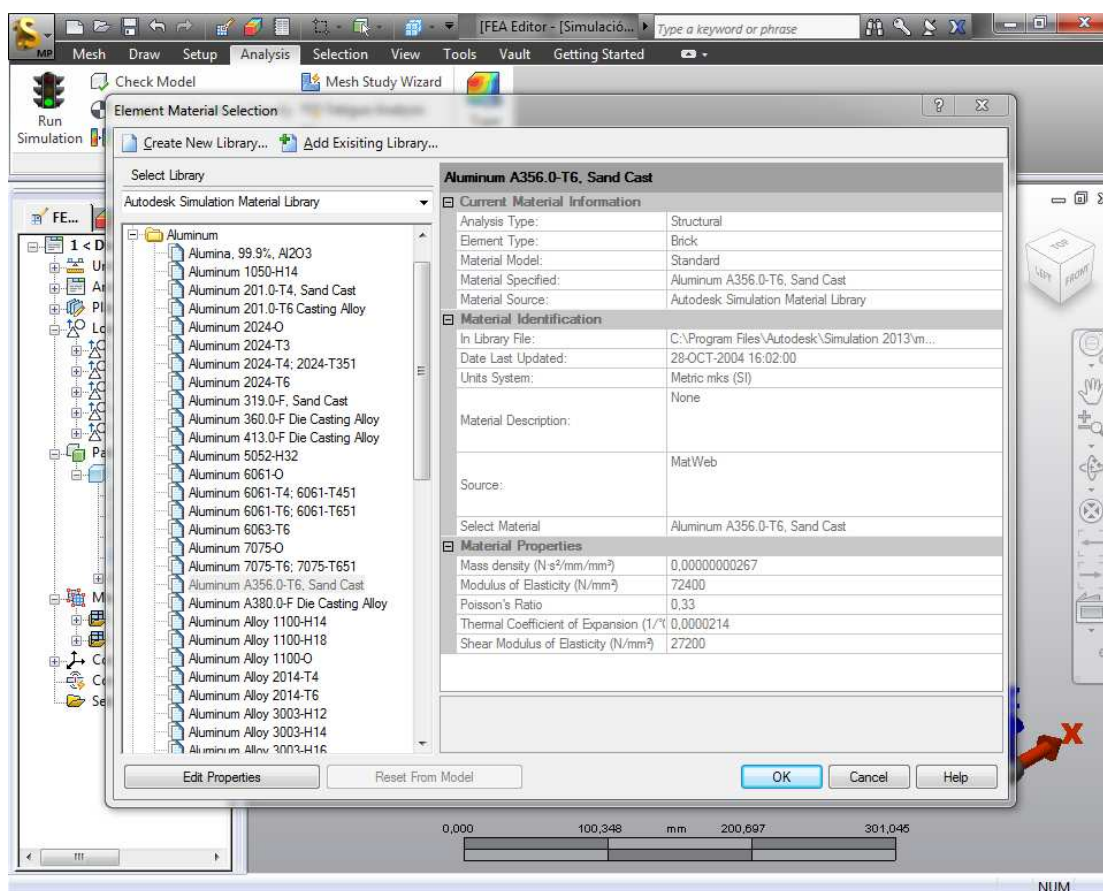


Figura 3.15. Definición del material utilizado en la simulación.

### 3.2.5 VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizado el análisis por elementos finitos del brazo del sistema de freno de un ascensor eléctrico, con ayuda del software computacional “Autodesk

Simulation Multiphysics 2013”, en esta sección, se presentan los resultados gráficos obtenidos y su correspondiente análisis.

### 3.2.5.1 Análisis de Desplazamientos

En la figura 3.16 se presenta la magnitud de los desplazamientos totales a lo largo del brazo de freno como producto de la acción de las cargas nodales aplicadas en la simulación; evidenciándose, un máximo desplazamiento  $-0.0572 \text{ mm}$  en el extremo libre del brazo de freno, y el desplazamiento mínimo en la sección correspondiente a la articulación.

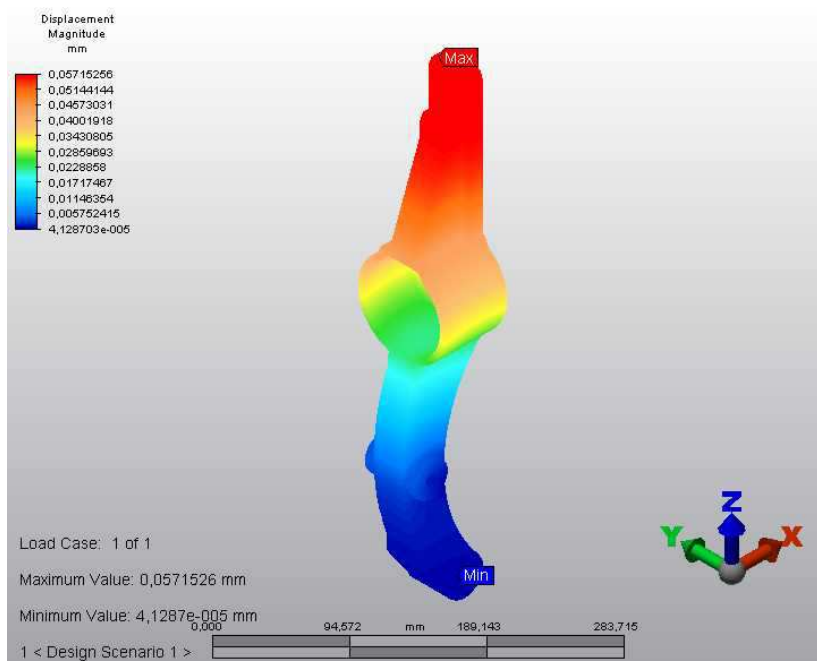


Figura 3.16. Distribución de desplazamientos totales en el brazo de freno.

Así mismo, el software computaciones utilizado permite visualizar, a una determinada escala, la deformación del brazo de freno como el resultado de la acción



de las cargas aplicadas en el modelo tridimensional. En la figura 3.17 se presenta la deformación del brazo de freno en un factor de escala del 10%.

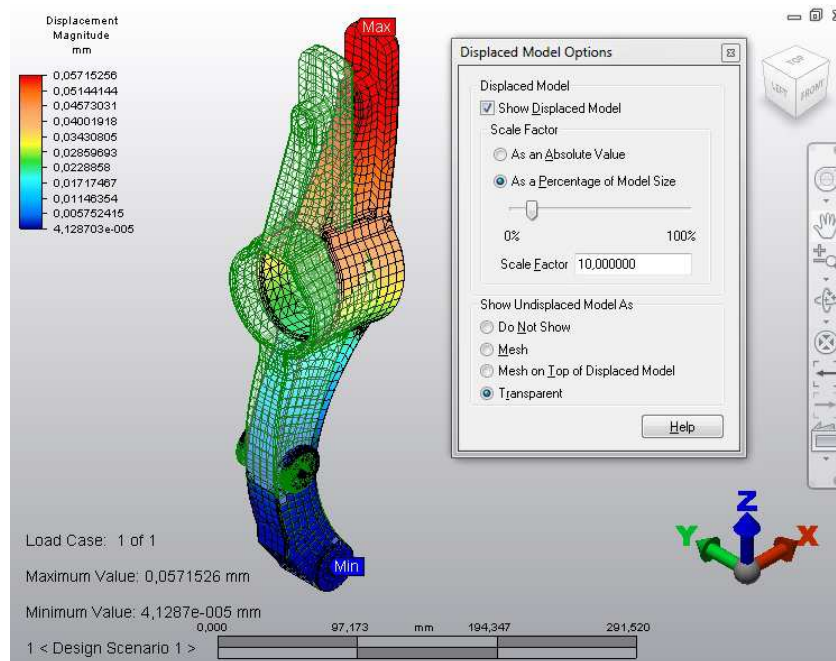


Figura 3.17. Modelo tridimensional deformado, escala aumentada 10%.

### 3.2.5.2 Análisis de Esfuerzos

El análisis de esfuerzos se lo realiza a través del esfuerzo de von Mises, mismo que, el software computacional lo considera como el esfuerzo equivalente que combina el efecto de los esfuerzos axiales en las direcciones globales, así:

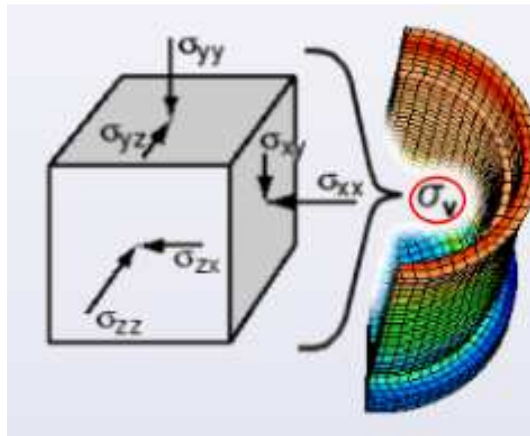
$$\sigma_V = \sqrt{0.5 \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \quad (3.19)$$

Donde:

$\sigma_V$ : Esfuerzo de von Mises, [N/m<sup>2</sup>]

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ : Esfuerzos axiales en las direcciones globales, [N/m<sup>2</sup>]

$\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}$ : Esfuerzos cortantes, [N/m<sup>2</sup>]



*Figura 3.18. Equivalencia de esfuerzos considerada por el software “Autodesk Simulation Multiphysics 2013”*

En función de los esfuerzos principales, el esfuerzo de von Mises se determina por:

$$\sigma_v = \sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.20)$$

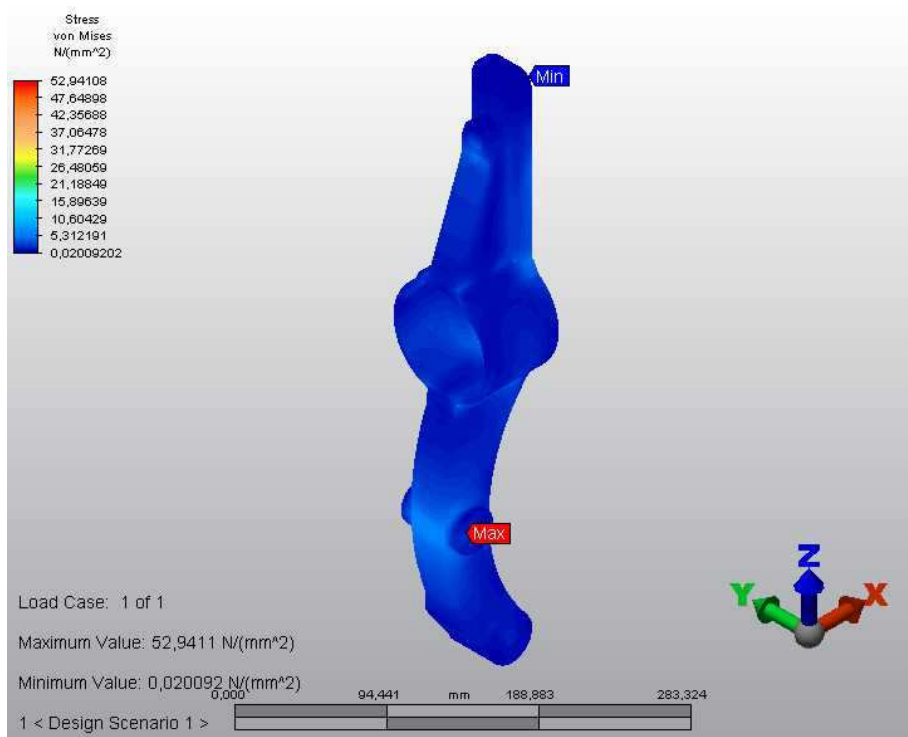
Donde:

$\sigma_v$ : Esfuerzo de von Mises, [N/m<sup>2</sup>]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : Esfuerzos principales, [N/m<sup>2</sup>]

En la figura 3.19 se muestra la distribución del esfuerzo de von Mises a través del brazo del sistema de freno de un ascensor eléctrico. Los resultados del análisis

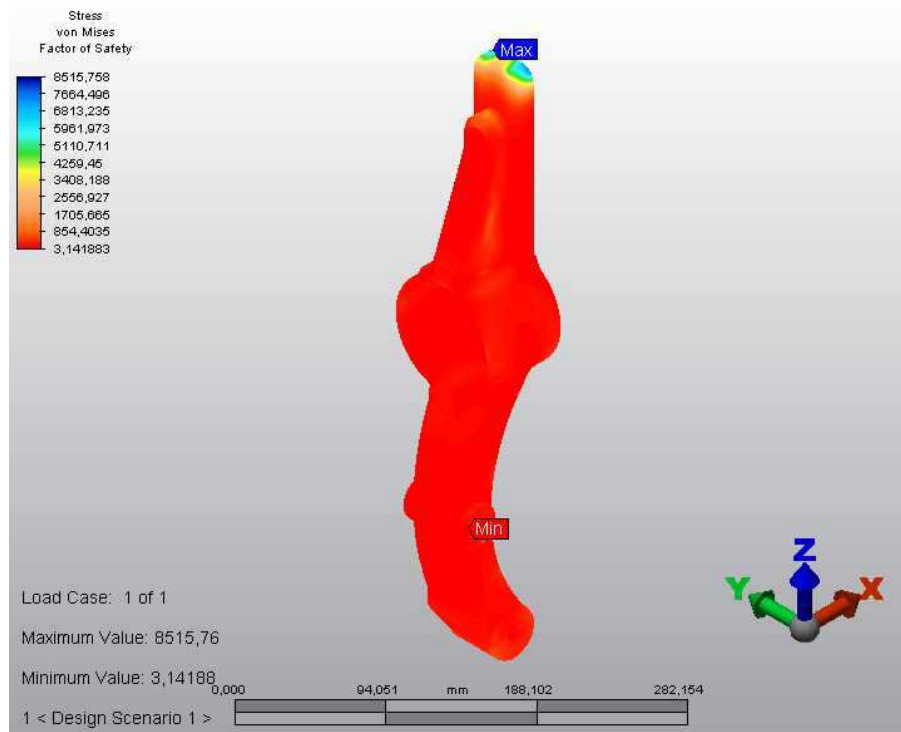
por elementos finitos muestran un esfuerzo de von Mises máximo de  $52.94 \text{ N/mm}^2$ , ubicado en el punto de pivote de la zapata articulada simétrica que soporta las cargas originadas por el contacto entre el disco de freno y la zapata (Fuerza Normal de contacto  $N$  y Fuerza de fricción  $F$ ).



*Figura 3.19. Distribución de esfuerzos a lo largo del brazo de freno*

### 3.2.5.3 Factor de Seguridad

Finalmente, en la figura 3.20 se presenta los resultados del factor de seguridad para el brazo de freno; obtenido del análisis por elementos finitos, el cual evidencia un factor de seguridad mínimo 3.14, mismo que garantiza la confiabilidad del diseño mecánico del brazo de freno bajo los requerimientos de funcionamiento del ascensor eléctrico.



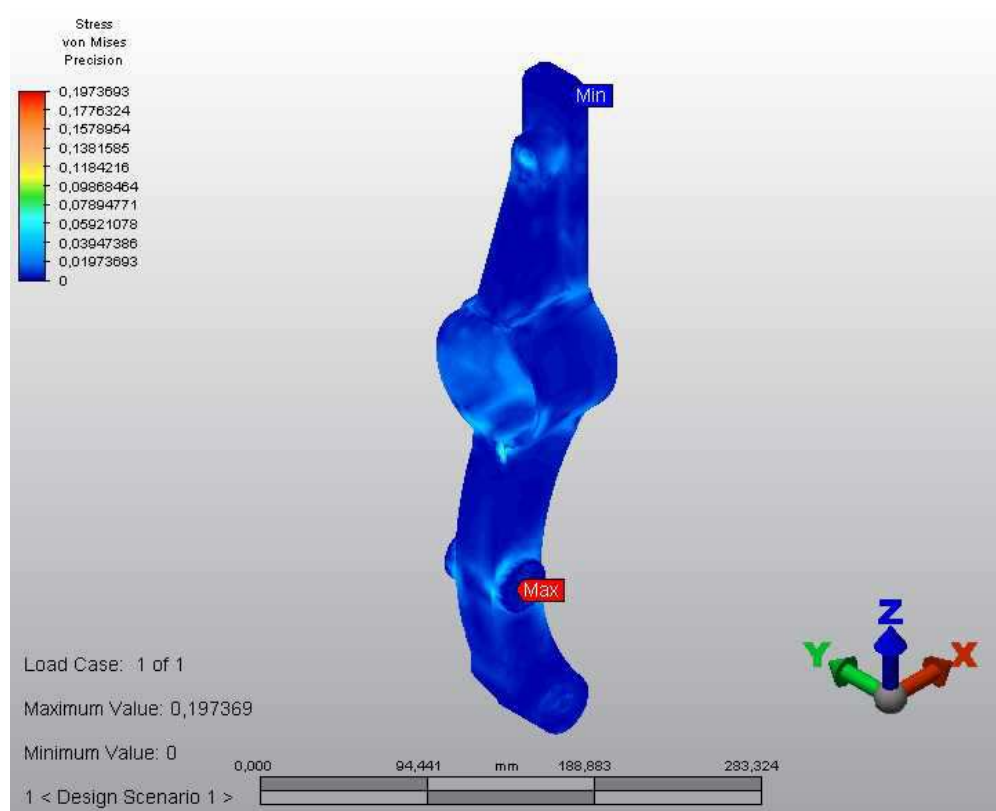
*Figura 3.20. Distribución del factor de seguridad para el brazo de freno*

### 3.2.6 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE LA SOLUCIÓN

El análisis de convergencia de la solución se lo realiza a través del refinando de la malla en las secciones del modelo tridimensional en las cuales se necesita mayor detalle de la discretización del modelo con los elementos; para el presente caso, en la Sección 2 del modelo tridimensional, esto con el objetivo de obtener una solución más exacta.

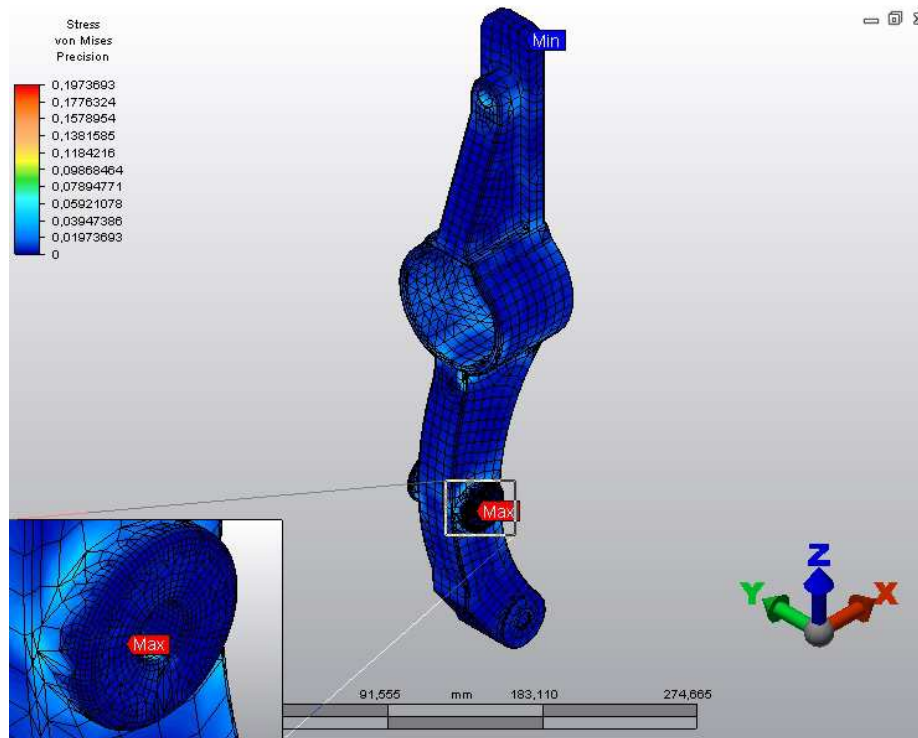
En el presente proyecto se realiza el análisis de convergencia respecto del esfuerzo de von Mises, con la herramienta denominada “von Mises Presicion”, disponible en el software computacional empleado para la presente simulación.

Debido a que el proceso de discretizar un modelo, implica que siempre existirá un cambio en los resultados obtenidos en un elemento respecto de los obtenidos en el elemento siguiente, ya que los resultados en un modelo discretizado no son continuos, la herramienta “von Mises Precision” es un método que matiza los cambios graduales en los resultados de un elemento al siguiente.



*Figura 3.21. Precisión del esfuerzo de von Mises*

Para este análisis, la precisión del esfuerzo de von Mises varía en una escala de 0 a 0,5, donde 0 corresponde al mejor resultado y 0,5 al peor. Para la presente simulación, el resultado obtenido en el software computacional se muestra en las figuras 3.21 y 3.22.



*Figura 3.22. Refinado local del mallado, modelo tridimensional del brazo de freno*

Como puede evidenciarse en las figuras 3.21 y 3.22, al realizar un refinado de la malla en la sección de acción de la Normal de Contacto  $N$  y la correspondiente fuerza de fricción  $F$ , el valor máximo correspondiente a la precisión del esfuerzo de von Mises es de 0.197, el cual es un valor que se acerca, dentro de un rango aceptable, al valor definido como el mejor en la escala de 0 a 0.5, descrita anteriormente.

### **3.2.7 ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE LOS BRAZOS DE FRENO MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST**

Click2Cast es un software que realiza el análisis de las etapas de llenado y solidificación del proceso de fundición por el método de elementos finitos MEF,

presenta una interfaz amigable con el usuario, admitiendo realizar una discretización de la pieza en elementos de tamaño definidos por el usuario o por uno recomendado por el programa en base al tamaño y forma de la pieza.

El software permite simular el proceso de fundición para diferentes materiales, como aleaciones de aluminio, acero al carbono, latón, magnesio, entre otros; en diferentes tipos de molde como acero al carbono, fundición gris, arena verde, arena, cobre, arena - sílica, entre otros; seleccionando las temperaturas de la colada y la de precalentamiento del molde.

### **3.2.8 SIMULACIÓN DEL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE LA PIEZA MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST**

El programa puede simular tres tipos de inyección, el primero definiendo la velocidad de la colada cuando atraviesa una sección de la pieza, el segundo tipo simula la fundición a baja presión, y el tercero la inyección del material mientras la pieza gira un ángulo determinado en un tiempo definido por el diseñador.

Para el presente proyecto, se ha considerado la inyección de material por gravedad, definiendo la velocidad de la colada en una sección de la pieza.

Para la formulación del análisis del elemento en el software debe seguirse los siguientes pasos:

- Abrir la geometría del elemento previamente realizada y generada en un archivo STL, que es formato CAD estándar;

- Definir la superficie de alimentación de la colada.
- A continuación se debe generar el mallado de la pieza, pudiendo seleccionarse un tamaño automático de los elementos de la malla dado por el software en base al espesor de la pieza o por una división recursiva del elemento hasta conseguir el tamaño seleccionado por el usuario;
- Definir el material y temperatura de la colada, el material del molde y su temperatura de precalentamiento, la velocidad de inyección y la dirección de la gravedad;
- Correr la etapa de cálculo;
- Generar y visualizar resultados.

### **3.2.9 CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN DE LA SOLIDIFICACIÓN**

Para la simulación se ha considerado las siguientes condiciones iniciales:

- Material de la fundición: AlSi<sub>7</sub>Mg
- Temperatura de la colada 713 °C <sup>70</sup>
- Material del molde: acero al carbono
- Temperatura de precalentamiento del molde 150 °C <sup>71</sup>

---

<sup>70, 71</sup> Parámetros del software Click2Cast



### 3.2.10 SOLUCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

En la etapa de cálculo el software permite realizar el análisis del proceso de fundición en dos módulos que pueden ser calculados de forma conjunta o por separado, la etapa de llenado de la pieza y la etapa de solidificación. Como parte del análisis para la determinación del punto adecuado de inyección de la colada, así como de la velocidad y consecuentemente del tiempo de llenado óptimos, se realiza un análisis y verificación de los siguientes resultados mostrados por el software:

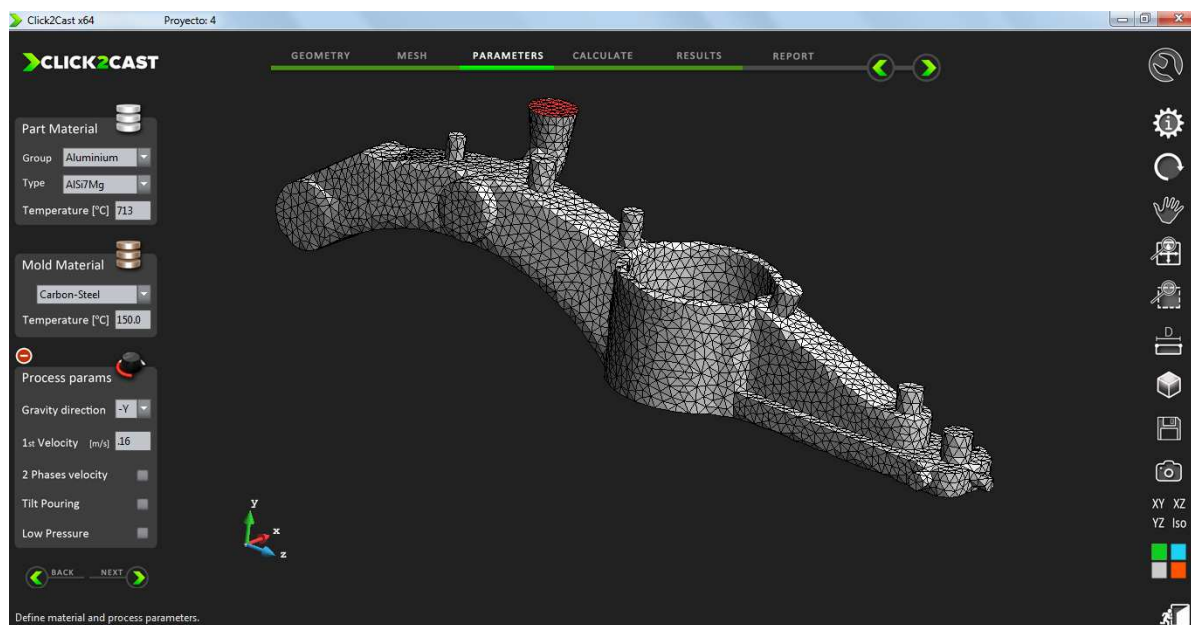
- “Cold Shuts” o juntas y gotas frías, que son imperfecciones causadas por el flujo de metal líquido sobre el aluminio parcialmente solidificado.
- “Air entrap” o aire atrapado durante el llenado, que son defectos producidos por gases.
- “Shrinkage porosity” que son porosidades producidas por contracciones durante la solidificación de la pieza. El software muestra la relación entre el volumen de los poros y el volumen de la pieza.

Para la selección de la sección de inyección del material fundido se considera que no existan concentradores de esfuerzos en sus alrededores, así como para la determinación de la dirección de la gravedad se toma en consideración la geometría de la pieza, de forma que se genere un flujo continuo de la colada sin que se cree turbulencia.

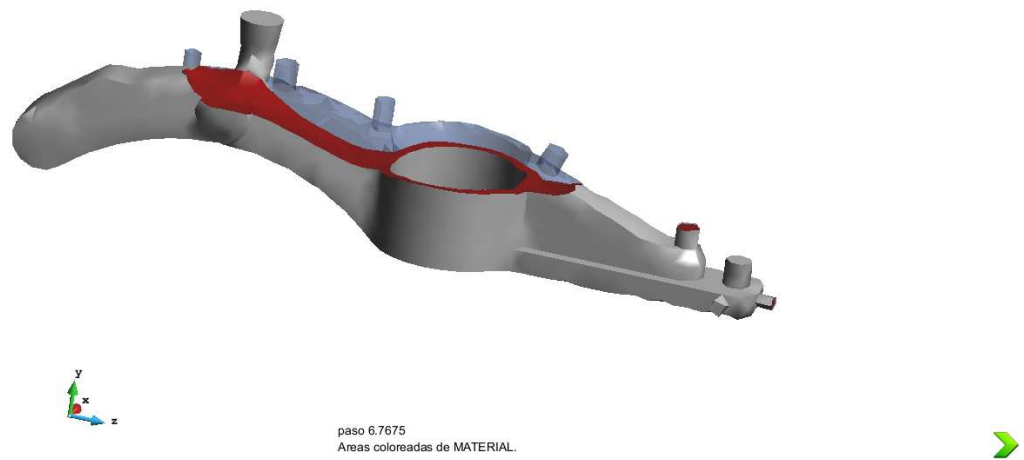
En el Anexo D se incluyen los análisis de simulaciones con diferentes puntos y velocidades de inyección, en consideración de la geometría de la pieza y la

concentración de mayor masa del elemento. Se incluye los gráficos de los defectos producidos por falta de llenado de la colada, aire atrapado, justas frías y contracciones producidas durante la solidificación de la fundición. A continuación se realiza el análisis del llenado de material fundido en el freno de ascensor por una sección en la cara lateral en un punto medio de la región con mayor volumen a ser llenado.

En la figura 3.23 se muestra el elemento mallado, y de color rojo la sección de inyección del material, se ha incluido secciones de material con el objetivo de direccionar el aire hacia estas durante el proceso de llenado. A continuación en las figura 3.24 se muestra el flujo de material durante el proceso de llenado, considerando la gravedad en la dirección del eje “-y”.

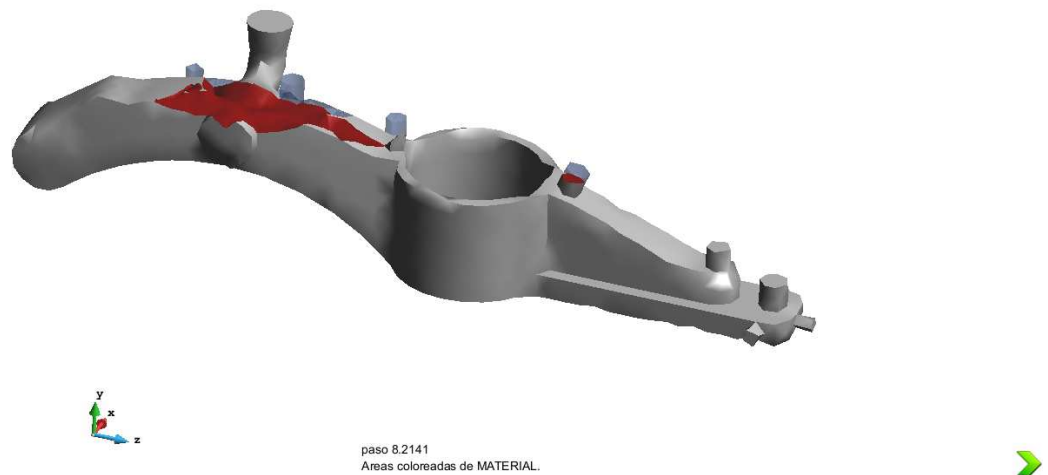


*Figura 3.23. Freno de ascensor con inyección de colada en la cara lateral del elemento a través de un alimentador*

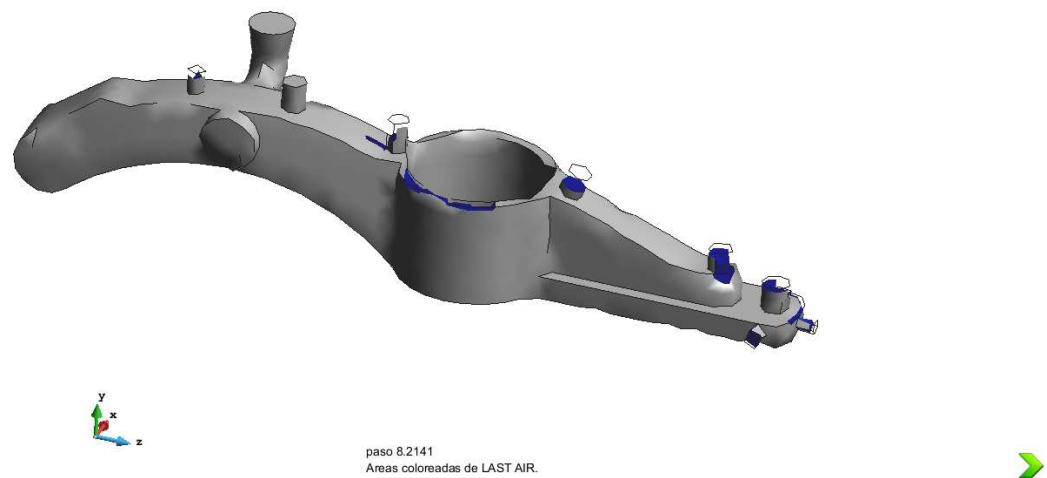


*Figura 3.24. . Flujo de material durante el proceso de llenado*

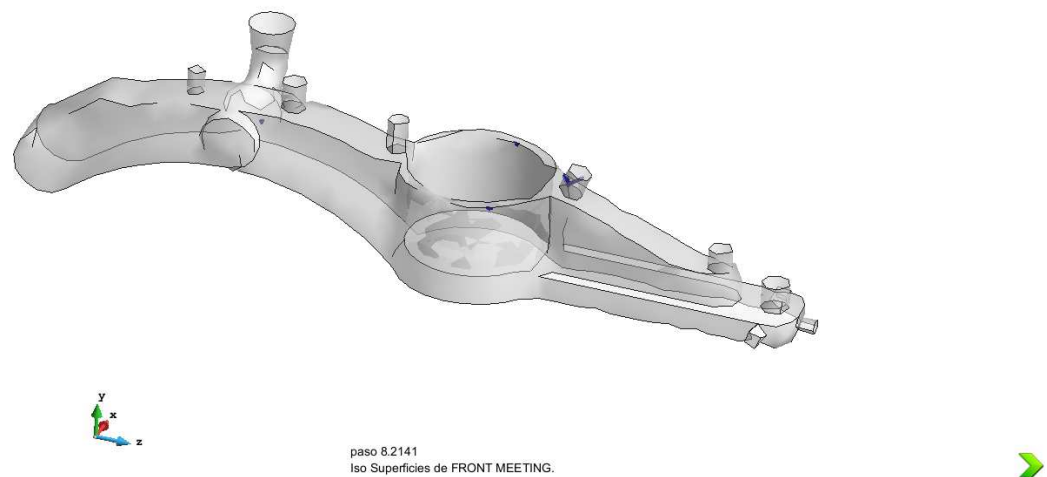
En la figura 3.25 se muestra que con una velocidad de 0.15 m/s el elemento no se llena con el metal fundido, en las figuras 3.26 y 3.27 se visualiza el aire atrapado y juntas frías durante el llenado.



*Figura 3.25. Límite de llenado del material con velocidad de inyección de 0.15 m/s*

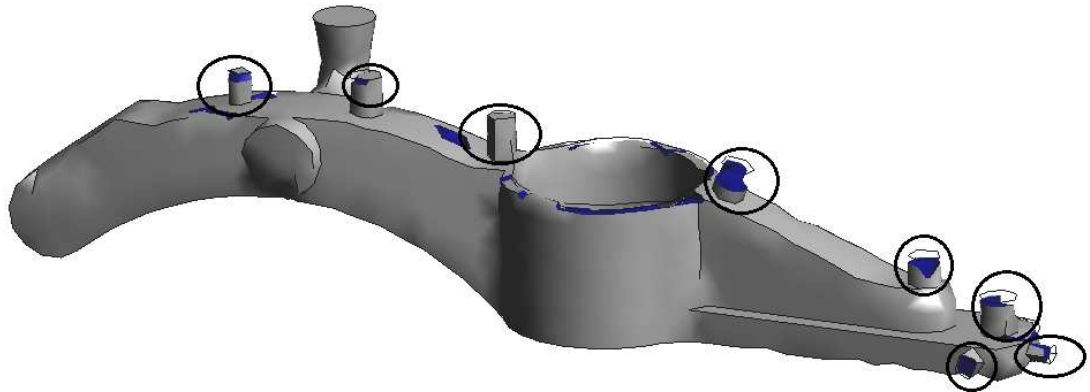


*Figura 3.26. Aire atrapado durante el proceso de llenado con velocidad de inyección de 0.15 m/s*



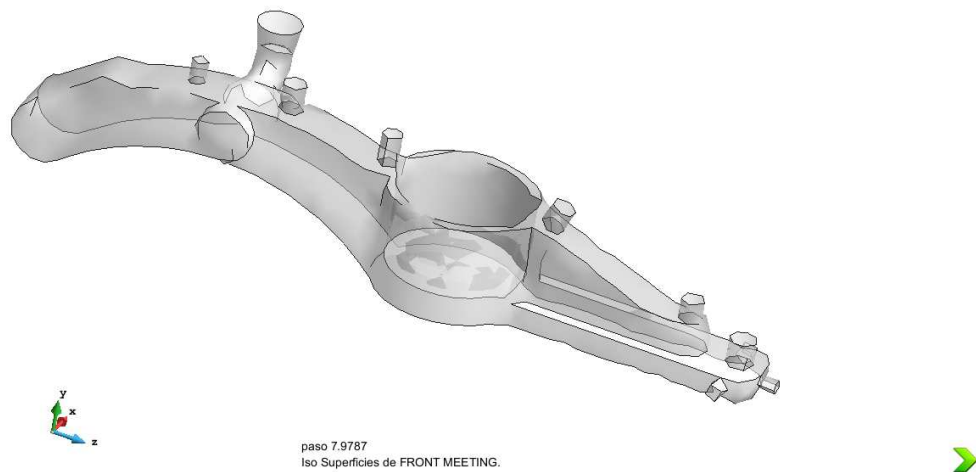
*Figura 3.27. Juntas frías producidas en el brazo de freno con velocidad de inyección de 0.15 m/s*

Con una velocidad de 0.16 m/s, en las figuras 3.28, 3.29 y 3.30 se muestra la defectología producida durante las etapas de llenado y solidificación de la pieza con la “alternativa 1” en la selección de la sección de inyección de la colada.

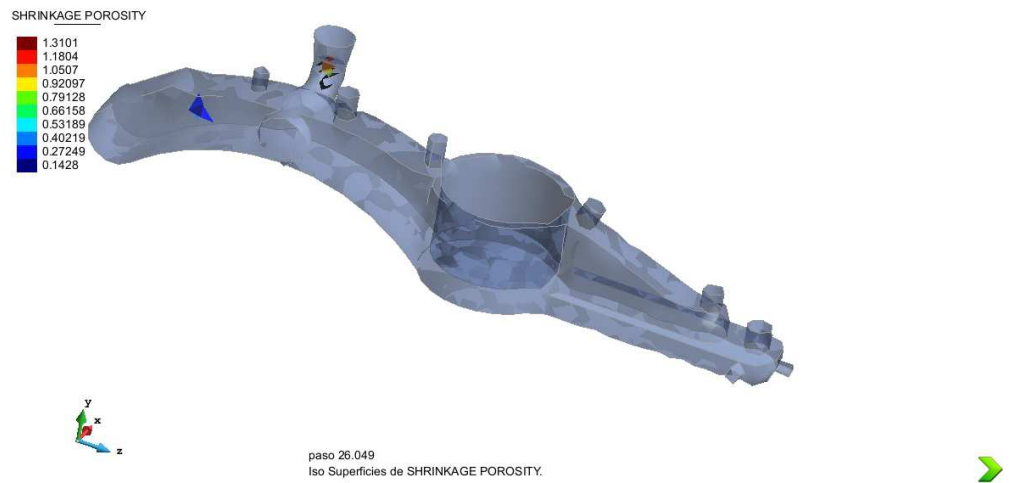


*Figura 3.28. Aire atrapado durante el llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s*

Las áreas de la pieza señaladas en la figura 3.28 son secciones de material incluidas en el modelo con el objetivo de que el aire atrapado durante la etapa de llenado sea direccionado hacia estas y no se vea comprometido el desempeño mecánico del elemento.

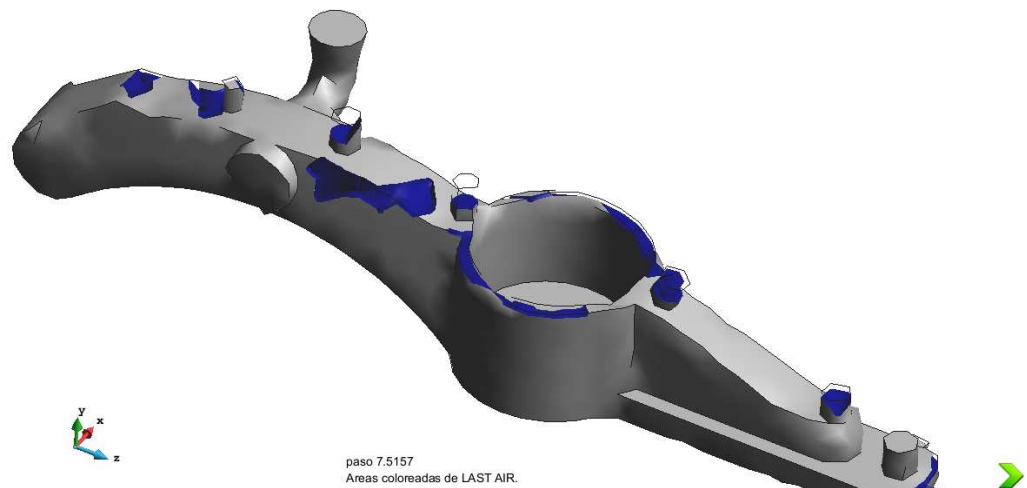


*Figura 3.29. Juntas frías durante el llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s*



*Figura 3.30. Porosidades durante el proceso de solidificación con velocidad de inyección de 0.16 m/s*

Con una velocidad de 0.17 m/s, en las figuras 3.31, 3.32 y 3.33 se muestran los defectos producidos durante las etapas de llenado y solidificación de la pieza.



*Figura 3.31. Aire atrapado durante el llenado con velocidad de inyección de 0.17 m/s*

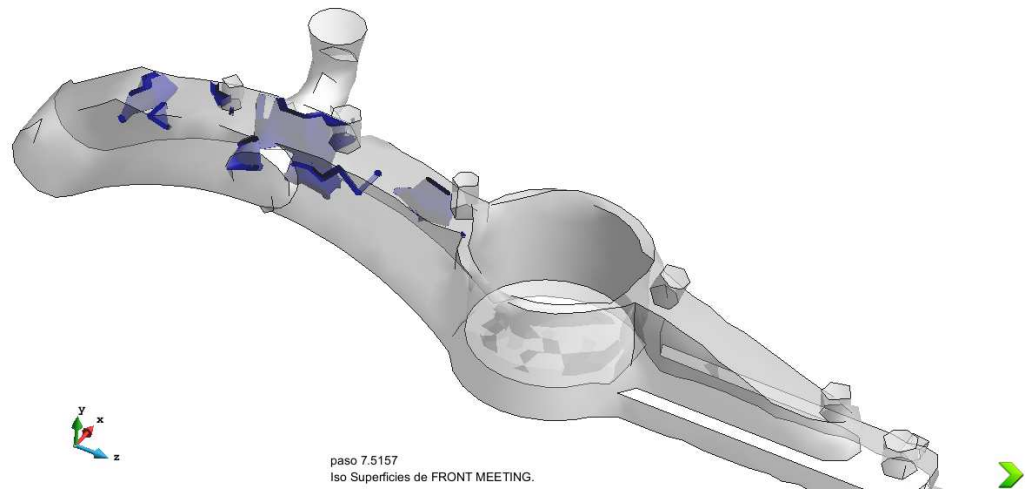


Figura 3.32. Juntas frías durante el llenado con velocidad de inyección de 0.17 m/s

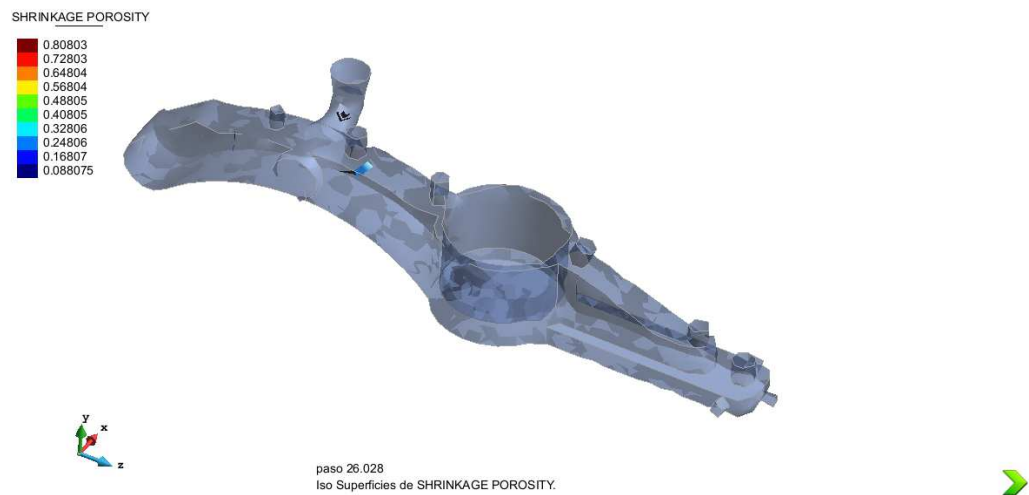


Figura 3.33. Porosidades durante el proceso de solidificación con velocidad de inyección de 0.17 m/s

## CAPITULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DEL BRAZO DE FRENO

#### 4.1 LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE LA FUNDICIÓN DE LOS BRAZOS DE FRENO

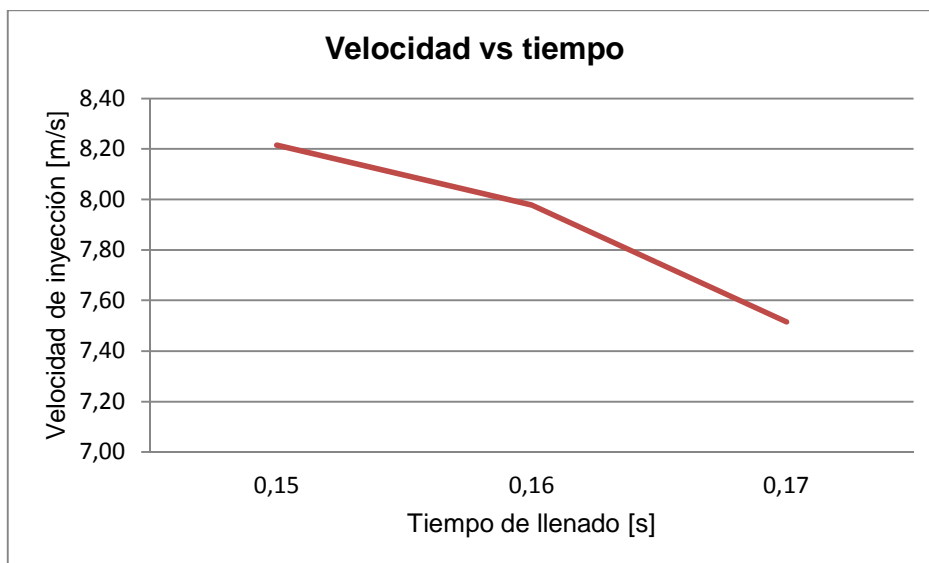
En los gráficos de aire atrapado y juntas frías de la simulación se indica el “paso” que representa el tiempo de llenado expresado en segundos, en la tabla 4.1 se resume los valores de la velocidad de inyección y el tiempo que tarda en llenarse la pieza analizada. En la figura 4.1 se grafica la relación entre la velocidad y el tiempo de llenado.

*Tabla 4.1. Relación velocidad de inyección versus tiempo de llenado de la pieza*

Velocidad [m/s]	Tiempo [s]
0.15	8.214
0.16	7.978
0.17	7.515

*Elaboración: Propia*





*Figura 4.1. Relación entre la velocidad de inyección y el tiempo de llenado*

La variación en la velocidad de inyección de la colada genera un cambio mínimo en el tiempo de llenado; sin embargo, la incidencia en la defectología de la pieza es considerable como se muestra en las figuras de aire atrapado, juntas frías y contracciones producidas durante el llenado y mostradas en el Capítulo 3 y en el Anexo D; en consecuencia, el control de las variables durante el proceso de fundición debe ser estricto.

Click2Cast es un programa que durante el cálculo considera que conforme el elemento analizado se llena con el material fundido los nodos se cierran y no escapa aire o gases producidos. El llenado incompleto de la pieza producido en la simulación con velocidad de 0.15 m/s y mostrado en la figura 3.25; se genera porque la fundición solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde, producido por un vaciado muy lento debido a una velocidad baja de inyección.

El programa no considera la inclusión de respiraderos, por lo cual se incluye en el modelo volúmenes adicionales para conducir el aire generado durante el llenado. El aire atrapado está directamente relacionado con la turbulencia producida durante el flujo del material durante el llenado y con la geometría de la pieza, debido a que entre mayor sea la turbulencia existe una mayor posibilidad de que el aire quede dentro del elemento fundido.

Las juntas frías mostradas en las simulaciones analizadas son producidas porque no existe fusión entre dos porciones de metal al encontrarse en un punto debido a la solidificación o enfriamiento prematuro, y la temperatura a la que se encuentran no es lo suficientemente alta para fundirse. Además, en estas gráficas se muestran las gotas frías producidas cuando el metal se vierte con excesiva rapidez durante la colada, pudiendo producir un flujo turbulento con la posible salpicadura de metal en el molde, anticipada al flujo de relleno. Estas salpicaduras pueden solidificarse y no se unirán debidamente a la pieza.

Las contracciones generadas durante la solidificación son producidas en las secciones de la pieza en las cuales existe un mayor volumen, estas pueden ser eliminadas con la inclusión de mazarotas que alimenten de material durante el enfriamiento. Estos defectos en la simulación con una velocidad de llenado de 0.16 m/s se encuentran ubicados principalmente en el alimentador de material, el cual es eliminado luego del proceso de fundición, así como en la región aledaña a este y como se muestra en la figura 3.20 el factor de seguridad calculado con el software computacional "Autodesk Simulation Multiphysics 2013" es de 3.14. Por tanto, y al

considerarse que no comprometen el desempeño del elemento bajo las solicitaciones mecánicas de funcionamiento, no se ha incluido mazarotas.

#### **4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE CLICK2CAST**

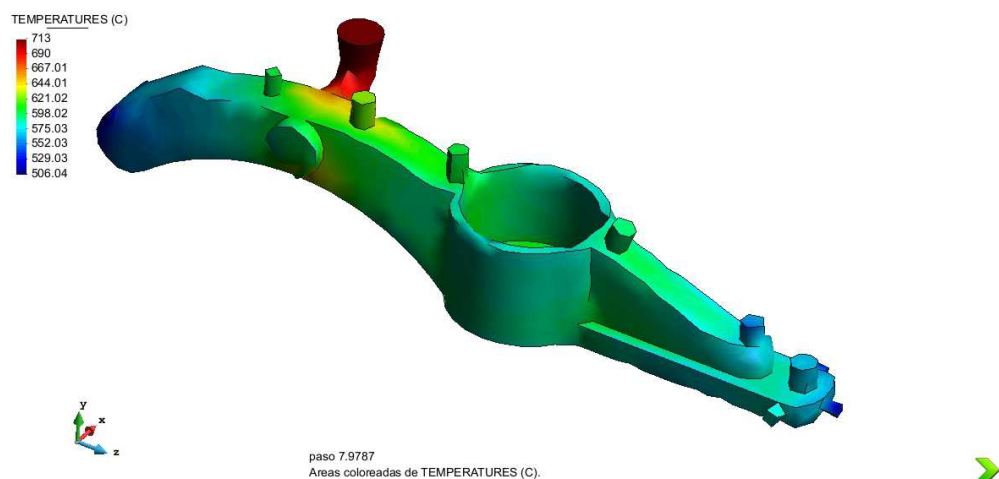
Para la determinación del punto óptimo de inyección se ha realizado análisis variando la sección y velocidad de alimentación y cuyos resultados son incluidos en el Anexo D. De los resultados de la defectología de aire atrapado, juntas frías y contracciones durante la solidificación, los cuales con cualitativos, se ha considerado que el punto de inyección mostrado en la figura 3.23 y con una velocidad de 0.16 m/s genera los mejores resultados.

Conforme se evidencia en la figura 3.28, el aire atrapado ha sido direccionado hacia secciones de material que no forman parte de la geometría del elemento necesaria para su funcionamiento, con lo cual no se compromete su desempeño al ser sometido a las solicitaciones mecánicas de funcionamiento.

Las juntas frías y la porosidad en el proceso de solidificación mostrados en las figuras 3.29 y 3.30 respectivamente, no comprometen las propiedades de funcionamiento del elemento. El porcentaje de porosidad en la solidificación representa un 0.1428% aproximadamente en el caso más crítico, según la escala de colores dadas por el software, debiendo considerarse que el factor de seguridad, mostrado en la figura 3.20, donde se encuentra este defecto es de 70 aproximadamente.

El software no genera datos cuantitativos relacionados al aire atrapado y juntas frías, razón por la cual el análisis de los defectos producidos durante la etapa de llenado son cualitativos. Los defectos visualizados son analizados en relación al tamaño de las graficaciones y su ubicación, considerándose el área de influencia de las imperfecciones, complementándose con el desempeño bajo las sollicitaciones mecánicas de funcionamiento. La geometría de la pieza analizada está determinada por los elementos con los cuales se encuentra acoplados en el sistema y el espacio físico del mecanismo.

Los datos calculados por el software para la etapa de llenado y solidificación son mostrados en las figuras 4.2 Temperaturas durante el llenado, 4.3 Tiempo de llenado, 4.4 Vectores de velocidad del material durante el llenado, 4.5 Diagrama de solidificación, 4.6 Módulo de solidificación, 4.7 Tiempo de solidificación y 4.8 Temperaturas durante la solidificación, los cuales son registrados en la tabla 4.2.



*Figura 4.2. Diagrama de temperaturas durante el proceso de llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s*

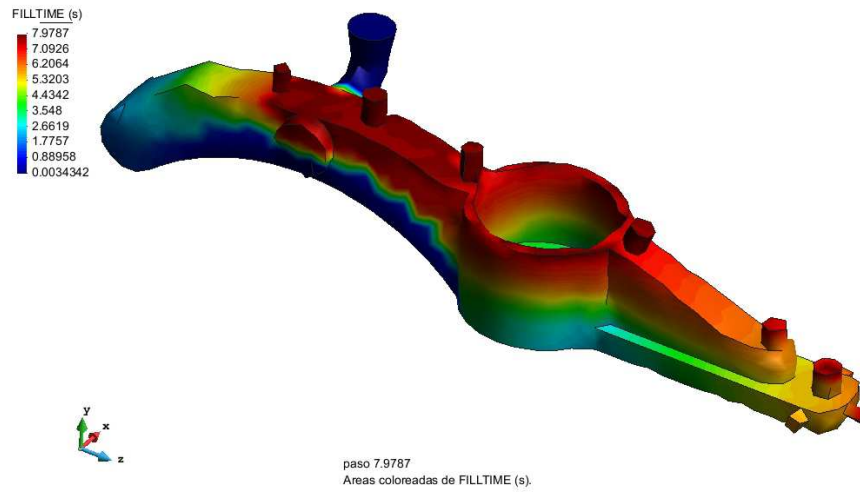


Figura 4.3. Tiempo de llenado con velocidad de inyección de 0.16 m/s

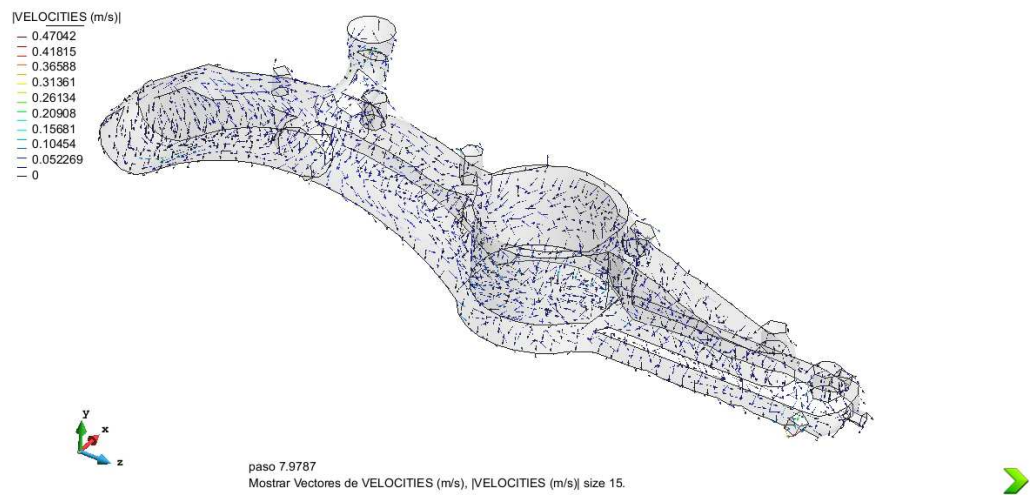


Figura 4.4. Vectores de velocidad del flujo de material durante el proceso de llenado

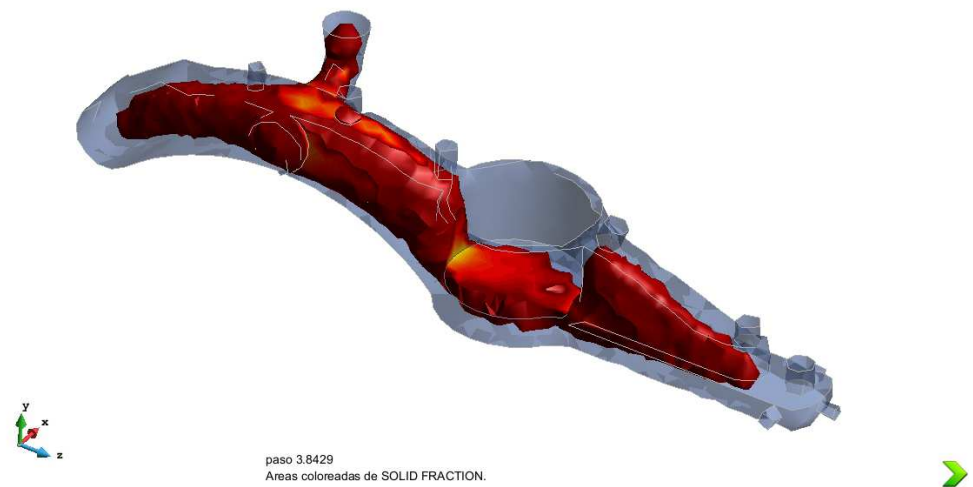


Figura 4.5. Diagrama del proceso de solidificación-material líquido con velocidad de inyección de 0.16 m/s

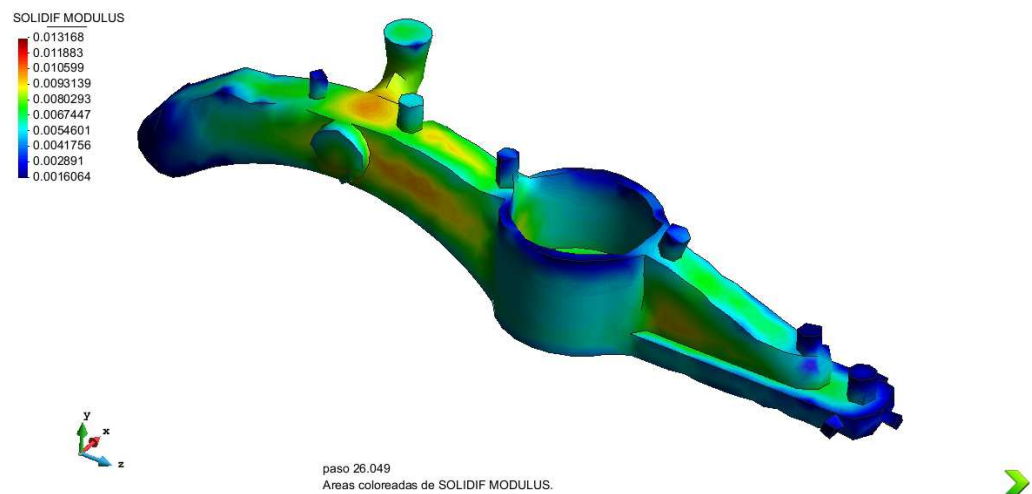


Figura 4.6. Módulo de solidificación con velocidad de inyección de 0.16 m/s

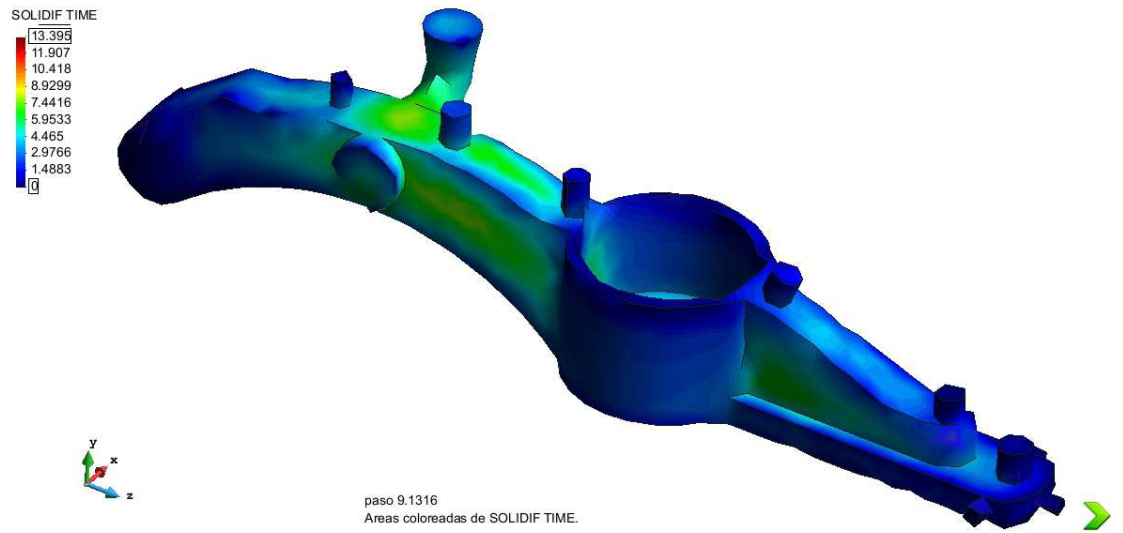


Figura 4.7. Tiempo de solidificación

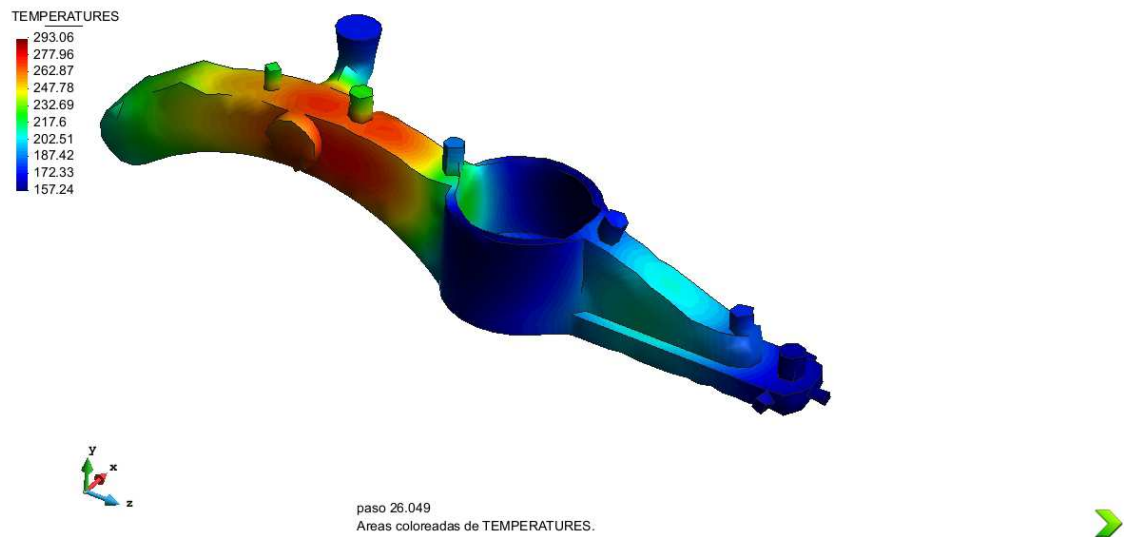


Figura 4.8. Diagrama de temperaturas durante el proceso de solidificación

Tabla 4.2. Resumen de resultados obtenidos mediante el software Click2Cast

<b>RESULTADOS</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Porosidad por contracción</b>	0.1428 (máximo)
<b>Temperatura durante el llenado</b>	713 °C (máximo) 506.4 °C (mínimo)
<b>Tiempo de llenado</b>	7.9787 s
<b>Velocidad de entrada</b>	0.16 m/s
<b>Módulo de solidificación</b>	0.0080293
<b>Tiempo de solidificación</b>	8.9299 s
<b>Temperatura de solidificación</b>	293.06 °C (máximo) 157.24 (mínimo)

Elaboración: Propia

Para el cálculo del tiempo de llenado (MFT) del freno de ascensor durante el proceso de fundición aplicamos la fórmula (2.8), definida en el capítulo 2 del presente documento, con el objetivo de realizar un análisis comparativo con el dato calculado por el software Click2Cast. Los datos utilizados son los que se detallan a



continuación y que son aplicados en la fórmula (2.7) que expresa la Ley de Continuidad.

$V = 0.00065 \text{ m}^3$ , volumen a ser llenado, dato obtenido desde el software Autodesk Inventor Professional 2013.

$v_1 = 0.16 \text{ m/s}$ , dato aplicado para la simulación.

$d_1 = 0,025 \text{ m}$ , diámetro del bebedero en la parte superior donde ingresa la colada, dato de diseño.

$d_2 = 0,02 \text{ m}$ , diámetro en la base del bebedero, dato de diseño.

$A_1 = 0.00031416 \text{ m}^2$ , área en la parte superior del bebedero por donde ingresa la colada, dato calculado aplicando fórmula de área de sección circular  $A=(\pi d^2)/4$ .

$A_2 = 0.00049087 \text{ m}^2$ , área en la base del bebedero.

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1 \times v_1}{A_2}$$

$$v_2 = 0.25 \text{ m/s}$$

En consecuencia:

$$Q = 0.0000785398 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por tanto:

$$MFT = \frac{V}{Q} = 8.27 \text{ s}$$

Resultado coherente con el obtenido mediante el software Click2Cast, registrado en la tabla 4.2 y mostrado en la figura 4.3, que es de 7.9787 segundos como tiempo en el punto último al que llega el metal fundido, existiendo una diferencia de 3.5% equivalente a 0,29 segundos.

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Al finalizar el proyecto se concluye que se cumplieron los objetivos planteados inicialmente; al realizar un análisis cualitativo de la defectología producida durante el proceso de fundición, en la etapa de llenado y solidificación, al obtenerse una pieza que no se ve comprometida por defectos bajo las sollicitaciones mecánicas de funcionamiento.

La utilización de un software para la simulación del proceso de fundición permite realizar modificaciones a diferentes condiciones que rigen la etapa de llenado, alcanzando un análisis con la suficiente aproximación, con lo cual se obtiene una optimización de recursos, disminuyendo tiempos de diseño y costos de producción.

Al predecir defectos producidos durante la etapa de solidificación de la pieza, se consigue una disminución de reprocesos y desperdicios de material, al restringir la utilización de mazarotas que compensen rechupes durante la etapa de solidificación; elementos que constituyen un desperdicio de material y posteriormente costos para su reutilización, así como maquinados posteriores al proceso de fundición.

Al aplicarse la ley de continuidad para la determinación del tiempo de llenado de la pieza se obtiene un valor comparable con el tiempo ingresado en el software

con el cual se obtuvo un elemento con defectos que no comprometen el desempeño mecánico del brazo de freno analizado.

El análisis de los defectos producidos durante el proceso de fundición está directamente relacionado con el estudio de las sollicitaciones mecánicas a las cuales está sometido el elemento durante su funcionamiento, debiendo considerarse indefectiblemente el factor de seguridad de diseño, pues al ser un elemento de seguridad en el transporte de personas, las consideraciones deben atender a principios de extrema seguridad.

La inclusión de los detalles que posee el elemento a ser fundido como perforaciones o ángulos entre las paredes, debe ser analizada con el objetivo de evitar la generación de turbulencia durante el flujo de la colada en el interior de la pieza, análisis que debe considerar los costos producidos por maquinados posteriores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ashby, M. (2005). *Materials selection in mechanical desing*. Oxford: ELSILVER Butterworth-Heinemann.
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson.
- Budynas, R., Nisbett, K. (2006). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- Gil Mur, F. J., Manero Planella, J. M. (2005). *Metalografía*. Catalunya: Edicione UPC.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Prentice Hall.
- Hufnagel, J. (Ed). (2004). *Manual del aluminio*. Barcelona: Reverté S.A.
- Kalpakjan, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura ingeniería y tecnología*. México: Prentice Hall.
- Mallo Gallardo, M. (1999). *Conformación de metales*, La Habana: Editorial Pueblo y Eduación.
- Miraverte, A. (2007). *Elevadores: Principios e innovaciones*. Barcelona: Reverté S.A.
- Morral, F. Jimeno, E & Molera, P. (1985). *Metalurgia General*. Barcelona: Reverté S.A.
- Zolotorevsky, V. S., Belov, N. A. & Glazoff, M.V. (2007). *Casting aluminium alloys*. Oxkord UK: Elsevier.

- Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L & Real Romero, J.C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. España: Editorial Visión Net.
- Vicente Galván,L., Soriano Cubells, M. & Elson Zaragoza, C. (2002). *Materiales metálicos*. Valencia: Editorial UPV.
- Marti Parera, A. (1993). *Frenos ABS*. Barcelona: Marcombo S.A.
- Standard specification for aluminum-alloy permanent mold castings, ASTM B108 § B108M (2012).
- Instalaciones Electromecánicas, Norma Ecuatoriana de Construcción NEC Capítulo 15 § Parte 15-3 (2013).
- Garrido Meneses,A.R., Sánchez Taco, V.H. (2011). *Deterinación de la metodología para la obtención de aleación de alumino de fundición maquinable sin porosidades*. (Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3955/1/CD-3708.pdf>
- Arias Espín, W. D. (2007). *Diseño y construcción de un equipo para colado en molde permanente*. (Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/599/1/CD-0999.pdf>
- García Ramos, C. (2008). *Simulación del proceso de inyección a alta presión mediante los programas de elementos finitos ProCAST y Vulcan*. (Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099./5466/1/Mem%C3%B2ria.pdf>

- Poveda Martínez, S., (2001). *Acabados Superficiales*. Recuperado de <http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/.pdf>
- Alu-Stock (2007), *Aleaciones de Aluminio*. ALU-STOCK S.A., 11(1), 14 - 58. Recuperado de <http://www.alu-stock.es/catalogo/pdf/libro/Alu-Stock-LA4-11-Aleaciones.pdf>
- Estudio y ensayo de materiales (2008), *Aluminio y sus Aleaciones*, Universidad Católica Argentina. Recuperado de [studioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/aluminio-y-aleaciones.pdf](http://studioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/aluminio-y-aleaciones.pdf)
- Ascensores MP(2006), *Curso de formación de ascensores*. MP ASCENSORES, Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/90131824/Curso-Formacion-Ascensores>
- Cubero, S., Tagliaferro, L. (2002). *Modificación de la morfología del silicio en la aleación de aluminio A356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento*. (Tesis de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela). Recuperado de <http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/2567/1/CD%20Tesis%20I2002%20C962.pdf>
- Lillo Huarún, S. P. (2006). *Comportamiento termomecánico en un disco de freno macizo y uno auto-ventilado*. (Título de Ingeniería, Universidad Austral de Chile). Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfci1729c/doc/bmfci1729c.pdf>
- Loizaga, A., De la Fuente, E., Niklas, A., Barrenengoa, J. & Fernández-Calvo, A.I. (2010). *Optimización de las propiedades mecánicas de las aleaciones*

- AlSi7Mg moldeadas en arena*. REVISTA DE METALURGIA, Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1160/1171>
- Archi EXPO. (2013). *Ascensores eléctricos*. Recuperado de <http://www.archiexpo.es/fabricante-arquitectura-design/ascensor-electrico-2073.html>
  - Ascensores Recalde. (2013). *Ascensor Hidráulico*. Recuperado de <http://www.ascensoresrekalde.com/pag.php?id=7>
  - Arquigráfico. (2013). *Ascensores Autoportantes*. Recuperado de <http://www.arquigrafico.com/tipos-de-ascensores-para-las-edificaciones/>



## **ANEXOS**

**ANEXO A**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE UN ASCENSOR ELÉCTRICO**

**ANEXO B**

**FOTOGRAFÍAS DE UN MECANISMO DE FRENO ELÉCTRICO**

**ANEXO C**

**ANÁLISIS DE CONVERGENCIA - RESULTADOS SIMULACIÓN**

**“AUTODESK SIMULATION MULTIPHYSICS 2013”**

**ANEXO D**

**SIMULACIÓN CON DISTINTOS PUNTOS Y VELOCIDADES DE  
INYECCIÓN DE LA COLADA Y GRÁFICOS DE DEFECTOS  
PRODUCIDOS DURANTE EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DEL  
ELEMENTO**