

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN POR FUNDICIÓN DE ANTENAS ALIMENTADORAS DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA INTEGRADO TROLEBÚS EN LA CIUDAD DE QUITO”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MIGUEL ÁNGEL ANCHALUISA SACÓN
miguel_as@live.com

JUAN PABLO SERRANO TOAPANTA
silvermundo@hotmail.com

DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO
fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, Junio 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Miguel Ángel Anchaluiza Sacón y Juan Pablo Serrano Toapanta, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Miguel Ángel Anchaluiza S.

Juan Pablo Serrano T.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Miguel Ángel Anchaluisa Sacón y Juan Pablo Serrano Toapanta, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a Dios quien me dio la vida y unos padres maravillosos. Mis padres quienes siempre estuvieron a mi lado para darme amor, aliento y estímulo, enseñándome con su ejemplo la buena y honrada manera de vivir que puede tener una persona, porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr esta meta.

Miguel Ángel

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi infinita gratitud:

A Dios por darme la capacidad y fuerza necesaria para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi Madre y a mi Padre por su amor, apoyo y por siempre alentarme a cumplir cada vez objetivos más grandes.

A mis abuelos y a toda mi familia por abrigarme con cariño y sabios consejos en los buenos y malos momentos.

A la familia Guevara quienes se han convertido en buenos amigos y sin quienes no habría sido posible el desarrollo práctico de este trabajo.

Al Ing. Fausto Oviedo y al personal del Laboratorio de Fundición por su pronta ayuda en cada pequeña dificultad u obstáculo que se fue presentando para la culminación de ésta Tesis.

Juan Pablo

DEDICATORIA

Como testimonio de gratitud dedico el presente trabajo a:

Mi familia, quienes me han heredado el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo: amor. A quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en una persona de provecho. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes del mundo.

Miguel Ángel

DEDICATORIA

Con profundo cariño y gratitud dedico este trabajo a mi Madre, a quien debo ser lo que soy, todos mis triunfos y mis metas cumplidas. Ella me ha brindado siempre su apoyo y confianza en mis proyectos, éste es sólo un logro más causa de su esfuerzo, trabajo, dedicación e infinito amor y gracias a que ha sabido llevarme por el camino del bien y me ha dado todos los recursos para para alcanzar grandes objetivos. Con quien hemos y sabremos salir siempre adelante en unión. Sólo podré retribuir todo su sacrificio llenándola de orgullo.

Juan Pablo

CONTENIDO

CAPITULO I	1
FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PROBLEMAS DE ESTUDIO	2
1.3. EL SOFTWARE BASADO EN EL MEF PARA LA FUNDICIÓN DE METALES	3
1.3.1. ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN.	3
1.3.2. EL USO DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE DEFECTOS EN PIEZAS FUNDIDAS	7
1.3.3. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN	9
1.4 EL SOFTWARE VULCAN	12
1.4.1 CAPACIDAD DEL SOFTWARE	12
1.4.2. ORGANIZACIÓN	12
1.5. EL SOFTWARE ESI PROCAST	17
1.5.1. CAPACIDAD DEL SOFTWARE	17
1.5.2. ORGANIZACIÓN	17
CAPITULO II	20
FUNDICIÓN EN MOLDES PERDIDOS	20
2.1. PROCESOS DE FUNDICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS	20
2.1.1. TIPOS DE MOLDES	22
2.1.1.1.2. <i>FUNDICIÓN EN MOLDES DE CAPA SECA</i>	23
2.1.2. MODELOS	26
2.2. NOYOS	29
2.2.1. FUNCIÓN	29
2.2.2. PROPIEDADES DE MEZCLAS DE MOLDEO PARA NOYOS	30
2.2.3. PROPIEDADES DE LOS NOYOS	32
2.2.4. FACTORES QUE INFLUYEN LA FABRICACIÓN DE NOYOS	37
2.2.5. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS NOYOS	37
2.3. ALEACIONES DE ALUMINIO	59
2.3.1. DESIGNACIÓN DE LA ALEACIÓN PARA ALUMINIOS FORJADOS	60
2.3.2. DESIGNACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS.	61
2.3.3. DESIGNACIÓN DE TEMPLE	62
2.3.4. ALEACIONES ALUMINIO-COBRE	64
2.3.5. ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO	68
2.3.6. ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO-MAGNESIO	69
CAPITULO III	72
DISEÑO DE LAS PIEZAS A PRODUCIR	72
3.1. ANÁLISIS DE LAS PIEZAS A PRODUCIR	72
3.1.1. TIPO DE PIEZAS	72
3.2. SELECCIÓN DE LA ALEACIÓN DE LAS PIEZAS	73
3.3. REDISEÑO DE LAS PIEZAS.	76
3.3.1. PARTES ORIGINALES	76
3.3.2. CRITERIO DE FABRICACIÓN	77
3.3.3. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE ESFUERZOS	78
3.3.4. OPCIONES DE DISEÑO	87

3.3.5. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN	88
3.5. CARACTERÍSTICAS DE LA NUEVA PIEZA.	88
3.5.1. MASA	88
3.5.2. ESPESOR	88
3.5.3. REFUERZO	91
3.5.4. ALEACIÓN	91
3.5.5. CONCENTRADORES DE ESFUERZOS	93
CAPITULO IV	94
CÁLCULO DEL MODELO, MOLDE Y SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	94
4.1. DISEÑO DEL MODELO	94
4.1.1. FACILIDAD DE DESMODELADO	94
4.1.2. CONTRACCIÓN	96
4.1.3. FUNCIONALIDAD O CONGRUENCIA	97
4.1.4. DETALLE DE VALORES USADOS PARA CADA UNO DE LOS MODELOS	97
4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	99
4.2.1. MÉTODO DE CÁLCULO	99
4.2.2. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE VALORES	103
4.3. CÁLCULO DE LA CAJA DE MOLDEO	104
4.3.1. DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES	106
4.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN UTILIZANDO SOFTWARE MEF	109
4.4.1. MODELO CAD	109
4.4.2. SIMULACIÓN	110
4.4.3. RESULTADOS	117
4.4.4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	122
CAPITULO V	125
CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS	125
5.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y CAJAS DE NOYOS	125
5.1.1 MODELOS	125
5.1.2 PLACAS MODELO	127
5.1.3. CAJAS DE NOYOS	129
5.2. ELABORACIÓN DEL MOLDE.	131
5.3. PREPARACIÓN DE LA ALEACIÓN	133
5.3.1. SELECCIÓN DE LA CHATARRA	133
5.3.2. MÉTODO DE CÁLCULO DE CARGAS	134
5.4. DESGASIFICACIÓN	137
5.4.1 DESGASIFICACIÓN CON ARGÓN	139
5.5. COLADO	142
5.6 DISEÑO DEL PROCESO DE SOLDADURA	143
5.6.1 PROCESO DE SOLDADURA	143
5.6.2 PREPARACIÓN DEL METAL BASE	144
5.6.3 PRECALENTAMIENTO	145
5.6.4 PARAMETROS DEL PROCEDIMIENTO	146
5.6.5 SELECCIÓN DEL EQUIPO	148
5.6.6 DETERMINACIÓN DE LA UNIÓN SOLDADA	149
5.7. SOLDADURA Y ACABADOS	149

5.8 TRATAMIENTO TÉRMICO	152
5.8.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ESFEROIDIZACIÓN DEL SILICIO	152
5.8.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ESFEROIDIZACIÓN	154
5.8.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS T5 Y T6	156
5.8.4 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO TERMICO.	160
CAPITULO VI	161
PRUEBAS Y CONCLUSIONES	161
6.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN	161
6.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	161
6.1.2 ENSAYO PRACTICA DE LABORATORIO	162
6.1.3 PROCEDIMIENTO	163
6.1.4 RESULTADOS	165
6.2. ANÁLISIS METALOGRAFICO	165
6.2.1. ALEACIÓN DE ANTENA ORIGINAL	165
6.2.2. ALEACIÓN A356	166
6.2.3. ALEACIÓN A195	167
6.3. CONCLUSIONES	168
6.4. RECOMENDACIONES	169
BIBLIOGRAFÍA	171
ANEXOS	172
ANEXO A: PLANOS	A
ANEXO B: WPS	B
ANEXO C: PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ANTENAS POR FUNDICIÓN	C

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la estructura de un programa de simulación numérica	4
Figura 2. Organización del software Vulcan.	13
Figura 3. Pantalla de trabajo del Vulcan	13
Figura 4. Ventana de los datos generales de la simulación	15
Figura 5. Ventana de propiedades del molde	16
Figura 7. Módulo gestor de manejo.	18
Figura 8. Organización del software ProCAST.	18
Figura 9. Proceso de fundición mediante moldeo perdido	20
Figura 10. Sólido Obtenido.	21
Figura 11. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arena verde.	22
Figura 12. Corte transversal de caja moldeo cerrada con capa seca.	23
Figura 13. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arena seca.	24
Figura 14. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arcilla.	24
Figura 15. Corte transversal de caja moldeo cerrada con secado por CO ₂ .	25
Figura 16. Cajas de moldeo de acero.	26
Figura 17. Comparación entre pieza a obtener y el modelo a fabricar.	27
Figura 18. Modelo sencillo y placa modelo.	28
Figura 19. Molde en arena mostrando el empleo de un noyo para fabricar una pieza con cavidad interna.	30
Figura 20. Molde en arena mostrando el empleo de un noyo para solucionar una contrasalida	30
Figura 21. Corte transversal de un noyo compuesto con alma de tubo de acero recubierto con fibra de asbesto para facilitar el escape de gases.	34
Figura 22. Diagrama de fase Aluminio – cobre.	66
Figura 23. Aleación 380 fundida en molde. El área próxima a una superficie maquinada (A) muestra una estructura típica de una fundición que tiene propiedades deseables: partículas interdendríticas de silicio eutéctico (B) y CuAl ₂ (C) en una matriz de solución sólida de aluminio (D). Atacada químicamente en 0.5 HF, 260x.	67
Figura 24. Diagrama de fase aluminio – silicio.	68
Figura 25. Diagrama de fase aluminio y silicio y microestructuras de fundición de elementos puros y de aleaciones de varias composiciones. Las aleaciones con menos de 12% de Si se denominan hipoeutécticas, aquellas con Si cerca de 12% como eutécticas, y aquellos con más del 12% de Si como hipereutécticas.	69
Figura 26. Diagrama de fase Aluminio – silicio de magnesio	70
Figura 27. Aleación 6061 en forma de placa, laminada en caliente, sección longitudinal. Partículas (A) de Fe ₂ SiAl ₁₂ (grises., tipo letra cursiva) y Mg ₂ Si (negras) (B) en una matriz de solución sólida rica en aluminio. Atacada químicamente en HF al 0.5%, 250x	70
Figura 28. Diagrama de fase ternario Aluminio – silicio – magnesio.	71
Figura 29. Partes de antena original.	77
Figura 30. Base de antena original con refuerzo.	77
Figura 31. Parámetros de simulación en antena original.	79

Figura 32. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena original.	80
Figura 33. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena original.	81
Figura 34. Parámetros de simulación en antena rediseñada.	82
Figura 35. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.	83
Figura 36. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.	84
Figura 37. Modelo CAD para la simulación de impacto.	85
Figura 38. Resultados de la simulación de impacto antena original.	85
Figura 39. Deformación en zona de fractura de antena rediseñada.	86
Figura 40. Resultados de la simulación de impacto.	86
Figura 41. Parámetros de simulación en antena rediseñada.	89
Figura 42. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.	90
Figura 43. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.	90
Figura 44. Vista interna de Base reforzada.	91
Figura 45. Aleación 380, magnificación 200x.	91
Figura 46. Dendritas típicas en una aleación A356. Atacado con reactivo Poulton modificado (60% HCl, 30% HNO ₃ , 5% HF, 5% H ₂ O)	92
Figura 47. Microestructuras de aleación A356 solidificadas a diferentes velocidades de enfriamiento. (a) Fundición en coquilla. (b) Fundición en arena verde. Atacadas químicamente con Keller.	92
Figura 48. Eliminación de concentradores de esfuerzos.	93
Figura 49. a es el modelo; m es la dirección de desmoldado; b son las dos tapas del molde; c es el plano de separación en la sección máxima del modelo; β es el ángulo de salida en las paredes verticales del modelo.	94
Figura 50. Modificación de las formas geométricas para dar ángulo de salida para la extracción de las piezas.	95
Figura 51. Significado de la contracción. Un modelo de dimensiones A, B, C deja en la arena una hulla o un hueco de iguales dimensiones que el metal rellenará; pero al enfriarse, por ejemplo el efecto de la concentración asumirá las dimensiones a, b, c menores.	96
Figura 52. Esquema del sistema de alimentación.	99
Figura 53. Determinación de las distancias permisibles para la fabricación de las antenas.	107
Figura 54. Dimensiones de las cajas de moldeo.	108
Figura 55. Redistribución de cajas de moldeo.	108
Figura 56. Modelo CAD de la pieza a ser obtenida en la caja 1 de fundición.	109
Figura 57. Modelo CAD de la arena de moldeo en la caja 1 de fundición.	109
Figura 58. Modelo CAD de la pieza a ser obtenida en la caja 2 de fundición.	110
Figura 59. Modelo CAD de la arena de moldeo en la caja 2 de fundición.	110
Figura 60. Geometría IGES del modelo.	111
Figura 61. Asignación de tamaño de elemento de malla.	112
Figura 62. Malla de superficie creada.	112
Figura 63. Malla de volumen creada.	113
Figura 64. Geometría IGES del molde y asignación de los tamaños de malla.	113
Figura 65. Malla volumétrica del molde.	114

Figura 66. Ensamblaje de las dos mallas.	114
Figura 67. Asignación de materiales.	115
Figura 68. Asignación de condiciones de borde.	116
Figura 69. Determinación de parámetros de simulación.	116
Figura 70. Visualización de la simulación.	117
Figura 71. Tiempo de llenado.	118
Figura 72. Temperatura de enfriamiento.	118
Figura 73. Tiempo de solidificación.	119
Figura 74. Acumulación de porosidades.	119
Figura 75. Tiempo de llenado.	120
Figura 76. Temperatura de enfriamiento.	121
Figura 77. Tiempo de solidificación.	121
Figura 78. Acumulación de porosidades.	122
Figura 79. Fracción Sólida.	123
Figura 80. Enfriamiento de la caja 1.	123
Figura 81. Burbuja de argón dentro de la colada de aluminio: 1ro.-La burbuja de argón funciona como cámara de vacío. 2do.- El hidrógeno monoatómico es absorbido dentro del Ar formando H ₂ y arrastrando inclusiones.	140
Figura 82. Representación de la evolución experimentada por los cristales de silicio eutéctico, durante el tratamiento de esferoidización: a) Estructura original, cristales de silicio ramificado, b) Primera fase del proceso de subdivisión de cristales, c) Engrosamiento y disminución del número de partículas, d) Estructura final idealizada, partículas esféricas	154
Figura 83. Evolución esquemática de la dureza y la resistencia de una aleación de aluminio de endurecimiento estructural. I) mantenido a temperatura ambiente después del temple. (II) mantenido a temperatura de revenido después del temple y maduración a temperatura ambiente.	157
Figura 84. Variación de las propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio.	160

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Cilindro de aluminio en bruto.	125
Imagen 2. Proceso de torneado y rectificación de modelos.	126
Imagen 3. Modelos terminados.	126
Imagen 4. Modelos terminados.	127
Imagen 5. Placa modelo.	127
Imagen 6. Placa modelo1: Vistas frontal, posterior y lateral (de izquierda a derecha).	128
Imagen 7. Placa modelo2: Vistas frontal, posterior, lateral (de izquierda a derecha).	129
Imagen 8. Modelos de madera para cajas de noyos.	129
Imagen 9. Cajas de noyos terminadas.	130
Imagen 10. Núcleos de acero para noyos.	131
Imagen 11. Noyos obtenidos.	131

Imagen 12. Molde de arena verde 1.	132
Imagen 13. Molde de arena verde 2.	132
Imagen 14. Topes.	133
Imagen 15. Moldes de arena verde terminados.	133
Imagen 16. Chatarra seleccionada.	134
Imagen 17. Pesado de chatarra.	136
Imagen 18. Horno de GLP encendido.	137
Imagen 19. Adición de fundentes y desgasificantes con el horno apagado.	139
Imagen 20. Insuflado de argón en el crisol con metal fundido mediante lanza de acero inoxidable.	141
Imagen 21. Retirado de la escoria formada sobre el metal fundido.	141
Imagen 22. Colado en el molde 1.	142
Imagen 23. Colado en el molde 2.	142
Imagen 24. Pieza de aluminio obtenida con sistema de alimentación y respiraderos.	143
Imagen 25. Vistas frontal y superior de las partes de la antena limpias y sin el sistema de alimentación.	149
Imagen 26. Comprobación de medidas en la parte 1 de la antena que debe ser 1250mm; tiene 6mm de sobredimensionamiento en su longitud.	150
Imagen 27. Junta realizada entre las partes 3 y 4 de la antena. Similar a las otras dos juntas.	151
Imagen 28. Montaje sobre el mandril del torno con ayuna de una luneta.	151
Imagen 29. Cordón de soldadura TIG, se puede distinguir la zona afectada por el calor.	151
Imagen 30. Probetas para el ensayo de tracción	162
Imagen 31. Máquina universal de ensayos de tracción	163
Imagen 32. Sujeción en los extremos roscados	164
Imagen 33. Falla en probetas ensayadas	164
Imagen 34. Metalografía antena original sentido longitudinal 1000x.	165
Imagen 35. Metalografía antena original sentido transversal 1000x.	166
Imagen 36. Metalografía aleación A356 100x.	166
Imagen 37. Metalografía aleación A356 500x.	167
Imagen 38. Metalografía aleación A195 100x.	167
Imagen 39. Metalografía aleación A195 500x.	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3.1. Designación para los grupos de aleación*	61
Tabla 2.3.2 Designación para los grupos de aleación por fundición	61
Tabla 3.2.1 Aleaciones unificadas de aluminio de fundición.	74
Tabla 3.2.2 Composición en peso de algunas aleaciones de aluminio fundido según ASTM.	76
Tabla 3.3.3.1.1 Reacciones en la base de antena original.	79
Tabla 3.3.3.1.2 Sumario de resultados antena original.	79
Tabla 3.3.3.2.1 Reacciones en la base de antena rediseñada.	82
Tabla 3.3.3.2.2 Sumario de resultados antena rediseñada.	82
Tabla 3.5.2.1 Reacciones en la base de antena rediseñada.	88
Tabla 3.5.2.2 Sumario de resultados antena rediseñada.	89
Tabla 3.5.6. Características de la nueva pieza.	93
Tabla 4.1.4. Valores seleccionados para el moldeo de modelos.	98
Tabla 4.2.1.a. Coeficiente S en dependencia del espesor de la pared de la pieza.	100
Tabla 4.2.1.b. Velocidad específica K en función de la densidad relativa Kv.	100
Tabla 4.2.1.c. Dimensiones de alimentadores.	101
Tabla 4.2.1.d. Dimensiones del colector de escoria.	102
Tabla 4.2.1.e. Dimensiones del tragadero, fondo del tragadero y cazuela.	102
Tabla 4.2.2. Dimensiones del sistema de alimentación a utilizar.	103
Tabla 4.3.a. Distancias permisibles entre piezas y elementos del molde.	104
Tabla 4.3.b. Dimensiones de las cajas de moldeo - Altura.	105
Tabla 4.3.c. Dimensiones de las cajas de moldeo - Ancho.	106
Tabla 5.3.2.2 Cargas necesarias para obtener la aleación.	136
Tabla 5.6.1 Procesos Recomendados para la Soldadura de Metales y Aleaciones	143
Tabla 5.8.3.1.2. Secuencia observada a menudo en las aleaciones endurecibles por envejecimiento	159
Tabla 6.1.3 Detalle de dimensiones de las Probetas	163

PRESENTACIÓN

El mantenimiento de las unidades de transporte del sistema Trolebús exige fabricar repuestos localmente y no depender de importaciones a costos considerables. A pesar de que durante la adquisición de éstas unidades estaba incluido un stock de repuestos y que además las piezas averiadas han sido reparadas varias veces, en ambos casos se ha llegado al límite. Por eso la importancia de la realización de esta tesis, la cual trata específicamente sobre las Antenas conductoras de energía que irán conectadas a las líneas principales de alimentación eléctrica. Trabajo en el cual, además se busca dinamizar la industria nacional, encontrar alternativas de fabricación y fomentar la incorporación de tecnologías no conocidas en el País.

Se ha elegido como método de fabricación factible y económicamente conveniente el de Fundición, con muchas alternativas para implementar mejoras tanto en diseño, tipo de aleación, técnicas de colado y métodos de fabricación. Se evaluarán los pros y contras mediante métodos innovadores en el sector, como simulación computarizada.

RESUMEN

Se realiza un estudio de las alternativas para la fabricación de las Antenas, concluyéndose que el método más sencillo en esta etapa del desarrollo es el de Molde Perdido y a partir de eso se consideran alternativas de colado, diseño del sistema de alimentación, espesores mínimos, modelos y cajas de noyos, cajas de moldeo, tipos de aleaciones, métodos para evitar defectos inherentes a la fundición, y posterior soldadura y tratamiento térmico.

El capítulo I contiene una pequeña introducción del Método de Elementos Finitos aplicado directamente a la fundición y la descripción de software conocido muy útil para este propósito.

El capítulo II describe un corto marco teórico de lo que es la fundición en molde perdido y las diferentes opciones que se tienen presentes y que son factibles para la fabricación de este tipo de piezas.

En el capítulo III se desarrolla un rediseño de las piezas tomando en cuenta que el método de fabricación también es un condicionante y se aplica simulación de esfuerzos para validar el rediseño.

En el capítulo IV, una vez determinada la pieza real a producirse, se calcula, diseña y valida los sistemas y partes complementarias para la fundición. Aquí se utiliza la ayuda del software MEF.

El capítulo V describe la realización y preparación de los modelos, cajas de noyos, moldes y aleaciones, y posterior fusión, desgasificación y colado. Finaliza con la descripción del proceso de soldadura y del tratamiento térmico.

Para finalizar el capítulo VI incorpora los resultados de ensayos y análisis realizados a probetas obtenidas de la fundición, así como conclusiones y recomendaciones finales.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Las limitaciones de la mente humana son tales que no se puede captar el comportamiento del complejo mundo que lo rodea en una sola operación global. Por ello una forma natural de proceder, consiste en definir un sistema seleccionando un elemento significativo del continuo, cuyo comportamiento puede conocerse, y a continuación se reconstruye el sistema original para estudiarlo a partir de estos componentes. Para poder entender de forma clara el método de elementos finitos, podemos representarlo por medio de un cuerpo que se analiza como un ensamble de bloques o elementos, la aplicación del método consiste principalmente en realizar divisiones en un número y forma que permitan su análisis óptimo.

En muchos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos, a tales problemas, se los denomina discretos. En otros, las subdivisiones prosiguen indefinidamente y el problema solo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática infinitesimal. Ello conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados, a tales sistemas se los llama continuos.

Abordar los problemas discretos lleva a definir el método de elementos finitos como procedimiento de aproximación para problemas continuos, de tal forma que:

- a) El continuo se divide en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica, mediante un número finito de parámetros
- b) La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos.

En muchos casos el comportamiento de sólidos y fluidos es similar en muchos aspectos por lo que se introduce la posibilidad de realizar el estudio de la mecánica de fluidos partiendo de esta premisa.

Ambos medios pueden estar sometidos a esfuerzos y de igual manera ambos pueden experimentar desplazamientos.

Sin embargo existe una diferencia fundamental. Los fluidos no pueden soportar esfuerzos cortantes cuando estos están en reposo, soportando únicamente una presión o un esfuerzo de compresión media. Mientras que en sólidos pueden existir otros esfuerzos y estos también pueden soportar fuerzas estructurales.

En la actualidad todo éste tipo de problemas es realizado por diferentes programas de computadoras, por lo que ya no es una limitante no tener un amplio conocimiento en la solución de métodos numéricos, sin embargo, es conveniente tener la base de los conocimientos para poder tener una noción, de cómo se resuelven este tipo de problemas y sobre todo poder tomar decisiones prudentes con respecto los resultados de dichos problemas.

Debido a que en el mercado existen gran cantidad de paquetes que permiten la utilización de los elementos finitos para la solución de problemas, lo que debemos tener muy en claro es que antes de iniciar el análisis debemos: entender el comportamiento básico de nuestro cuerpo a modelar, los datos que el paquete requiera para poder llevar a cabo su procesamiento, al igual que comprender y entender las técnicas de modelado para que así podemos tener una gran aproximación a nuestro cuerpo de estudio; pero sin importar el paquete que utilicemos debemos seguir pasos similares para ingresar los datos, y así poder obtener resultados confiables y coherentes.

1.2. PROBLEMAS DE ESTUDIO

El método de los elementos finitos no ha sido un procedimiento de predilección en la solución de problemas de fluidos por su pronta aparición en esta materia y simplemente porque el campo de los fluidos había sido estudiado por métodos tradicionales como el método de diferencias finitas y el de volúmenes finitos.

Pero gracias a trabajos como el de Zienkiewicz O. C. y Taylor R., como de otros autores, ha podido tomarse al método de los elementos finitos como una solución alternativa a problemas de la dinámica de fluidos, permitiendo además, el aprovechamiento de los ordenadores gracias a la apertura de este apartado hacia la dinámica de fluidos computacional.

Hoy en día, en el plano internacional, la herramienta dinámica de fluidos computacional (CDF por sus siglas en inglés) está ampliamente desarrollada, debido a que la solución analítica de diversos problemas de flujo, presenta una gran dificultad, ya sea por lo complicado de la geometría del mismo, por las condiciones de contorno impuestas para el problema o simplemente por la complejidad en la solución matemática de las ecuaciones de gobierno, permitiendo la simulación numérica a través de programas computacionales de dicho problema, ahorrando mucho tiempo y lo que es de mayor utilidad, obtener una visualización del fenómeno para comprender un poco más del problema.

1.3. EL SOFTWARE BASADO EN EL MEF PARA LA FUNDICIÓN DE METALES

Existen distintos tipos de software de Elementos Finitos destinados al área de la fundición, entre ellos el ProCAST y el propio Vulcan, sea cual fuere el software de Elementos Finitos seguirá la estructura detallada a continuación.

1.3.1. ESTRUCTURA DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN.

Un programa de simulación basado en el M.E.F. es una pieza compleja de software en la que confluyen numerosas operaciones. Las funciones a desempeñar por un programa de simulación no se limitan simplemente a resolver las ecuaciones que modelizan el problema; además incluyen la preparación de los datos y el análisis de los resultados numéricos que aparecen como producto del cálculo.

Debido al variado número de tareas complejas a desempeñar por el paquete de cálculo, éste suele dividirse en diferentes secciones, cada una de las cuales efectúa una operación determinada. Un programa de simulación por elementos finitos consta de:

PREPROCESADOR: Crea un archivo de datos, donde el calculador dispone de la información necesaria para realizar la simulación.

CALCULADOR: Resuelve el problema y genera un archivo de resultados.

POSTPROCESADOR: Facilita la visualización de los resultados a partir del archivo de datos.

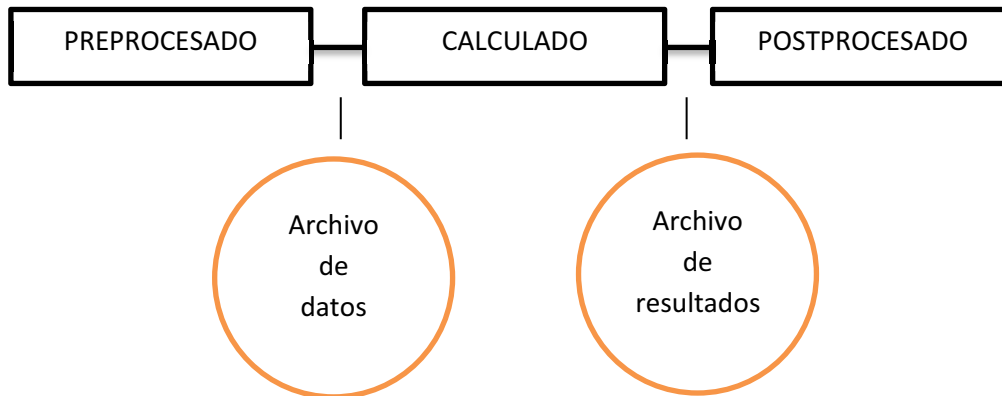


Figura 1. Esquema de la estructura de un programa de simulación numérica

1.3.1.1. Preprocesador

La función básica del preprocesador de un paquete de cálculo es crear un archivo de datos, en el cual el calculador del programa podrá disponer, en el formato adecuado, de toda la información necesaria para la resolución del problema. Para crear el archivo de datos, el preprocesador recoge toda la información necesaria y permite generar el mallado del dominio. A partir de la discretización del dominio, seleccionada por el usuario, el calculador del programa aplicará el M.E.F.

Parte de la información requerida por el preprocesador del programa para generar el archivo de datos puede obtenerse directamente a partir de archivos externos, lo cual simplifica la utilización de los programas de simulación. Los datos de mayor relevancia a introducir en el preprocesador por parte del usuario son:

- Geometría de la estructura.
- Condiciones de contorno.
- Caracterización de los materiales a emplear.

- Generación de la malla.

1.3.1.1.1. Geometría de la estructura.

Al emplear en el preprocesador un generador de malla, es habitual definir primero la geometría global de la estructura y después mallarla con los tipos de elementos adecuados. Generalmente, la geometría se importa de un archivo de sistema CAD.

La geometría es definida como un conjunto de líneas, superficies y volúmenes. Es útil definir regiones físicamente identificables por separado al definir la geometría y considerar ésta como un conjunto de diversas entidades ya que, además de permitir afrontar la resolución del problema por partes, facilitando el trabajo conjunto de diversas personas en el mismo problema; se obtienen agrupaciones lógicas a la hora de listar los resultados.

1.3.1.1.2. Condiciones de contorno y condiciones iniciales.

Las condiciones de contorno y las condiciones iniciales son variables que reproducen las características del entorno en el cual se realiza el análisis de estudio. Estos datos se almacenan por separado del resto de información de modo que se facilita el estudio de la respuesta del sistema frente a diversas variaciones de las condiciones.

1.3.1.1.3. Caracterización de materiales.

Introducidas las condiciones del problema, es necesario indicar los materiales implicados en la simulación del problema de estudio. Para caracterizarlos se requiere la introducción de los datos de las diferentes propiedades de cada uno de ellos.

1.3.1.1.4. Generación de la malla.

Definida la geometría y diversas condiciones, se debe proceder a la discretización del dominio en varias regiones de sencilla caracterización, para realizar posteriormente el cálculo por elementos finitos. Como ya se ha comentado anteriormente, la convergencia de los resultados con la realidad dependen del mallado escogido en la idealización del dominio; por lo tanto, la elección del tipo y tamaño del elemento, determinarán la precisión y validez de la simulación.

Para realizar una correcta discretización del dominio, además de considerar aspectos geométricos y condiciones de contorno, se debe tener en cuenta una aproximación de la solución a la hora de escoger el tipo de elemento para la malla, ya que el resultado que se va a obtener una vez realizada la simulación puede influir significativamente. También es necesario saber cual es el comportamiento de cada tipo de elemento y las aproximaciones realizadas en su formulación. En base a estas consideraciones, en ocasiones será conveniente definir diferentes tipos de elementos y tamaños de malla en un mismo dominio. En éste caso se presenta el problema de conseguir la transición entre ellas. La interconexión de distintos elementos es posible siempre que las interpolaciones comunes sean del mismo tipo, para no violar las condiciones de convergencia del método. En algunos casos puede forzarse la compatibilidad mediante la utilización de ecuaciones de ligadura pero no es recomendable y, en todo caso, su utilización queda relegada a los expertos.

Como método operativo para la discretización del dominio se aconseja realizar una verificación de la ausencia de errores en la malla generada antes de proceder a los cálculos de la simulación y seguir un refinamiento progresivo de la malla, empezando con modelos de malla muy simplificados que irán refinándose en aquellas zonas que lo requieran en función de los resultados obtenidos. De este modo se ahorra gran cantidad de horas de computación, con la consiguiente reducción del coste de la simulación.

La verificación de la malla se inicia con un simple análisis visual de ésta. En caso necesario se pueden emplear herramientas que indican la presencia de nodos próximos no conectados, elementos distorsionados, mallas no unidas o grietas internas; incluidas en los paquetes generadores.

1.3.1.2. Calculador

El módulo de cálculo se ocupa de plantear y resolver el sistema de ecuaciones al que queda reducido el sistema físico, generando posteriormente el archivo de resultados del problema. La naturaleza de las ecuaciones que modelizan el problema, así como los resultados obtenidos, dependen del tipo de análisis especificado. El paquete de cálculo empleado por el programa de simulación por elementos finitos basa sus operaciones en el M.E.F.

La salida del módulo de cálculo es un largo listado de valores aproximados de las variables en los nodos difíciles de interpretar, por este motivo se hace necesaria una fase de postproceso.

1.3.1.3. Postprocesador

El postprocesador recoge los datos generados por el módulo de cálculo y los elabora y representa en la forma más adecuada. Permite la visualización de los resultados obtenidos a través de gráficas, tablas, animaciones, etc., facilitando el análisis e interpretación de los resultados.

1.3.2. EL USO DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE DEFECTOS EN PIEZAS FUNDIDAS

En el mundo existen diversos software comerciales para simular la solidificación en piezas fundidas (Magmasoft, NovaFlow & Solid, ViewCast, CastCAE, MAVIS, ProCAST, Vulcan, etc.), los cuales están muy extendidos en países desarrollados.

1.3.2.1. Introducción

La tecnología de piezas fundidas tiene como uno de sus últimos pasos la comprobación de la misma en la práctica, paso que desperdicia una gran cantidad de recursos en caso de tener errores.

Con mucha frecuencia se aplican tecnologías en las que, en su mayoría, interviene la experiencia de los especialistas y estas necesitan de un gran número de pruebas para llegar al éxito, por supuesto con una considerable pérdida para la empresa.

Estos problemas se agravan cuando las piezas son de grandes dimensiones, como por ejemplo el block de un determinado motor que puede llegar a pesar 19 toneladas.

Como variables de entrada además de la geometría de la pieza, el simulador tiene en cuenta la composición química de la aleación a fundir, el tipo de mezcla de moldeo, la temperatura del metal y el molde, entre otros parámetros. También tiene en cuenta el movimiento de la pared del molde cuando se usa arena en verde, algo que no hay manera de prever en cálculos manuales de aleaciones que se expanden como los hierros fundidos.

Los resultados de la simulación permiten visualizar los principales defectos que se van a producir, así como los tiempos de solidificación y posterior enfriamiento de la pieza.

Estos resultados permiten analizar y diseñar exitosamente, un adecuado sistema de alimentación y mazarota. El conocimiento preciso de los tiempos de solidificación de cada parte de la pieza, permite una mejor ubicación y determinación de las dimensiones de las mazarotas, evitando el usual sobredimensionamiento de las mismas. Haciendo iteraciones sucesivas se puede llegar a una tecnología que logre obtener una pieza sin defectos

1.3.2.2. Simulación del llenado del molde

El fenómeno de solidificación del metal líquido entrando en la cavidad del molde antes de copiar toda la forma del mismo es conocido como cold shut. Este es uno de los defectos principales que se producen durante el llenado del molde y se convierte en crítico cuando las piezas tienen pequeños espesores. Piezas con pequeños espesores se han vuelto muy comunes debido a la necesidad de producirlas cada vez más ligeras para disminuir los consumos energéticos.

La simulación del llenado del molde permite también observar el régimen del flujo de metal en la cavidad del molde, la posible turbulencia que se formaría y corregir la forma del sistema de alimentación en caso de problemas.

1.3.2.3. Simulación la solidificación

En este caso, uno de los defectos más comunes a preverse son los rechupes. Fenómeno producido por la contracción del metal, se debe en general por un enfriamiento lento casi siempre en la parte más gruesa de la pieza y al no ser alimentada adecuadamente por las mazarotas o montantes de alimentación la pieza se autoalimenta formando estas cavidades internas. La simulación ayudará a mejorar el sistema de alimentación, así como ubicación y tamaño de mazarotas y respiraderos.

Otro defecto muy importante que se puede predecir gracias a la simulación, son las porosidades. Pueden ser ocasionadas por escorias las cuales penetran dentro de la pieza por defecto del sistema de colada de la misma o por

deficiente limpieza del material antes del colado. Además son producidas por gases que no escapan por deficiente permeabilidad de las arenas de moldeo.

1.3.2.4. Simulación de tensiones residuales

La simulación de esfuerzos permite realizar un cálculo termo-mecánico que devuelve como resultados la distribución de esfuerzos, las deformaciones (elástica y plástica), los desplazamientos, fatiga interna y grietas. De esta manera se puede pronosticar y corregir el diseño tanto de la pieza como de los sistemas complementarios para el proceso de fabricación por fundición.

1.3.3. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

Antes de comenzar a analizar los procesos al detalle, se va a hacer una descripción general de cómo es la modelización de los procesos de fundición. De esta manera se hará más fácil entender las ideas básicas y al mismo tiempo ayudaran a mejorar la comprensión de los conceptos que se mostrarán en los siguientes apartados.

El procedimiento se puede descomponer en los siguientes pasos: definición geométrica, mallado geométrico, definición de los parámetros del material y del proceso, simulación o solución de las ecuaciones de gobierno y finalmente, evaluación de los resultados.

1.3.3.1. Proceso de fundición

Desde un punto de vista teórico, un proceso de fundición se puede considerar como la suma de varios pasos:

- El llenado de una cavidad mediante una aleación fundida, descrita por las leyes fluido dinámicas.
- La solidificación y el enfriamiento de la aleación, según las leyes de transmisión de calor.
- Las posibles transformaciones de estado sólido, relacionadas con termodinámica y cinética, como está descrito en la metalurgia física;
- Las tensiones y deformaciones en que la pieza se ve sometida debido a los pasos anteriores.

Las características finales (geométricas, físicas, mecánicas, microestructurales) de la pieza fundida son el resultado directo de los diferentes pasos del proceso; mediante el control de estos pasos, las características mencionadas anteriormente pueden ser optimizadas.

Para poder definir las condiciones de frontera y las condiciones iniciales del proceso, deben de tenerse en cuenta parámetros fundamentales como la temperatura de fundición, el tamaño del fundido, la configuración del molde (entradas, bebederos, núcleos, etc.) o la fluidez del metal fundido.

Prácticamente, la complejidad geométrica de las piezas fundidas y el número de variables involucradas hacen imposible la descripción analítica del llenado del molde y de la solidificación y enfriamiento de la aleación. Este problema se supera mediante la disponibilidad de computadoras muy potentes, que pueden resolver, mediante métodos numéricos adecuados, sistemas con millones de ecuaciones diferenciales. Esta aproximación se basa en modelos obtenidos gracias a la representación discreta.

1.3.3.2. Definición de la geometría

El primer paso en el proceso de modelización es definir la geometría del sistema de fundición. Los programas de simulación de procesos de fundiciones modernos, tienen la capacidad de importar dibujos de CAD de otros programas que están especializados para ello. Como se verá en el siguiente apartado el programa que se usa en este proyecto, ofrece la posibilidad de generar el mismo esta tarea. Es muy importante que durante el modelado de la geometría se incluya todos los elementos del sistema de fundido que puedan tener una influencia significativa en el llenado y la solidificación del material. Como por ejemplo los canales de refrigeración, los canales de entrada del fundido, etc.

1.3.3.3 Mallado de la geometría

Después de la definición de la geometría del sistema de fundido, esta debe ser dividida en un número discreto de elementos volumétricos segmentados para los subsiguientes cálculos. Los nodos de la malla son los puntos de la geometría donde las ecuaciones resuelven los valores de las variables. Las líneas que conectan los nodos entre si, son las vías que usan para interpolar las variables principales en función de sus valores en los nodos.

Un punto crítico a tener en cuenta es lo fina o basta que puede ser la malla. Esta característica es básica para conseguir la precisión deseada. Cuando más fina es la malla más precisión se obtiene. Aunque se debe tener en cuenta que la precisión crece a medida que la malla es más fina. Además el tiempo de cálculo aumenta a medida que la malla se hace más fina, ya que existen más elementos para calcular. En general se puede decir que para encontrar la simulación óptima, hay que hacer un balance entre la precisión buscada y el tiempo de cálculo que debe ser sacrificado.

1.3.3.4. Definiciones de los parámetros del material y del proceso

El siguiente paso de la modelización del sistema, es definir los parámetros del material y del proceso, que son necesarios para resolver las ecuaciones gobernantes del proceso de llenado y solidificación del molde. En primer lugar, se definen las propiedades termofísicas de los diversos materiales que están relacionados con el sistema de fundición. Además, las condiciones iniciales para las incógnitas de las ecuaciones también deben de ser especificadas (Ej.: temperaturas iniciales y velocidad de flujo).

1.3.3.5 Simulación

En este paso, las ecuaciones gobernantes del proceso de llenado o de solidificación de la fundición se solucionan sobre una malla computacional, usando las definiciones del material y de los parámetros del proceso. Los resultados se guardan en distintos momentos para la evaluación del proceso de solidificación o del llenado.

1.3.3.6 Evaluación de los resultados

En la evaluación de los resultados de una solidificación (caso que concierne a este proyecto), interesa investigar el patrón de solidificación del fundido (Ej.: el tiempo en que las diferentes áreas tardan en solidificarse) para así poder ver si la contracción en la solidificación puede ser adecuadamente alimentada. También intentar evaluar las áreas donde pueda haber porosidad o evaluar la estabilidad de la cavidad del molde durante el proceso.

Los resultados de la simulación de los procesos de fundición dan lugar a la investigación de muchas áreas de las piezas y de su evolución, para poder mejorar los procesos reales.

1.4 EL SOFTWARE VULCAN

1.4.1 CAPACIDAD DEL SOFTWARE

Vulcan es un programa desarrollado por la empresa Quantech ATZ con la colaboración del CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería). El programa resulta una herramienta muy potente como simulador de procesos de fundición.

Este es capaz de generar simulaciones de llenado y de solidificación de los procesos de fundición, así como abordar el problema termomecánico. El uso del software Vulcan se puede considerar el paso previo para garantizar la producción de piezas sin defectos, con menor costo de tiempo, dinero y materiales.

1.4.2. ORGANIZACIÓN

Se puede decir que el programa se divide en tres partes básicas.

- Preprocessor (preproceso)
- Solver (cálculo)
- Postprocessor (postproceso)

El preprocessor es la parte inicial del programa, está destinada a adquirir o dibujar la geometría de los materiales y definir todas las propiedades termofísicas de estos, al igual que las condiciones de contorno o las condiciones iniciales. También puede generar la malla de la geometría.

El solver, es el código del programa de cálculo, este resuelve las ecuaciones de gobierno con las condiciones y propiedades que ha adquirido del preprocessor. También usa la malla que le ha indicado el postprocessor.

El postprocessor es la parte que adquiere los resultados y la malla del solver. Esta parte genera el entorno gráfico necesario para poder apreciar los cambios de temperatura, de solidificación, o llenado del molde para poder ser evaluados. También permite analizar todos los puntos de la geometría de la malla, para que el ingeniero así pueda realizar los estudios necesarios de regiones concretas de la pieza.

En la figura 2 se muestra un esquema explicativo de las partes en que se puede dividir el programa y sus funciones.

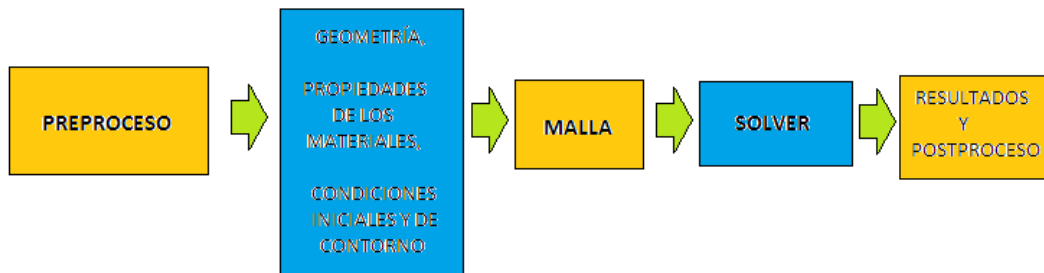


Figura 2. Organización del software Vulcan.

El software Vulcan puede resumirse en las siguientes etapas con las que se puede realizar la simulación, estas etapas son:

1. **Definición de la geometría:** Antes de estudiar los diversos campos del programa, se debe hacer una breve descripción del interfaz del código con el usuario. La figura muestra la pantalla de trabajo del programa, en ella se pueden ver diversas barras de herramientas. En la barra situada a la izquierda de la pantalla hay las opciones de visualización y opciones de dibujo.

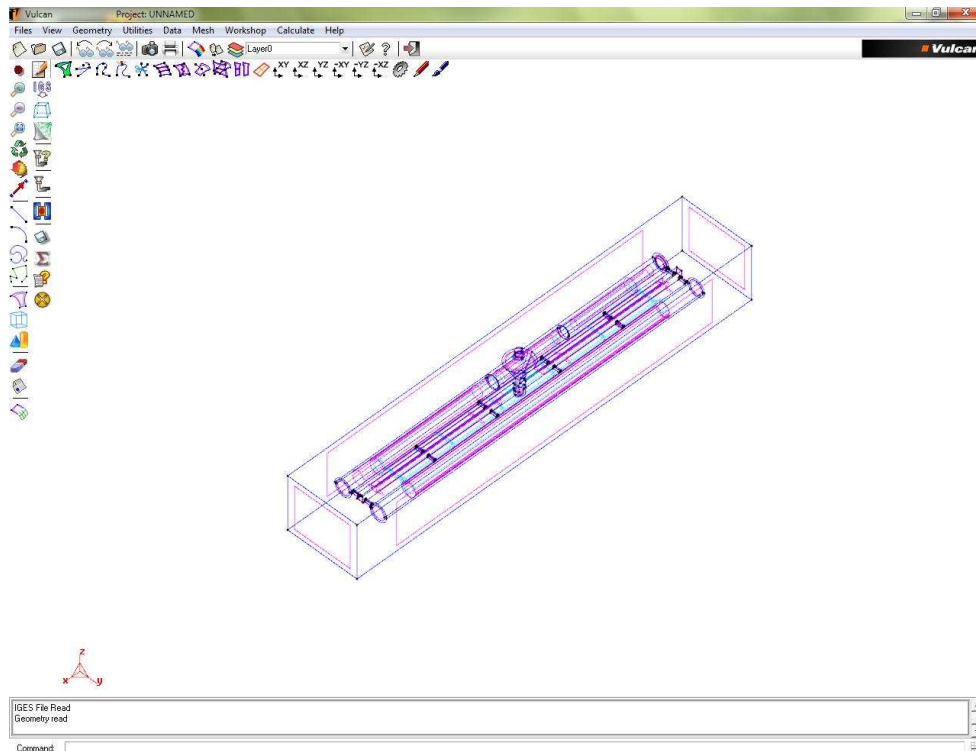


Figura 3. Pantalla de trabajo del Vulcan

El programa tiene un amplio abanico de funciones que se pueden usar para el dibujo, como por ejemplo el generador de coordenadas o de líneas, los elementos básicos para poder dibujar en CAD. También permite generar elementos de 3D.

Puede generar formas sencillas predeterminadas como complejos dibujos geométricos.

- 2. Mallado de la geometría:** El sistema de mallado del programa permite generar mallas de diferentes tamaños, de esta manera se puede variar la finura de la malla y así conseguir la medida óptima para un proceso concreto. Otra de las opciones interesantes que ofrece el programa es la posibilidad de que la malla se ajuste a la geometría. Cuando las geometrías son muy complejas, a veces un tamaño concreto del elemento no puede caber en todos los rincones de la pieza. El usuario del programa puede escoger mediante la opción cordal error un mínimo y un máximo de grosor del elemento. Esta opción puede adaptar los tamaños a la geometría de la pieza.

El usuario también puede definir el tamaño y la forma de los elementos en entidades concretas. Por ejemplo puede escoger un tamaño de los elementos en las líneas, pero cambiar el tamaño en las superficies. Y de la misma manera con los puntos y los volúmenes.

- 3. Definiciones de los parámetros del material y del proceso:** Para que se puedan resolver las ecuaciones siguiendo la geometría de la malla, es necesario introducir los parámetros de los materiales y del proceso, ya explicadas en apartados anteriores. El programa dispone de una opción que en la barra de tareas principal que permite seguir los pasos de la definición del problema de una forma simple y fácil. En la barra de herramientas principal hay una opción llamada "process". Esta opción abre un menú rápido que indica en cada momento el siguiente paso que se debe dar, antes siempre debe estar definida la geometría. El orden que sigue es el que se establecido con anterioridad, procesar la malla, definir los parámetros del proceso y describir los materiales y sus condiciones de contorno.

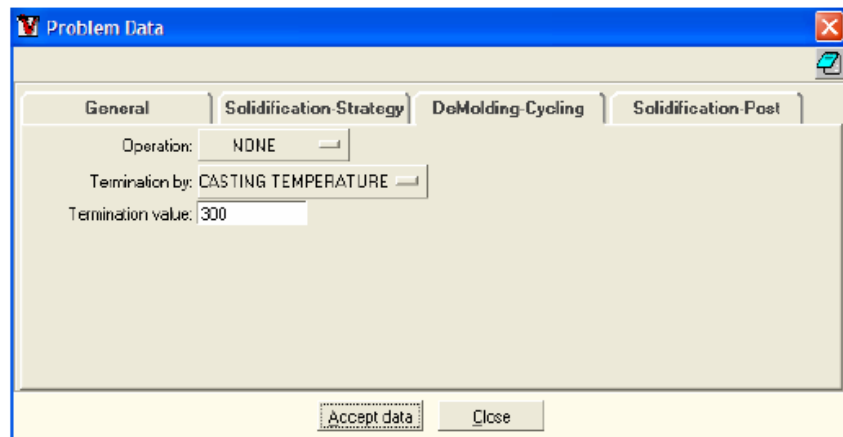


Figura 4. Ventana de los datos generales de la simulación

En el aparece una ventana que permite escoger el tipo de análisis, la estrategia de solidificación, etc.

Una vez seleccionados los parámetros del proceso, se debe repetir el mismo proceso para las propiedades de los materiales y sus condiciones de contorno.

El programa divide los materiales que entran en el sistema en cuatro grupos. El molde, el fundido, el líquido refrigerante y el núcleo. Normalmente se usa sistemas de molde fundido, pero para sistemas más completos se tienen las herramientas para poder abordarlos.

La ventana tiene las opciones para poder cambiar los materiales y definir las propiedades de estos. Al mismo tiempo dispone de dos pestañas donde se pueden cambiar las condiciones de contorno de los materiales. Cabe destacar que la ventana del fundido está mucho más completa, introduce propiedades de fluido y propiedades respecto al cambio de fase. Sin duda, debido a la simulación de llenado, ya que se necesitan muchos más parámetros de los materiales. En esta ventana también se definen condiciones iniciales como la temperatura.

4. **Simulación del proceso:** Una vez introducidos y definidos los datos de la malla, proceso y materiales, se guarda el archivo y se pasa a simularlo. Cuando se resuelven las ecuaciones de un proceso, el programa permite ver como va la evolución de los cálculos a medida que avanza el tiempo. También permite parar los cálculos en un momento dado, y hasta permite un cálculo remoto desde otro terminal.

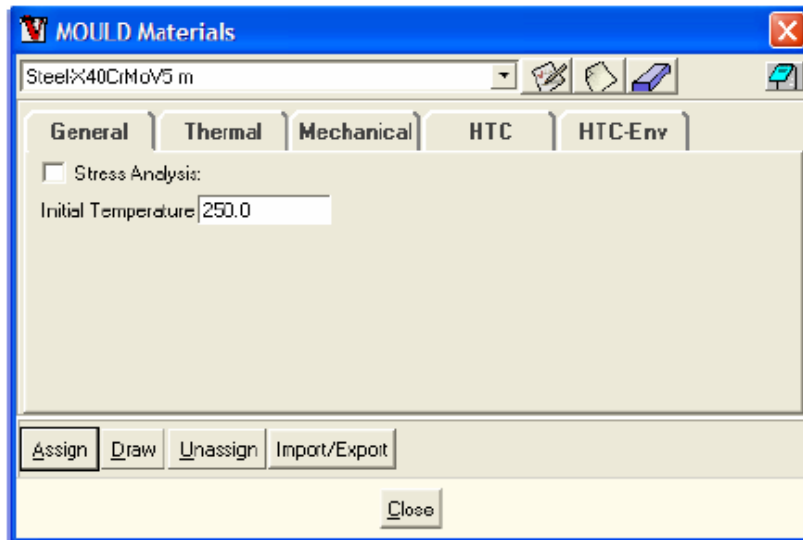


Figura 5. Ventana de propiedades del molde

5. **Evaluación de los resultados:** Para poder realizar una evaluación de los resultados se debe pasar a la parte del postproceso. El postproceso pasa a la pantalla los resultados obtenidos por el *solver* del programa. Los resultados que pueden ser visualizados se pueden clasificar en cinco categorías:

- Vista de los resultados escalares: muestra valores de mínimos y máximos, visualizaciones del contorno, visualizaciones de las texturas y de las líneas, muestra las iso-superficies. Además estas posibilidades se pueden configurar a gusto del usuario.
- Vista de resultados vectoriales: deformación de la malla, visualización de vectores, líneas de corriente (trazados de las partículas)
- Diagramas lineales: diagramas escalares de líneas y diagramas vectoriales.
- Animación de los resultados de las visualizaciones.

Las visualizaciones de los contornos se realizan asignando colores diferentes para cada valor, de manera que entre un mínimo y un máximos dados exista toda una gama de colores

Las animaciones permiten ver la evolución de las variables que están bajo estudio.

El programa permite seleccionar planos concretos de las piezas, y ver su transformación gradual. Al igual que dentro de los planos seleccionar puntos concretos del mallado y ver su desarrollo mediante gráficos.

1.5. EL SOFTWARE ESI PROCAST

1.5.1. CAPACIDAD DEL SOFTWARE

ProCAST es un software que utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF). Permite el modelado de transferencia térmica de calor (flujo de calor), incluyendo radiación con factores de vista, flujo de metal líquido, incluyendo el llenado del molde, esfuerzos plenamente en conjunto con la solución térmica (termomecánica). Además de eso, incluye también los modelos de microestructura/tratamiento térmico y el modelado de las porosidades.

Están incluidos modelos especiales que tienen en cuenta fundición tixotrópica, modelos de espuma perdida y soplado de núcleo. También incluye características especiales para procesos tales como fundición en coquilla de alta presión, centrífuga y con inclinación. Finalmente, están incluidos procesos de fundición personalizados como filtros y mangas.

1.5.2. ORGANIZACIÓN

El programa esta organizado alrededor de un módulo gestor de manejo, el cual es capaz de llamar a los diferentes módulos más pequeños.

- MeshCAST: el generador de malla.
- PreCAST: el pre-procesador en conjunto con las bases de datos.
- DataCAST/ProCAST: los calculadores.
- VisualCAST (visor): la unidad de exportación de post-proceso.



Figura 7. Módulo gestor de manejo.

La siguiente figura presenta la estructura del software. Primero, la geometría, es cargada en forma de un modelo CAD dentro del MeshCAST, para generar una malla MEF. Luego, se configura el cálculo en el PreCAST, el pre-procesador. PreCAST esta vinculado con bases de datos termodinámicas para la determinación automática de las propiedades de los materiales. Antes de que el calculador ProCAST sea iniciado, debe correr un “condicionador de datos” llamado DataCAST. Finalmente, los resultados pueden ser vistos o exportados (para futuros procesamientos) en el post-procesador VisualCAST.

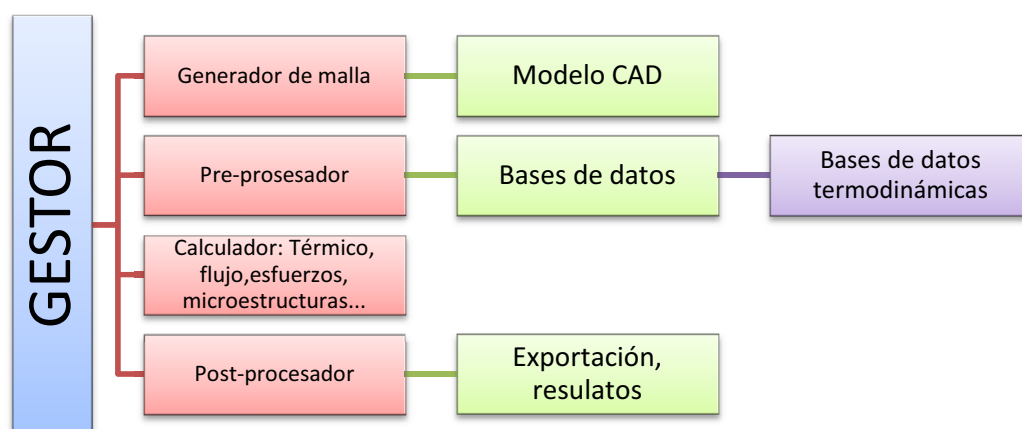


Figura 8. Organización del software ProCAST.

El software ProCAST consta con 5 módulos los cuales ayudan al usuario a realizar paso a paso las tareas necesarias para una correcta simulación, estos módulos son:

1. **MeshCAST:** Importa la geometría en formato IGES, PARASOLIDS, STL, NASTRAN, ANSYS SURFACE, entre otros. Genera una malla de volumen en la cual se ha de trabajar.
2. **PreCAST:** Utiliza la malla de volumen para asignar las propiedades tanto del molde como de la pieza a ser fundida a sus diferentes componentes y además condiciones iniciales y condiciones de borde.
3. **DataCAST:** Ordena los parámetros asignados para poder empezar los cálculos correspondientes y crear una simulación.
4. **ProCAST:** Calcula y genera una simulación. Las características vinculadas a procesos específicos (ej. moldeo cíclico, colado con inclinación, etc.) están integradas en los módulos físicos correspondientes.
5. **VisualCAST:** Muestra los datos calculados de una manera gráfica, en la que el usuario pueda comprender e interpretar. Muestra la simulación propiamente dicha. En la versión 2010 se requiere de la instalación de un paquete informático adicional para el funcionamiento de éste módulo, éste es ESI Visual Environment.

CAPITULO II

FUNDICIÓN EN MOLDES PERDIDOS

2.1. PROCESOS DE FUNDICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS

El proceso para producir piezas u objetos útiles con metal fundido se le conoce como proceso de fundición. Este proceso se ha practicado desde el año 2000ac. Consiste en vaciar metal fundido en un recipiente o molde con la forma de la pieza u objeto que se desea fabricar y esperar a que solidifique y enfríe.

En la figura 9 se muestra con un ejemplo particular como se funde una pieza. Se vierte el metal fundido por el bebedero, por gravedad, hasta la cavidad del molde mediante los canales de alimentación.

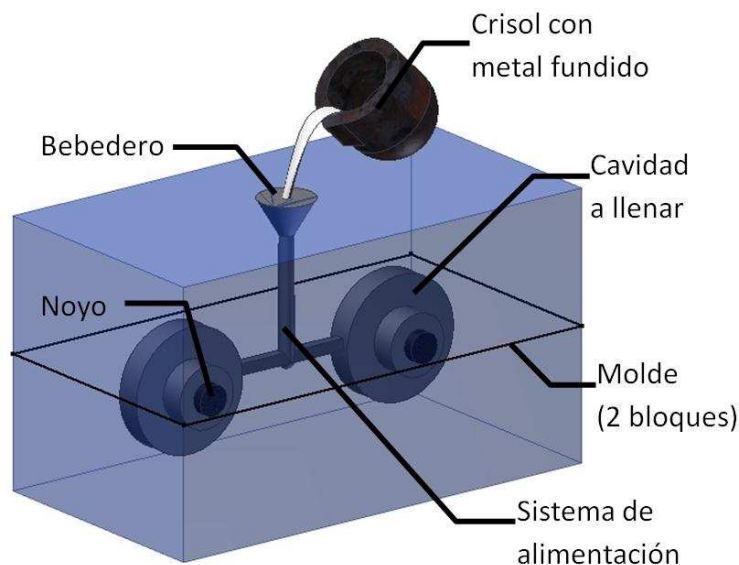


Figura 9. Proceso de fundición mediante moldeo perdido

Los recipientes con la forma deseada se conocen como moldes, éstos se fabrican de diferentes materiales como: arena, yeso, barro, metal, etc. Los moldes pueden servir una vez o varias. En el primer caso se les conoce como moldes temporales y los que se pueden utilizar varias veces, se les conoce como moldes permanentes.

Los moldes temporales habitualmente constan de dos bloques para que sea más fácil el moldeo (realizar la cavidad), este molde deberá destruirse para obtener el sólido resultante después de la colada.

Si se desea realizar un agujero o hueco en la pieza debe utilizarse un elemento sólido, noyó, que no permita que el metal llegue a esa zona. A veces, dependiendo del material y del tipo de moldeo, se añaden a los canales de alimentación un depósito denominado mazarota que se llena en la colada con el metal fundido y que va aportando material a las cavidades de la pieza conforme estas se van enfriando evitando así rechupes y poros internos en la pieza.

Muchas veces se utiliza el propio bebedero como depósito. El sólido obtenido, figura 10, consta en este caso de dos piezas y de los canales de alimentación que deben separarse de estas, en lo que se denomina desbaste.



Figura 10. Sólido Obtenido.

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

1. Diseñar los modelos de la pieza y sus partes internas.
2. Diseñar el molde.
3. Preparar los materiales para los modelos, moldes y noyos.
4. Fabricar los modelos, noyos y moldes.
5. Colar el metal fundido en el molde.
6. Enfriar los moldes.
7. Extraer las piezas fundidas.
8. Limpiar las piezas fundidas.
9. Terminar las piezas fundidas.
10. Recuperar los materiales de sistemas de alimentación y mazarotas.

2.1.1. TIPOS DE MOLDES

Como se mencionó anteriormente existen dos tipos de moldes, temporales y permanentes. En este trabajo nos enfocaremos en los moldes temporales.

2.1.1.1. Tipos de moldes temporales o perdidos

2.1.1.1.1. Fundición en moldes de arena

Uno de los materiales más utilizados para la fabricación de moldes temporales es la arena sílice aglutinada con bentonita. El procedimiento consiste en el recubrimiento de un modelo con arena húmeda y compactarla hasta que adquiera la forma del modelo y dureza deseada.

Es uno de los pocos procesos que es adecuado para metales féreos (Acero o fundición), níquel o titanio, ya que poseen temperaturas de fusión muy altas y no pueden fabricarse con moldes permanentes o desechables de yeso. Además de los metales citados, este proceso se utiliza para la fusión de aleaciones de cobre (tales como bronce), aluminio y sus aleaciones. En cambio sería inapropiado para grandes series de piezas de metales no féreos o que precisen de cierta precisión dimensional (piezas que no se pretenden mecanizar). Los moldes pueden realizarse manualmente para pequeñas series o automatizarse para series mayores.

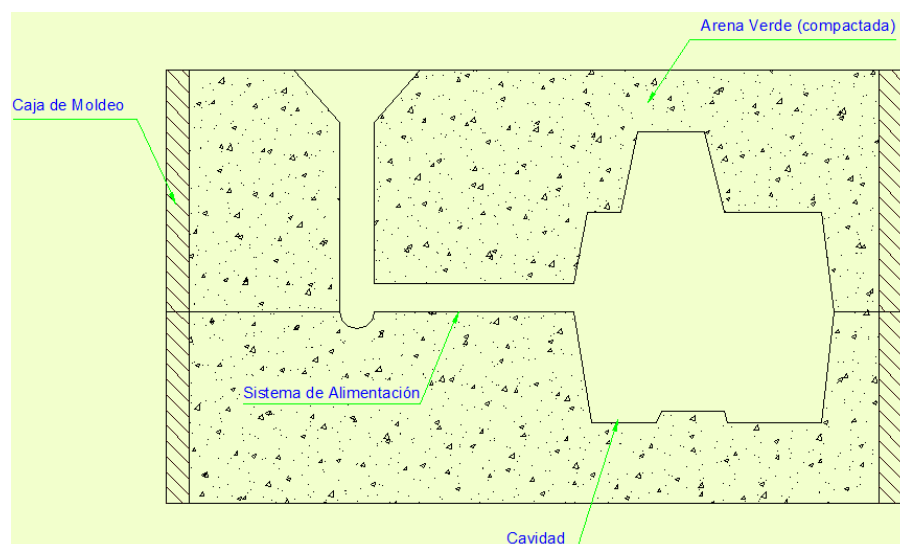


Figura 11. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arena verde.

2.1.1.1.2. Fundición en moldes de capa seca

Es un procedimiento muy parecido al de los moldes de arena verde, con excepción de que alrededor del modelo (aproximadamente 10 mm) se coloca arena con un compuesto que al secar hace más dura a la arena, este compuesto puede ser almidón, linaza, agua de melaza, etc. El material que sirve para endurecer puede ser aplicado por medio de un rociador y posteriormente secado con una antorcha.

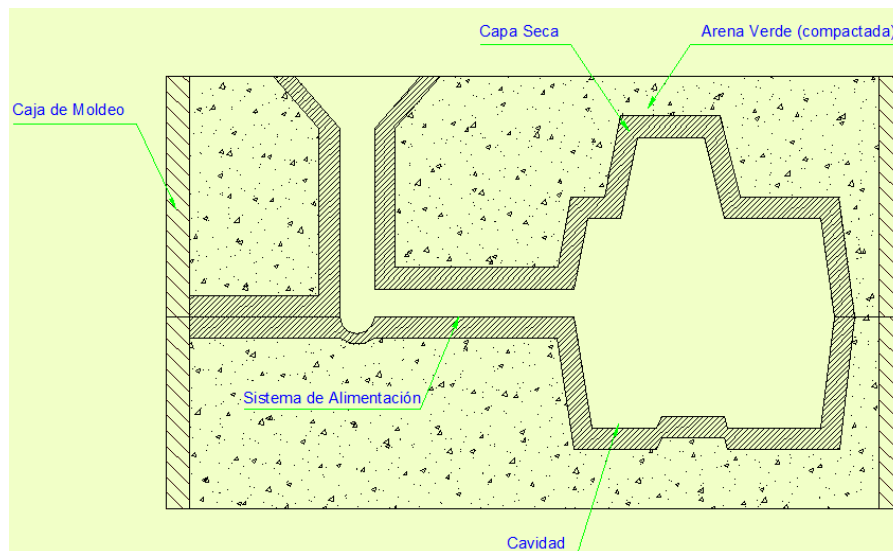


Figura 12. Corte transversal de caja moldeo cerrada con capa seca.

2.1.1.1.3. Fundición en moldes con arena seca

Estos moldes son hechos en su totalidad con arena verde común, pero se mezcla un aditivo como el que se utiliza en el moldeo anterior, el que endurece a la arena cuando se seca. Los moldes deben ser cocidos en un horno para eliminar toda la humedad y por lo regular se utilizan cajas de fundición, como las que se muestran más adelante. Estos moldes tienen mayor resistencia a los golpes y soportan bien las turbulencias del metal al colarse en el molde.

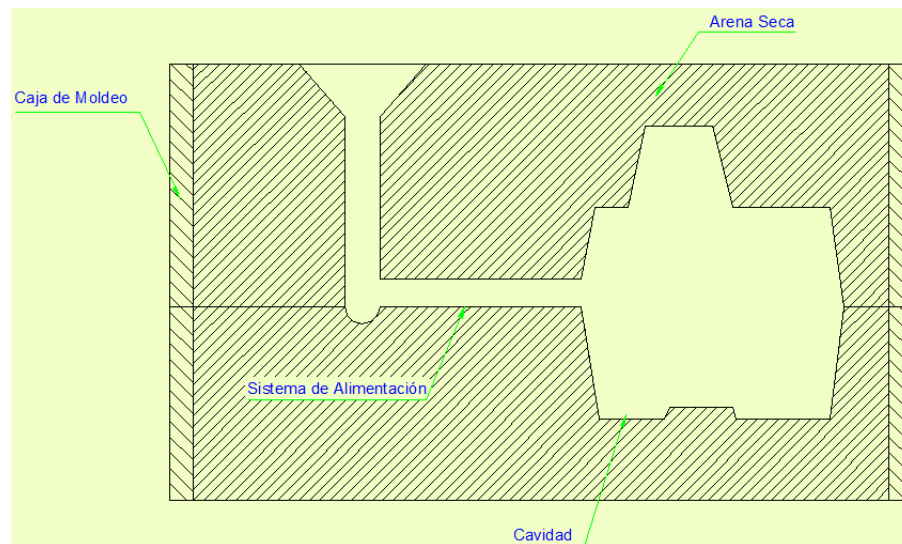


Figura 13. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arena seca.

2.1.1.1.4. Fundición en moldes de arcilla

Los moldes de arcilla se construyen al nivel de piso con ladrillos o con materiales cerámicos, son utilizados para la fundición de piezas grandes y algunas veces son reforzados con cajas de hierro. Estos moldes requieren mucho tiempo para su fabricación y no son muy utilizados.

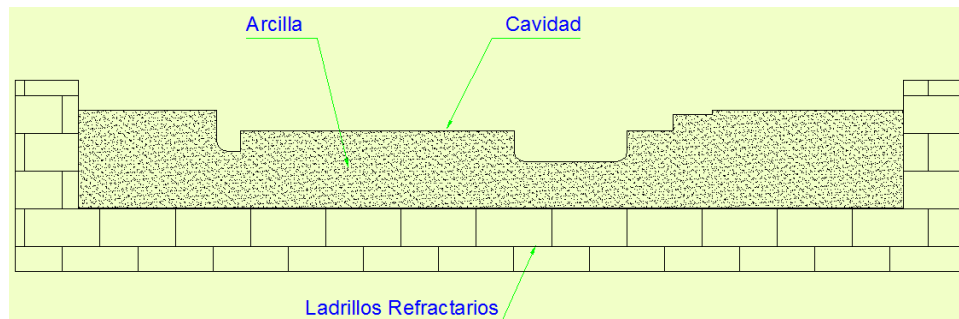


Figura 14. Corte transversal de caja moldeo cerrada con arcilla.

2.1.1.1.5. Fundición en moldes de arena sílice con resina furánica

Este proceso es bueno para la fabricación de moldes o corazones de arena. Están fabricados con arena seca de grano agudo mezclado con ácido fosfórico, el cual actúa como acelerador en el endurecimiento, al agregarse a la mezcla una resina llamada furánica. Con esta mezcla de ácido, arcilla y resina en aproximadamente dos horas el molde se endurece lo suficiente para recibir el metal fundido.

2.1.1.1.6. Fundición con moldes de arena sílice con silicato de sodio y curado de CO_2

En este tipo de moldes la arena sílice se mezcla con silicato de sodio para posteriormente ser apisonada alrededor del modelo. Una vez armado el molde se inyecta bióxido de carbono a presión y éste reacciona con el silicato de sodio aumentando la dureza del molde. Con la dureza adecuada de la arena del molde se extrae el modelo, si este fuera removible, para posteriormente ser cerrado y utilizado.

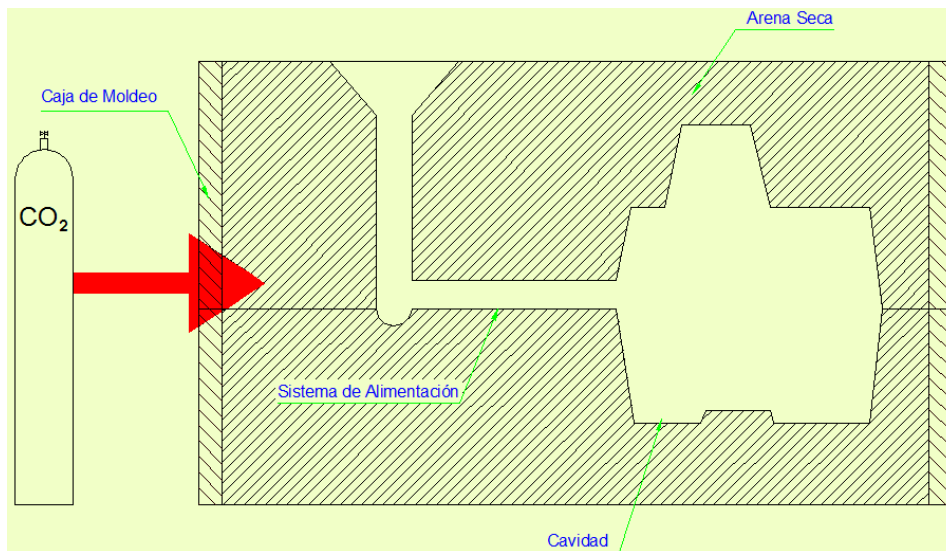


Figura 15. Corte transversal de caja moldeo cerrada con secado por CO_2 .

2.1.1.1.7. Cajas de moldeo

Las cajas de moldeo son marcos rígidos que soportan las arenas de moldeo. Estas cajas se rellenan y compactan con la arena donde se practicará el negativo de la pieza con el auxilio del modelo. Estos marcos deben ser sólidos, ligeros si las operaciones son manuales, inconfundibles entre sí, rugosos para que la arena no resbale y de bajo coste. Suelen ser de acero moldeado, fundición, aluminio o madera.



Figura 16. Cajas de moldeo de acero.

2.1.2. MODELOS

Los *moldes* se fabrican por medio de *modelos* los que pueden ser de madera, plástico, cera, yeso, arena, poliuretano, metal, etc. Si los modelos se destruyen al elaborar la pieza, se dice que éstos son desechables y si los modelos sirven para varias fundiciones se les llama removibles.

2.1.2.1. Modelos desechables

Ventajas de los modelos desechables

- Fabricación de moldes sin máquinas de moldeo se requiere menos tiempo.
- No requieren de tolerancias especiales en el molde.
- El acabado es uniforme y liso.
- No requiere de piezas sueltas y complejas.
- No requiere de corazones.
- El moldeo se simplifica notablemente.

Desventajas de los modelos desechables

- Se debe fabricar modelo para cada fundición.

- Los modelos son más delicados en su manejo.
- No se puede utilizar equipo de moldeo mecánico.
- No se puede revisar el acabado del molde.

2.1.2.2. Modelos removibles

Para obtener la cavidad del molde se realiza una huella con un sólido patrón con la forma de la pieza a fabricar. Las dimensiones de este modelo se sobredimensionan respecto a la pieza original para contrarrestar la contracción de la pieza al solidificarse y para que haya un exceso de material en las superficies que deban mecanizarse. Este modelo puede ser sólido si está hecho de una sola pieza o dividido si consta de dos piezas o más.

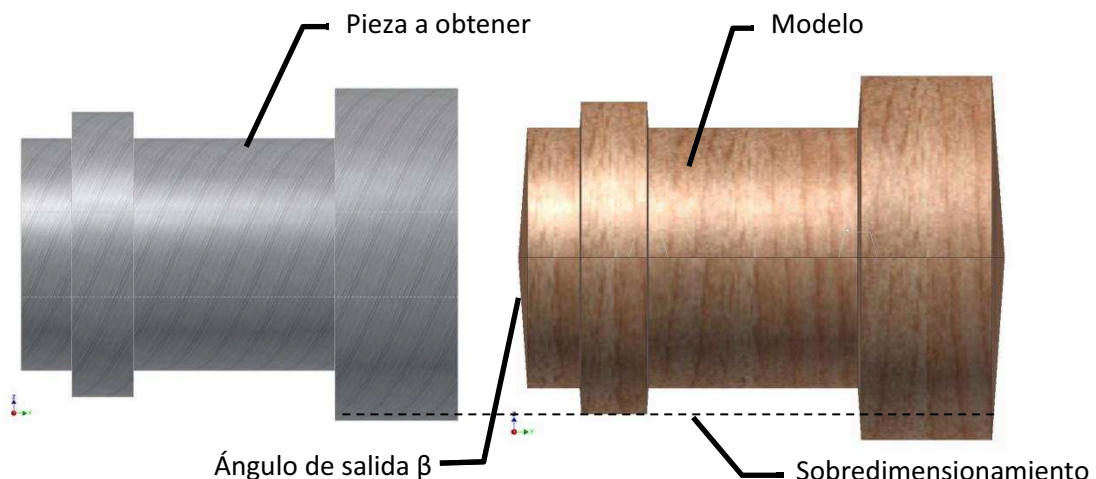


Figura 17. Comparación entre pieza a obtener y el modelo a fabricar.

A los dispositivos necesarios para obtener la impresión en el molde se les conoce como “Juego de modelos”, que consta de los modelos de la pieza de fundición y los elementos del sistema de alimentación, las cajas de noyos (se explican más adelante) y las placas modelo para la instalación y fijación de los modelos de la pieza y el sistema de alimentación, además de las cajas de moldeo detalladas anteriormente.

Los juegos de modelos se hacen por obreros modelistas, como regla de alta calificación, pues debe satisfacer las siguientes exigencias principales: asegurar la obtención de una moldura de forma geométrica y dimensiones determinadas; poseer alta resistencia y durabilidad; poseer buenas propiedades tecnológicas en su elaboración; tener una masa mínima y ser cómodos para su explotación, tener un coste mínimo y ser fáciles de reparar;

mantener sus propiedades físicas por el tiempo determinado para su explotación. Todo esto basándose en las condiciones de producción: unitaria, en serie o a gran escala.

Los modelos pueden ser de madera (para bajas producciones y de baja exactitud dimensional), metálicos (para producción en serie y de buena tolerancia dimensional). También pueden ser fabricados de materiales plásticos como resinas epóxicas, además de yeso y cemento.

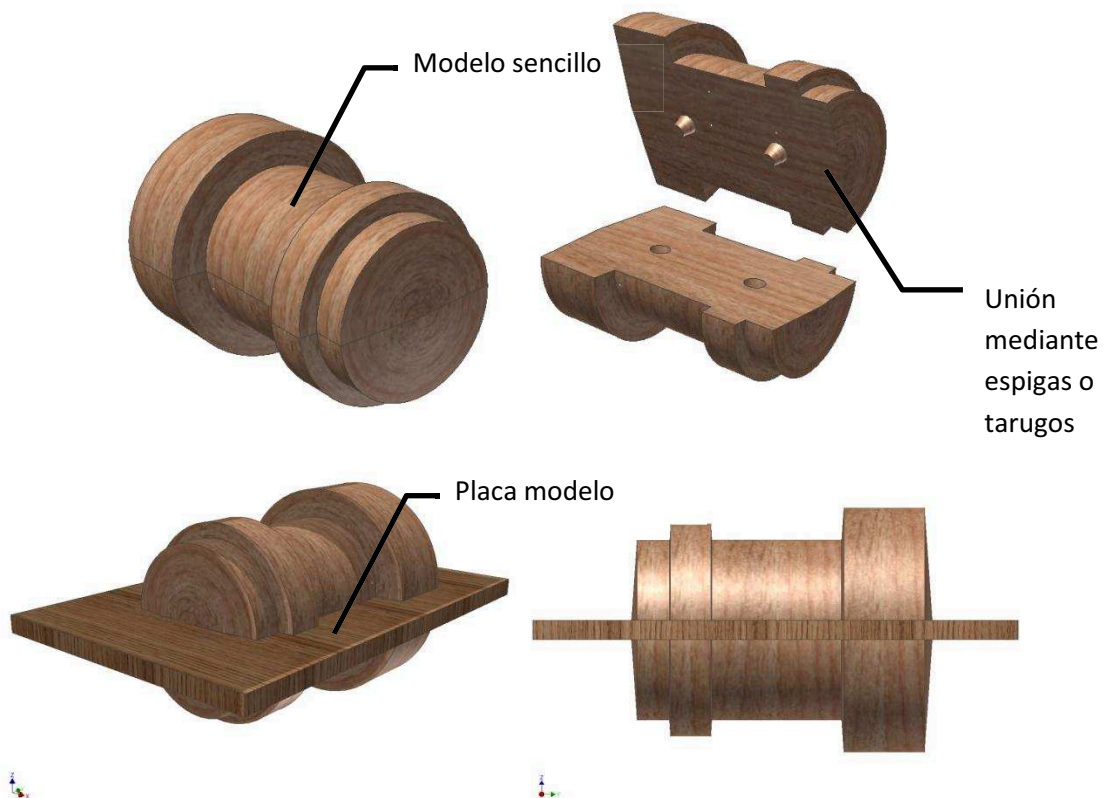


Figura 18. Modelo sencillo y placa modelo.

Además se les debe dar el ángulo de salida a las caras transversales de las piezas que varía entre 0 y 45 grados dependiendo de sus dimensiones y su aplicación como se muestra en las tablas 4.1.1.a y 4.1.1.b del capítulo IV

2.1.2.3. Tolerancias en los modelos

En el diseño de los modelos que se utilizan para construir un molde es necesario tener en consideración varias tolerancias.

1. *Tolerancia para la contracción.* Se debe tener en consideración que un material al enfriarse se contrae dependiendo del tipo de metal que se esté

utilizando, por lo que los modelos deberán ser más grandes que las medidas finales que se esperan obtener.

2. *Ángulo de salida.* Cuando se tiene un modelo que se va a remover es necesario agrandar las superficies por las que se deslizará, al fabricar estas superficies se deben considerar en sus dimensiones la holgura por extracción. Las paredes verticales deben tener cierta inclinación para evitar el arrastre de arena durante el desmoldeo, a ésta inclinación se le conoce como ángulo de salida.

3. *Tolerancia por acabado.* Cuando una pieza es fabricada es necesario realizar algún trabajo de acabado o terminado de las superficies generadas, esto se logra puliendo o quitando algún material de las piezas producidas por lo que se debe considerar en el modelo esta rebaja de material.

4. *Tolerancia de distorsión.* Cuando una pieza es de superficie irregular su enfriamiento también es irregular y por ello su contracción es irregular generando la distorsión de la pieza, estos efectos deberán ser tomados en consideración en el diseño de los modelos.

5. *Golpeteo.* En algunas ocasiones se golpean los modelos para ser extraídos de los moldes, acción que genera la modificación de las dimensiones finales de las piezas obtenidas, estas pequeñas modificaciones deben ser tomadas en consideración en la fabricación de los modelos.

Observe que cuando se utilizan modelos desechables muchas de las tolerancias antes mencionadas no son aplicables.

2.2. NOYOS

2.2.1. FUNCIÓN

Los noyos se emplean corrientemente en el desempeño de dos funciones:

La ejecución de partes vacías o internas de una pieza, como se muestra en el ejemplo de la figura 19.

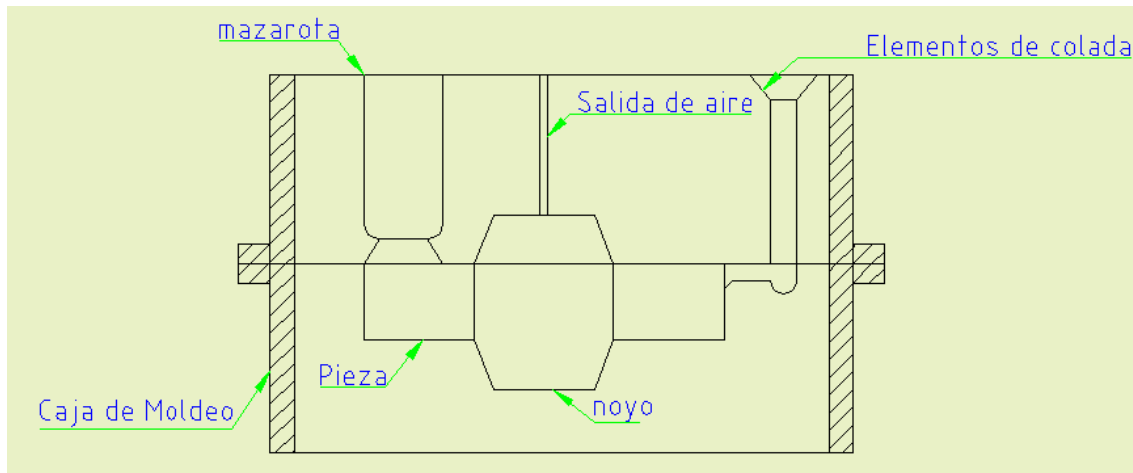


Figura 19. Molde en arena mostrando el empleo de un noyo para fabricar una pieza con cavidad interna.

Para solucionar el problema de la contrasalida que presentarían algunos modelos, tal como se muestra en la figura 20

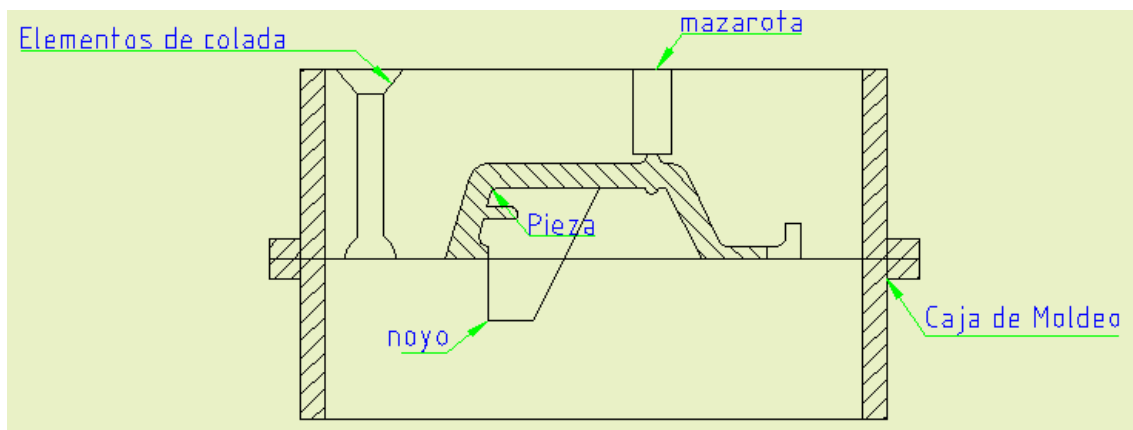


Figura 20. Molde en arena mostrando el empleo de un noyo para solucionar una contrasalida

También se les denomina machos, núcleos o corazones. Se emplean además para mantener en posición las inserciones, facilitar el moldeo de partes delicadas y/o desmontables, evitar salidas exageradas, evitar el empleo de cajas intermedias.

2.2.2. PROPIEDADES DE MEZCLAS DE MOLDEO PARA NOYOS

Las mezclas y noyos deben llenar ciertos requisitos, pues durante su fabricación, almacenamiento y colada del metal están sometidas a condiciones rigurosas que pueden en un momento dado, hacer que la mezcla o el noyo ya fabricado, no satisfaga la calidad de las piezas pedidas.

Propiedades que deben cumplir las mezclas:

- Facilidad de preparación
- Conservación
- Moldeabilidad
- Ausencia de pegado con las cajas de noyos

2.2.2.1. Facilidad de preparación

El empleo de nuevos productos en la preparación de mezclas ha requerido: la implantación de equipos costosos, un poco sofisticados y la permanente vigilancia de la dosificación exacta de los productos para obtener mezclas con características relativamente constantes.

Además aparece un nuevo factor: el de polución y penosas condiciones de trabajo para quien trata con algunas mezclas que producen gases corrosivos.

2.2.2.2. Conservación

Algunas mezclas después de preparadas no pierden sus propiedades durante un buen lapso de tiempo, pero hay otras que tienen una vida útil (tiempo al cabo del cual la resistencia a la compresión es sólo del 75 % de la resistencia en el momento de haberse terminado de preparar.) sólo de algunos minutos; ello debido a la continuación de la reacción química que produce el endurecimiento, una vez que se ha introducido el catalizador (caso de las mezclas de arenas con resinas llamadas furánicas) o al iniciarse una transformación físico-química (caso de la mezcla del silicato - CO₂ al reaccionar con el CO₂ del ambiente).

Otras de las posibilidades de pérdida de propiedades son debidas a la absorción de agua de la humedad ambiente o al aceleramiento de un proceso cuando se trabajan mezclas a temperatura ambiente relativamente alta.

2.2.2.3. Moldeabilidad

La moldeabilidad es la aptitud o capacidad de la arena para reproducir con facilidad una forma.

A veces no sólo se requiere que las mezclas tengan una buena moldeabilidad, sino también disponer, en algunos casos (proceso de elaboración de noyos por soplado) de algunos elementos que ayuden a esta operación, tal como rejillas

que ejercen una especie de tiro en determinada dirección, de la arena que ha sido soplada en el momento de elaboración del Noyo.

2.2.2.4. Ausencia de pegado a las cajas de noyos

Aunque parezca de poca importancia el problema del pegado a las cajas puede llevar a desechar algunas mezclas (caso de las arenas aglomeradas con resinas urea-formol) puesto que el elevado ritmo a que se producen los Noyos, se ve considerablemente disminuido por este inconveniente, hasta el punto de hacerlo poco rentable frente a otros procedimientos.

La disminución de esa adherencia puede hacerse por: pulido de las paredes de la caja, la utilización de talcos o productos aislantes u otros que tienen que ver con la temperatura tanto de la mezcla como de la caja.

2.2.3. PROPIEDADES DE LOS NOYOS

Resistencia a la manipulación

Conservación durante el almacenamiento

Poca deformación por dilatación

Permeabilidad

Resistencia durante la colada

Poca oposición a la contracción del metal

Friabilidad

Buen acabado superficial

Bajo costo

2.2.3.1. Resistencia a la manipulación

Una vez se ha terminado de fabricar el Noyo, este ya debe tener una resistencia o cohesión mínima que permita extraer el Noyo de la caja y manipularlo posteriormente; por ejemplo, llevarlo a cocción (caso de noyos estufados).

Para contrarrestar las deformaciones en los noyos debidas a la falta de cohesión, se emplean corrientemente plantillas o soportes que tienen su misma

forma exterior y que durante su endurecimiento sirven de apoyo evitando así las deformaciones.

2.2.3.2. Conservación durante el almacenamiento

Como en algunas ocasiones, después de fabricados los Noyos, no se pueden emplear inmediatamente como sería deseable, entonces estas deben cumplir con ciertas propiedades de inalterabilidad durante su almacenamiento.

Generalmente tienen tendencia a tomar humedad del medio ambiente, haciendo a veces, que se inicie o continúen reacciones físico-químicas que alteran sus propiedades y que implica prever instalaciones para almacenamiento de los noyos en ambiente seco y ausente de polvos.

2.2.3.3. Poca deformación por dilatación

Como en general los noyos entran en contacto con el metal caliente (momento de la colada), ellos deben ser estudiados desde el punto de vista de la forma y calidad, frente a la dilatación del cuarzo (estado alotrópico del sílice) para evitar defectos en las piezas. Su dilatación varía bruscamente de 0.9 % a 1,4 % cuando pasa de 525 a 573°C; mientras que por debajo de 525°C la dilatación es casi lineal e igual 0,14 % por cada 100°C.

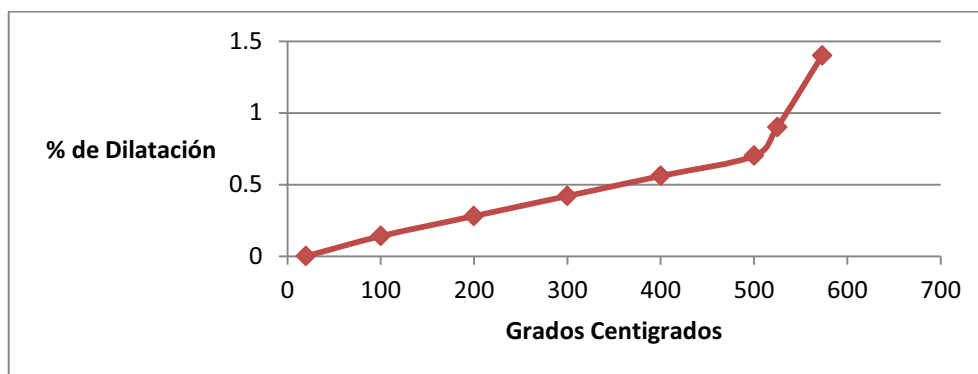


Gráfico 1. Dilatación del cuarzo.

En general, se puede decir que la concurrencia de otros factores (fuerte apisonado o escasa resistencia en verde, grandes superficies afectadas por la radiación del metal caliente, prolongado tiempo de colado y otros) pueden aumentar el riesgo de aparición de defectos que pueden prevenirse con el estudio de la forma del molde y noyos como también con la utilización de aditivos.

2.2.3.4. Permeabilidad

Siendo los noyos la parte del conjunto del molde que tiende a producir más gases, debido al contacto con el metal fundido, entonces se busca darles la mayor permeabilidad posible por medio de acanaladuras o conductos que faciliten la evacuación de los gases a través del noyo y molde evitando así la formación de defectos en la pieza.

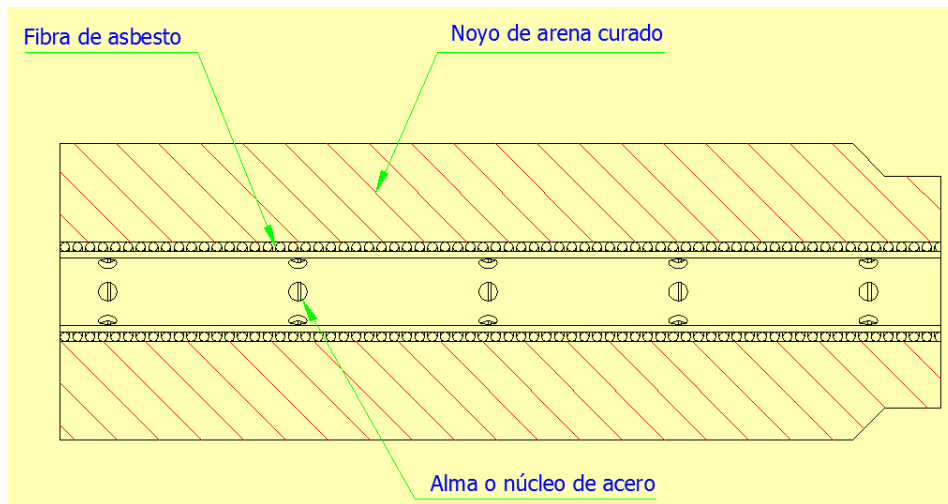


Figura 21. Corte transversal de un noyo compuesto con alma de tubo de acero recubierto con fibra de asbesto para facilitar el escape de gases.

En general se puede decir que los aditivos disminuyen la permeabilidad, a excepción de la dextrina; por lo tanto, es necesario vigilar de cerca el empleo de ellos y cuando se haga indispensable su uso, entonces controlar los porcentajes de utilización.

El índice de finura, el tamaño y forma del grano, el apisonado y el porcentaje de aglomerantes o aglutinantes, son los directos responsables, entre otros, de la mayor o menor permeabilidad de los noyos.

2.2.3.5. Resistencia durante la colada

Al momento de la colada y posteriormente por algunos segundos cuando se ha iniciado la solidificación, los noyos están fuertemente solicitados, debiendo ser resistentes a la presión del metal líquido, la erosión, la vitrificación y al abrevaje.

Al entrar el metal líquido a la huella o vacío formado por el molde, el metal ejerce, según la ley de Arquímedes, una presión metalostática igual sobre las

diferentes superficies del molde y noyo; por lo tanto, las fuerzas ejercidas y debidas a éste efecto serán proporcionales a la altura metalostática y a la densidad del metal colado. Siendo así podemos actuar sobre la disposición de los noyos, la elaboración adecuada de portadas y la colocación de armaduras o refuerzos dentro de los noyos.

Al entrar en contacto el metal caliente con una parte del molde o noyo, la temperatura se va elevando progresivamente. En algunos casos el aglutinante o aglomerante pierde rápidamente su poder de cohesión produciendo la erosión de dicha superficie, de allí que dichas partes soporten muy mal el impacto del metal caliente; por ello se debe evitar en lo posible el posicionamiento de un noyo frente a la salida de un ataque de colada que presentaría un punto de impacto del metal caliente con el noyo, siendo preferible en ese caso, que el chorro de metal líquido entrase en dirección paralela o tangencial a la superficie de la parte del noyo interesado.

Aunque el degradamiento del aglutinante o aglomerante no sea acompañado por un impacto por parte del metal, siempre pierde sus características hasta incluso llegar a presentar principio de fusión (caso de aleaciones de alto punto de fusión) favorecido esto por la formación de óxidos y silicatos que se comportan como fundentes; esto rebaja la refractariedad de la mezcla produciendo la vitrificación y abrevaje del noyo o parte de él.

El abrevaje o metalización es causada por la dilatación del cuarzo, presentándose al fisurarse el noyo y dejarse penetrar por el metal. Este problema se presenta generalmente en arenas de grano grueso, poco refractarias; con aleaciones de alta colabilidad y alto poder de capilaridad o en casos de reacción molde metal. Es un problema que se presenta frecuentemente en los bronce fosforosos y bronce al plomo. Un principio de solución es dar una pintura a base de mica o pegar una delgada hoja de amianto, que puede reducir también la presentación de la vitrificación.

2.2.3.6. Poca oposición a la contracción del metal

Como en algunos casos los noyos están totalmente rodeados de metal, o tienen formas que se oponen a la libre construcción de la pieza durante su enfriamiento, se hace necesario que presente cierta elasticidad. Por ello es

imperativa la buena concepción de las armaduras o refuerzos, cuando se requieren, o efectuar un desmoldeo parcial al principio de la solidificación (operación cuidadosa) para facilitar la contracción. En algunas ocasiones hay que descartar el empleo de procesos de elaboración de noyos donde éstos presentan una resistencia residual a la compresión elevada (ensayo hecho a alta temperatura).

2.2.3.7. Friabilidad

Una vez ha solidificado la pieza se hace necesario que los noyos se desmenucen con el fin de obtener las piezas con los detalles o formas dadas por el noyo. Esa facilidad de desmoronamiento depende tanto del tipo de aglutinante o aglomerante como del porcentaje empleado en la mezcla, que determina la cohesión del noyo después de haber sido llevado a alta temperatura.

2.2.3.8. Buen acabado superficial

Además de las piezas que no necesitan de un acabado imperativamente bueno, hay las piezas donde el noyo debe dar superficies brutas de colada de buen acabado (incluyendo superficies donde el maquinado no es asequible). Para ello se recurre a disminuir el índice de finura y a dar un apisonado más fuerte, hasta donde lo permitan las otras propiedades mínimas buscadas en los noyos (resistencia residual a alta temperatura, permeabilidad, poca oposición a la contracción, etc.)

2.2.3.9. Bajo costo

Hay que tener en cuenta no sólo el alto costo de algunos aglomerantes o resinas, sino también la inversión e implantación de equipos que implican algunos procedimientos, lo que conlleva a un serio análisis de costos frente a diferentes parámetros: mano de obra, desarrollo de nuevos procedimientos y productos, supervisión para obtener resultados constantes, aumento del ritmo de producción, pequeñas variaciones de la forma del noyo o incluso elaboración de diferentes noyos en una misma máquina.

Todo ello parte de un concienzudo análisis de la forma del noyo (posibles variaciones con respecto al noyo empleado en el prototipo fabricado), serie y ritmo o cadencia proyectada y vida útil de la matachera.

2.2.4. FACTORES QUE INFLUYEN LA FABRICACIÓN DE NOYOS

Por las consideraciones hechas anteriormente, vimos que el estudio a realizar para escoger el proceso y diseño del noyo a fabricar debe incluir los siguientes factores:

- Cantidad y tamaño de los noyos a fabricar
- Función a cumplir por el noyo
- Disposición del (de los) noyo(s) en el molde
- Aleación a colar
- Calidad y acabado de la pieza

Ello implica la utilización de una serie de equipos implantados o la escogencia de ellos de acuerdo al trabajo de la fabricación de noyos necesitado, teniendo en cuenta futuras proyecciones.

2.2.5. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS NOYOS

Los procesos de fabricación de noyos se pueden clasificar desde diversos puntos de vista, según su ejecución (a mano o máquina), según la temperatura de elaboración (ambiente o diferente de ella), según la serie y precisión dimensional (cajas de noyos metálicas, de madera o plásticas), según la arena y/o el aglomerante utilizado, que caracterizan los diferentes procesos para la fabricación de noyos. Los de mayor empleo y la tendencia actual, siguiendo procesos ya puestos a punto en los países industrializados son:

- Noyos con aceite
- Noyos con Silicato - CO₂
- Noyos cáscara
- Noyos con resina (diversos tipos)

2.2.5.1. Noyos con aceite

Generalidades

Aunque la tendencia actual es dejar de emplear este proceso por los costos frente al empleo de estufa y plantillas de curado; en el país todavía es de empleo corriente por la facilidad técnica de ejecución de las mezclas de arenas

y los noyos en sí. El proceso es relativamente sencillo si se compara con los procesos modernos. De todas formas puede llegar a competir con la fabricación de noyos de una serie media siempre y cuando los noyos sean relativamente pequeños. En este caso se emplea el molino convencional de rulos para la preparación de la arena, se utilizan cajas de madera y la ejecución del noyo se hace a la mano.

El proceso consiste en elaborar una mezcla de arena con aceite, con la cual se hacen los noyos que son desmoldados y apoyándolos en plantillas o soportes se llevan a una estufa donde se les hace el curado o endurecido.

Aglomerantes y preparación de mezclas.

Aunque el más empleado es el aceite de lino o linaza, se ha tentado la utilización de casi toda clase de aceites vegetales (maíz, solía, algodón), animales (pescados, sardinas) y minerales (derivados del petróleo). En algunas ocasiones se ha remplazado parte del aceite de lino por otros aceites, con el fin de elaborar una mezcla de aceites de menor costo y más recientemente se ha combinado con resinas sintéticas (fenol-formol) y oxidantes (bióxido de manganeso) con el fin de dar mejores propiedades al noyo.

De todas maneras es el aceite de lino el que mejor resistencia en seco proporciona en relación con el porcentaje utilizado. Corrientemente se emplea en tasas del 2 al 4 % (a mayor índice de finura de la arena, mayor porcentaje del aglomerante), en mezclas con 0.75 a 1,5 %, de dextrina y 1 a 2 % de agua. Como el aceite produce una muy baja resistencia en verde, entonces se recurre a la dextrina, que sí nos la produce permitiendo la manipulación del noyo hasta cuando éste haya recibido el endurecimiento.

Es muy importante anotar que el aceite y las arcillas (caso general con la bentonita) reaccionan produciendo un fenómeno de saponificación y que esa especie de jabón producido no tiene ningún poder aglutinante y que por lo tanto se hace necesario disponer de una arena silíceo, lavada exenta de arcillas con el fin de evitar pérdidas por desperdicio del aceite y propiedades muy malas de los noyos.

Para la preparación de las mezclas de arena se procede de forma semejante a la preparación de arenas sílico-arcillosas sintéticas para moldeo: inicialmente

se agrega a la arena silíceas, los productos secos (dextrina) dejando homogenizar la mezcla durante aproximadamente 2 minutos, para proceder a introducir los productos líquidos y dejar mezclar de 10 a 15 minutos (dependiendo de la eficiencia de mezclado del molino) y cuidando de no elevar la temperatura de la mezcla. En la adición de aceites viscosos es necesario recurrir a conocidos trucos de tarado de los recipientes para contrarrestar el efecto del pegado del aceite viscoso a las paredes y que fácilmente provocaría errores de dosificación.

Una vez preparada la mezcla se debe depositar en recipientes tapados o cubiertos con telas o plásticos para evitar que se sequen y comiencen a endurecer.

Endurecimiento o Curado

El aceite de lino o los que lo remplazan, están constituidos (principalmente) por diferentes porcentajes de: aceites grasos saturados, ácido oleico no saturado, ácido linoleico no saturado, ácido linolénico no saturado y glicerina.

El más susceptible de transformación es el ácido linolénico, producto no saturado:

Las dobles uniones que nos indican su no saturación, reaccionan con el oxígeno, produciendo otros ácidos acompañados de agua y un aumento sensible de la viscosidad que es el responsable de la cohesión de la arena.

Generalmente los noyos elaborados al aceite de lino se estufan entre 185 y 210°C hecho que acelera la oxidación para dar una buena resistencia "en seco". La utilización de otros aceites o la necesidad de obtener otras propiedades en el noyo hacen que ese estufado se haga aproximadamente a 300°C.

Además de poderse mejorar la oxidación por calentamiento, se puede efectuar, como se dijo anteriormente por la adición de agentes oxidantes tales como el bióxido de manganeso, derivados del agua oxigenada, perborato de sodio y nitrato de amonio.

Utilización del proceso

Es de empleo común (Ecuador) en la fabricación de noyos de piezas ferrosas y no ferrosas, sin tener en cuenta el volumen de la serie. Sin embargo, (en países industrializados) por razón de costos (implantación y mantenimiento de estufas y bandejas, etc.) no es competitivo con relación a otros procesos de mayor facilidad de manejo.

Es de anotar que los noyos al aceite, tienen facilidad de preparación, no retoman mayor humedad después de fabricados y desprenden pocos gases durante la colada (aunque un poco en el caso de los aceros).

Además el poder de variar fácilmente los porcentajes de aglutinantes y aglomerantes, permite tener un amplio rango de posibilidades en cuanto a las propiedades mecánicas.

2.2.5.2. Noyos con silicato de sodio - CO₂

Generalidades

Utilizando el Silicato de Sodio como aglomerante se han estudiado diferentes procesos para elaborar noyos, variando el agente endurecedor o catalizador. Entre estas variantes encontramos los procesos : Silicato de Sodio - Silicio, Silicato de Sodio - escoria de alto horno, Silicato de Sodio - éster y para concluir, Silicato de Sodio - CO₂ del que nos ocupamos en este trabajo por ser el que se utiliza con más amplitud.

Este proceso muy empleado en el país desde hace varias décadas, es desafortunadamente mal conocido y por lo tanto mal utilizado, llevándolo a veces al desprestigio sin fundamento.

El proceso consiste en preparar una mezcla de arena con Silicato de Sodio, con la que se elabora el noyo y al que se le hace pasar una corriente de bióxido de carbono (CO₂), directamente en la caja de noyos; produciéndose como efecto un endurecimiento más o menos elevado de acuerdo con la variación de los diferentes factores o parámetros que intervienen en el endurecido.

Posiblemente debido al bajo costo del Silicato, éste no se selecciona cuidadosamente con el fin de aprovechar al máximo sus ventajas. Es corriente

el sobregaseado de los noyos, lo que implica malas propiedades y desperdicio del CO₂.

Aglomerante

El Silicato de Sodio empleado, está formado por a % del SiO₂, b % de Na₂O y x cantidad variable de agua que lo definen y determina su comportamiento. Las relaciones más importantes que se establecen son: el módulo R,

$$R = \frac{a}{b}$$

La relación ponderal es muy semejante a la relación molecular.

La concentración en materias secas MS:

$$MS = a + b$$

Y la viscosidad, que depende directamente de la cantidad de agua contenida en el silicato.

La escogencia del Silicato de Sodio apropiado, se dirige en el sentido de obtener facilidades de preparación de mezclas y de preparación de los noyos frente a su comportamiento durante el almacenamiento y proceso de vaciado, evidentemente haciéndose al menor costo para la calidad exigida.

En la selección del silicato disponemos de toda una gama de ellos, con módulos que van desde 2 a 2,2 en el caso de módulos bajos hasta 2,8 a 3,0 en el caso de módulos altos, pasando por silicatos con módulos de 2,4 (término medio) que tienden a dar satisfacción en el mayor número de casos.

Para su selección completa (se escogerá el módulo y se determinará el % de materias secas) debemos tener en cuenta al menos los siguientes parámetros:

- módulo R del silicato
- % T de incorporación del silicato
- índice de finura I.F. de la arena empleada
- % a de finos (< 20 μ) en la arena
- % s y calidad de otros aglutinantes y/o aglomerantes.

El módulo R del Silicato es escogido de acuerdo con las condiciones de almacenamiento de los noyos; como se explicará más adelante con silicatos de módulo alto es imposible almacenar los noyos y al contrario cuando ésta condición se imponga es necesario escoger silicatos de módulos bajos (los silicatos de módulo medio permiten almacenamiento durante temporadas no muy largas). De otra parte se debe anotar que los noyos hechos con silicatos de módulos bajos son de difícil desmoldeo (alta resistencia residual a alta temperatura) y al contrario las de módulo alto desmoldan fácilmente.

Además el consumo de CO_2 es mayor en los noyos hechos con silicatos de módulo bajo que con los de módulo alto.

El porcentaje de incorporación del silicato en la mezcla depende de la resistencia que deseemos obtener del noyo, ella crece cuando el porcentaje de silicato aumenta; existiendo el gran inconveniente, que al aumentar la resistencia aumentan nuestras dificultades para el desmoldeo de los noyos. Sin embargo, para aclarar ideas, podemos utilizar mezclas que llevan del 3 al 5 % de Silicato, empleando un 3 % cuando se requieren desmoldeos fáciles (de los noyos). Además, este porcentaje de incorporación, se ve afectado por el índice de finura de la arena, haciendo que éste aumente al aumentar el índice de finura, o sea, al disminuir el tamaño del grano; aumentando así el consumo de Silicato de Sodio.

El índice de finura I.F. de la arena está generalmente determinado por el estado de superficie deseado en la pieza y del tamaño de los granos de la arena depende el consumo del silicato. Cuando el índice de fineza aumenta (por lo tanto, aumenta la superficie específica de los granos de arena) se favorece la reacción química, manteniendo el consumo de CO_2 a un nivel normal.

Aunque las arcillas representan generalmente un consumo inútil de silicato, sería muy costosa la eliminación de ella por lavado, además que puede ser una ventaja en el control de la concentración como se verá más adelante. Otros elementos menores de 20μ tales como el negro mineral (0,5 a 2 %), harina de madera o viruta (0,6 al 5 %) ayudan al desmoldeo de los noyos como también a controlar la resistencia antes de la colada.

Otros aditivos, como el azúcar (0,3 a 1 %), la melaza (0,8 - 1,5 %), el óxido de hierro (0,7 - 1,5 %), la dextrina u otros productos semejantes (0,5 - 1 %), son empleados en la búsqueda o control de la resistencia antes de colada, aptitud al soplado o manufactura, aptitud al almacenado y al desmoldeo de los noyos.

Se recomienda determinar el porcentaje de materias secas, según la expresión¹:

$$\%M.S. = 80 - 16.25R - \frac{I.F.}{16} - 4a + 4s + 2.5T$$

Como además hay otros factores que no han sido considerados como la eficiencia del mezclado de la arena y condiciones ambientales, hay necesidad de hacer pequeños ajustes hasta obtener una mezcla bastante fluida antes del gaseado y que no se pegue a las paredes de la matachera.

Preparación de mezclas y fabricación de los noyos.

Para la preparación de mezclas se debe partir de una arena seca, fría (temperatura ambiente) y con bajo tenor en elementos menores de 20 μ .

Se debe prestar atención a que este trabajo no sea enérgico hasta el caso de elevar la temperatura de la arena, lo que iniciaría un endurecido temprano que restaría propiedades al noyo. Por lo demás se deben seguir consignas normales en cuanto a no alternar preparación de diferentes tipos de mezclas sin hacer un riguroso aseo del equipo y tomar los cuidados normales en la dosificación de las sustancias de adición.

Una vez preparada la mezcla, lo más aconsejable es depositarla en un recipiente plástico y no en madera que absorbería parte de la humedad de la mezcla, iniciando así el proceso de endurecido.

Las cajas, particularmente cuando la fabricación de noyos es mecánica, debe prever ángulos de salida un poco mayores que los normales, teniendo sumo cuidado en evitar aún las menores contra-salidas de acabado. Cuando la fabricación de noyos se hace a mano se puede recurrir a pequeñas vibraciones, antes del gaseado.

¹ Jeancolas y Virolle - Centre Technique des Industries de la Fonderie

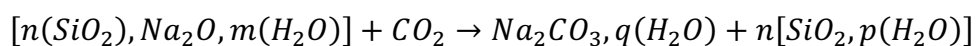
La manufactura de los noyos puede hacerse manual o por medio de máquinas sopladoras. En ambos casos, estando la mezcla correctamente elaborada (fluida), el apisonado debe ser enérgico y en algunos casos recurrir a armaduras o refuerzos (noyos delicados).

El gaseado de los noyos debe hacerse a presiones relativamente bajas, 2 a 3 milibares (0,03 - 0,05 psi), en un tiempo bastante corto (10 - 20 segundos). Como consecuencia de un consumo de CO₂ al 1 % en masa, requiere de caudales grandes. Como corrientemente no es fácil el control en una instalación de este tipo, entonces se recomienda el uso de 2 juegos de manómetros reductores, que permiten un mejor control de presión y caudal de gaseado.

Endurecimiento

Aunque muy complejo el mecanismo de endurecimiento de las mezclas al Silicato CO₂, se puede centrar su estudio sobre la deshidratación del Silicato al pasar una corriente de CO₂ que produce un aumento brusco de la viscosidad del Silicato, acompañado de la formación del gel de Sílice, en mayor o menor cantidad, de acuerdo al módulo del silicato en el momento de la preparación de la mezcla.

Esto sucede según la reacción química:



Con formación intermedia de ácido carbónico Ahora bien, el que haya o no formación de gel de Sílice y mayor aglutinación debida a la alta viscosidad del Silicato, se deben, como ya se dijo al módulo inicial de él, presentándose variaciones en los resultados obtenidos como se indica seguidamente:

Caso de módulos bajos (Tipo 2.0)

El CO₂ reacciona con el silicato, secándolo y cambiándole su alcalinidad, lo que produce un aumento del módulo hasta alcanzar un valor límite de equilibrio de aproximadamente 4 y alcanzando una alta viscosidad que no permite una nueva reacción con el CO₂; de esta forma se estaría en presencia de un Silicato a alta viscosidad y una reacción química incompleta donde habría muy poca formación de gel de sílice.

Caso de módulos altos (Tipo 3.0)

En comparación con los módulos bajos, este tiene menor cantidad de Na_2O , lo que permite que rápidamente se alcance el módulo límite de equilibrio sin que la viscosidad sea demasiado alta, haciendo que se produzca gel de sílice, lo que conlleva una disminución del módulo de viscosidad; se reinicia la deshidratación hasta que al final se obtiene una reacción con formación de gel de sílice y muy poco silicato de sodio sin reaccionar.

Si se continúa el gaseado, se podría "sobregasear" el noyo, hecho que implica la formación de bicarbonato de sodio, producto higroscópico, que no permite el almacenamiento de los noyos sin la correspondiente desmejora de la resistencia antes de la colada, además de que este bicarbonato se comporta como fundente en el acto de colada produciendo desastrosos resultados en las piezas.

Caso de Módulos Medios (Tipo 2.4)

Estos silicatos producen reacciones intermedias entre las presentadas en los dos casos anteriores, obteniéndose también propiedades intermedias. Es tal vez por ello que se recurre generalmente a ellos.

Utilización del proceso

Tomando como base lo anteriormente anotado, se debe cuidar de seleccionar correctamente el módulo y el porcentaje de materias secas del silicato de sodio, recomendándose utilizar módulos bajos cuando se desean noyos resistentes y que permitan almacenamiento de varias semanas, lo que no es posible con noyos fabricados con silicatos de módulo alto puesto que sufren una pérdida apreciable de su resistencia durante el almacenamiento, pero que su uso es ventajoso en el caso de noyos no almacenados y de exigente facilidad al desmoldeo (colapsabilidad o friabilidad) después de colada.

Desde el punto de vista de consumo de CO_2 , son más ventajosos los de módulo alto aunque hay que tener cuidado con el sobregaseado.

En la fabricación de los noyos bien puede emplearse, además de la arena silíceo, la cromita, el zirconio o la olivina sin que se presenten grandes inconvenientes.

Ahora, según el metal a colar, se debe cuidar en el caso de aleaciones de alto punto de fusión de proporcionar un recubrimiento o pintura a base de grafito o zirconio en solución inflamable, que generalmente es alcohol.

2.2.5.3. Noyos Cascara o Croning

Generalidades

En la búsqueda de utilizar otros materiales para la fabricación de noyos en grandes series con buena precisión dimensional, se llegó al empleo de este proceso siendo una de las primeras resinas empleadas para este efecto.

Durante la segunda guerra mundial, el alemán Croning desarrolló un proceso de fabricación de noyos que permitía cadencias de producción elevadas, logrando mayor precisión dimensional, gran exactitud de dimensiones (desviación para la misma cota) y buen acabado superficial. Este proceso que se presenta altamente rentable para grandes series, conlleva altos gastos de implantación y mayores cuidados técnicos, si se le compara con los procesos descritos anteriormente. Además, se deben tomar precauciones para evitar quemaduras del operario, reacciones cutáneas y olores desagradables.

En rasgos generales, el proceso de fabricación de noyos por este sistema, consiste en preparar una mezcla de arena que es proyectada o soplada dentro de un utillaje metálico (molde), el que efectúa un pre-curado aproximadamente a 280°C para terminar el proceso de curado con un calentamiento a 350°C durante 1 ó 2 minutos. El noyo así obtenido es una cascara (hueco) muy duro y resistente.

Aglomerante

Inicialmente se empleó una resina Urea-Formaldehído abandonándose su uso por su menor temperatura de destrucción, mayor porcentaje de adición y principalmente por el mayor porcentaje de gases desprendidos en el momento de colada. Actualmente se utiliza una resina de tipo fenol-formaldehído. Una resina a base de fenol que se hace termoendurecible al adicionársele hexametileno-tetramina.

Preparación de mezclas

Aunque generalmente se compra la mezcla ya lista para la elaboración de los noyos, se describirán en forma sencilla los dos sistemas más empleados en la preparación de las mezclas que se encuentran ya pre-revestidas. Uno consiste en cargar arena caliente en el mezclador e inmediatamente la resina pulverizada que se endurece parcialmente, por acción del calor, aglutinando la mezcla.

A continuación se enfría, recurriendo al uso de un catalizador (aceleradores), en solución, para finalmente proceder a deshacer los grumos y tamizar la mezcla. El otro método consiste en mezclar la resina en solución (en líquido volátil) con la arena fría, haciendo trabajar la mezcla hasta cuando el agente volátil se haya evaporado, etapa en la cual, ya la mezcla ha comenzado a aglutinarse formando grumos, por lo que se debe continuar la molienda o mezclado hasta que desaparezcan los grumos. En la preparación de estas mezclas se usan generalmente molinos de rulos con algunas modificaciones y se debe prestar mucha atención al desmenuzamiento de los grumos para evitar la separación de la resina parcialmente curada que se encuentra revistiendo los granos de arena.

Además se pueden preparar mezclas directamente en las fundiciones, cuando así se requiera, utilizando para ello, arena fría y la resina en estado sólido, de grano muy fino; para el mezclado se utilizan molinos con aletas, de eje vertical u horizontal, bastando para el mezclado tiempos de 5 a 8 minutos. El inconveniente que presentan estas mezclas es la falta de homogeneidad debido a la aguda tendencia a separarse la resina de la arena en el momento de elaborar el noyo.

Fabricación y endurecimiento de los Noyos

Dependiendo de algunos factores como: el tamaño de la serie, tamaño del noyo, cadencia de elaboración de los noyos y otros, se puede disponer de máquinas más o menos sofisticadas. Existen desde las más sencillas que descargan la mezcla por medio de un depósito de volteo, hasta las de soplado, de producción a grandes cadencias. De todas formas el principio de elaboración del noyo es el mismo y consiste en depositar una cierta cantidad

de mezcla dentro de un molde metálico que ha sido recubierto con una solución de aceite de siliconas pulverizado (para evitar la adherencia del noyo al molde). El molde que ha sido calentado a 280°C aproximadamente, provoca la descomposición del hexametileno-tetramina produciendo amoníaco y formol que reaccionan con la resina fenólica, causando una reacción de policondensación responsable de la aglomeración de la mezcla; de esta forma se produce una cáscara de 5 a 10 mm de espesor durante el pre-curado que dura aproximadamente 20 segundos (dependiendo el espesor de factores como el tiempo de pre-curado y la resina), enseguida se procede a recuperar la mezcla que no haya reaccionado y que ayudó a la fabricación del noyo, para finalmente concluir el curado a una temperatura entre 300 y 400°C, durante 1 a 2 minutos (la temperatura y el tiempo de curado dependen de la resistencia deseada y de la resina). El producto final es una cáscara dura, friable, liviana y de mucha permeabilidad.

Utilización del proceso

Este proceso de fabricación de noyos es empleado en casi todas las aleaciones de fundición, aunque su mayor campo de aplicación son los aceros inoxidable y las aleaciones de cobre. Cuando se presentan problemas de refractariedad (colada de aleaciones de alto punto de fusión) se puede recurrir al zircón. Con las aleaciones ligeras se pueden presentar problemas de desmoldeo o desmenuzamiento de los noyos, por lo tanto se debe entrar a determinar la cantidad de resina, los tiempos y las temperaturas de curado a emplear con miras a obtener un espesor y dureza de cáscara adecuados.

El proceso Croning conviene particularmente para grandes series a cadencias relativamente elevadas de noyos pequeños y medianos, puesto que presentan complicaciones con los noyos de grandes dimensiones.

Los noyos tienen una precisión dimensional muy buena (del orden del 0,5 %), no retoman humedad del ambiente y despiden pocos gases en el momento de la colada que son evacuados con facilidad (buena permeabilidad), sin embargo la velocidad de enfriamiento de las piezas tiende a ser menor (en igualdad de condiciones) con respecto a con los noyos al Silicato CO₂ o al aceite, presentando el inconveniente de un tamaño de grano grueso en las aleaciones que son susceptibles a este fenómeno.

Reciclamiento de las arenas

La regeneración de las arenas de noyos se hace conjuntamente con la arena de los moldes, comenzando esta operación, separando los terrones (generalmente residuos de noyos) que no alcanzan a disgregarse en la parrilla de desmoldeo. En casi todos los países industrializados se trabaja en mayor o menor escala, regenerando las arenas (en particular las aglomeradas con resinas) dependiendo del costo de la arena silíceo y con mayor razón cuando se trata de zircón u olivina por su alto costo y dificultades en un mercado comúnmente discontinuo e inestable. En líneas generales, la recuperación se hace quemando la resina, recuperándose por lo tanto sólo la arena, la mezcla una vez quemada se debe enfriar y tamizar.

2.2.5.4. Fabricación de Noyos con Resinas

Una vez tratados los procesos convencionales para la fabricación de noyos, se presentarán los procesos desarrollados, en los países industrializados en las últimas décadas. El empleo de resinas ha permitido la elaboración de moldes y noyos de acuerdo a las necesidades que se presentaban con respecto a la cantidad y tamaño de los noyos a fabricar frente a las propiedades deseadas, la producción diaria u horaria requerida y a los costos.

En general estos procesos son clasificados según su endurecimiento en frío o en caliente, dependiendo de la necesidad de calentar o no la caja de noyos. Dentro de estos procesos hay que dar por descontados, como es evidente, los procesos ya tratados, así como los derivados de ellos, por su similitud tecnológica.

2.2.5.4.1. Noyos endurecidos en caliente

Generalidades

Este proceso de fabricación de noyos, es llamado comúnmente "caja caliente", por el calentamiento que tiene que hacerse de la caja de noyos para hacer el endurecimiento del noyo.

Dentro de las ventajas que se pueden relieves están: elevada producción horaria de noyos, gran capacidad de producción por unidad de superficie, buena exactitud dimensional (poca desviación de dimensiones) y limpieza de la

zona de fabricación de noyos, aunque generalmente se producen gases malolientes.

Aunque el proceso de fabricación de noyos "Croning" está dentro de los procesos clasificados como "caja caliente", se diferencian fundamentalmente en la preparación de la arena: la resina, en el "Croning" es sólida de granulometría muy fina, mientras que en los procesos en este capítulo tratados, es generalmente líquida y normalmente se recurre a la utilización de catalizadores, mientras que en el proceso "Croning" no. Esto implica diferencias en: la presentación del noyo (cáscara o macizo), velocidad de endurecimiento (más lenta en el "Croning") y en la duración de vida o vida útil de la mezcla de arena ya preparada (casi indefinida para el "Croning").

Resinas y Catalizador

El aglomerante utilizado en este proceso son resinas termo-endurecibles o termoplásticas, que generalmente se utilizan en combinación con un catalizador o endurecedor.

Las resinas utilizadas son hechas a base de formol, fenol-formol, Urea-fenol-formol y Urea-formol. Además, pueden ser polímeros de alcohol furfurílico o furfurool, como también asociaciones de las anteriormente nombradas, con el furfurool, por lo que comercialmente reciben la denominación de resinas fenólicas y furánicas.

Estas resinas llevan una mayor o menor cantidad de agua que sirve en la regulación de su viscosidad y que junto con el pH controlan en cierta medida su estabilidad, exigiendo condiciones de almacenamiento en lugares frescos y poco húmedos; sin embargo, aunque se cumpla con estos requisitos, su vida (conservando sus características) es de aproximadamente 6 meses.

El endurecimiento de los noyos ocurre por reacciones complejas de polimerización o más corrientemente de policondensación. Cuando se parte de moléculas de base idénticas (monómero) y se presenta una reacción de polimerización, se obtiene un cuerpo de moléculas gigantes llamado polímero; si se parte de moléculas de base, de dos tipos diferentes, para producir un polímero, entonces la reacción se dice llamar copolimerización. Cuando se parte de moléculas de base idénticas (monómeros) y se presenta una reacción

de policondensación, se obtienen: un cuerpo de grandes moléculas llamado policondensado y hay formación o eliminación de un segundo cuerpo producido, que en algunos casos puede ser agua; si se parte de moléculas de base, de dos tipos diferentes, para producir un policondensado y agua (caso general en resinas empleadas en fundición) entonces la reacción se llama de copolicondensación.

A título de información, se menciona en forma sencilla de donde se obtienen los productos base para la fabricación de las resinas utilizadas en fundición y cuyas técnicas de elaboración no es del caso mencionar aquí. El formol se obtiene de la destilación de la madera; el fenol por oxidación catalítica del benceno con formación de acetona, aunque por otro método un poco más costoso, se puede extraer de productos sulfonados; la urea se obtiene por acción del amoníaco con el anhídrido carbónico y para finalizar, el furfurool o alcohol furfurílico obtenido por hidrogenación catalítica del furfurool que a su vez se obtiene de desechos vegetales.

El catalizador o endurecedor es hecho de ácidos donde su pH juega un papel muy importante, frente a la velocidad de curado o endurecido de los noyos.

La escogencia de la resina y el endurecedor, impone algunas dificultades pues se debe partir de la propaganda y recomendación del fabricante, quien se cuida de guardar, la composición y algunos secretos de estos, por lo que generalmente se hacen pruebas o ensayos de laboratorio que permitan escoger el proceso adecuado a las necesidades que se tienen.

Arena empleada

Se debe emplear una arena lavada (eliminación de finos), seca y de tamaño granulométrico bastante parejo u homogéneo. Su temperatura en el momento del mezclado, incide directamente en la velocidad de endurecido del noyo, disminuyendo el tiempo de curado a medida que aumenta la temperatura, el índice de finura puede ir desde 40 hasta 100 (de acuerdo con el metal y el aspecto deseado de las piezas) prefiriendo las arenas de grano redondo. Se pueden emplear también el zirconio y la cromita pero no así la olivina.

Preparación de mezclas y fabricación de noyos

Aunque casi la totalidad de molinos se pueden utilizar, sí hay algunos tipos que son más ventajosos, principalmente en dos aspectos: su eficiencia en la molienda (mezcla homogénea) y su poca tendencia a elevar la temperatura de ella, quiere decir esto que los productos son mezclados de manera uniforme pero no tan enérgica que cambie su granulometría o eleve su temperatura. Generalmente se emplean mezcladores continuos de tornillos sinfín (caso de grandes producciones) y molinos de paletas con el eje vertical.

En lo que respecta al orden de introducción de los productos, generalmente es imperativo introducir primero el catalizador o endurecedor y después la resina. Cuando hay necesidad de introducir otros productos (aditivos que ayudan al desmoldeo, colorantes, etc.), estos son los primeros a mezclar con la arena.

El tiempo de mezclado varía mucho, dependiendo del tipo de molino, el índice de finura de la arena y de la temperatura ambiente. A modo de información: en un molino continuo basta algunos segundos, mientras que en un molino de paletas se requieren de 3 a 5 minutos.

En relación con la selección de la resina y las cantidades a utilizar de resina y catalizador, esto depende de varios factores interrelacionados: metal a colar, calidad y aspecto de la pieza, espesor y volumen del noyo, temperatura ambiente y temperatura de la matachera. La resina se emplea en tasas del 1 al 2 %, y el catalizador entre el 15 y el 40 % de la cantidad de resina empleada.

Una vez preparada la mezcla, ésta es colocada en un depósito o tolva situada generalmente en la parte superior de la máquina sopladora de noyos. La dosis de mezcla pasa a la cámara de soplado, desde donde es inyectada a la matachera o caja de noyos.

La caja de noyos se encuentra a la temperatura de curado del noyo (el calentamiento generalmente se hace por resistencias eléctricas). Dicha temperatura, que es influenciada por diversos factores ya anotados, está comprendida entre 180 y 270°C. Se debe tener la precaución de refrigerar la cabeza de soplado (orificio por donde pasa la mezcla a la caja de noyos o "caja caliente") pues de lo contrario la mezcla allí depositada se endurecería al igual que el noyo, causando problemas para retirarlo. El tiempo de curado o

endurecido que es relativamente corto (entre 30 y 120 segundos) depende también de varios factores, ya mencionados anteriormente. El noyo así elaborado no se debe enfriar bruscamente, para permitir que el curado se continúe en el interior del noyo. Las manipulaciones posteriores, debidas al transporte, recubrimiento o pinturas y almacenamiento, deben ser cuidadosas pues en general el noyo en esta fase es muy frágil.

Utilización del proceso

Teniendo en cuenta las ventajas ya mencionadas, el proceso de fabricación de noyos en "caja caliente" es empleado generalmente en la elaboración de noyos de tamaño relativamente pequeños, en el moldeo de piezas tanto ferrosas como no ferrosas. Además de los parámetros ya citados, a tener en cuenta en la selección de la resina, el catalizador y las temperaturas, debe cuidarse en el proceso, la cantidad de gases producidos al momento de la colada, como también la resistencia en caliente del noyo; esto con el fin de asegurar un buen desmoldeo, evitar las grietas y las porosidades debidas a los gases. Las resinas a base de fenol-formol y Urea-formol asociadas con furfurool, dan alta resistencia en caliente, lo que las hace apropiadas en el noyotado de moldes para piezas en acero y fundición de cierto espesor y al contrario, se emplean resinas Urea-formol que producen noyos desmenuzables a más baja temperatura y que las hacen recomendables en el caso de aleaciones ligeras y piezas delgadas en fundición. Es de anotar que las resinas con alto contenido de Urea, producen gases (nitrógeno) que trae tantos problemas en las piezas coladas.

Noyos en "Caja Tibia"

Este proceso recientemente desarrollado, nació de la búsqueda de resinas que endurecieran bajo la acción de una temperatura mucho más baja (120 a 150°C) que la empleada en el proceso "caja caliente", conservando de todas formas el tiempo de curado y en proporción, el costo de la resina. Las ventajas son obvias: menor consumo de energía, menor dificultad tecnológica en la construcción del equipo y en la aplicación del proceso y, finalmente, el mejoramiento de las condiciones de trabajo del operario.

La resina empleada es elaborada a base de un polímero muy reactivo del furfurool, sin formol ni fenol y con un contenido muy bajo de nitrógeno. Ella se emplea en tasas del 1 al 1,3 % y en su selección se debe confiar en las instrucciones o propaganda del productor quien se reserva dar a conocer su composición.

2.2.5.4.2. Noyos endurecidos en frío

Generalidades

Este proceso llamado de auto-fraguado, auto-endurecimiento o fraguado en frío, se le denomina así porque la caja de noyos permanece a una temperatura muy cercana de la ambiental durante la fabricación del noyo, comprendido obviamente el período de endurecimiento o fraguado de este.

La gran versatilidad que tiene su aplicación, hace que se pueda seleccionar, desde cuando se requiere fabricar moldes o noyos de gran tamaño a la unidad o pequeñas series, hasta cuando se tienen grandes series de noyos pequeños, producidos a alto ritmo de producción horaria. Como esa diversidad de casos implican condiciones de equipamiento y aplicación específicas, entonces se tratará el caso de fabricación de noyos en series pequeñas (fraguado relativamente lento) y finalmente se tratará en la fabricación de noyos en grandes series (fraguado rápido).

Este proceso se diferencia claramente del proceso "caja caliente" por el mecanismo de endurecimiento. El curado en la caja caliente se debe a la acción del calor, mientras que el endurecimiento en el proceso auto-fraguado se hace por acción de un catalizador o endurecedor y de allí que el primero se realice a temperaturas vecinas a 200°C mientras que el segundo se haga a temperaturas muy próximas a la ambiental.

El endurecimiento en el proceso de auto-fraguado se realiza mediante la acción de un catalizador o acelerador sobre una resina furánica o fenólico - furánica, que genera una reacción de policondensación. Dicha reacción es exotérmica, produciéndose un aumento de aproximadamente 10°C en la mezcla.

En la selección de la resina y el catalizador se presentan las mismas dificultades que en el proceso caja caliente, pues el fabricante se reserva su composición.

La arena a emplear debe ser una arena silíceas lavada, sin finos, seca y por lo menos estar a temperatura ambiente. También se pueden emplear el zirconio o la cromita, pero no la olivina. El tamaño del granó debe corresponder a índices de finura comprendidos entre 40 y 100, de granos homogéneos y de preferencia redondos.

Resinas

Como en el proceso caja caliente, se emplean en el proceso de fraguado en frío, resinas fenólicas y furánicas, variando sólo el porcentaje de los productos de base y en particular el furfurool que generalmente es superior al 50 %, hasta concentraciones donde puede llegar al 85 % . También se citan las resinas empleadas, así como la procedencia de los productos de base y las condiciones de almacenamiento. También es importante el porcentaje de urea que al contener una buena cantidad de nitrógeno, produce defectos de porosidades en las piezas.

Catalizadores o Endurecedores

Siendo el catalizador responsable, en parte, de la reacción de endurecimiento de los noyos fraguados en frío, se debe prestar particular atención a su selección y dosificación. Estos son ácidos más o menos complejos de ácido para-tolueno sulfónico, ácido fosfórico y, en algunas ocasiones ácido sulfúrico. El ácido fosfórico fue el más empleado inicialmente, pero en la actualidad ha sido remplazado en parte por los otros dos ya mencionados.

En lo que respecta a la duración de vida de la mezcla, el tiempo de fraguado y a la resistencia de los noyos, depende de la dosis de catalizador y de la combinación de ácidos empleada, obteniéndose resultados insospechados pues puede ocurrir que tengan un comportamiento con una resina y el opuesto con una resina diferente. Para citar no más que un caso, el comportamiento de los ácidos para-tolueno sulfónico y fosfórico con una resina fenol-formol-furfurool tendría la siguiente tendencia: a las 12 horas de fabricado el noyo, la resistencia mecánica aumenta a medida que se incrementa la cantidad de ácido para-tolueno sulfónico y al contrario, ésta disminuye a medida que se aumenta la cantidad de ácido fosfórico.

Otro factor a tener en cuenta es la homogeneidad del endurecimiento al interior del noyo con lo que se corre el riesgo de obtener resultados inesperados en algunas partes del noyo y produciendo así defectos en las piezas fundidas.

En general se recurre a ensayos de Laboratorio, para determinar las condiciones más convenientes en la utilización del proceso.

Preparación de mezclas y fabricación de noyos

La preparación de mezclas para la fabricación de noyos de fraguado en frío, es muy similar a la presentada en la sección 3.2.4 para la preparación de mezclas en "caja caliente". Tanto en la preparación de mezclas para fraguado en frío, como para "caja caliente" se debe hacer énfasis en no mezclar directamente la resina con el catalizador (sin la presencia de arena) pues se producen reacciones violentas que pueden llegar a causar explosiones. También se emplean molinos similares a los utilizados para la preparación de mezclas para noyos en "caja caliente", pero la duración de vida o vida útil de las mezclas cambia fundamentalmente, pues las mezclas para caja caliente tienen una duración de vida relativamente grande (algunas horas), mientras las mezclas para fraguado en frío la vida útil es de sólo minutos. En este aspecto tienen mucha influencia la cantidad y composición del catalizador y la temperatura ambiente. En la selección y dosificación tanto de la resina, como del catalizador se tienen en cuenta varios factores que en ocasiones están relacionados entre sí: calidad y cantidad de resina y catalizador, temperatura ambiente, metal a colar, calidad de la pieza, duración de vida de la mezcla y la forma y volumen del noyo. Al igual que para la "caja caliente", con cantidades muy pequeñas de resina y catalizador es suficiente, sólo bastan 0,8 a 2 % de resina y 30 a 40 % del catalizador con respecto a la cantidad de resina.

En la fabricación de los noyos se debe tener muy en cuenta que éste se elaborará durante la vida útil de la mezcla pues una vez terminada ésta, el noyo resultará de pésimas propiedades. Para ahorrar en lo posible la mezcla se pueden utilizar otros materiales de relleno, como: pedazos de coque, terrones de noyos ya utilizados (retornos de desmoldeo), trozos de poliestireno o arena aglutinada o aglomerada con otros productos. Una vez elaborado el noyo, éste debe permanecer en la matachera o caja de noyos hasta que haya endurecido totalmente, para asegurar su indeformabilidad, después que se haga el

desmodelado. Para facilitar esta operación, la caja de noyos debe cumplir: tener buenas salidas, buen acabado de superficies e indeformable. Así, el noyo obtenido se puede proceder a pintarlo o recubrirlo según las necesidades y estará listo para su empleo.

2.2.4.4.3. Otros procesos para fabricación de noyos endurecidos en frío

Generalidades

Estos procesos desarrollados en la última década han aprovechado, el alto ritmo o cadencia de producción del proceso "Caja caliente" y/o el endurecimiento a temperatura ambiente del proceso de fraguado en frío. Para ello se ha recurrido a mecanismos y productos que han cambiado casi totalmente el concepto de la fundición. Se emplea el vacío o resinas altamente reactivas o catalizadores gaseosos.

Como es de esperarse, el desarrollo y aplicación de estos procesos, implican una serie de dificultades en su técnica, sus instalaciones, su manejo y control, condiciones de trabajo del operario y lo que es más preocupante, la contaminación.

En esta sección se presentarán brevemente cuatro procesos patentados que tratan de ganar adeptos frente al amplio panorama de procesos ya presentados.

Proceso "Pet-Set"

Este proceso se emplea generalmente en la producción de noyos o moldes a la unidad o en pequeñas series.

Utilizando mezcladores continuos de tornillos sinfín o mezcladores discontinuos de eje vertical con aletas en 3, se debe emplear una arena extra-silíceas, lavada y seca, a la que se agrega una resina líquida a base de fenol (disuelta en un solvente) y un catalizador líquido (llamado amina), éstas se mezclan durante 30 a 90 segundos, agregando enseguida un endurecedor líquido (llamado isocianato) los que se mezclan durante igual tiempo al anterior. La resina al igual que el endurecedor se emplea en cantidades del 0,3 al 0,6 % de la masa de arena y el catalizador del tres al 15 % de la masa de resina. Dependiendo de las propiedades deseadas, entonces se seleccionan los porcentajes de los

productos a emplear. En la elaboración del noyo sólo se requiere una leve vibración para el llenado de la caja de noyos, resultando un noyo de muy buen acabado superficial y en la mayoría de los casos no requiere recubrimiento.

Proceso "Ashland"

Los productos utilizados para la fabricación de la mezcla de arena son semejantes a los del proceso "Pet-Set", con la diferencia del catalizador que se utiliza en estado gaseoso.

En la preparación de la mezcla de arena se puede utilizar cualquier mezclador o molino, siendo el más conveniente el de eje vertical con aletas en S. A la arena se le agrega la resina, se mezcla durante 30 a 60 segundos y se le adiciona el endurecedor operando el mezclador hasta obtener homogeneidad en la mezcla. Por lo general se emplea el endurecedor en igual cantidad que la resina, variando ésta entre 0,4 y 0,8 %.

Una vez la mezcla preparada, se elabora el noyo en máquinas sopladoras, pudiéndose lograr ritmos o cadencias de producción muy grandes, de noyos pequeños o medianos y donde el endurecimiento se logra al hacer pasar una corriente de catalizador gaseoso (0,07 % de la masa de arena) en cuestión de pocos segundos. Como la amina gaseosa (catalizador) tiene un penetrante olor a amoníaco, se deben construir cajas de noyos que no permitan el escape del catalizador y previendo una instalación que reciba la cantidad excedente de catalizador, como también la mezcla resultante del lavado del noyo con aire comprimido. Este aire sirve inicialmente para difundir el catalizador en toda la masa del noyo y finalmente para eliminar el que no haya reaccionado (el lavado se hace aproximadamente cinco segundos después del gaseado con el catalizador).

El noyo resultante es poco frágil, resistente a la erosión, friable y que desprende muy pocos gases al momento de la colada.

Proceso "Hardox"

Este proceso es muy parecido al anteriormente expuesto proceso "Ashland" en cuanto al gaseado con un catalizador gaseoso.

Se emplea una resina furánica a la que se agrega agua oxigenada, al momento de prepararse la mezcla. El noyo se elabora de forma similar y como se hace en el proceso Ashland, pero como catalizador se emplea el anhídrido sulfuroso (SO_2) que produce el endurecimiento del noyo en pocos segundos. También se hace un “lavado” con aire comprimido.

Una ventaja que se le encuentra con respecto al proceso Ashland, es la duración de vida de la mezcla ya preparada, que alcanza a ser de varios días.

Proceso Vacodur

Este proceso recién aparecido, está en vía de desarrollo; utilizando un sistema muy novedoso. Se emplea un aglomerante del tipo amina-poliisocianato; la resina es disuelta en un medio volátil, el que es recuperado en el período de endurecimiento por medio de la aplicación del vacío. El solvente recuperado se puede emplear nuevamente en la preparación de nuevas mezclas recuperando la arena de desmoldeo donde el aglomerante no ha sido destruido totalmente.

2.3. ALEACIONES DE ALUMINIO

La característica más conocida del aluminio es su peso ligero, y su densidad es como una tercera parte de la del acero o de las aleaciones al cobre. Ciertas aleaciones al aluminio tienen mejor proporción resistencia-a-peso que la de los aceros de alta resistencia. El aluminio tiene buena maleabilidad y formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica. Una forma de aluminio ultra puro se utiliza para reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de alta reflectividad a la luz y de no decoloración superficial.

El aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica, como cajas para barras conductoras o cubiertas para equipo eléctrico.

Aunque la conductividad eléctrica del aluminio de la clase conductor eléctrico (EC) es como el 62% que la del cobre, su peso ligero lo hace más apropiado como conductor eléctrico para muchas aplicaciones industriales.

El aluminio puro tiene una resistencia tensil de unas 13000 lb/pulg²; sin embargo, grandes incrementos en resistencia se obtienen mediante el

trabajado en frío o por aleación, Algunas aleaciones, adecuadamente tratadas en forma térmica, se aproximan a resistencias tensiles de 100000 lb/ pulg².

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajado; se puede fundir mediante cualquier método conocido-laminado a cualquier espesor deseado, estampado, estirado, enrolado, forjado y extruido a casi cualquier forma imaginable.

El aluminio comercialmente puro, aleación I 100 (99.0 + % de aluminio), es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o gran resistencia a la corrosión (o ambas) y en las que no se necesita alta resistencia. Se ha utilizado ampliamente en utensilios para cocina, varios componentes arquitectónicos, equipo de manejo y almacenamiento de alimentos y agentes químicos, así como en ensamblajes soldados.

2.3.1. DESIGNACIÓN DE LA ALEACIÓN PARA ALUMINIOS FORJADOS

La designación del aluminio forjado y de las aleaciones forjadas al aluminio fue estandarizada por The Aluminium Association en 1954. Consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica el grupo de aleación (tabla 2.3.1), el segundo señala el cambio de la aleación original o límites de impureza; el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la aleación. En el grupo 1xxx para aluminio con un mínimo de purezas del 99% y mayores, los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje de mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0.01%. De este modo, 1060 indica un material de 99.60% mínimo de pureza de aluminio y ningún control especial sobre las impurezas individuales.

Tabla 2.3.1. Designación para los grupos de aleación*

	Número de asociación de aluminio
Aluminio, 99% y mayor, principal elemento de aleación	1xxx
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otro elemento	8xxx
Series no utilizadas	9 xxx

* THE ALUMINIUM ASSOCIATION

En los grupos de aleación del 2xxx al 8xxx, los dos últimos dígitos sirven sólo para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo.

[AVNER, S.; "INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA"; MCGRAW HILL; 1983; PÁG. 480]

2.3.2. DESIGNACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FUNDIDAS.

Las designaciones de las aleaciones de aluminio **fundidas** también están formadas por cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de aleación principal como sigue:

Tabla 2.3.2 Designación para los grupos de aleación por fundición

Designación	Elementos aleantes
1xx.x	Aluminio (99.00% mínimo);
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.

[KALPAKJIAN, S.; "MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA"; PEARSON; 4TA ED.; PÁG. 160]

En la serie 1xx.x, los segundos y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, igual que ocurre en los terceros y cuartos dígitos del aluminio forjados. Para las otras series, los dígitos segundos y terceros no tienen un significado numérico. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto.

Para aleaciones 2xx.x hasta 8xx.x, el grupo de aleación se determina por el elemento de aleación presente en la mayor media de porcentaje, excepto en los casos en que la composición que está registrada califica como una modificación de una previamente registrada. Si el mayor porcentaje medio común a un elemento de aleación es más de uno, el grupo de aleación es determinado por el elemento que viene primero en la secuencia.

Los segundos dos dígitos identifican la aleación de aluminio específica o, por la serie de aluminio (1xx.x), indican pureza. Los últimos dígitos, que están separados de los otros por un punto decimal, indican la forma del producto, ya sea de colada o lingote. La modificación de una aleación original, o de los límites de impurezas para aluminio sin alear, se indica mediante una letra de serie anterior la designación numérica. Las letras de orden se asignan en orden alfabético empezando por A, pero omitiendo I, O, Q, y X, los X siendo reservado para las aleaciones experimentales. Normas explícitas se han establecido para determinar si una composición propuesta es una modificación de una aleación existente o si se trata de una nueva aleación.

2.3.3. DESIGNACIÓN DE TEMPLE

Esta designación sigue a la de aleación y se halla separada de ésta por un guión. The Aluminium Association Temper Designation System, establece en 1948, se utiliza para el aluminio y aleaciones al aluminio forjadas y fundidas. Se basa en las secuencias de los tratamientos básicos utilizados para producir los diversos temple. El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico. Excepto para los temple en condición de recocido y aquellos en condición de fabricado sin tratamiento térmico se definen más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro temple básicos; F, condición de fabricado; O, recocido; H, endurecido por deformación y T, tratado térmicamente.

-F: Condición de fabricado Aplicado a productos que adquieren algún temple como resultado de las operaciones de manufactura. No hay garantía de propiedades mecánicas.

-O: Recocido, recristalizado Es el temple más suave de los productos de aleación forjados.

-H: Endurecido por deformación Se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas mediante trabajado en frío solamente. La -H siempre es seguida por dos o más dígitos. El primero indica la combinación específica de las operaciones básicas como sigue:

-H1: Endurecido por deformación solamente. El segundo dígito designa la cantidad de trabajo en frío realizada, cuyo número 8 representa la condición de dureza total; por tanto, una dureza media es -H14, una dureza de un cuarto es -H12, etc. Los temples extra duros se designan con el 9. Un tercer dígito se emplea a menudo para indicar el grado de control del temple o para identificar un conjunto de propiedades mecánicas específico.

-H2: Templado por deformación y luego recocido parcialmente. Se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro y luego, mediante recocido parcial, se les reduce su resistencia al nivel deseado. La cantidad residual de trabajado en frío se designa mediante el mismo método que los de la serie -H1.

-H3: Endurecido por deformación y luego estabilizado. Se aplica sólo a aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades. El grado de endurecimiento por deformación remanente después del tratamiento de estabilización se indica en la forma usual por uno o más dígitos.

-W: Tratados térmicamente en solución. Es un temple inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución. Debido al envejecimiento natural, esta designación es específica sólo cuando se indica el periodo de envejecimiento; por ejemplo, 2024-W (1/2 hr).

T: Tratado térmicamente. Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temples

estables. La -T sigue de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas. Las variaciones deliberadas de las condiciones, que dan lugar a características significativamente distintas para el producto, se indican añadiendo uno o más dígitos a la designación básica:

- T2: Recocido (sólo productos fundidos).
- T3: Tratados térmicamente a solución y luego trabajada en frío.
- T4: Tratados térmicamente a solución y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.
- T5: Sólo envejecido artificial. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.
- T6: Tratados térmicamente y en solución luego envejecida artificialmente.
- T7: Tratados térmicamente y en solución luego estabilizada: se aplica a productos en que las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva más allá del punto de dureza máxima, proporcionando control de crecimiento y/o esfuerzo residuales.
- T8: Tratados térmicamente, en solución trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.
- T9: Tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.
- T10: Envejecida artificialmente y luego trabajada en frío, lo mismo que en -T5, pero seguida por trabajado en frío a fin de mejorar la resistencia.

2.3.4. ALEACIONES ALUMINIO-COBRE

La figura 22 muestra el extremo rico en aluminio del diagrama de equilibrio aluminio-cobre. La máxima solubilidad del cobre en aluminio es 5.65% a 548°C y luego decrece hasta 0.45% a 300°C; por tanto, las aleaciones que contienen entre 2.5 y 5% de cobre responderán al tratamiento térmico endureciéndose por envejecido. La fase theta θ es una fase intermedia de aleación, cuya

composición corresponde estrechamente al compuesto CuAl_2 . El tratamiento de solución se lleva a cabo al calentar la aleación hasta la región unifásica kappa (K), seguida por enfriamiento rápido. El envejecimiento subsecuente, ya sea natural o artificial, permitirá precipitar la fase θ , incrementando así la resistencia de la aleación. Estas aleaciones pueden contener menores cantidades de silicio, hierro, magnesio, manganeso, cromo y zinc.

Las aleaciones aluminio-cobre forjado que más se utilizan son las 2014, la 2017 y la 2024. La más vieja de todas las aleaciones al aluminio tratables térmicamente es la duralumín —duraluminio— (2017), que contiene 4% de cobre. Esta aleación se emplea bastante para remaches en la construcción de aviones. Como es una aleación que envejece en forma natural, después del tratamiento de solución se refrigera para evitar el envejecimiento. En estado de fase única, en la condición de tratamiento a solución, tiene buena ductilidad, de manera que la cabeza del remache se puede formar fácilmente. Volver el material a temperatura ambiente produce la precipitación de la fase θ en forma de pequeñas partículas submicroscópicas, que incrementan la dureza y la resistencia.

La aleación 2014 tiene mayor contenido de cobre y manganeso que la 2017 y es susceptible de envejecimiento artificial. En el temple artificialmente envejecido, la 2014 tiene mayor resistencia tensil, mucha mayor resistencia a la cedencia y menor elongación que la 2017.

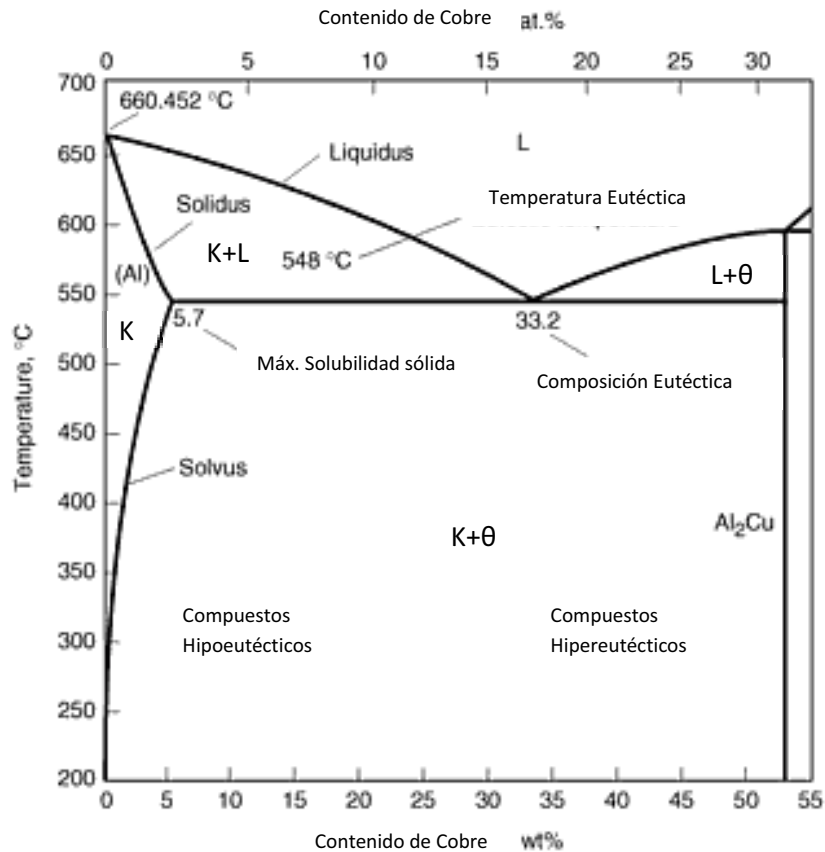


Figura 22. Diagrama de fase Aluminio – cobre.

[METALS HANDBOOK, DESK EDITION; 2ND ED.; ASM; 1998; PÁG. 1117]

Esta aleación se utiliza en piezas forjadas, diseñadas para soportar trabajo pesado, en accesorios para avión y en estructuras para camión. La aleación 2024, que contiene 4.5% de cobre y 1.5% de magnesio, desarrolla las resistencias más altas de cualquier tipo de aleación aluminio-cobre envejecida en forma natural. El mayor contenido de magnesio, comparado con la 2017, la hace más difícil de fabricar. Una combinación de endurecimiento por deformación y envejecimiento desarrollará la máxima resistencia a la cedencia que se puede obtener en una lámina de aleación de alta resistencia. Entre las aplicaciones típicas de la aleación 2024 están estructuras para avión, remaches, ferretería, ruedas para camión y productos de máquina para hacer tornillos. Una aleación cobre-aluminio que contiene 2% de níquel (2218) se ha diseñado para aplicaciones que implican altas temperaturas, como cabezas de cilindro y pistones forjados.

La única aleación binaria aluminio-cobre fundida es la 195, que contiene 4% de cobre. Con el tratamiento térmico adecuado, esta aleación tiene una excelente

combinación de resistencia y ductilidad. La aleación 195, fundida en molde de arena, se utiliza para volantes y cajas para ejes traseros, ruedas para camión y avión, y para cárteres de motores.

Se han producido varias aleaciones de fundición (112, 113 y 212) que contienen aproximadamente 8% de cobre y pueden contener grandes adiciones de silicio controladas, así como hierro y zinc. **La presencia de silicio incrementa la fluidez**, de manera que las aleaciones 113 y 212 se prefieren **para piezas fundidas de secciones delgadas**, como cajas, placas para cubierta y pistones para frenos hidráulicos.

Se ha ideado una serie de aleaciones de fundición, como las 85, 108, 319 y 380 clasificadas como aleaciones aluminio-cobre-silicio, que contienen menos del 5% de cobre y de 3 a 8% de silicio. La figura 23 muestra la estructura típica de una aleación 380, fundida en molde, que tiene propiedades deseables. El cobre proporciona mayor resistencia y mejores propiedades de maquinado que las aleaciones puras aluminio-silicio, en tanto que el silicio da mejores propiedades de fundición y resistencia a pérdidas de presión que las aleaciones aluminio-cobre. Entre las aplicaciones típicas se incluyen ménsulas, estructuras para máquinas de escribir, múltiples, cuerpos para válvula, recipientes, y tanques para gasolina y aceite.

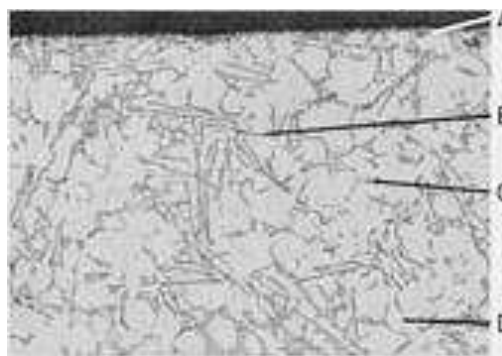


Figura 23. Aleación 380 fundida en molde. El área próxima a una superficie maquinada (A) muestra una estructura típica de una fundición que tiene propiedades deseables: partículas interdendríticas de silicio eutéctico (B) y CuAl_2 (C) en una matriz de solución sólida de aluminio (D). Atacada químicamente en 0.5 HF, 260x.

[METALS HANDBOOK, VOL. 9; "METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES"; ASM; 1992; PÁG. 778]

2.3.5. ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO

La figura 2.3.5.a muestra la porción rica en aluminio del sistema de aleación aluminio-silicio. La máxima solubilidad del silicio en la solución sólida α es 1.65% a la temperatura eutéctica de 577°C. Aunque la línea solvus muestra menor solubilidad a menores temperaturas, estas aleaciones suelen ser no tratables térmicamente. La aleación forjada 4032, que contiene 12.5% de silicio, tiene gran capacidad de forjado y bajo coeficiente de expansión térmica. Se utiliza para pistones forjados para automóvil.

Las aleaciones aluminio-silicio de fundición tienen excelente capacidad (facilidad) de fundido y resistencia a la corrosión. Las aleaciones 13 (12% de silicio) y 43 (5% de silicio) se utilizan para piezas fundidas complicadas, equipo para manejo de alimentos v accesorios marinos.

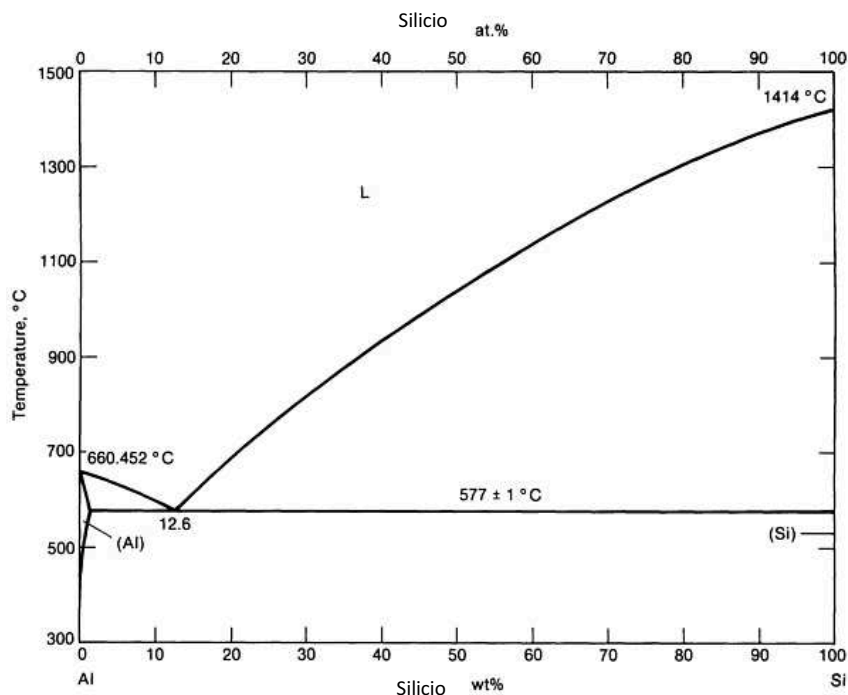


Figura 24. Diagrama de fase aluminio – silicio.

[METALS HANDBOOK, VOL.15; "CASTING"; ASM; 1992; PÁG. 116]

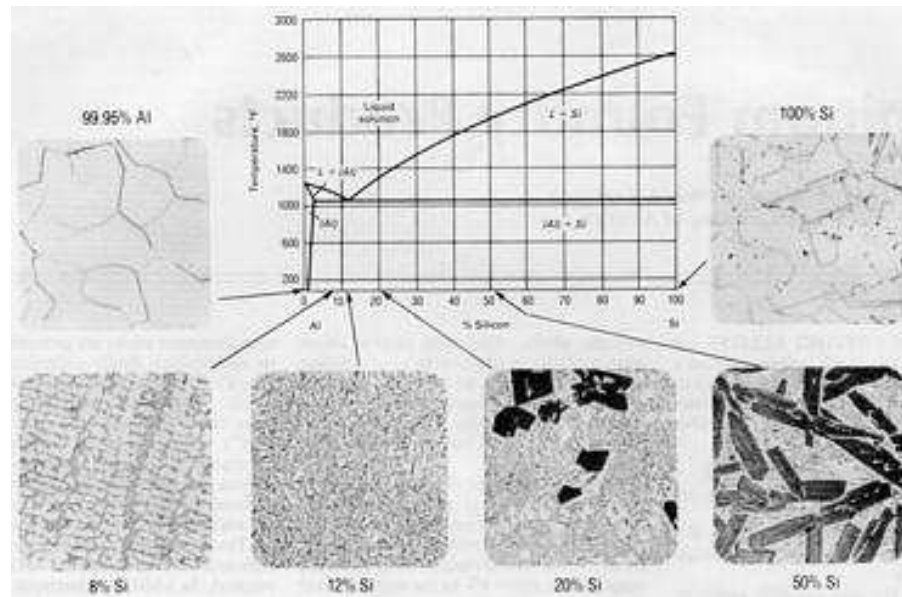


Figura 25. Diagrama de fase aluminio y silicio y microestructuras de fundición de elementos puros y de aleaciones de varias composiciones. Las aleaciones con menos de 12% de Si se denominan hipoeutécticas, aquellas con Si cerca de 12% como eutécticas, y aquellos con más del 12% de Si como hipereutécticas.

[METALS HANDBOOK, VOL.02; "PROPERTIES AND SELECTION: NONFERROUS ALLOYS AND SPECIAL-PURPOSE MATERIALS"; ASM; 1992; PÁG. 485]

2.3.6. ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO-MAGNESIO

El magnesio y el silicio se combinan para formar un compuesto, siliciuro de magnesio (Mg_2Si), que a su vez forma un sistema eutéctico simple con aluminio. La figura 26 muestra la porción rica en aluminio del sistema $Al-Mg_2Si$; es la precipitación del Mg_2Si después del envejecimiento artificial (temple T6), el cual permite que estas aleaciones alcancen su resistencia total. Las aleaciones forjadas incluyen la 6053, la 6061 y la 6063. El magnesio y el silicio suelen estar presentes en la razón adecuada para formar siliciuro de magnesio. La estructura de la aleación 6061 en forma de placa laminada en caliente, muestra partículas de Fe_3SiAl_{12} (grises, tipo cursivo) y Mg_2Si (negras) en una matriz de solución sólida rica en aluminio (figura 27). Estas aleaciones se caracterizan por la excelente resistencia a la corrosión y se pueden trabajar más que otras, tratables térmicamente. Entre las aplicaciones típicas se incluyen mallas de refuerzo en pistas de aterrizaje para aviones, canoas, muebles, tubería para aspiradora, pasamanos para puentes, y aplicaciones arquitectónicas.

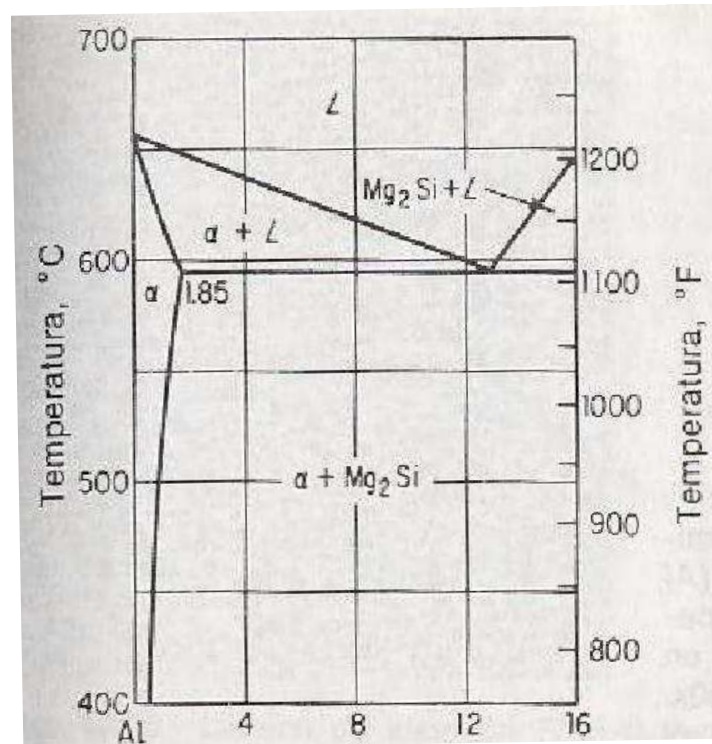


Figura 26. Diagrama de fase Aluminio – silicio de magnesio

[AVNER, S.; "INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA"; MCGRAW HILL; 1983; PÁG. 487]

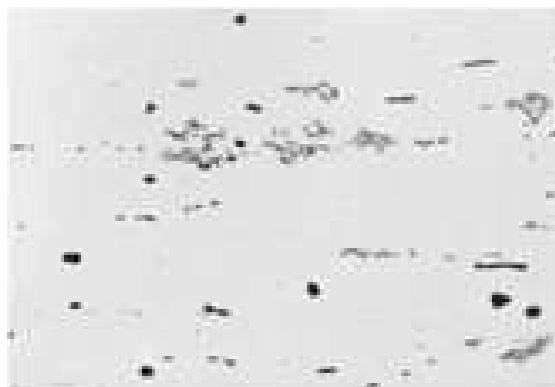


Figura 27. Aleación 6061 en forma de placa, laminada en caliente, sección longitudinal. Partículas (A) de Fe_2SiAl_2 (grises., tipo letra cursiva) y Mg_2Si (negras) (B) en una matriz de solución sólida rica en aluminio. Atacada químicamente en HF al 0.5%, 250x

[METALS HANDBOOK, VOL. 9; "METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES"; ASM; 1992; PÁG. 748]

Las aleaciones de fundición aluminio-silicio-magnesio 355, 356 y 360 proporcionan una deseable combinación de capacidad de fundido, aguante a fugas de presión, resistencia en general y resistencia a la corrosión. En la condición de tratamiento térmico, sus propiedades mecánicas se aproximan a las de las aleaciones aluminio-cobre. Se usan ampliamente con fines

aeronáuticos, en piezas para máquina-herramienta y en piezas fundidas para propósitos generales.

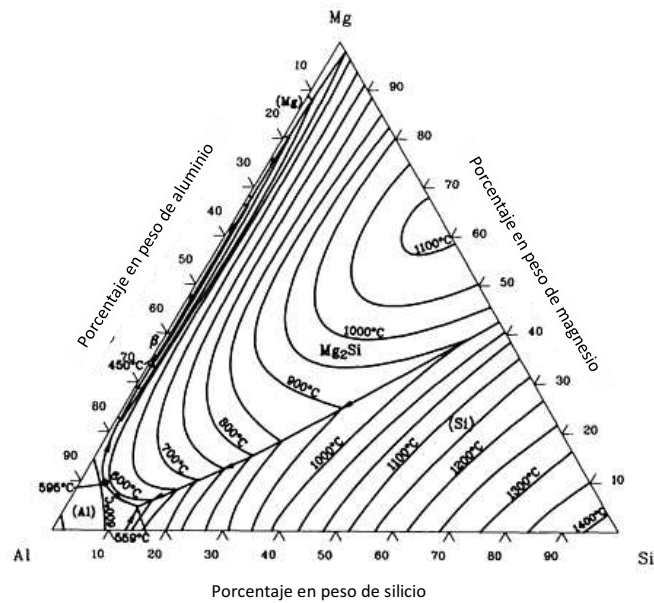


Figura 28. Diagrama de fase ternario Aluminio – silicio – magnesio.

[METALS HANDBOOK, VOL. 3; "ALLOY PHASE DIAGRAMS"; ASM; 1992; PÁG. 1537]

CAPITULO III

DISEÑO DE LAS PIEZAS A PRODUCIR

3.1. ANÁLISIS DE LAS PIEZAS A PRODUCIR

3.1.1. TIPO DE PIEZAS

Las piezas a producir corresponden a las antenas que toman energía eléctrica de los cables superiores que alimentan al trolebús, sistema de transporte que sirve a la ciudad de Quito.

3.1.1.1. Análisis Técnico

Las antenas que alimentan al sistema Trolebús, han sufrido de roturas entre los 30 y 50 cm de distancia de su base, debido principalmente al mal estado de las vías en la ciudad, que provoca el descarrilamiento de la antena de los cables de alimentación, golpeándose estas con los postes de alambrado eléctrico que se ubican en las aceras, haciendo necesaria su reparación, la que no dura mas allá de 2 meses. Se hace necesaria la fabricación de estas antenas en el país para evitar la importación de éstas, y el rápido fallo después de su reparación.

3.1.1.2. Análisis Socioeconómico

El cliente principal será la empresa TROLEBUS, la cual requiere de un stock de repuestos de antenas funcionales. Para la producción de este tipo de piezas se necesita un taller metalmecánico en donde se pueda trabajar con torno, suelda MIG o TIG y tenga la capacidad para fundir piezas de aluminio.

3.1.1.3. Análisis Funcional

Se visitó el área de mantenimiento en el Sistema Integrado Trolebús “El Recreo”, se conoció que durante el diseño de la antena el diámetro exterior de la antena en su base no debía sobrepasar los 65 mm para poder embonar adecuadamente y la antena en peso no debía ser mayor a un 30% más del peso original de la antena, para evitar la desestabilización de unos muelles ancla que al ser cerámicos no soportarían un esfuerzo excesivo al prescrito anteriormente.

3.2. SELECCIÓN DE LA ALEACIÓN DE LAS PIEZAS

En la elección de la aleación de aluminio más adecuada para fines determinados, el ingeniero debe considerar el método de moldeo más conveniente para cada pieza, si puede someterla o no a mejoramiento y cuáles son sus características.

Desde el punto de vista de la resistencia mecánica, es evidente que los compuestos de aluminio que pueden ofrecer la mayor resistencia a la rotura son las aleaciones. Entre éstas, las que ofrecen mejores características de resistencia, especialmente al desgaste, son las aleaciones de cobre; siguen las aleaciones al magnesio (7-10%), al silicio-magnesio y al zinc-magnesio; el segundo grupo y el cuarto presentan además una elevada tenacidad.

Sobre la resistencia en caliente, las aleaciones de mejor comportamiento son las que contienen cobre, níquel y hierro; siguen las de gran contenido de magnesio y de silicio y, por último las aleaciones de zinc.

Desde el punto de vista de la colabilidad y ausencia de fragilidad de contracción, se observa que estas cualidades, en comparación con el aluminio purísimo, disminuyen primero con la presencia del aleante y luego aumentan superando casi la proporción correspondiente al máximo intervalo de solidificación; entre las diversas aleaciones, el complejo de las aleaciones aluminio-silicio con fuerte contenido de silicio es el que mejor se comporta.

Pasando a la mecanización, las más mecanizables son las que dan una viruta quebradiza y ofrecen escasa resistencia mecánica; desde este punto de vista las aleaciones de cobre-aluminio son las mejores. Las aleaciones aluminio-silicio, por la conocida presencia de cristales de silicio durísimo, que causan la rotura del filo cortante, presentan un comportamiento opuesto, así que no son aconsejables en el caso de preparación de piezas de forma compleja que requieran una prolongada mecanización.

Para la resistencia a la presión, en cambio, las aleaciones de aluminio-silicio son las mejores: las menos adecuadas son las aleaciones con gran contenido de magnesio.

G-AL SI 13 CU MG	si	si	si	si	-	Cp	22	1,5	60	1	p	2	3	5	3	3	para piezas de paredes delgadas
						Ca	17	2	50								Para usos generales y específicamente
						Cc	18	3	50								para piezas delgadas y sometidas a
G-AL SI 12 MN MG	si	si	-	-	si	Cp	22	1,5	60	1	p	2	3	5	3	2	esfuerzos medianos
						CaTA	22	-	80								Para usos generales y en particular para
						CcTA	24	-	80								piezas de paredes delgadas y sometidas a
G-AL SI 10 CU MG NI	si	si	-	-	si	CaTA	23	0,5	100	1	p	2	3	3	3	3	esfuerzos
						CcTA	25	0,3	95								Para elementos que trabajen en caliente y con poca dilatación
G-AL SI 9 MN MG	si	si	-	-	si	CaTA	22	2	80	1	p	2	1	3	3	3	
						CcTA	25	3,5	80								Para usos Generales
G-AL SI 5,5 CU	-	si	si	si	-	Cc	17	3	50	2	p	2	5	3	2	5	
G-AL SI 5 CU MG	si	si	-	(si)	si	Cp	20	1,5	55	2	p	2	3	2	2	2	
						CaTA	20	0,5	70								Para usos generales y en particular para cilindros de motores y cuerpos de bomba
G-AL SI 4,5 MN MG	si	si	si	(si)	si	CaTA	20	1	80	2	p	3	5	2	1	2	
						CcTA	25	1	90								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión
G-AL SI 2 MN MG	si	si	-	-	si	Cp	18	1,5	55	3	m	3	5	1	1	1	
						CaTA	22	1	80								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión y sometidas a esfuerzo
						CcTA	25	1	90								
Aleaciones Al-Mg																	
G-AL MG 10	si	si	si	si	(si)	Ca	16	1	65	4	p	4	1	1	1	1	
						CaTN	25	6,5	75								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión y sometidas a fuertes esfuerzos
						Cc	22	6	70								
G-AL MG 7	si	si	si	si	(si)	Cp	20	1,5	70	4	p	3	3	1	1	1	
						CaTN	18	3,5	70								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión y sometidas a fuertes esfuerzos
						CcTN	26	5	70								
G-AL MG 5	si	si	-	si	-	Cp	20	1,5	60	3	m	3	4	2	2	1	
						Ca	16	3	55								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión y sometidas a esfuerzos medianos
						Cc	20	8	60								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión y sometidas a esfuerzos medianos
G-AL MG 3	si	si	-	si	-	Ca	13	5	40	3	m	3	4	2	2	1	
						Cc	15	6	45								Para usos generales y específicamente para elementos que soporten la corrosión

p=pequeño; m=media; 1=buen comportamiento; 2=comportamiento suficiente; 3=comportamiento mediocre; 4=comportamiento deficiente; 5=mal comportamiento; Ca=colado en arena; Cc=colado en coquilla; Cp=colado a presión; T=templado; N=envejecido naturalmente; A=envejecido artificialmente; E=estabilizado

Tabla 3.2.2 Composición en peso de algunas aleaciones de aluminio fundido según ASTM.

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Pb	Ti	Otros Total
356.1	6.50-7.50	0.50	0.2-5	0.35	0.25-0.45	-	-	0.35	-	0.05	0.25	0.15
A360	9.00-10.00	1.30	0.6	0.35	0.40-0.60	-	0.50	0.5	0.15	-	-	0.25
A360.1	9.00-10.00	1.00	0.6	0.35	0.40-0.60	-	0.50	0.4	0.15	-	-	0.25
713	0.25	0.80	40-1.0	0.60	0.25-0.50	0.35	0.15	7.0-8.0	-	-	0.25	0.25
319.1	5.50-6.50	1.00	3.0-4.0	0.50	0.10	-	0.35	1.00	-	-	0.25	0.50
A380.0	7.50-9.50	1.30	3.0-4.0	0.50	0.10	-	0.50	3.00	0.35	-	-	0.50
A380.1	7.50-9.50	1.00	3.0-4.0	0.50	0.10	-	0.50	2.90	0.35	-	-	0.50
383	9.50-11.50	1.30	2.0-3.0	0.50	0.10	-	0.30	3.00	0.15	-	-	0.50
384.1	10.50-12.0	1.00	3.0-4.0	0.50	0.10	-	0.50	2.90	0.35	-	-	0.50
390	16.0-18.00	0.60-1.0	4.0-5.0	0.10	50-.65	-	-	0.10	-	-	0.20	0.20
332.1	8.5-10.50	0.90	2.0-4.0	0.50	60-1.50	-	0.50	1.00	-	-	0.25	0.50
808	7.0-8.50	0.80	1.0-2.0	0.20-0.50	0.40-0.60	-	-	1.50	-	-	-	0.50

[CUSTOM ALLOY SCRAP SALES, INC.; [HTTP://CUSTOMALLOY.COM/IS_CONTENT_SPANISH.HTML](http://CUSTOMALLOY.COM/IS_CONTENT_SPANISH.HTML)]

De este modo, para nuestro caso en particular se usará una aleación Aluminio-Silicio o Aluminio-Cobre, debido a que la antena consta de una sección circular con un espesor en promedio de 5 a 6 mm, considerada con una pared delgada, por la que debe correr material, además de las sollicitaciones mecánicas a las que va a estar sometida la antena en su funcionamiento, por ello debe ser capaz de soportar esfuerzos mecánicos de fatiga e impacto.

3.3. REDISEÑO DE LAS PIEZAS.

3.3.1. PARTES ORIGINALES

Las antenas originales están conformadas por tres partes principales, las cuales son, una parte cilíndrica, una parte cónica y un refuerzo agregado a la zona de ruptura.

Según las siguientes ilustraciones:

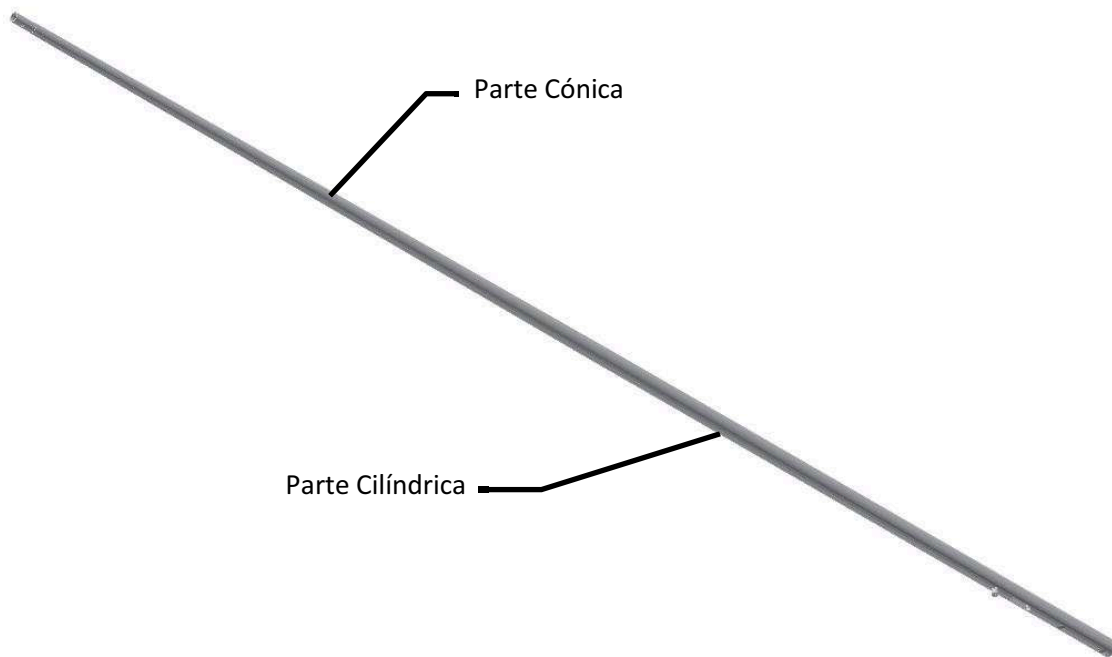


Figura 29. Partes de antena original.

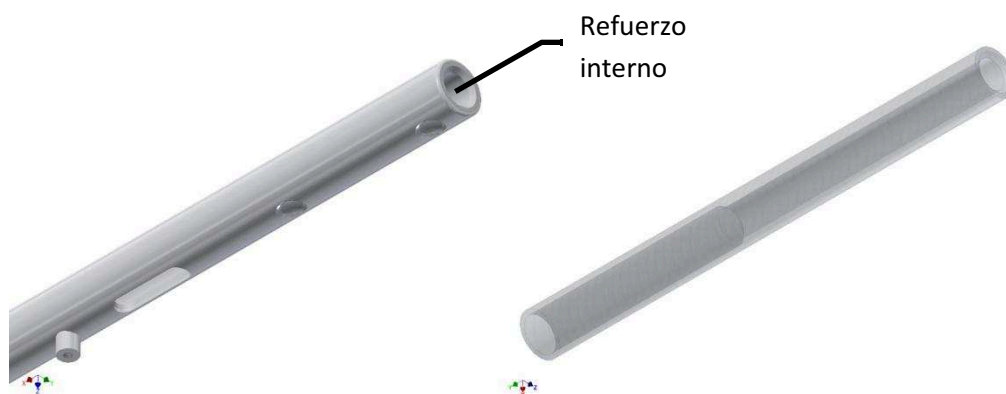


Figura 30. Base de antena original con refuerzo.

3.3.2. CRITERIO DE FABRICACIÓN

El método elegido para fabricar las antenas es por fundición en arena verde, por lo cual es necesario pensar en la manera de producir dichas piezas con los limitantes que este proceso presenta y la forma misma de las piezas.

Los principales limitantes que se encontraron son:

- Zona de ruptura cercana a la base ≈ 400 mm
- Longitud total de la antena = 5300 mm
- Espesor mínimo = 6 mm

- Peso máximo = 16 kg
- Tipo de aleación = Aluminio 98%, 0.6% Si, 0.6% Mg, o con propiedades mecánicas similares.

Además las antenas deben cumplir con propiedades como, resistencia al impacto, buena conductividad eléctrica y la aleación fundida debe tener buena colabilidad.

Debido a que el proceso de fabricación de la antena original es por extrusión, esta tiene un espesor mínimo de 3,5 a 4 milímetros, lo cual no es muy adecuado al momento de su fabricación por fundición en molde de arena, pues se corre el riesgo de que la colada no fluya y se tenga muchos defectos de fundición. Por este motivo se optó por aumentar el espesor entre 5 y 6 milímetros.

En cuanto a la gran longitud de las piezas, se llegó a la decisión de dividir las partes más cortas para hacer más sencillas las etapas de modelaje y de moldeo.

En primer lugar se han generado modelos virtuales en computadora para después evaluar los pros y contras de cada alternativa.

3.3.3. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE ESFUERZOS

Para poder tener una idea más acertada de lo que sucede con la antena cuando esta sometida a esfuerzos de impacto, los mismos que se generan al chocar entre si o contra postes de alumbrado eléctrico se han generado simulaciones en computadora. Estas simulaciones son útiles también para calcular esfuerzos internos y como estos disminuirían al aplicar los criterios básicos de rediseño.

3.3.3.1. Antena original

Los parámetros de simulación establecidos son:

Masa total incluido el refuerzo (en función de una aleación 6061) = 11.9 kg

Espesor mínimo = 3.5 – 4 mm

Fuerza horizontal (flecha amarilla) = 100 N

Peso con una gravedad de $9,8 \text{ m/s}^2$ (flecha verde) = 98.66 N

La antena esta anclada en la base de manera similar a como se fija a la carrocería del Trolebús en la realidad.

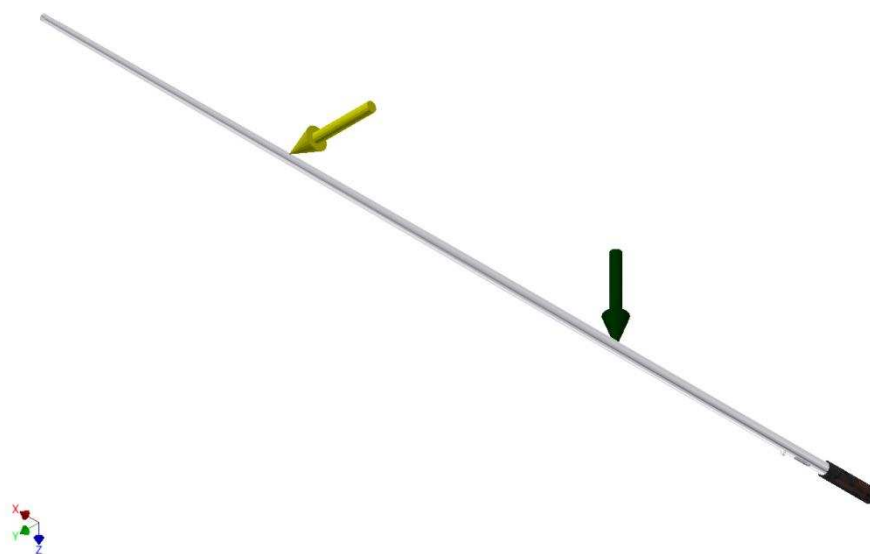


Figura 31. Parámetros de simulación en antena original.

Se presenta las siguientes tablas de resultados de reacciones y momentos en la base en donde la antena se fija y esfuerzos generales a lo largo de la pieza:

Tabla 3.3.3.1.1 Reacciones en la base de antena original.

Nombre de la restricción	Reacción		Momento	
	Magnitud	Componente (X,Y,Z)	Magnitud	Componente (X,Y,Z)
Restricción 1	179,554 N	0 N	323,206 N m	-1,86053 N m
		-100 N		148,774 N m
		-149,129 N		-286,923 N m

Tabla 3.3.3.1.2 Sumario de resultados antena original.

Nombre	Mínimum	Máximum
Volumen	4394453 mm ³	
Masa	11,909 kg	
Von Mises Stress	0,000000000403017 MPa	43,4221 MPa
1st Principal Stress	-3,19977 MPa	41,5261 MPa
3rd Principal Stress	-43,4689 MPa	2,68004 MPa
Displacement	0 mm	128,459 mm
Safety Factor	6,33318 ul	15 ul
Stress XX	-43,3945 MPa	41,5069 MPa
Stress XY	-7,59169 MPa	6,44179 MPa
Stress XZ	-9,27078 MPa	6,07891 MPa
Stress YY	-8,31387 MPa	9,00623 MPa
Stress YZ	-4,04762 MPa	3,98476 MPa
Stress ZZ	-6,49294 MPa	6,84532 MPa
X Displacement	-0,911099 mm	0,937506 mm

Y Displacement	-0,000387495 mm	114,292 mm
Z Displacement	-0,000271924 mm	58,642 mm
Equivalent Strain	0,0000000000000001832 ul	0,000567911 ul
1st Principal Strain	-0,0000000000323204 ul	0,000605737 ul
3rd Principal Strain	-0,000630429 ul	0,000000210451 ul
Strain XX	-0,000628992 ul	0,000605367 ul
Strain XY	-0,000146545 ul	0,000124348 ul
Strain XZ	-0,000178957 ul	0,000117343 ul
Strain YY	-0,000201587 ul	0,000206905 ul
Strain YZ	-0,0000781326 ul	0,0000769192 ul
Strain ZZ	-0,000203606 ul	0,000207333 ul
Contact Pressure	0 MPa	22,5431 MPa
Contact Pressure X	-22,4025 MPa	21,2628 MPa
Contact Pressure Y	-2,61097 MPa	3,10862 MPa
Contact Pressure Z	-2,8784 MPa	1,98498 MPa

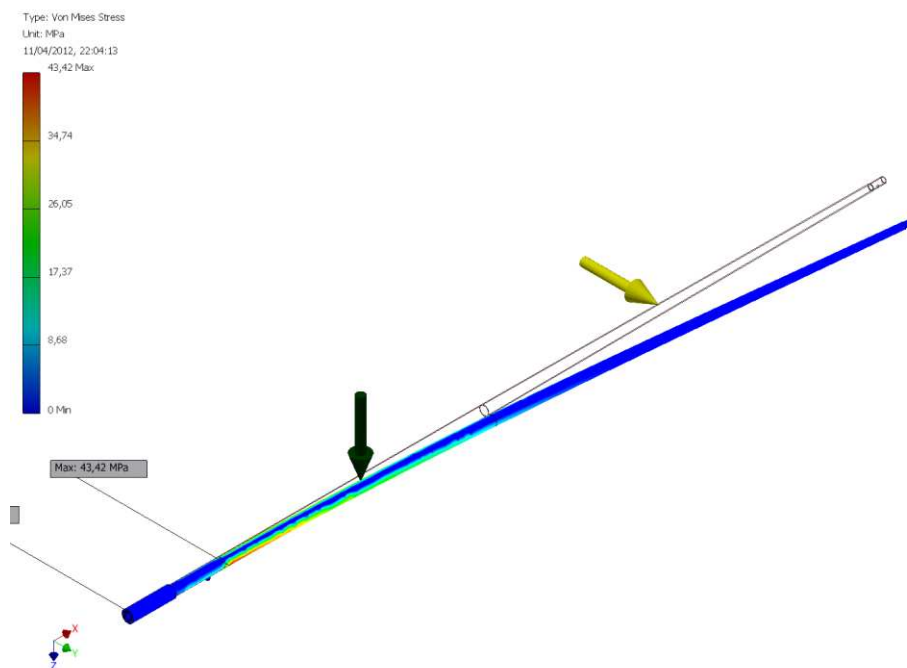


Figura 32. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena original.

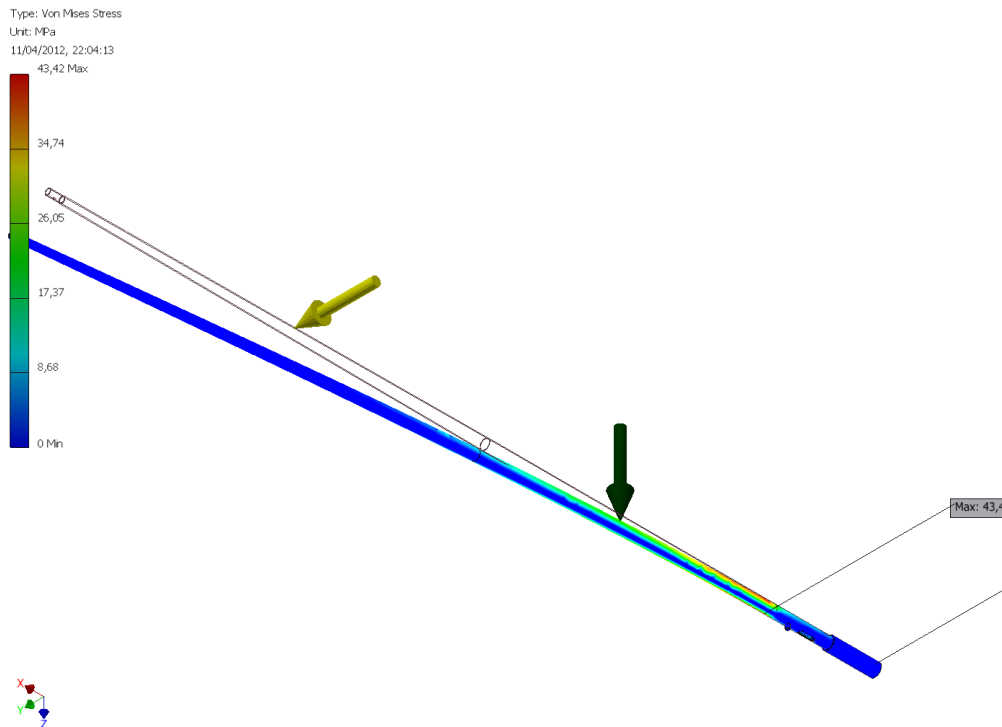


Figura 33. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena original.

3.3.3.2. Antena rediseñada

Los parámetros de simulación establecidos son:

Masa total incluido el refuerzo (en función de una aleación 6061) = 15.66 kg

Espesor mínimo = 6 mm

Fuerza horizontal (flecha amarilla) = 100 N

Peso con una gravedad de $9,8 \text{ m/s}^2$ (flecha verde) = 153.46 N

La antena esta anclada en la base de manera similar a como se fija a la carrocería del Trolebús en la realidad. (Restricción 1)

Se ha agregado el refuerzo en la base como un solo cuerpo y se han eliminado los concentradores de esfuerzos.

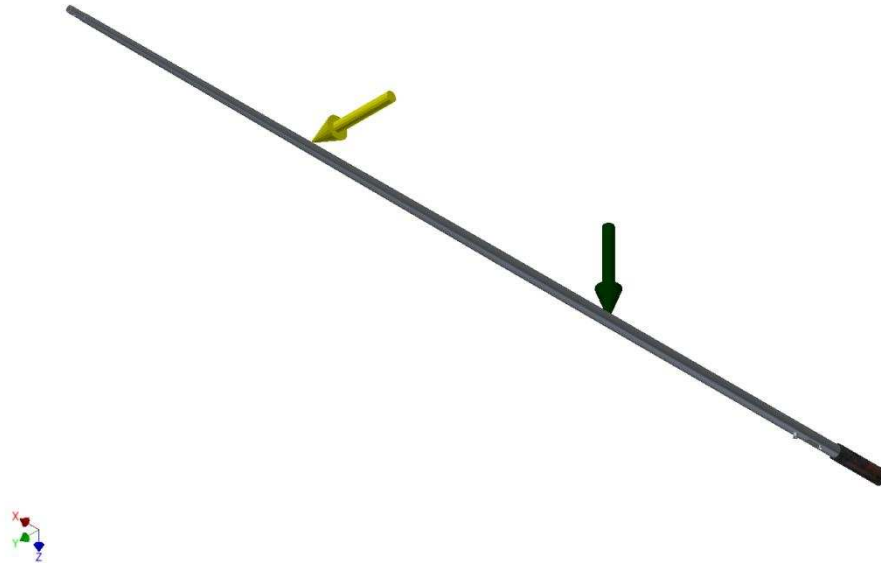


Figura 34. Parámetros de simulación en antena rediseñada.

Se obtuvieron los siguientes resultados a lo largo de la pieza:

Tabla 3.3.3.2.1 Reacciones en la base de antena rediseñada.

Nombre de la restricción	Reacción		Momento	
	Magnitud	Componente (X,Y,Z)	Magnitud	Componente (X,Y,Z)
Restricción 1	198,115 N	0 N	480,456 N m	0 N m
		-86,98 N		299,741 N m
		-178 N		-375,49 N m

Tabla 3.3.3.2.2 Sumario de resultados antena rediseñada.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	5778533 mm ³	
Masa	15,6595 kg	
Von Mises Stress	0,00000000402152 MPa	33,3299 MPa
1st Principal Stress	-8,27878 MPa	30,7965 MPa
3rd Principal Stress	-34,3138 MPa	7,53779 MPa
Displacement	0 mm	100,956 mm
Safety Factor	8,25086 ul	15 ul
Stress XX	-33,0965 MPa	30,7944 MPa
Stress XY	-10,729 MPa	7,89769 MPa
Stress XZ	-5,49132 MPa	6,80126 MPa
Stress YY	-31,5778 MPa	24,3806 MPa
Stress YZ	-9,52505 MPa	10,118 MPa
Stress ZZ	-12,6259 MPa	18,2628 MPa
X Displacement	-0,724515 mm	0,71658 mm
Y Displacement	-0,000548338 mm	82,7328 mm
Z Displacement	-0,000409476 mm	57,8562 mm
Equivalent Strain	0,000000000000182738 ul	0,000435375 ul
1st Principal Strain	-0,000000384786 ul	0,000446914 ul
3rd Principal Strain	-0,000481606 ul	0,00000132558 ul
Strain XX	-0,000481418 ul	0,000446874 ul

Strain XY	-0,000207106 ul	0,000152452 ul
Strain XZ	-0,000106001 ul	0,000131287 ul
Strain YY	-0,000381276 ul	0,000330064 ul
Strain YZ	-0,000183865 ul	0,000195311 ul
Strain ZZ	-0,000179419 ul	0,000179701 ul
Contact Pressure	0 MPa	11,4053 MPa
Contact Pressure X	-11,0149 MPa	5,34175 MPa
Contact Pressure Y	-2,45483 MPa	1,3375 MPa
Contact Pressure Z	-0,827911 MPa	1,65125 MPa

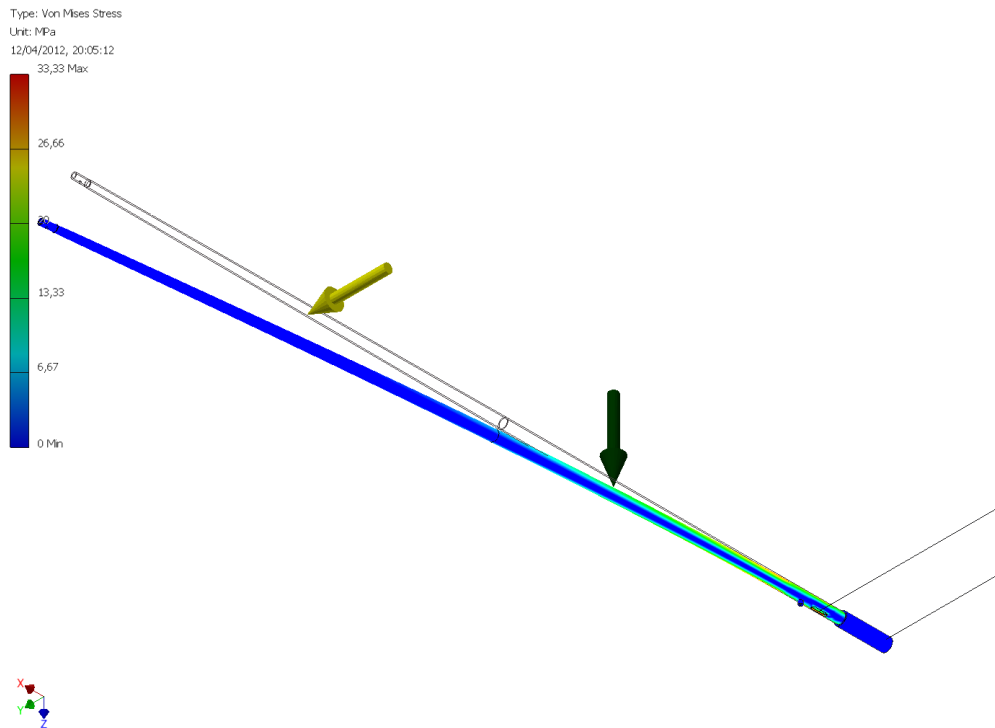


Figura 35. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.

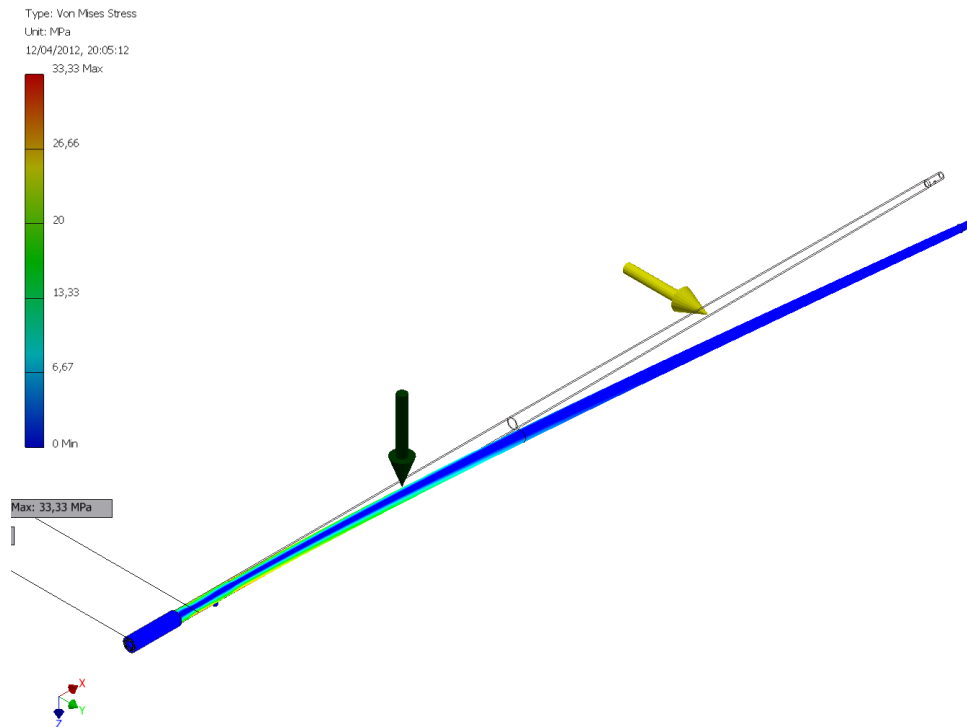


Figura 36. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.

3.3.3.3. Simulación de Impacto

Para entender de mejor manera como ocurre en fenómeno de rotura de las antenas se ha generado también una simulación de impacto teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

1. La aleación de la antena original tiene por designación 6061.
2. Choca con un poste de concreto a una distancia de aproximadamente 1m y llega con una velocidad final de 10 m/s.
3. La antena pivota en la base.

El modelo CAD queda de la siguiente manera:

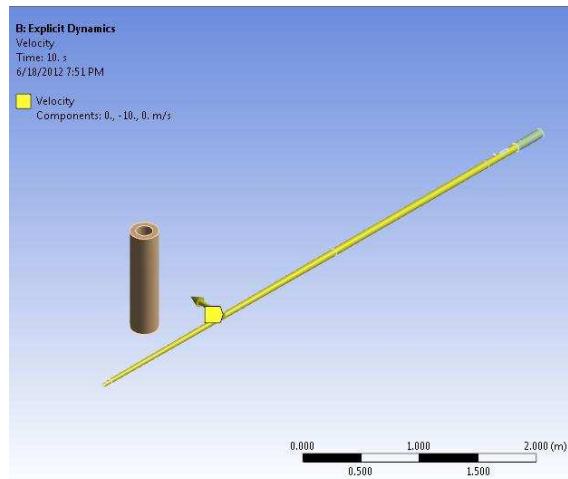


Figura 37. Modelo CAD para la simulación de impacto.

Una vez corrida la simulación nos devuelve los siguientes resultados:

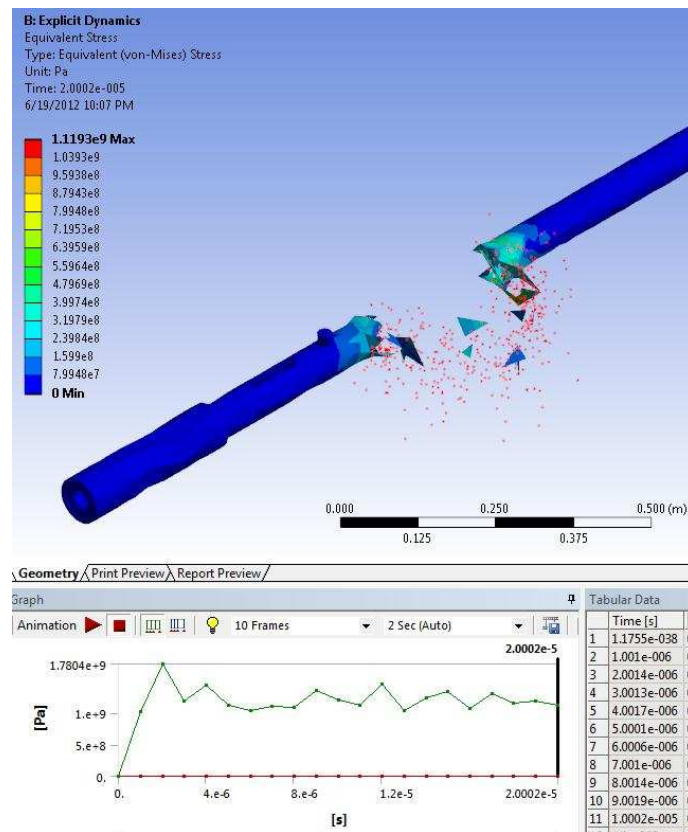


Figura 38. Resultados de la simulación de impacto antena original.

El esfuerzo máximo equivalente para fractura para este caso 112 MPa.

De igual manera se aplica el criterio de rediseño y se reemplaza con el nuevo modelo. Con el modelo CAD de la antena rediseñada se obtuvieron los siguientes resultados:

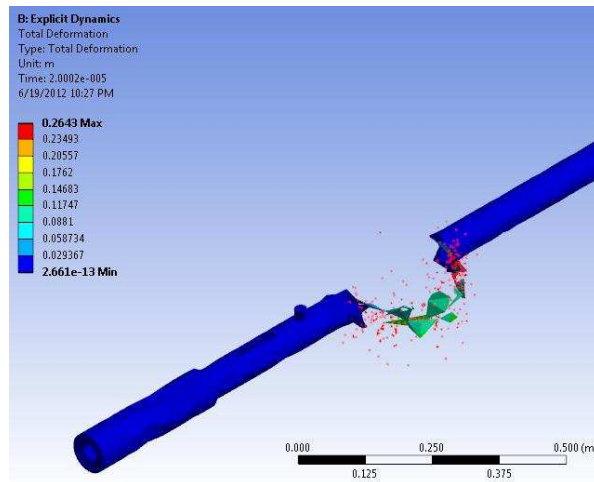


Figura 39. Deformación en zona de fractura de antena rediseñada.

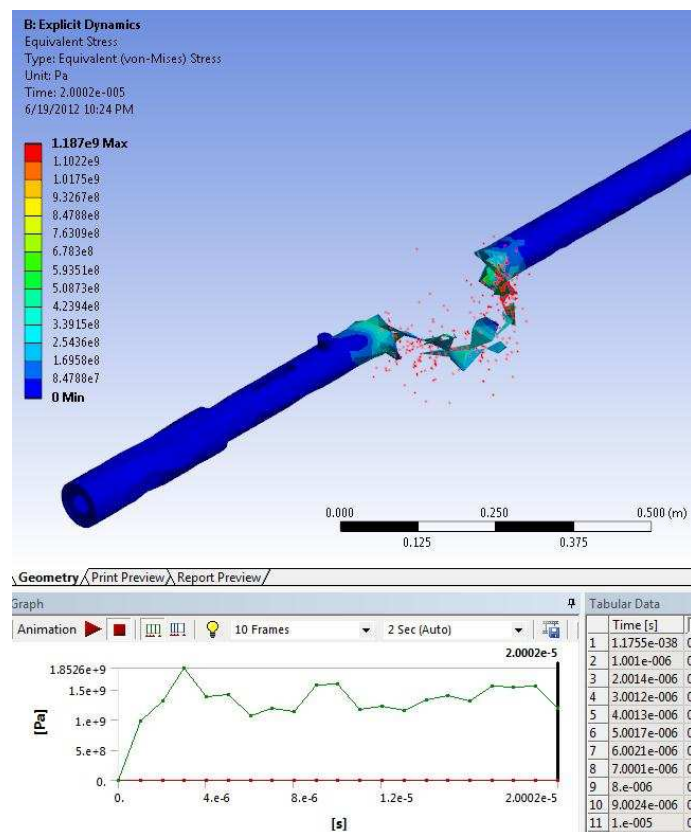


Figura 40. Resultados de la simulación de impacto de antena rediseñada.

El esfuerzo equivalente para la antena rediseñada bajo las mismas condiciones es de 119 MPa para fractura, lo que significa que con el nuevo diseño se requiere un 6.25% más esfuerzo para fracturarla, por lo se reafirma la validez del rediseño.

3.3.4. OPCIONES DE DISEÑO

Alternativa de Diseño	N° Secciones	Limitantes	Ventajas	Observaciones
1	3	Dificultad en la fabricación de los modelos, especialmente las de sección cónica	<p>-Requiere menor cantidad de uniones soldadas</p> <p>-Se controla mejor la uniformidad de la pieza fundida</p>	<p>Las longitudes de cada sección: 2 de 1760 mm y una de 1780 mm -El espesor mínimo de las paredes 6 mm esperando tener un peso de 16 kg en la pieza fundida</p>
		Mayor dificultad en la colabilidad y fluidez de la aleación por el molde, debido a la longitud de cada una de las secciones.		
		Se dificulta la fabricación de noyos de grandes longitudes.		
		Se hace mas difícil controlar el adecuado llenado del molde		
2	4	Requiere mas uniones soldadas	Se hace más fácil la fabricación de los modelos.	Las longitudes de cada sección: 2 de 1250 mm y 2 de 1400 mm
		Se excede el peso que puede soportar el muelle de soporte	La colada puede llenar todo el molde.	El espesor mínimo de las paredes 6 mm
			La fabricación de los noyos es mas fácil que con la alternativa anterior	
3	4	Requiere mas uniones soldadas	Se hace más fácil la fabricación de los modelos.	Las longitudes de cada sección: 2 de 1250 mm y 2 de 1400 mm
		Más difícil de colar debido a la disminución de espesor en las paredes de la pieza fundida	<p>La colada llena el molde teniendo un mayor control del colado durante la fundición.</p> <p>La fabricación de los noyos no se complica haciendo uso de almas de acero</p>	El espesor mínimo de las paredes 5 mm para obtener el peso adecuado de la antena

3.3.5. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN

- La concentración de esfuerzos coinciden con la zona de rotura presente en la realidad. El modelo es valido.
- La diferencia en diseño de las piezas presenta un aumento de masa de un 31.5%.
- La fuerza de reacción en la restricción en la base aumenta de 179.55 N a 198.115 N, es decir, un 10.3%.
- El momento en el acople de la base aumenta de 323.206 a 480.456 N m, un 48.6%.
- El esfuerzo máximo de Von Mises DISMINUYE de 43.4221 MPa a 33.3299 MPa, 23.24%.
- Los esfuerzos en general disminuyen en aproximadamente 10 MPa.
- Se selecciona la opción de diseño 3.

3.5. CARACTERÍSTICAS DE LA NUEVA PIEZA.

Después de todos los análisis, pruebas y simulación se consideran las siguientes características para la fabricación de las antenas:

3.5.1. MASA

No mayor a 14.6 kg, lo que se obtiene con una densidad de 2.71 g/cm^3 y con un espesor mínimo de 5 milímetros.

3.5.2. ESPESOR

Con el espesor establecido, se obtienen esfuerzos internos según la siguiente simulación:

Tabla 3.5.2.1 Reacciones en la base de antena rediseñada.

Nombre de la restricción	Reacción		Momento	
	Magnitud	Componente (X,Y,Z)	Magnitud	Componente (X,Y,Z)
Restricción 1	192,188 N	167,185 N	469,408 N m	375,314 N m
		-94,7922 N		281,921 N m
		0 N		-1,93573 N m

Tabla 3.5.2.2 Sumario de resultados antena rediseñada.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	5373768 mm ³	
Masa	14,563 kg	
Von Mises Stress	0,00000000041947 MPa	34,5268 MPa
1st Principal Stress	-3,27673 MPa	34,2802 MPa
3rd Principal Stress	-33,9367 MPa	3,00107 MPa
Displacement	0 mm	109,369 mm
Safety Factor	7,96482 ul	15 ul
Stress XX	-5,79381 MPa	5,20951 MPa
Stress XY	-2,25982 MPa	2,65302 MPa
Stress XZ	-5,39948 MPa	5,93629 MPa
Stress YY	-5,09977 MPa	4,64953 MPa
Stress YZ	-7,01245 MPa	5,51356 MPa
Stress ZZ	-33,9331 MPa	34,2564 MPa
X Displacement	-59,4889 mm	0,000573081 mm
Y Displacement	-0,000466718 mm	91,7737 mm
Z Displacement	-0,785358 mm	0,784781 mm
Equivalent Strain	0,00000000000000188274 ul	0,000451221 ul
1st Principal Strain	-0,000000232019 ul	0,000499889 ul
3rd Principal Strain	-0,000494993 ul	0,000000255791 ul
Strain XX	-0,000167789 ul	0,00016459 ul
Strain XY	-0,0000436221 ul	0,0000512121 ul
Strain XZ	-0,000104228 ul	0,00011459 ul
Strain YY	-0,000168158 ul	0,000165385 ul
Strain YZ	-0,000135364 ul	0,00010643 ul
Strain ZZ	-0,000494925 ul	0,00049943 ul
Contact Pressure	0 MPa	6,15341 MPa
Contact Pressure X	-1,88263 MPa	1,75351 MPa
Contact Pressure Y	-1,50267 MPa	1,7242 MPa
Contact Pressure Z	-6,05262 MPa	5,45762 MPa

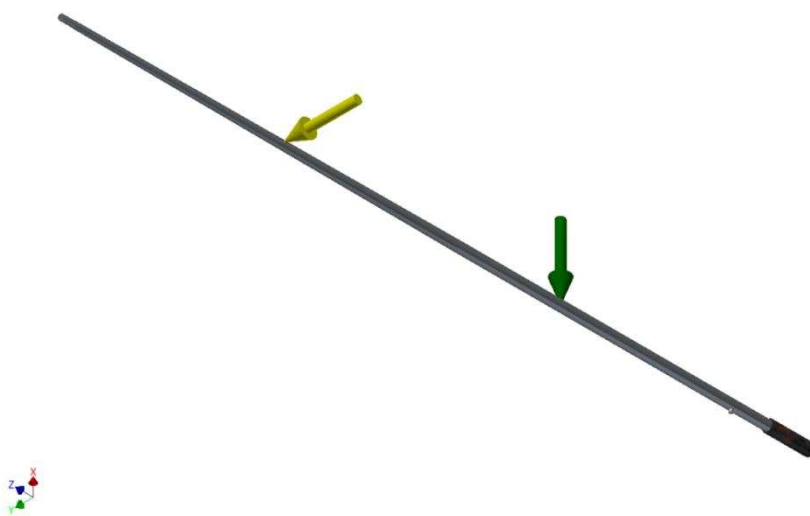


Figura 41. Parámetros de simulación en antena rediseñada.

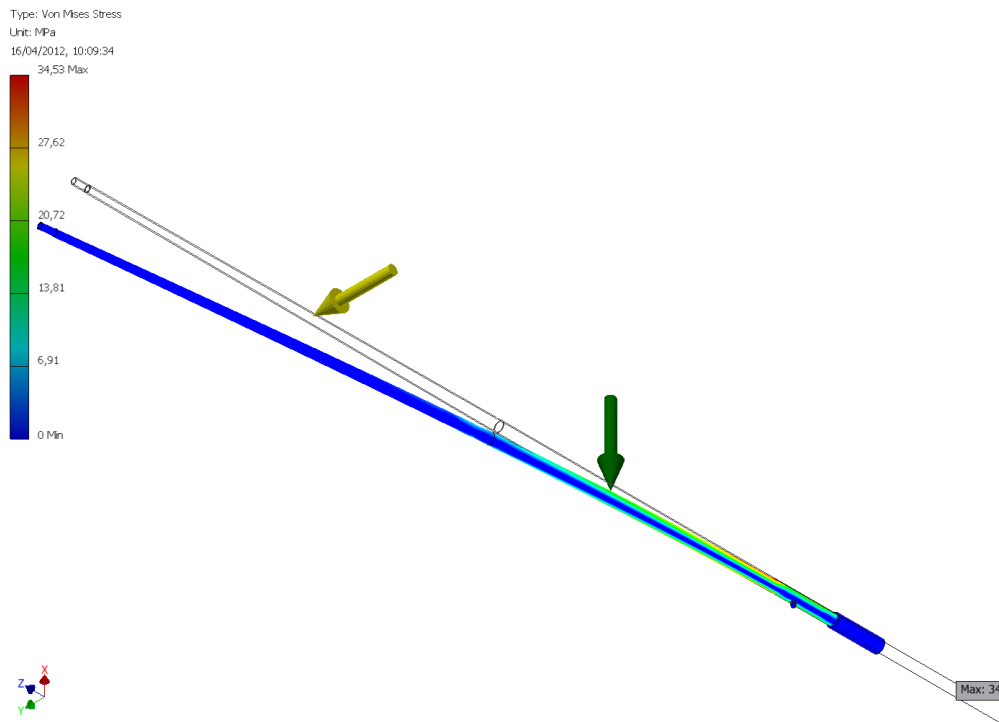


Figura 42. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.

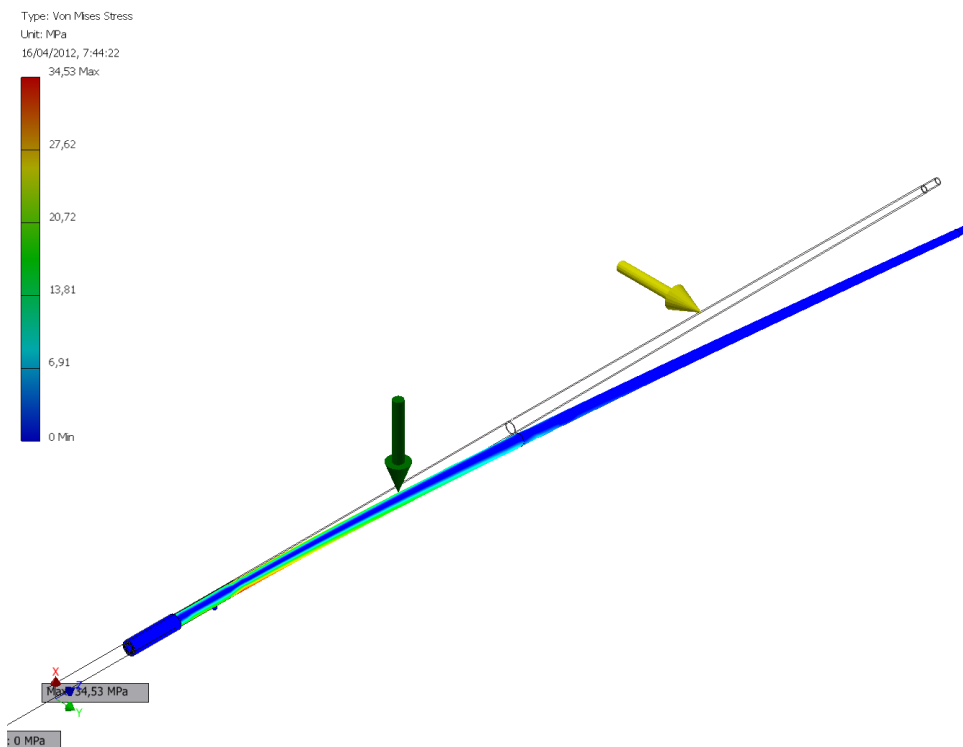


Figura 43. Esfuerzos de Von Mises presentes en antena rediseñada.

3.5.3. REFUERZO

La zona inferior de la antena se debe reforzar con un ensanchamiento gradual en su espesor. De esta manera se garantiza mayor resistencia a la fractura por impacto y un acople adecuado con el muelle de sujeción del trolebús.



Figura 44. Vista interna de Base reforzada.

3.5.4. ALEACIÓN

Los tipos de aleación seleccionados deben cumplir con características tales como buena resistencia al impacto, baja densidad, colabilidad al momento de su fundición. Se han encontrado dos tipos de aleación que cumplen con dichas características:

- 195 - 206 clasificadas como aleaciones aluminio-cobre

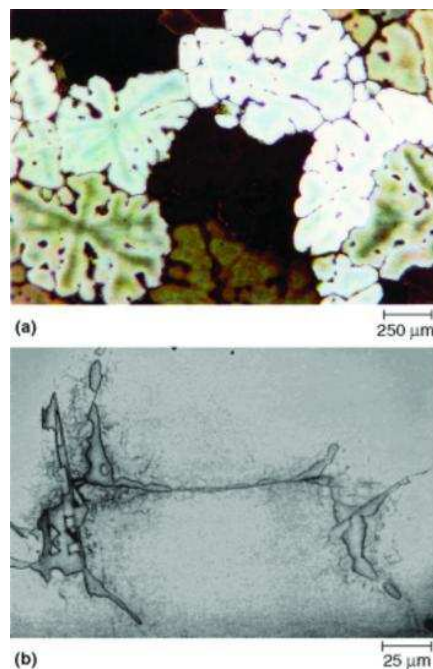


Figura 45. Aleación 201 (4,10% Cu) 56x.

[METALS HANDBOOK, VOL. 9; "METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES"; ASM; 2004; PÁG. 251]

- 356, aluminio-silicio-magnesio. En la condición de tratamiento térmico, sus propiedades mecánicas se aproximan a las de las aleaciones aluminio-cobre.

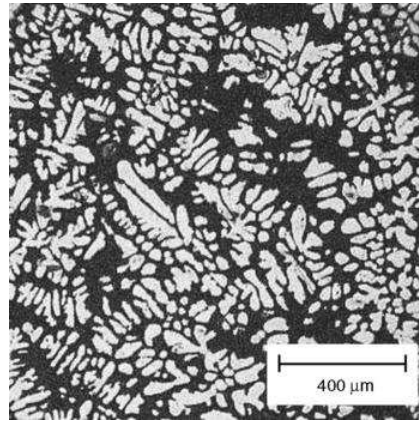


Figura 46. Dendritas típicas en una aleación A356. Atacado con reactivo Poulton modificado (60% HCl, 30% HNO₃, 5% HF, 5% H₂O).

[METALS HANDBOOK, VOL. 9; "METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES"; ASM; 2004; PÁG. 265]

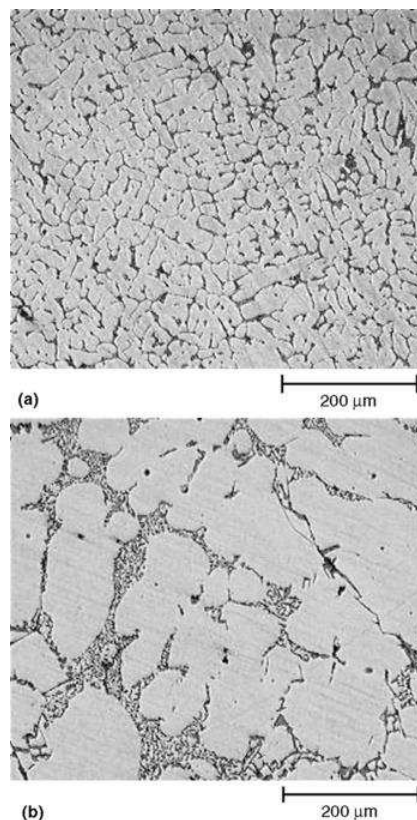


Figura 47. Microestructuras de aleación A356 solidificadas a diferentes velocidades de enfriamiento. (a) Fundición en coquilla. (b) Fundición en arena verde. Atacadas químicamente con Keller.

[METALS HANDBOOK, VOL. 9; "METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES"; ASM; 2004; PÁG. 268]

3.5.5. CONCENTRADORES DE ESFUERZOS

Para disminuir el riesgo de fractura, sobretodo en la zona que acumula la mayor magnitud de esfuerzos internos, se debe suavizar el cambio de secciones con chaflanes a 45°.

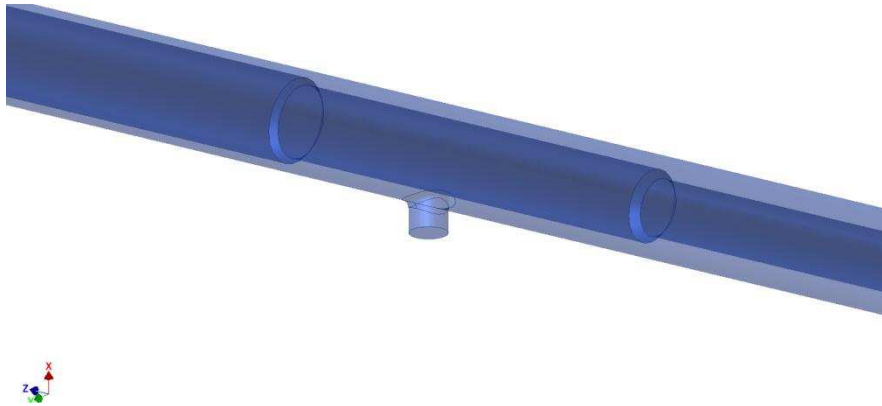


Figura 48. Eliminación de concentradores de esfuerzos.

3.5.6. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS

- **Tabla 3.5.6.** Características de la nueva pieza.

MASA MÁX. [kg]	ESPESOR [mm]		REFUERZO	ALEACIÓN	CONCENTRADORES DE ESFUERZOS	
	MÍN.	MÁX.			Chaflán	45°
14.6	5	15	si	195 ó 356	Filete	Radio 5 mm

CAPITULO IV

CÁLCULO DEL MODELO, MOLDE Y SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

4.1. DISEÑO DEL MODELO

Para obtener el molde hay que emplear un modelo, que por regla general, es una fiel reproducción de la pieza (modelo natural). Este modelo es diseñado teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: contracción, facilidad de desmoldado y la funcionalidad o congruencia.

4.1.1. FACILIDAD DE DESMODELADO

Fabricado el molde, esto es, rodeado el modelo de los materiales de moldeo, hay que abrirlo, para lo cual se realizarán los moldes en dos partes separables por las correspondientes superficies de contacto, que se llaman superficie de desmoldado o de separación.

Una vez abierto, se extrae el modelo para retocar el molde y llenarlo después de metal líquido. Por lo tanto, el modelo debe ser de fácil extracción.

Fijada la dirección de abertura del molde y de extracción del modelo, debe procurarse que este último tenga las caras paralelas al plano de separación del molde gradualmente decrecientes hacia el interior, es decir, que sus lados sean ligeramente cónicos, para evitar que al ser extraído arrastré consigo el material del molde.

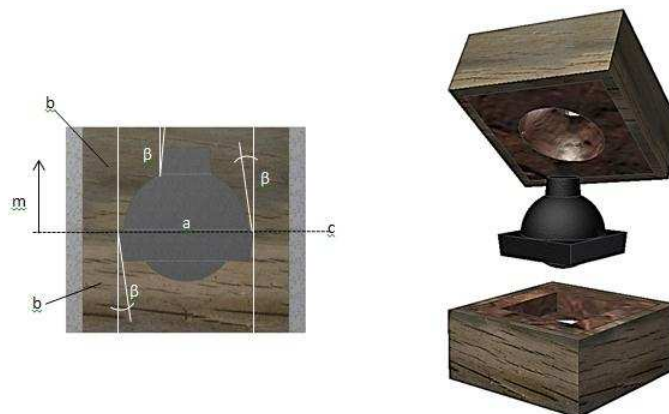


Figura 49. a es el modelo; m es la dirección de desmoldado; b son las dos tapas del molde; c es el plano de separación en la sección máxima del modelo; β es el ángulo de salida en las paredes verticales del modelo.

Está claro que, desde este punto de vista, no todas las piezas pueden realizarse en la fundición sin modificar su estructura. Una sección rectangular, por ejemplo, deberá hacerse trapecial; una cilíndrica, cónica, etc.

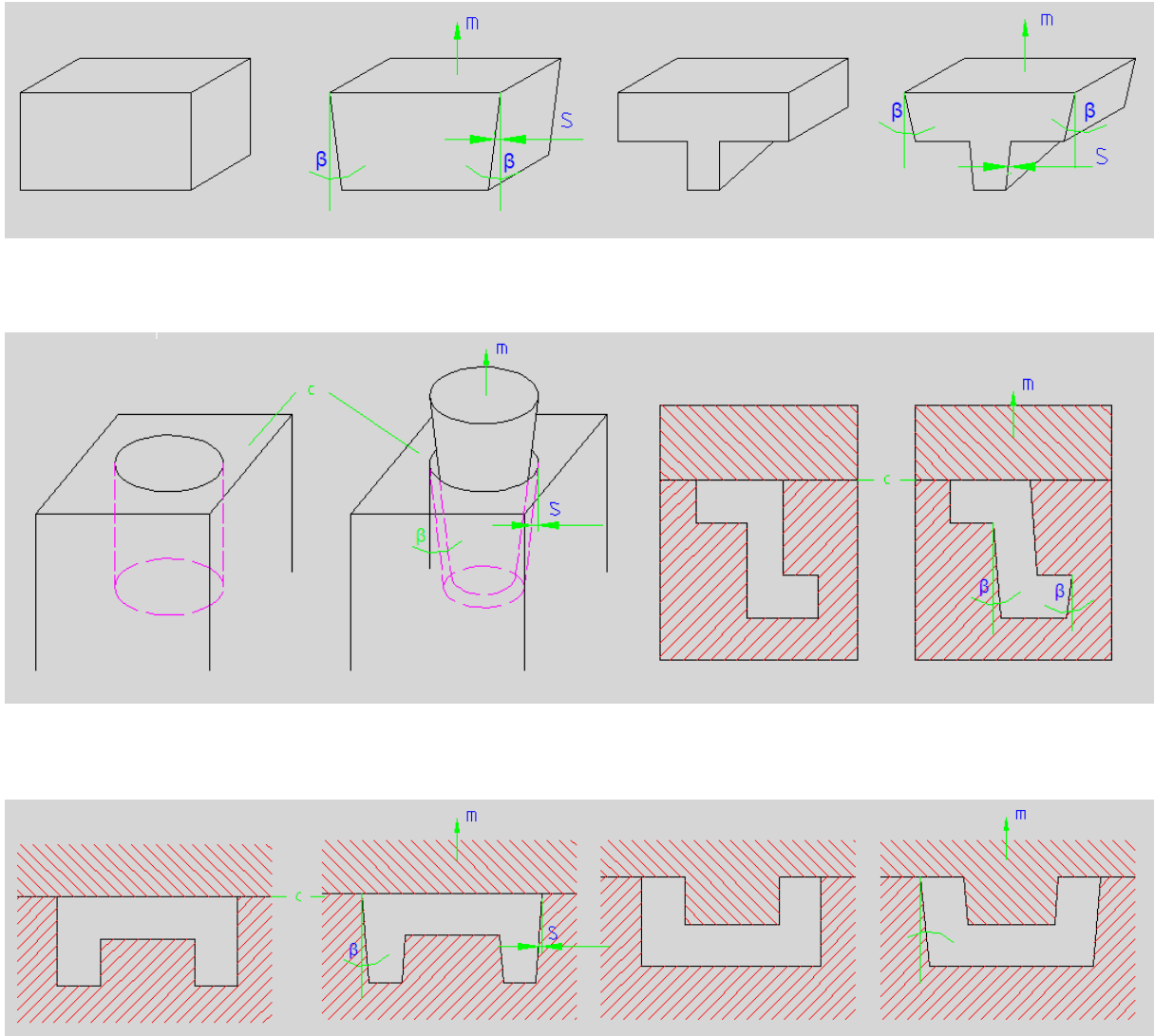


Figura 50. Modificación de las formas geométricas para dar ángulo de salida para la extracción de las piezas.

El diseñador deben tener en cuenta esta circunstancia y establecer en sus diseños el ángulo de salida conveniente para evitar que el modelista lo establezca por su cuenta alterando el moldé o las dimensiones de la pieza en dirección o en cantidad, inadecuadas a las exigencias del proyecto.

En las tablas de referencias bibliográficas como Capello² están indicados los valores de la salida s en milímetros o en tanto por ciento y los ángulos de salida β aconsejables.

4.1.2. CONTRACCIÓN

Cuando el metal líquido penetra en el molde comienza a enfriarse y se solidifica. Ya es sabido que el aumento de la temperatura dilata los cuerpos, y que con el enfriamiento los contrae. El metal, por lo tanto, al reproducir la forma del molde en el cual ha sido colado tendrá unas dimensiones algo menores.

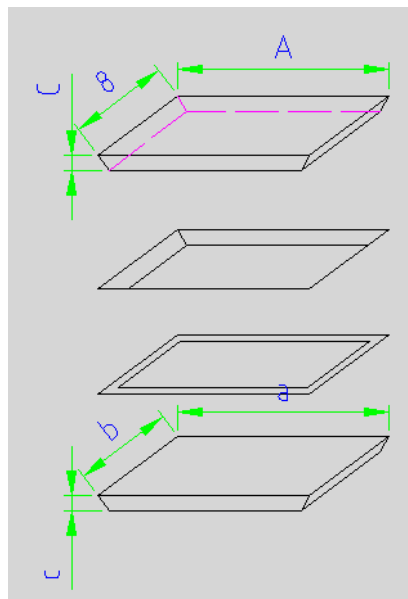


Figura 51. Significado de la contracción. Un modelo de dimensiones A, B, C deja en la arena una hulla o un hueco de iguales dimensiones que el metal rellenará; pero al enfriarse, por ejemplo el efecto de la concentración asumirá las dimensiones a, b, c menores.

En la práctica las contracciones varían bastante para un mismo metal, según las piezas, porque dependen también de la configuración de las mismas, del material de los moldes, de la operación de colado. No es siempre fácil prever la contracción. En la práctica, el diseño de construcción señala siempre el tamaño final de la pieza.

² CAPELLO, E; "TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN"; G. GILI; 1971; PÁG. 11

4.1.3. FUNCIONALIDAD O CONGRUENCIA

Los modelos deben construirse de modo que la pieza resultante de la colada se adapte al mecanizado y al uso para el que está destinada; han de ser por consiguiente funcionales o congruentes y resultar:

- a. **Prácticos:** Los modelos deben barnizarse con coloraciones diversas según la clase de metal que se emplee en la colada. Esto evitará errores y será una indicación de mucha utilidad para la fundición.
- b. **Precisos:** Si se requiere conseguir piezas de precisión, es indispensable que los modelos sean igualmente exactos, y que conserven esta cualidad mientras estén en uso e incluso durante su almacenamiento.
- c. **Duraderos:** Los criterios de proyección y de construcción de un modelo son distintos según haya de servir para una sola pieza, para algunas decenas o para mayor número de piezas. Las propiedades de exactitud y de duración son las que determinan el tipo constructivo y el material que ha de emplearse.
- d. **Útiles:** Los modelos deben ser adecuados a los mecanizados y el uso que habrán de darse a las piezas. Si una pieza se va a usar en bruto, es decir, tal como queda después de desbarbada y limpiada, el modelo no precisa una preparación especial. Pero, si la pieza ha de ser mecanizada en una o más superficies, debe darse al modelo un espesor suplementario o de mecanizado, que suele ser entre 3 y 8 mm. Para obtener los mejores resultados es indispensable una estrecha colaboración entre el diseñador, el modelista y el fundidor.

4.1.4. DETALLE DE VALORES USADOS PARA CADA UNO DE LOS MODELOS

Al tener preparado el molde es necesario abrirlo en dos partes para poder extraer el modelo, para lo cual es necesario que tenga en todas sus caras normales a la línea de partición, una inclinación que permita su extracción, sin que el modelo arrastre arena consigo, la facilidad para este caso se presenta en una forma circular que facilita el moldeo del modelo haciendo innecesario el uso de ángulo para el área longitudinal del modelo, mientras que para el área transversa, donde se alojan las portadas de los noyos es menester usar un

ángulos de salida de entre 7 y 15° de acuerdo Capello² y teniendo en cuenta el diámetro de las portadas.

Para obtener piezas con medidas determinadas, el modelo debe tener medidas mayores considerando el fenómeno de contracción, ya que en nuestro caso no se necesita maquinar la pieza después de la fundición, no se considerará una medida incluso mayor; debido a esto se ha seleccionado una contracción de 13 mm por metro de longitud, que es un valor utilizado para piezas medianas en aleaciones de aluminio.

En la tabla siguiente se resume los valores tomados para este caso:

Tabla 4.1.4. Valores seleccionados para el moldeo de modelos.

Nº Modelo	Forma	s			Ángulo de salida β	Contracción 0/00 o mm/m	Color Superficie	Color Portadas	Esquema
		mm		%					
		Lado I	Lado D						
1	Cilíndrica	3,1	3,1	<0,8	8	Verde	Negro		
2	Cilíndrica	3,75	3,75	<0,8	8				
3	Cónica	3,37	2,49	<0,8	7				
4	Cónica	3,56	2,59	<0,8	10				

Se adjunta en el Anexo 1 los planos correspondientes a cada uno de los modelos con las medidas y formas antes prescritas.

4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación consta de 3 elementos principales que son el tragadero, el escoriador y los alimentadores.

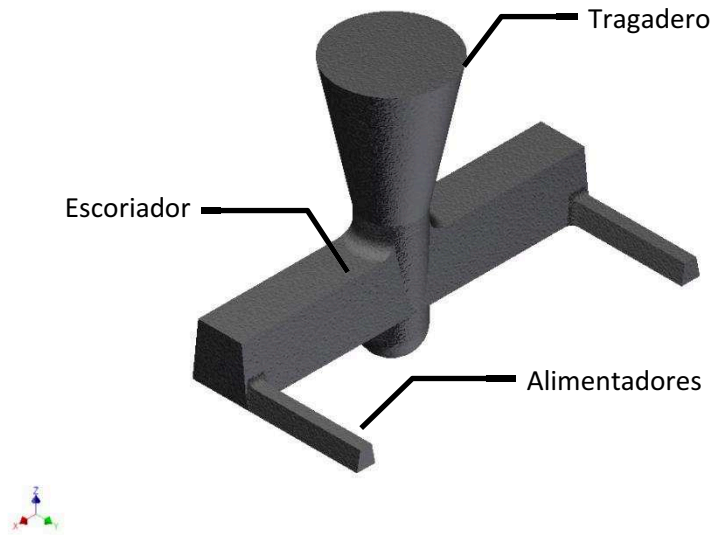


Figura 52. Esquema del sistema de alimentación.

Para realizar una simulación de elementos finitos, es necesario primero realizar un modelo de la pieza en algún formato CAD, por lo general se utiliza el formato IGES. Para esto se necesitan determinar las dimensiones generales del sistema de alimentación.

4.2.1. Método de cálculo

Para cada una de las partes de la antena a ser fabricada, se sigue el siguiente método.

- ✓ En primer lugar seguir los siguientes pasos en orden inverso:
 1. Debemos determinar la sumatoria de las áreas transversales de los alimentadores, cualquiera sea su número, con la siguiente fórmula:

$$\sum Fa = \frac{G}{Tv \cdot K}$$

Donde,

G es la masa de la pieza [kg]

Tv es el tiempo de vertido [s]

K es la velocidad específica del vertido [kg/ (cm²·s)]

2. Tv se calcula según la siguiente fórmula:

$$Tv = S\sqrt{G}$$

Donde,

S es un coeficiente que depende del espesor de la pieza según la siguiente tabla para aluminio:

Tabla 4.2.1.a. Coeficiente S en dependencia del espesor de la pared de la pieza.

Espesor medio de las paredes de la pieza [mm]	≤6	7 - 10	11 - 15	16 - 20	21 - 40	>40
Coeficiente S	1,8	2	2,2	2,4	2,6	3

[NAVAS, E; "MÉTODOS DE CÁLCULO EN FUNDICIÓN"; HOLGUÍN; 1990; PÁG. 48]

3. G se determina con ayuda de la densidad ρ y el volumen de cada pieza Ve:

$$G = \frac{Ve}{\rho}$$

Donde,

Ve es el volumen [dm³]

ρ es la densidad de la aleación [kg/dm³]

4. La velocidad específica K se toma de la siguiente tabla:

Tabla 4.2.1.b. Velocidad específica K en función de la densidad relativa Kv.

Densidad relativa de la pieza Kv [kg/dm ³]	0,3 - 0,6	0,6 - 1,0	1,1 - 1,5	1,6 - 2,0	2,1 - 2,5	2,6 - 3,0	3,1 - 4,0
Velocidad específica de vertido, K [kg/(cm ² ·s)]	0,2	0,22	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45

[NAVAS, E; "MÉTODOS DE CÁLCULO EN FUNDICIÓN"; HOLGUÍN; 1990; PÁG. 49]

Donde,

Kv se obtiene de la fórmula:

$$Kv = \frac{G}{Ve} = \rho$$

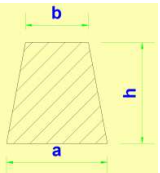
- ✓ Una vez calculada el área de los alimentadores $\sum Fa$, se elige la cantidad de alimentadores a utilizarse en base a la geometría de la pieza y se debe usar la siguiente relación para las áreas del colector de escoria ce, y del tragadero t:

$$Ft: Fce: \sum Fa = 1: 2: 3$$

Siendo $\sum Fa = \text{número de alimentadores} \cdot Fa$

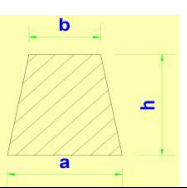
- ✓ Con estos valores se eligen las dimensiones de los alimentadores, colector de escoria y tragadero de las siguientes tablas:

Tabla 4.2.1.c. Dimensiones de alimentadores.

	Altura h [mm]									
	3		5		8		12		16	
										
Área de la sección [cm ²]	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0,3	11	9	7	5	-	-	-	-	-	-
0,5	18	16	11	9	8	5	-	-	-	-
0,7	25	22	16	12	10	8	-	-	-	-
0,9	31	29	19	17	12	10	-	-	-	-
1	35	32	21	19	13	10	-	-	-	-
1,2	41	39	25	22	15	12	-	-	-	-
1,4	48	45	29	26	18	15	12	9	-	-
1,8	61	59	37	34	22	19	15	12	12	9
2,2	75	72	45	42	31	25	19	16	15	12
2,5	85	82	51	49	31	28	21	18	16	13
3	95	92	57	54	39	36	25	22	19	16

[NAVAS, E; "MÉTODOS DE CÁLCULO EN FUNDICIÓN"; HOLGUÍN; 1990; PÁG. 35]

Tabla 4.2.1.d. Dimensiones del colector de escoria.

	Dimensiones [mm]		
	Cuando a=h		
Área [cm ²]	a	b	h
1	11	8	11
1,3	12	10	12
1,6	14	10	14
2	15	12	15
2,5	16	13	17
3,15	18	14	19
4	22	18	21
5	24	19	24
6,3	26	20	27
8	30	27	30
10	34	28	33
12,5	38	30	37
16	42	34	42
20	48	38	47
25	52	42	53
31,5	60	48	59
40	66	52	67

[NAVAS, E; "MÉTODOS DE CÁLCULO EN FUNDICIÓN"; HOLGUÍN; 1990; PÁG. 38]

Tabla 4.2.1.e. Dimensiones del tragadero, fondo del tragadero y cazuela.

Sección mínima del tragadero [cm ²]	Diámetro del tragadero d [mm]	Dimensiones [mm]				
		R	c	r	H	H1
7,06	30	17,5	10	6	40	10
9,62	35	20	10	6	40	10
19,63	50	29	10	10	60	15
23,75	55	32	15	10	60	15
28,27	60	35	15	15	70	20

[NAVAS, E; "MÉTODOS DE CÁLCULO EN FUNDICIÓN"; HOLGUÍN; 1990; PÁG. 35]

4.2.2. SELECCIÓN Y CÁLCULO DE VALORES

Siguiendo el método descrito anteriormente se han encontrado y tabulado los siguientes valores:

Nota: las unidades utilizadas son las mismas que están descritas en el método.

Tabla 4.2.2. Dimensiones del sistema de alimentación a utilizar.

ρ aluminio		2,71			
K		0,4			
S		1,8			
		Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4
G		5,049	3,193	3,420	2,902
Ve		1,863	1,178	1,262	1,071
Tv		4,045	3,216	3,329	3,066
$\sum Fa$		3,121	2,482	2,569	2,366
Fce		4,681	3,723	3,853	3,549
Ft		9,362	7,445	7,706	7,098
Alimentadores	Cantidad	6	6	6	6
	Fa	0,5	0,4	0,4	0,4
	h	8	8	8	8
	a	8	8	8	8
	b	5	5	5	5
Colector de escoria a=h	h	24	21	21	21
	a	24	22	22	22
	b	19	18	18	18
Tragadero	d	35	30	30	30
	R	20	17,5	17,5	17,5
	c	10	10	10	10
	r	6	6	6	6
	H	40	10	10	10
	H1	10	10	10	10

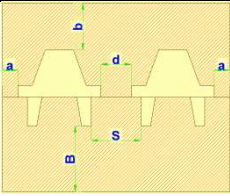
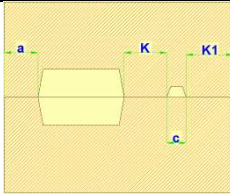
4.3. CÁLCULO DE LA CAJA DE MOLDEO

Las dimensiones de la caja de moldeo se determinan por las dimensiones de la pieza fundida, por la cantidad de piezas en una caja de moldeo, por su posición, por las dimensiones de las mazarotas y el sistema de alimentación, y por las dimensiones de las portadas de los machos. Puede plantearse que las dimensiones de la caja de moldeo se determinarán después de la elaboración de la tecnología de la pieza fundida.

Debe tenerse en cuenta también que la capa de mezcla entre la cavidad del molde y las paredes de la caja de moldeo tiene que asegurar la resistencia debida del molde para evitar su destrucción y deformación por la acción de las presiones estática y dinámica del metal vertido.

Las dimensiones de la caja de moldeo no deben ser excesivas porque aumenta la laboriosidad de la producción del molde y el consumo de mezcla de moldeo. Las distancias mínimas entre las diferentes partes de la cavidad del molde y las partes de la caja de moldeo se dan en la siguiente tabla:

Tabla 4.3.a. Distancias permisibles entre piezas y elementos del molde.

DISTANCIAS PERMISIBLES									
									
Distancias Pieza-Pieza y Pieza-Molde									
Tipo de pieza	Dimensiones [mm]								
	a	b	B	S			d		
Pequeñas	20 - 30	35 - 60	50 - 75	0,3 de la altura de plantilla			0,5 de la altura de plantilla		
Medianas	50 - 75	75 - 100	100 - 125						
Grandes	125 - 175	150 - 200	175 - 200						
Distancias Pieza-Conductos de Alimentación									
Base del conducto (c) [mm]	Tipo de molde	Masa de la pieza [kg]							
		0 - 50	51 - 250	251 - 500	501 -	0 - 50	51 - 250	251 - 500	501 -
		K1 [mm]				K [mm]			
0 - 25	seco	30	35	-	-	30	35	-	-
	verde	50	60	-	-	30	35	-	-
26 - 50	seco	40	40	45	50	40	40	45	30
	verde	50	55	60	70	45	50	55	60
51 - ...	seco	50	50	55	60	50	50	55	60
	verde	60	65	70	80	60	60	65	70

Nota: En consideración al peso, para poder ser manipuladas a mano, las cajas de moldeo, no deben exceder de 30kg.

La siguiente tabla presenta valores recomendados para la altura de la caja de moldeo, sí se toma en cuenta la longitud (L) o el diámetro (D) dependiendo de las características de la pieza a fabricar. Así, de esta manera, sí la longitud de la pieza es de alrededor de 300 milímetros, la altura (H), podrá estar comprendida entre 50 y 150 milímetros, dependiendo también de la configuración de la pieza a fabricar.

Tabla 4.3.b. Dimensiones de las cajas de moldeo - Altura.

L ó D [mm]	Altura de la caja H [mm]																		
	50	75	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800	900	1000
300																			
*350																			
400																			
450																			
500																			
*550																			
600																			
*650																			
700																			
*750																			
800																			
900																			
1000																			
*1100																			
1200																			
1300																			
1400																			
*1500																			
1600																			
1800																			
2000																			
2200																			
2400																			
*2500																			
2800																			
3000																			
*3250																			
3500																			
*3750																			
4000																			
*4250																			
4500																			
*4750																			
5000																			
5500																			
6000																			
6500																			
7000																			
* Dimensiones no recomendadas																			

[GOYOS, L; "TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN II"; ISPJAE; PÁG. 63]

De la misma manera, en la tabla 4.3.c, se normalizan los valores del ancho de la caja de moldeo en base a la longitud o el diámetro de la pieza.

Tabla 4.3.c. Dimensiones de las cajas de moldeo - Ancho.

L ó D [mm]	Ancho de la caja W [mm]																									
	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900	1000	1100	1200	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400			
300																										
*350																										
400																										
450																										
500																										
*550																										
600																										
*650																										
700																										
*750																										
800																										
900																										
1000																										
*1100																										
1200																										
1300																										
1400																										
*1500																										
1600																										
1800																										
2000																										
2200																										
2400																										
*2500																										
2800																										
3000																										
*3250																										
3500																										
*3750																										
4000																										
*4250																										
4500																										
*4750																										
5000																										
5500																										
6000																										

* Dimensiones no recomendadas

[GOYOS, L; "TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN II"; ISPJAE; PÁG. 64]

4.3.1. DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES

De las tablas anteriormente citadas y en concordancia con las dimensiones de las partes de las antenas a ser fabricadas por fundición se han obtenido las siguientes alternativas de diseño para las cajas de moldeo:

Opción 1.-

Para la opción 1 se considera la fabricación de una sola pieza en cada caja de moldeo, como se muestra a continuación:

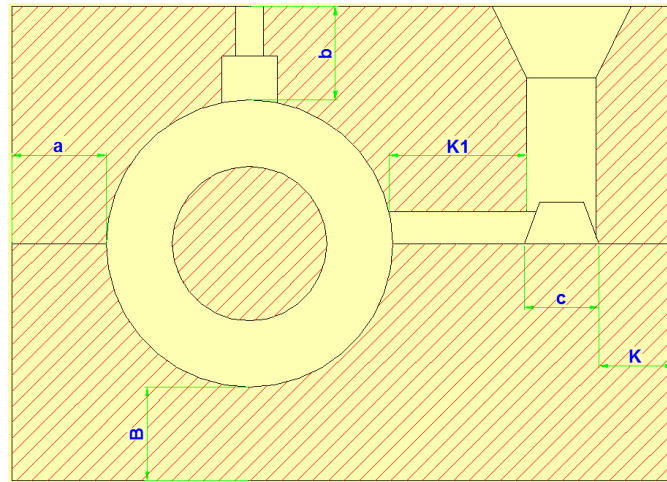


Figura 53. Determinación de las distancias permisibles para la fabricación de las antenas.

Según la tabla 4.4.a, se puede considerar a las antenas como piezas grandes en longitud, pero el diámetro de la sección transversal es pequeño, por lo tanto, se eligen los siguientes valores de a , b y B en milímetros:

$$a=20$$

$$b=60$$

$$B=60$$

De la misma tabla, se eligen los valores de $K1$ y K , para cada parte de la antena que en promedio pesan 4kg (1/4 del peso total ≈ 16 kg); el valor de c se determinó en el cálculo del sistema de alimentación, 24 milímetros; y para fundición en arena verde:

$$K1=50$$

$$K=30$$

De esta manera, incluyendo el diámetro del modelo sobredimensionado que es de 66 milímetros, el ancho total de la caja sería de:

$$W=190$$

Este valor es muy pequeño, por lo que el ancho de la caja para esta opción de fabricación debe determinarse basándose en la tabla 4.4.c y los valores de a y K deberían aumentar para una posición equidistante del modelo dentro de la caja.

Opción 2.-

Según las tablas 4.3.b y 4.3.c para longitudes de pieza de alrededor de 1200 a 1400 milímetros se consideran alturas de caja entre 175 a 600 milímetros y anchos entre 300 y 1500 milímetros.

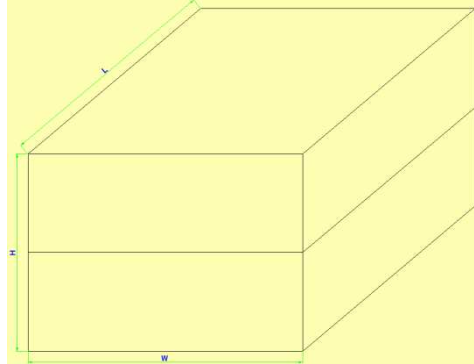


Figura 54. Dimensiones de las cajas de moldeo.

Para la altura se considera el diámetro de la pieza es de no más de 66 milímetros y el valor recomendado de b y B según la tabla 4.4.a es de 60mm, por lo que la altura de la caja debe estar alrededor de 186 milímetros lo que está dentro del rango recomendado, se elige la siguiente altura por facilidad de fabricación: $H=300$

Por ser piezas delgadas se toma el menor ancho recomendado y se plantea un rediseño y redistribución de las cajas: $W=300$

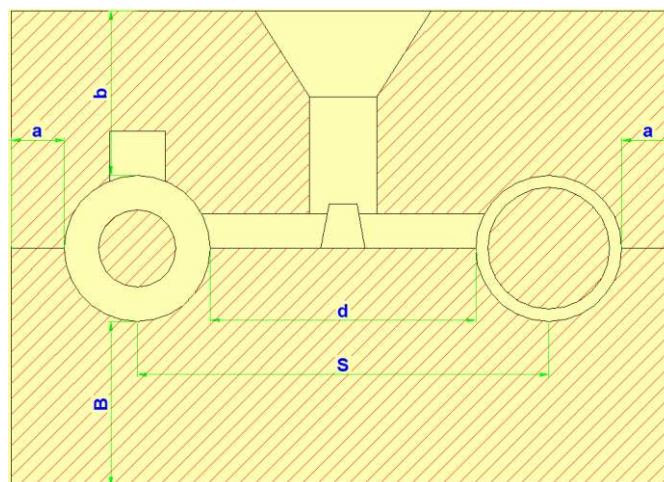


Figura 55. Redistribución de cajas de moldeo.

De esta manera se aprovecha mejor el espacio dentro de la caja y se ahorran dos cajas de moldeo, las dimensiones d y S son aproximadamente 100 y 150 milímetros respectivamente.

4.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FUNDICIÓN UTILIZANDO SOFTWARE MEF

4.4.1. MODELO CAD

Con las dimensiones del modelo, sistema de alimentación y caja de moldeo determinadas se procede a realizar un modelo CAD en cualquier paquete informático de diseño mecánico.

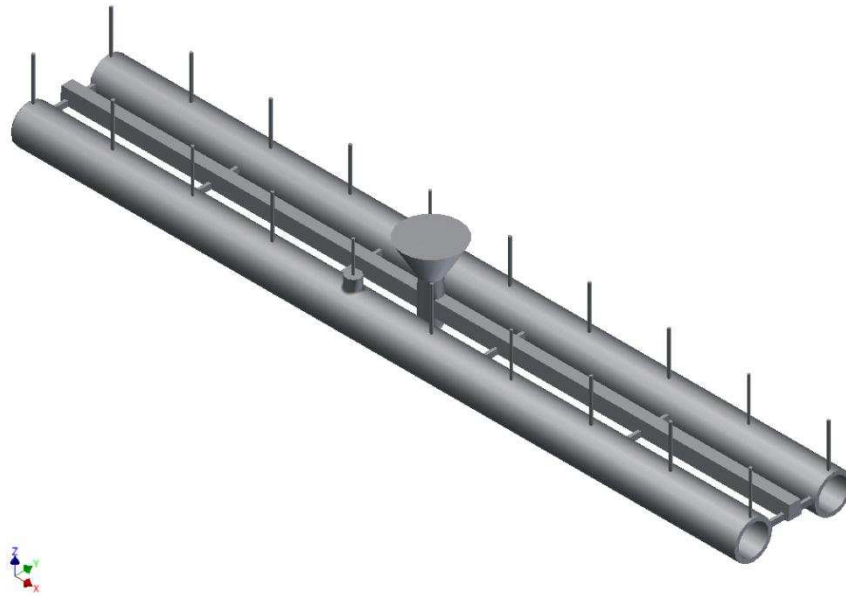


Figura 56. Modelo CAD de la pieza a ser obtenida en la caja 1 de fundición.

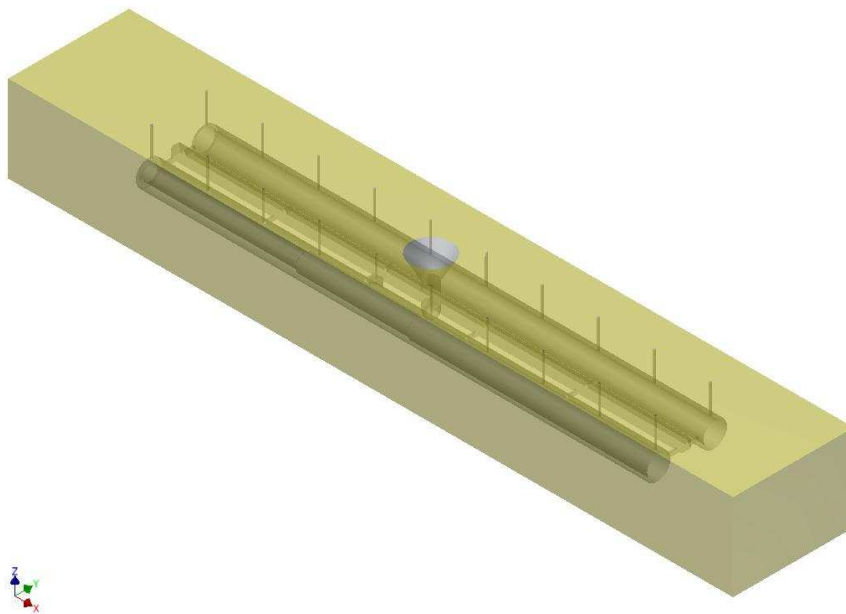


Figura 57. Modelo CAD de la arena de moldeo en la caja 1 de fundición.

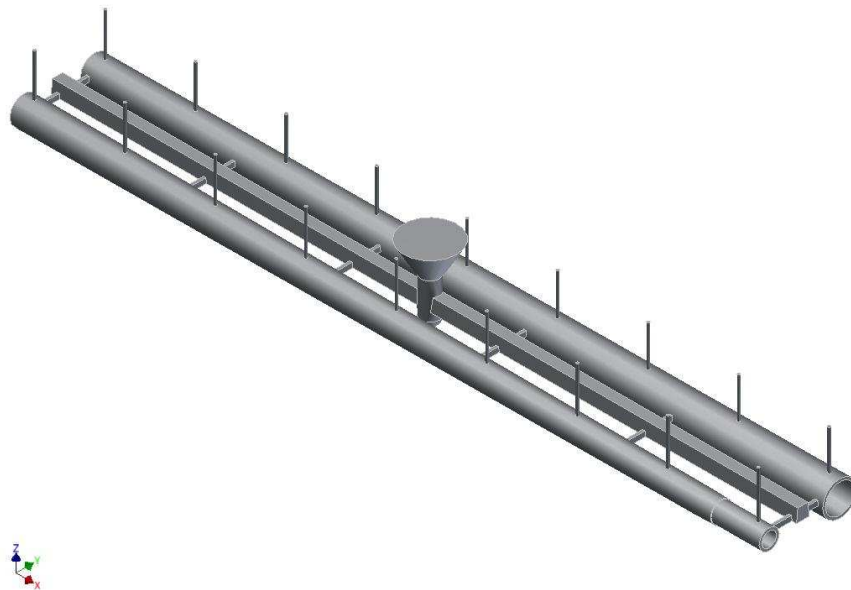


Figura 58. Modelo CAD de la pieza a ser obtenida en la caja 2 de fundición.

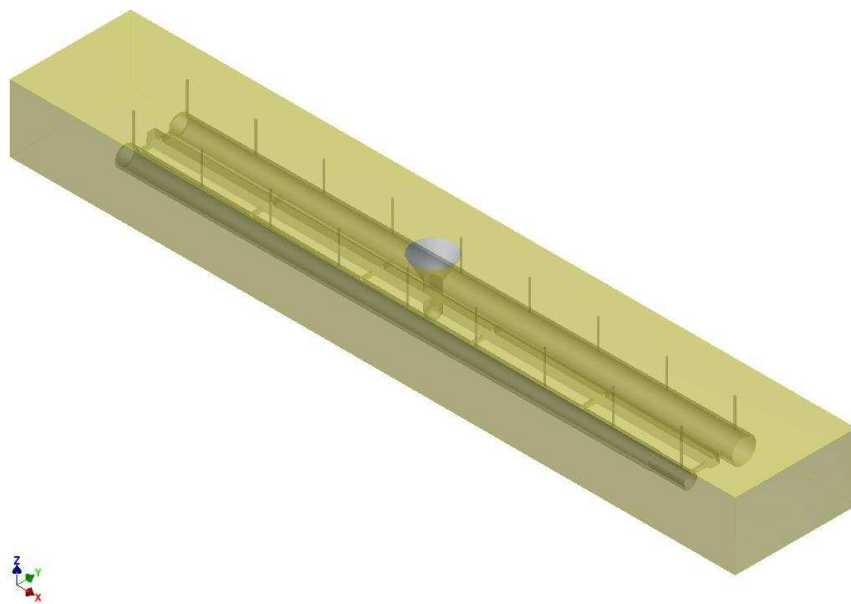


Figura 59. Modelo CAD de la arena de moldeo en la caja 2 de fundición.

4.4.2. SIMULACIÓN

Una vez exportada la geometría en formato IGES al software de simulación, se deben ingresar datos de mallado, tipo de materiales para el molde y la pieza, condiciones de borde y condiciones iniciales, así como parámetros especiales y el tipo de problema.

Para este caso se requieren resultados de llenado y de enfriamiento de la colada bajo las siguientes condiciones:

- molde de arena verde
- la aleación a utilizarse es de aluminio A356
- la temperatura ambiente es de 20 °C
- la temperatura inicial del aluminio es 750 °C
- enfriamiento lento con aire
- la altura de colado es de aproximadamente 20 cm

Para la correspondiente simulación se han seguido los siguientes pasos:

4.4.2.1. MALLADO

Importar la geometría del modelo desde un formato IGES 144 “Trimmed Surfaces”.

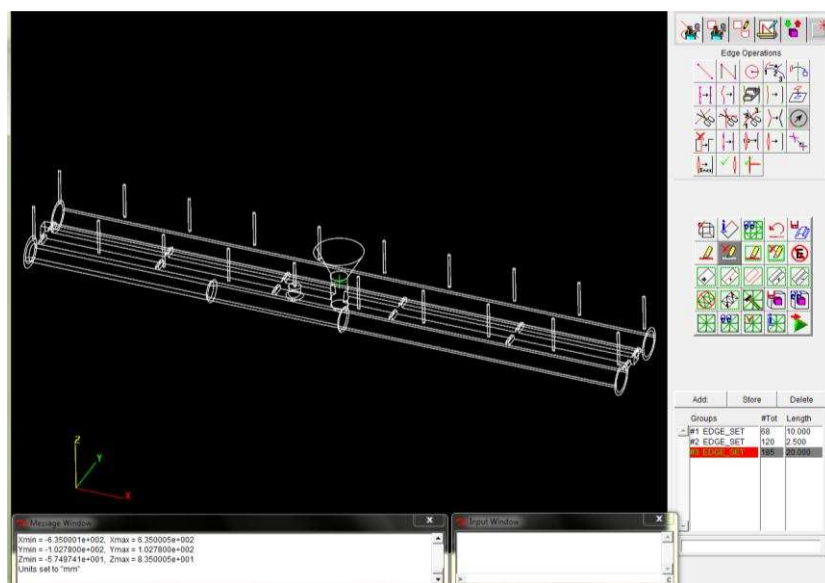


Figura 60. Geometría IGES del modelo.

Chequear la geometría en búsqueda de errores, nos debe mostrar el mensaje “Geometry seems to be ok”.

Seleccionar las líneas correspondientes a sistema de alimentación y sistema de respiraderos para cambiar el tamaño de malla, pues no se necesita gran precisión de simulación en estos componentes.



Figura 61. Asignación de tamaño de elemento de malla.

Asignar los siguientes valores: al sistema de alimentación un tamaño de elemento de malla de 20, a las piezas fundidas un tamaño de 10 y al sistema de respiraderos, por ser cilindros delgados y para evitar problemas de mallado un tamaño de 2.5.

Generar la malla y la volver a chequear en búsqueda de elementos defectuosos, devuelve el siguiente mensaje, “The Surface Mesh seems OK...”.



Figura 62. Malla de superficie creada.

Pasar a la siguiente fase, en Go: Volume Meshing. Revisar intersecciones, debe indicar “Total # of possible intersections are: 0”.



Figura 63. Malla de volumen creada.

Guardar e importar la geometría del molde igualmente desde el formato IGES.

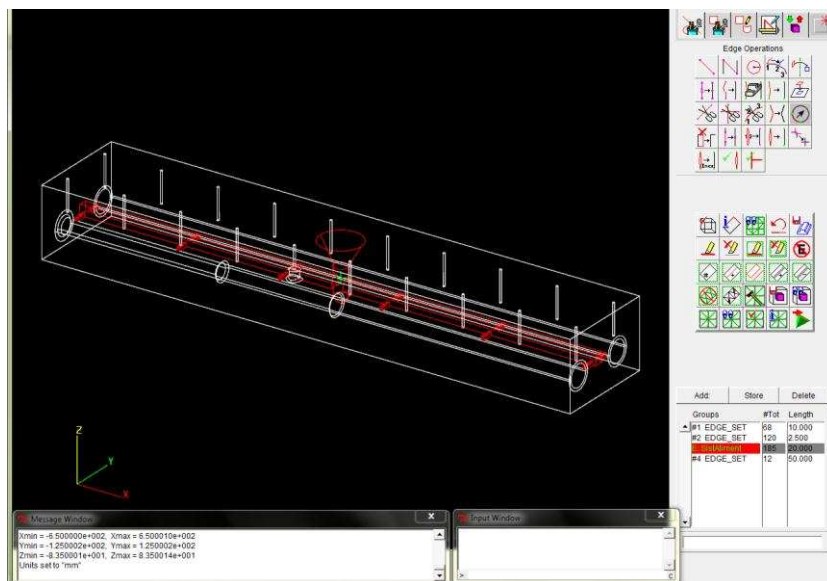


Figura 64. Geometría IGES del molde y asignación de los tamaños de malla.

El procedimiento es el mismo con la excepción que en este caso a los bordes de la caja se asigna un tamaño de elemento mucho más grande de 50. Clicar en Volume Meshing.

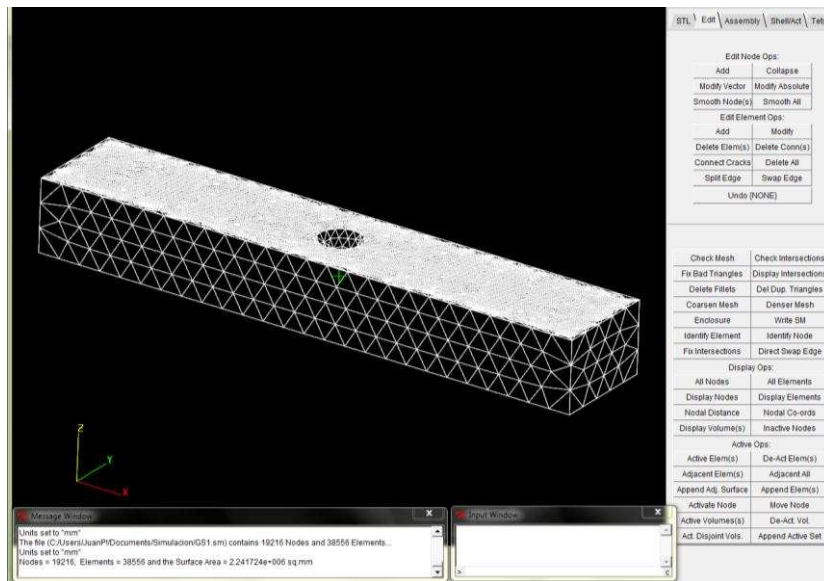


Figura 65. Malla volumétrica del molde.

De igual manera chequear intersecciones y guardar.

Abrir el archivo anterior correspondiente al modelo, con extensión sm. En File clicar Assemble, elegir el archivo.sm correspondiente al molde y clicar assemble de nuevo, esperar.

Se crea una unión de ambas mallas de superficie, revisar que las entradas y salidas correspondan al tragadero y a los respiraderos en Show Features y continuar el ensamblaje.

Por último en la pestaña Tets seleccionar Generate Tet mesh.

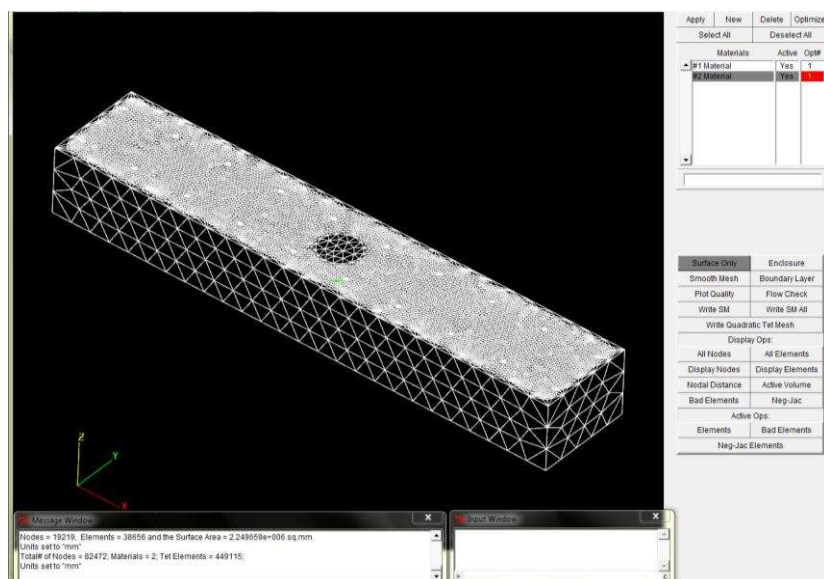


Figura 66. Ensamblaje de las dos mallas.

Se crea un archivo.mesh el mismo que corresponde a la malla de volumen en la cual se diferencian dos materiales, el molde y el modelo o en este caso, la pieza.

4.4.2.2. PREPROCESO

Abrir el archivo.mesh creado anteriormente. En materiales se asignan al molde como arena verde y al modelo como aluminio A356, el aluminio debe constar como CASTING y vacío. El molde debe constar como MOLD y no vacío.

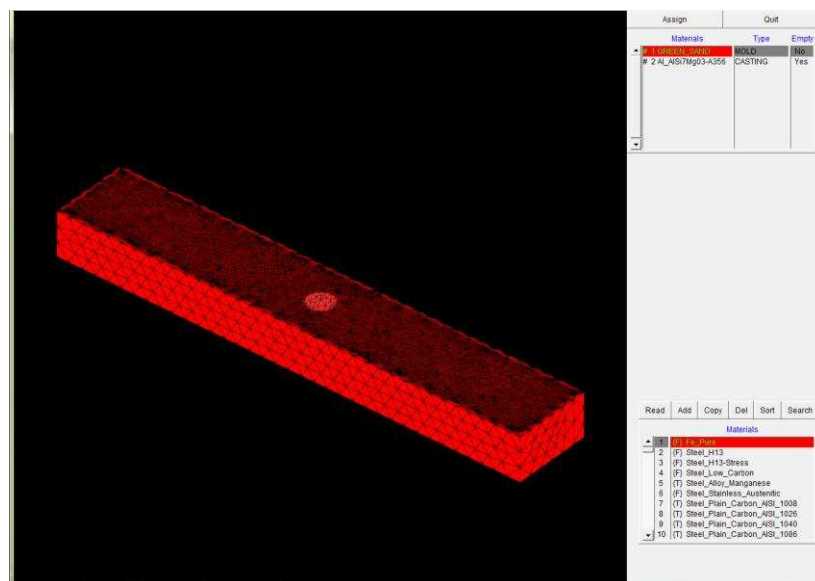


Figura 67. Asignación de materiales.

La interface es coincidente y de se asigna un valor de $h=500$ [W/ (m²K)]. Así mismo se asignan las condiciones de borde seleccionando los diferentes elementos de la malla. Calor adiabático en la base, enfriamiento alrededor de la caja con aire quieto, temperatura ambiente en todas las caras, ventilación en los respiraderos y en el tragadero una velocidad aproximada de ingreso del metal líquido de -150 mm/s en el eje z.

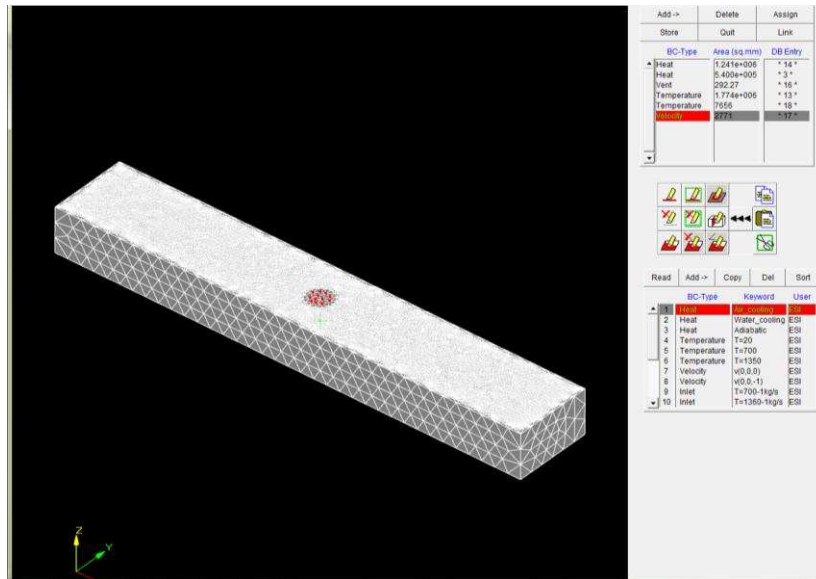


Figura 68. Asignación de condiciones de borde.

A continuación en proceso se establece la gravedad de -9.8 m/s^2 en el eje z. Condiciones iniciales constantes, el aluminio a $750 \text{ }^\circ\text{C}$ y el molde de arena a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Por último en Parámetros de corrido se eligen en la pestaña Preferencias la opción Default, la cual corresponde a una simulación de llenado y térmica por gravedad.

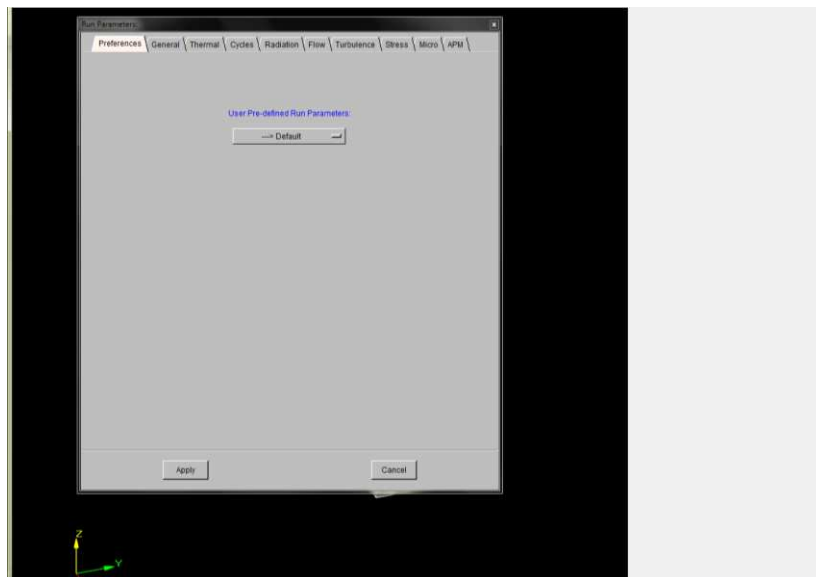


Figura 69. Determinación de parámetros de simulación.

Se guarda y se cierra el módulo.

4.4.2.3. CÁLCULO Y POSTPROCESO

A continuación se procede a calcular el llenado, simplemente se da clic en "Execute" esperamos y cerramos la pantalla que aparece a continuación.

En el siguiente módulo ejecutamos “Run” aparecerá una pantalla y esperamos a que termine de calcular. Se puede chequear el progreso de la simulación en la pestaña Status en el gestor de manejo general.

4.4.2.4. VISUALIZACIÓN

Por último abrimos el módulo de visualización e interpretamos los resultados.

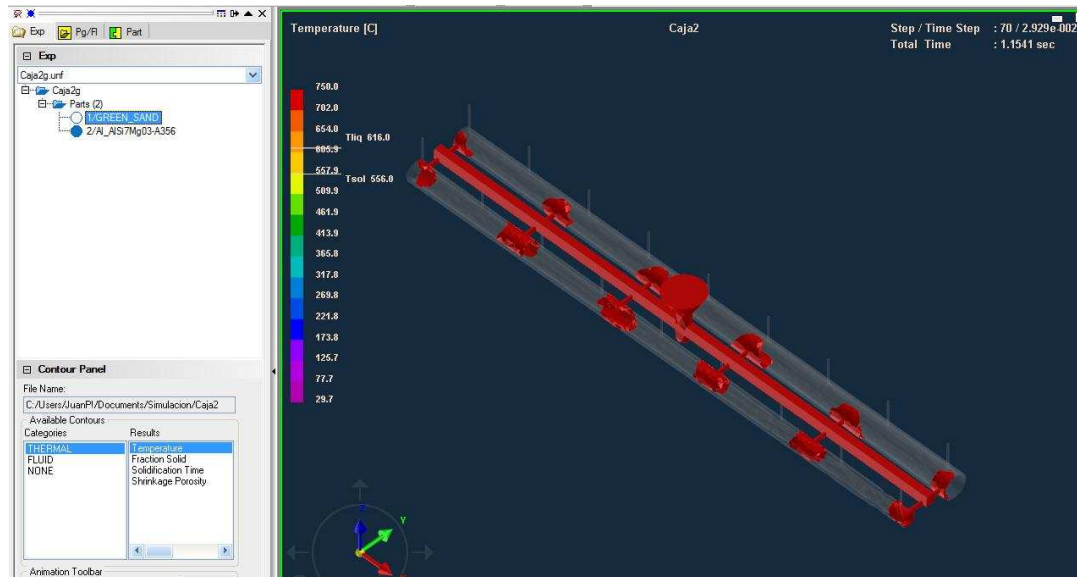


Figura 70. Visualización de la simulación.

4.4.3. RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes resultados:

4.4.3.1. Caja 1

La simulación muestra que el molde se va a llenar en su totalidad, **sin** inconvenientes de solidificación prematura.

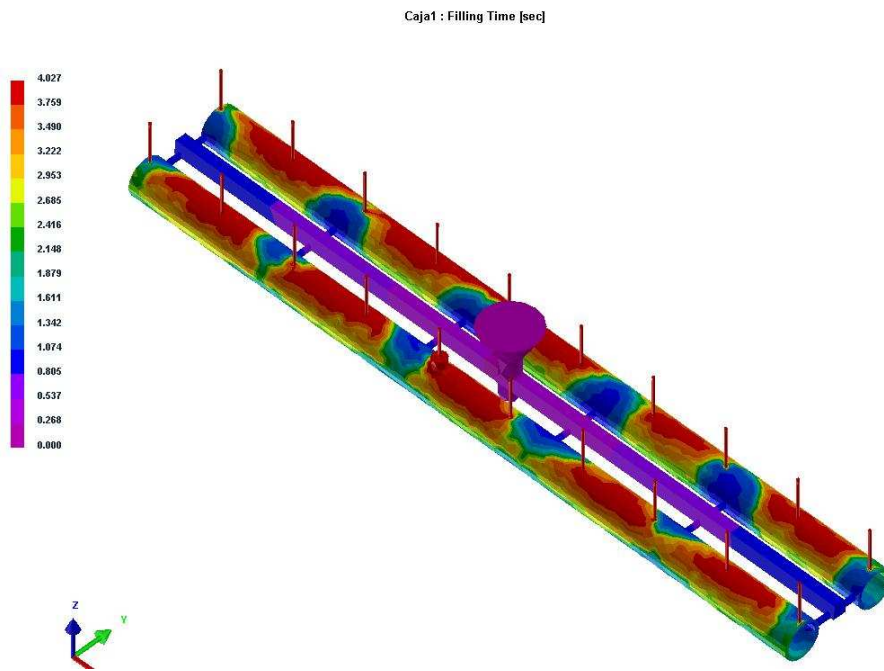


Figura 71. Tiempo de llenado.

En cuanto a la temperatura de enfriamiento el resultado fue que en la zona del refuerzo se enfría prácticamente al mismo tiempo que el tragadero, lo que podría derivar en rechupes en esa zona.

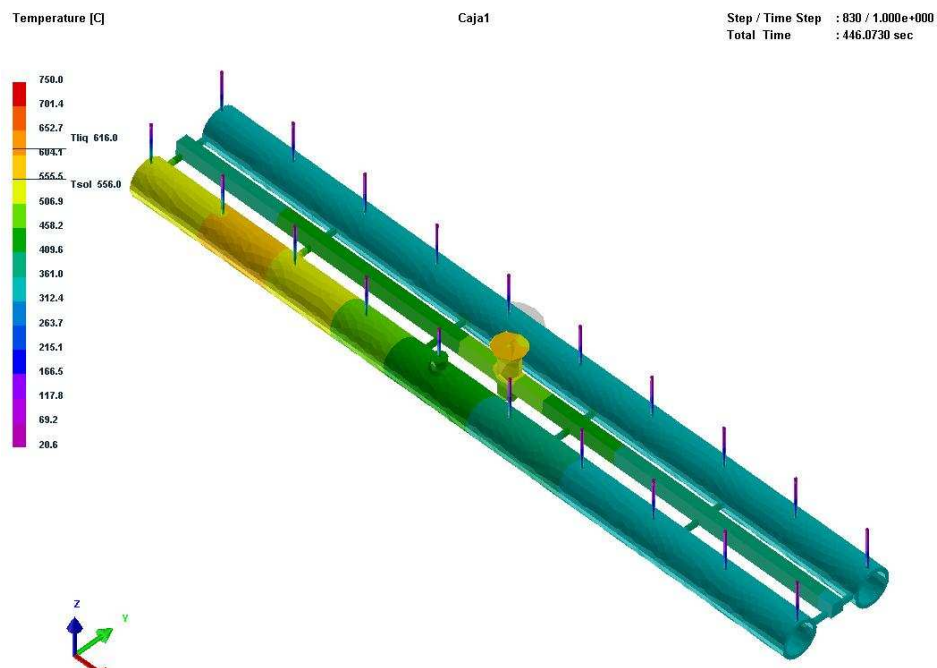


Figura 72. Temperatura de enfriamiento.

En lo que respecta a solidificación, al igual que el enfriamiento, solidifica prácticamente al mismo tiempo.

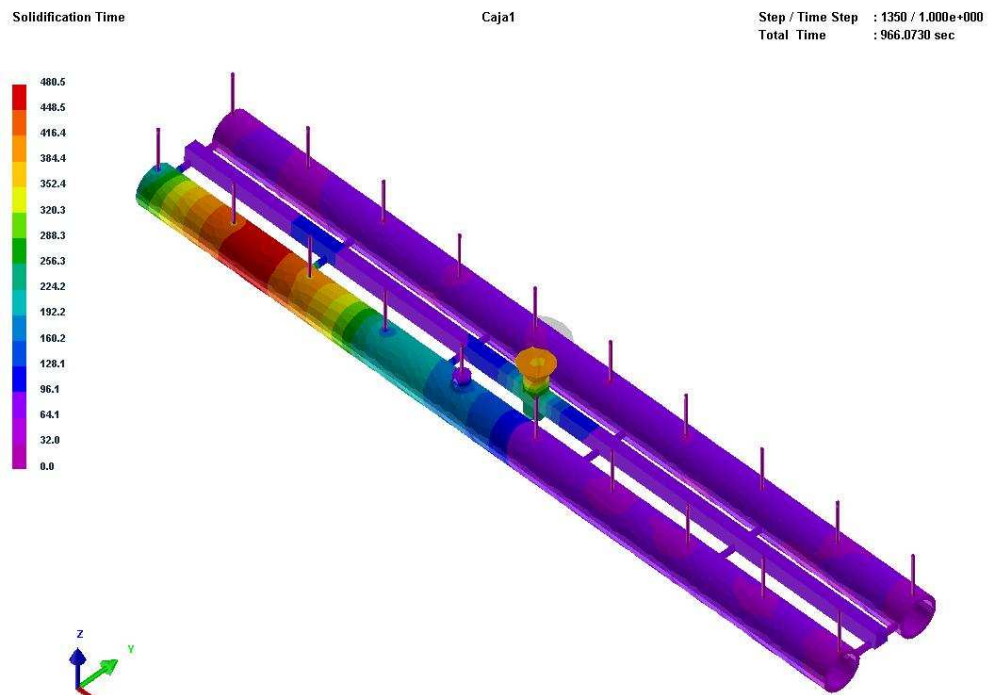


Figura 73. Tiempo de solidificación.

Por último el porcentaje de porosidades es del 9% en casi toda la pieza.

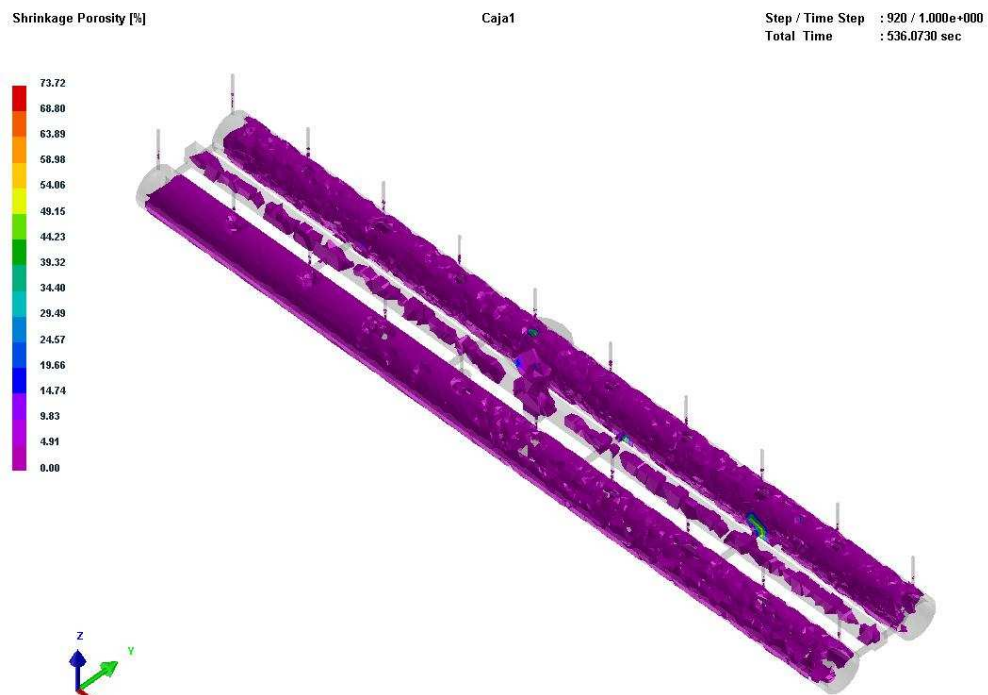


Figura 74. Acumulación de porosidades.

Conclusiones:

Para evitar rechupes en la zona más gruesa de la antena de deberían hacer más grandes los respiraderos de esa zona, así mismo para que no se enfríe antes que el tragadero, se debe agrandar la sección del mismo.

4.4.3.2. Caja 2

Tampoco presenta problemas de llenado, siendo el tiempo de llenado menor al de la caja anterior por ser de un menor volumen.

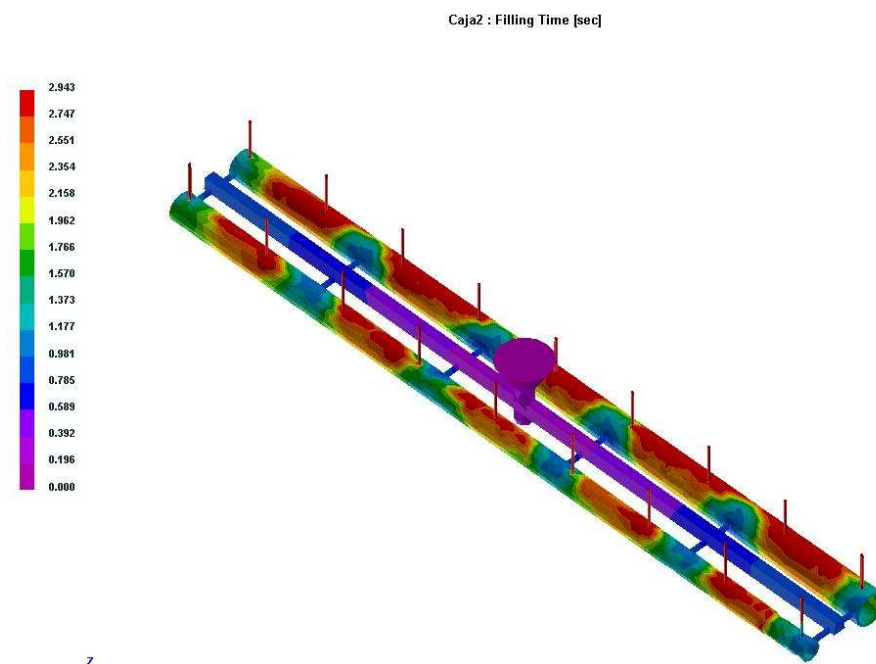


Figura 75. Tiempo de llenado.

Se diferencia claramente a lo largo de toda la simulación que la última zona en enfriar es el tragadero, por lo que no tendría el mismo problema que el molde anterior.

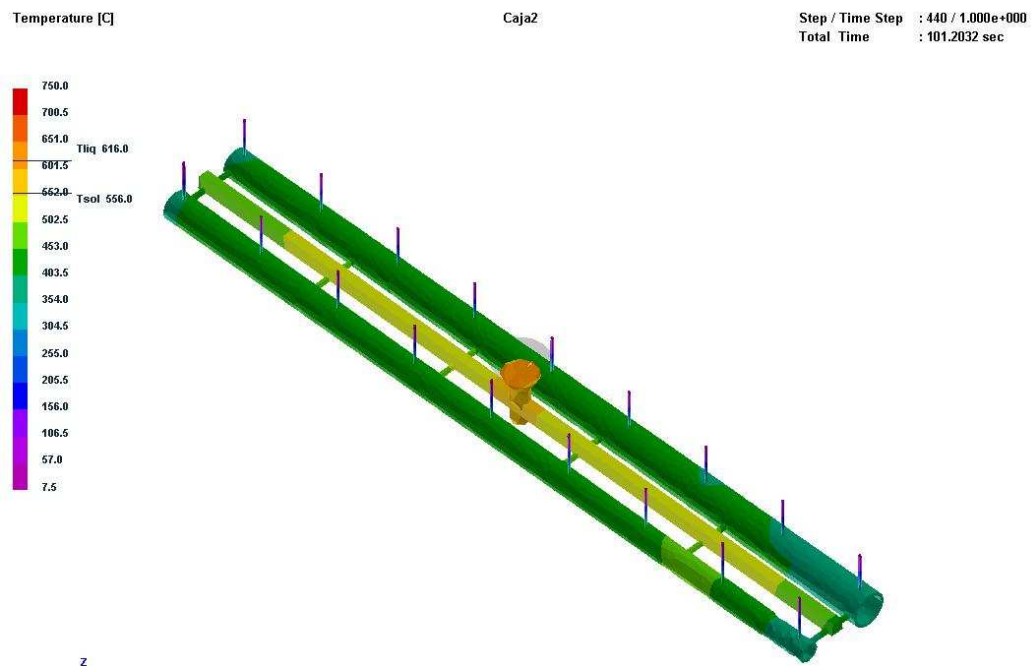


Figura 76. Temperatura de enfriamiento.

El tiempo de solidificación también es mayor en el tragadero, por lo que se confirma la validez del diseño.

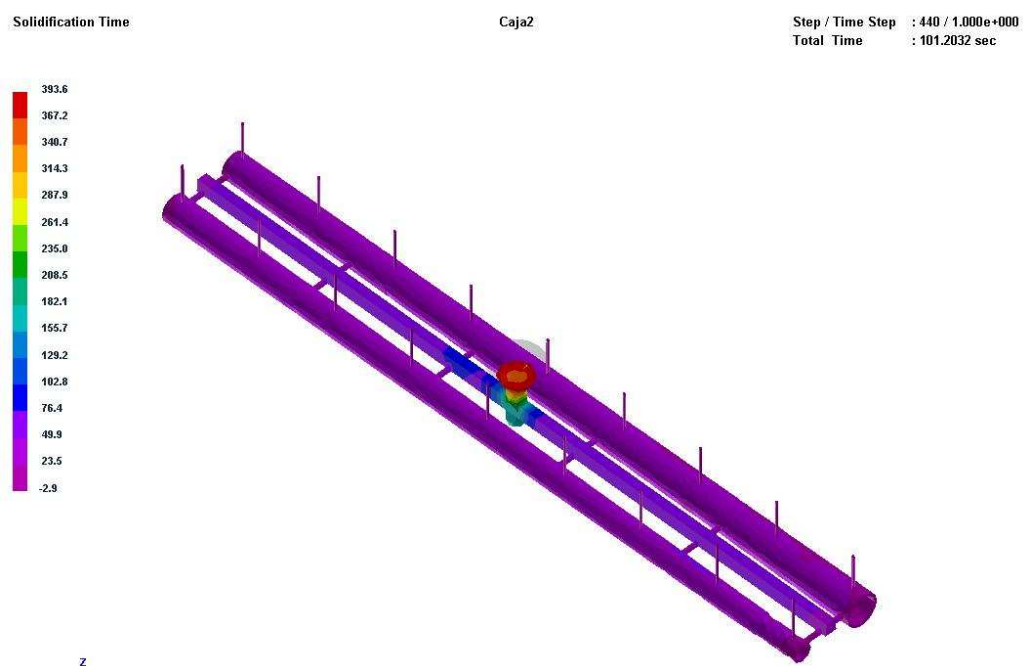


Figura 77. Tiempo de solidificación.

Por último, coincidiendo con la caja 1, existe un 9% de acumulación de porosidades, aunque en un volumen menor.

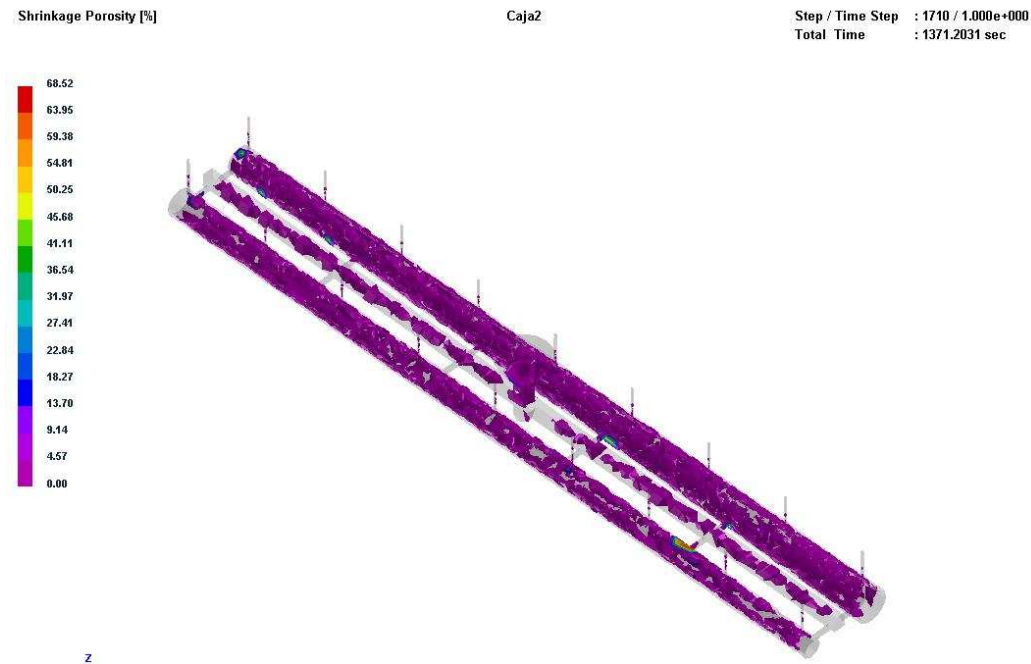


Figura 78. Acumulación de porosidades.

Conclusiones:

En la Caja 2 no es necesario un rediseño del sistema de alimentación. El Diseño es válido.

4.4.4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.4.4.1. Rediseño de la Caja 1

Como se citó anteriormente, se hace necesaria la corrección del sistema de alimentación en la caja 1, debido a que la zona del refuerzo tiene, en gran medida, un mayor volumen que el resto de la pieza, lo que provoca que solidifique y se enfríe tardíamente.

Para esto se plantea el agrandamiento de la sección, tanto de los respiraderos adyacentes a ésta zona, como también del tragadero.

Se obtienen los siguientes resultados:

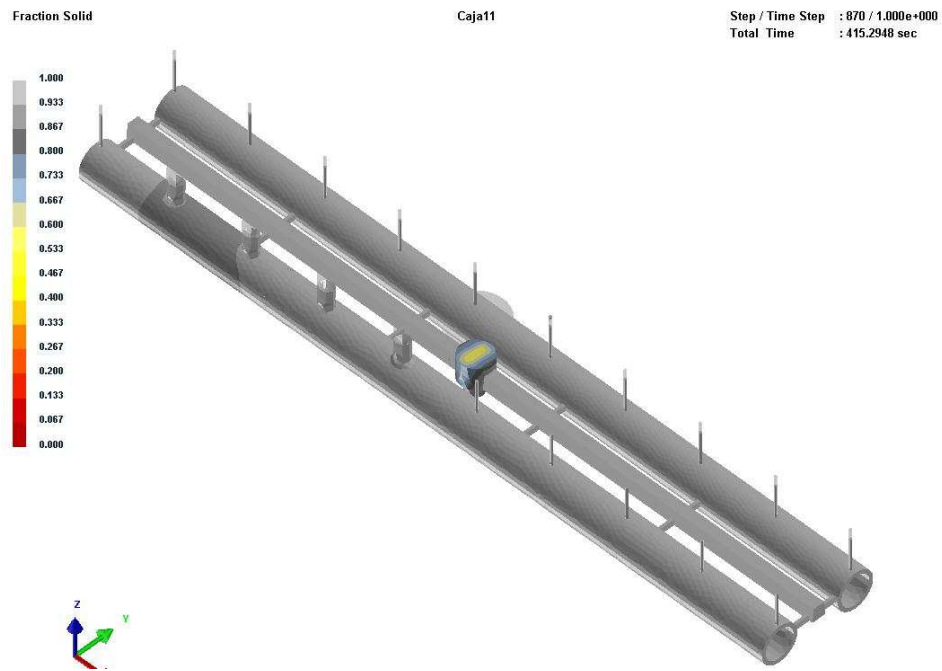


Figura 79. Fracción Sólida.

Como se ven en la figura, con el nuevo diseño, la última porción en solidificar es el tragadero, además el rechupe es contenido en los respiraderos con gran diámetro.

A continuación se muestra el progreso de enfriamiento, el tragadero aún mantiene su temperatura mientras el resto de la pieza se enfría.

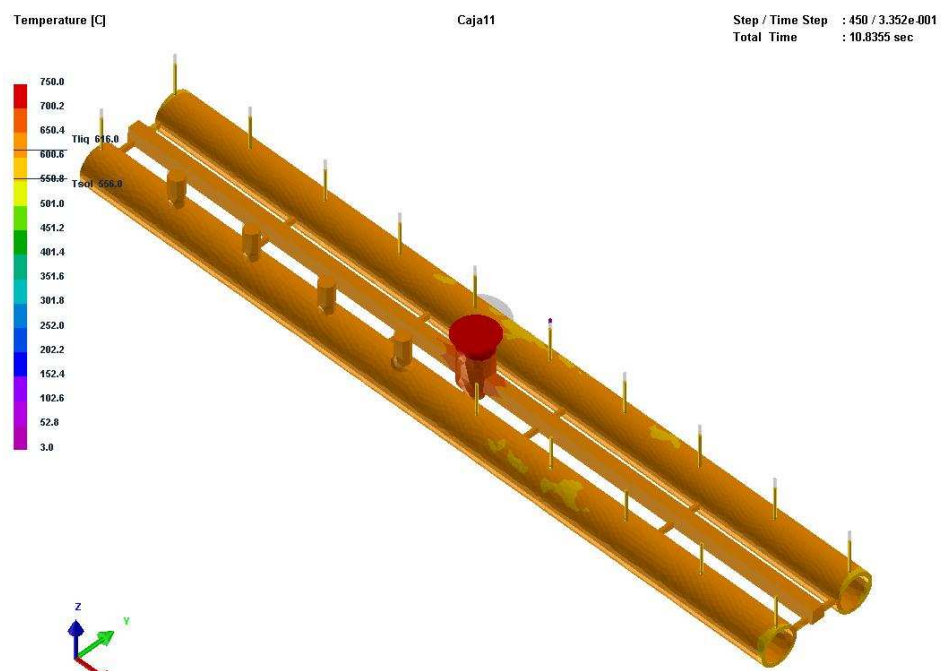


Figura 80. Enfriamiento de la caja 1.

El nuevo diseño del sistema de alimentación es válido y se puede poner en práctica. Cabe notar que puede ser conveniente aumentar incluso un poco más las secciones aquí modificadas.

CAPITULO V

CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS

5.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y CAJAS DE NOYOS

5.1.1 MODELOS

Para una mayor precisión dimensional y geométrica se decidió fabricar los modelos a partir de cilindros de aluminio sólidos divididos por la mitad. El material es aluminio puro por su fácil maquinabilidad, baja densidad y buenas propiedades mecánicas para este propósito. Para unir las dos mitades se utilizaron pernos de $\frac{1}{4}$ de pulgada roscados directamente en el metal.



Imagen 1. Cilindro de aluminio en bruto.

Una vez obtenidos los cilindros se procede a maquinaslos y rectificados en el torno hasta llegar a las dimensiones calculadas para los modelos.



Imagen 2. Proceso de torneado y rectificación de modelos.



Imagen 3. Modelos terminados.



Imagen 4. Modelos terminados.

5.1.2 PLACAS MODELO

Para una mayor facilidad de moldeo se ha fabricado placas modelo. Para ello se vuelven a dividir los modelos retirando los pernos que unen las dos mitades, y se ubican en una placa de madera cortada con las mismas dimensiones de la caja de moldeo. Se deben también, fabricar el conducto escoriador y los alimentadores de acuerdo a las dimensiones prestablecidas en el capítulo 4.



Imagen 5. Placa modelo.

Según lo descrito, se fabricarán dos partes de la antena en una sola caja, así, se tienen al final dos placas modelo y dos moldes. La placa modelo 1 esta

destinada para fabricar las partes cilíndricas 1 y 2 de la antena y la placa modelo 2 para las partes cónicas 3 y 4.

5.1.2.1 Placa modelo 1



Imagen 6. Placa modelo1: Vistas frontal, posterior y lateral (de izquierda a derecha).

5.1.2.2. Placa modelo 2



Imagen 7. Placa modelo2: Vistas frontal, posterior, lateral (de izquierda a derecha).

5.1.3. CAJAS DE NOYOS

Las cajas de noyos se fabricaron de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio.

5.1.3.1. Modelos para cajas de noyos

En primer lugar es también necesaria la fabricación de modelos de los noyos a obtener. Estos noyos se hicieron de madera de pino, torneados y con las dimensiones calculadas.



Imagen 8. Modelos de madera para cajas de noyos.

5.1.3.2. Cajas de resina poliéster

Se fabrican las cajas de resina poliéster sobre los modelos de madera reforzándolas con fibra de vidrio. Al endurecerse, se retiran los modelos y se obtienen las cajas.



Imagen 9. Cajas de noyos terminadas.

5.1.3.3. Núcleos, almas o flautas para noyos

Los noyos a fabricar son de gran longitud y sección delgada por lo que corre el riesgo de fracturarse, además se requiere que las piezas obtenidas tengan la menor cantidad de gases atrapados. Es por estos motivos que se incluye en la fabricación de los noyos un núcleo hueco conformado por un tubo de acero con perforaciones a lo largo.



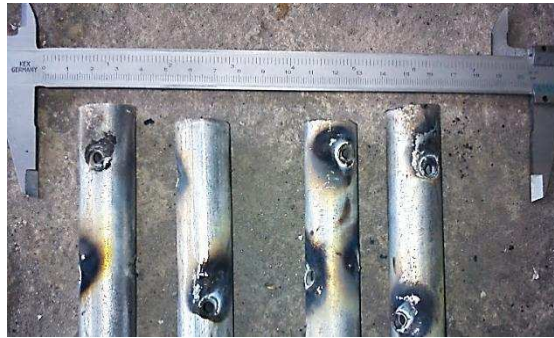


Imagen 10. Núcleos de acero para noyos.

Con este diseño se garantiza la resistencia del noyo y la salida de los gases del mismo por el núcleo.

5.1.3.4. Noyos

Para fabricar los noyos, tan solo basta cerrar las tapas de las cajas y colocar las flautas en el centro dejando el espacio alrededor para introducir la arena sílice mezclada con 4.5% de bentonita y 2% de silicato de sodio.

Se compacta la arena con la ayuda de una varilla hasta que se llene la caja y se procede a gasear por el conducto que deja la flauta con un caudal de CO_2 de 0.5 lt/s durante aproximadamente 2 minutos o hasta que el noyo se haya curado.



Imagen 11. Noyos obtenidos.

5.2. ELABORACIÓN DEL MOLDE.

Con las placas modelo y los noyos fabricados la realización de los moldes es relativamente sencilla. Basta tacar la arena para luego realizar el tragadero para el ingreso de la colada y la cazuela en el fondo para disminuir la turbulencia.



Imagen 12. Molde de arena verde 1.



Imagen 13. Molde de arena verde 2.

Se hace necesaria la colocación de topes del espesor necesario y del mismo material de la colada pues los hoyos tienden a flejar. Estos topes deben estar libres de oxido para que se puedan fundir dentro de la pieza.



Imagen 14. Topes.

Se colocan los noyos y se secan las cajas con llama directa. El molde esta listo para cerrarse y recibir la colada.



Imagen 15. Moldes de arena verde terminados.

5.3. PREPARACIÓN DE LA ALEACIÓN

5.3.1. SELECCIÓN DE LA CHATARRA

- Aluminio – silicio: pistones
 - Si = 10%
 - Cu = 1%
 - Mg = 1%
 - Al = 88%

- Aluminio – cobre: perfilería
 - Cu = 4%
 - Mg = 0.5%
 - Al = 95.5%
- Aluminio – magnesio: carcasas de motor, aros de automóviles
 - Mg = 5%
 - Al = 95%
 - Aluminio puro



Imagen 16. Chatarra seleccionada.

5.3.2. MÉTODO DE CÁLCULO DE CARGAS

El cálculo de la carga se realiza teniendo en cuenta el porcentaje de quemado de los componentes de la aleación. La magnitud del quemado depende de la oxidación de los desechos, del tipo del aluminio en lingotes, el estado del grupo de fusión, el procedimiento de afino, la duración de la fusión, etc.

Por ejemplo, el tanto por ciento de quemado del aluminio en hornos eléctricos y de crisol es de 0,5-1 %; en los hornos de reverbero, 1-2%, y si la carga está muy oxidada, el quemado llega a 2,5%.

El quemado del silicio constituye 0,5-1% y depende poco del estado de la carga y el tipo de horno de fusión. El quemado de magnesio alcanza 2-3%; con una carga muy oxidada llega a 5%. El quemado del cobre forma 0,5-1,5%. Los productos del quemado de los componentes de la aleación son óxidos.

5.3.2.1. Consideración de pérdidas

De lo descrito, se eligen los siguientes porcentajes de pérdidas:

- Al = 2%
- Si = 1%
- Cu = 1.5%
- Mg = 3%

Fórmula para el cálculo de pérdidas

$$\%C_e = \frac{\%E * \%e_p}{100} + \%E$$

Siendo,

$\%C_e$ el porcentaje total necesario de carga en masa de cada elemento aleante

$\%E$ el porcentaje teórico preestablecido para cierta aleación

$\%e_p$ el porcentaje de pérdidas por quemado

Ejemplo de cálculo:

Para una fundición de 10kg y una aleación de aluminio con 3% de Cu.

Los porcentajes en masa necesarios para las cargas incluidas las pérdidas por quemado son

$$\%C_{Cu} = \frac{3 * 1.5}{100} + 3$$

$$\%C_{Cu} = 3.045\%$$

$$\%C_{Al} = \frac{97 * 2}{100} + 97$$

$$\%C_{Al} = 98.94\%$$

La masa de cobre necesaria será

$$M_{Cu} = M_{Total} * \%C_{Cu}$$

$$M_{Cu} = 10kg * 3.045\%$$

$$M_{Cu} = 0.3045kg$$

La masa de aluminio necesaria será

$$M_{Al} = M_{Total} * \%C_{Al}$$

$$M_{Al} = 10kg * 98.94\%$$

$$M_{Al} = 9.894kg$$

Es decir, que para preparar 10kg de aleación de aluminio con cobre al 3% se necesitan 9.9kg de aluminio y 0.305kg de cobre, lo que da un total de 10.2kg de material en bruto.

5.3.2.2. Cálculo de cargas

Se clasifica la chatarra y se pesa, para saber que cantidad se tiene de cada elemento.



Imagen 17. Pesado de chatarra.

Se calculan las cargas de a cuerdo al método descrito, para la aleación 356.

Tabla 5.3.2.2 Cargas necesarias para obtener la aleación.

Masa total a obtener de aleación [kg]:				32
Elemento	%	% Pérdidas	% Aleación	Masa [kg]
Si	3,0%	1	3,03%	0,970
Cu	3,0%	1,5	3,05%	0,974
Mg	0,6%	3	0,62%	0,198
Al	93,4%	2	95,27%	30,486
TOTAL	100,0%		101,96%	32,628

Para la aleación 195, 4% de cobre, no se hace necesario el cálculo de cargas, pues como chatarra se utiliza solamente perfilería de duraluminio (aleación 2017) que tiene la misma composición porcentual en masa.

Con las cargas listas, se enciende el horno y se eleva la temperatura sobre la temperatura de fusión, se siguen agregando las cargas poco a poco hasta tener una colada uniforme.



Imagen 18. Horno de GLP encendido.

5.4. DESGASIFICACIÓN

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a absorber Hidrógeno durante la fusión y la colada. Debido a que la solubilidad del Hidrógeno en el aluminio se incrementa exponencialmente al aumentar la temperatura, una gran cantidad de Hidrógeno es captado por el aluminio durante la fusión, mismo que es expulsado durante la solidificación formando burbujas; un porcentaje de éstas salen a la atmósfera, pero la cantidad remanente permanece en el aluminio causando porosidades en la pieza sólida.

La formación de estas porosidades es promovida por la presencia de inclusiones en el metal, éstas actúan como nucleantes para las burbujas durante la solidificación, de ahí que el objetivo de la desgasificación sea tanto reducir el nivel del Hidrógeno en el metal líquido, como el de reducir el número de inclusiones.

Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumenta la absorción de gases y las pérdidas por oxidación. Para piezas con espesores menores a 10mm la temperatura de colado recomendada es de 720 °C.

La presencia de hidrógeno se debe en primer lugar a condiciones defectuosas del horno, herramientas húmedas, chatarra oxidada y prolongado mantenimiento del metal a excesiva temperatura. Piezas de aluminio porosas, significan piezas rechazables, con baja resistencia mecánica, ausencia de compacidad y mal acabado superficial.

Para el proceso de desgasificación y escoriación existen varios productos, de los que hemos elegido dos por facilidad de adquisición y sus características fundentes:

- ALU FUNDEX Extra
- APARTAGAS H-7

ALU FUNDEX EXTRA

Son una serie de fundentes que protegen, cubren y limpian las aleaciones de aluminio durante la fusión. Estos productos forman una capa protectora sobre el metal fundido, la cual reduce la oxidación y minimiza la absorción de hidrógeno.

Presenta las siguientes características: reducción de la oxidación y las pérdidas de aluminio con un consiguiente incremento de la fluidez; Absorción de materias no metálicas o inclusiones mejorando las propiedades mecánicas; Formación de una capa protectora que conlleva a una menor facilidad de absorción de gases; Reducción del contenido metálico en las escorias, por lo tanto mayor rendimiento de fusión; Es un fundente escorificante de alta eficiencia que puede ser aplicado en la fundición de aluminio en crisol u horno de reverbero. Se aplica sobre la superficie del metal fundido al apagar el horno en conjunto con el APARTAGAS H-7.

Su aplicación debe ser del 0.3 al 0.5% en peso con respecto a la carga dependiendo del tipo de material a fundir. En este caso, para 32kg de carga se requieren 100 gramos de fundente.

APARTAGAS

Se presenta en dos formas, pastillas y polvo, ambos tienen la misma finalidad y efecto. Las pastillas vienen en un tamaño de 50, 200, 500 y 1000 gramos.

Cuando la temperatura alcanza 700°C, se apaga el quemador o se saca el crisol del horno. El calor residual eleva la temperatura de la carga hasta unos 750°C. Cuando la temperatura comienza a descender, se sumergen por medio de una campana perforada, las tabletas o el polvo necesario para desgasificar el metal fundido manteniendo la campana en el fondo del crisol hasta que cese el desprendimiento de burbujas.

Se hace énfasis en que la desgasificación debe hacerse con una temperatura descendente. Si la temperatura aún está subiendo, la desgasificación no va a ser igual de efectiva.

Para coladas a base de lingotes se recomienda el 0.15 % de APARTAGAS con respecto a la carga de metal. Si las coladas son hechas a base de desperdicios o chatarras, se deberá utilizar un 0.25%. Para 32kg de carga se requieren 80 gramos, cada pastilla tiene 50 gramos, por lo que se utilizan 2 pastillas.



Imagen 19. Adición de fundentes y desgasificantes con el horno apagado.

5.4.1 DESGASIFICACIÓN CON ARGÓN

Además de los desgasificantes sólidos se utilizó desgasificación con argón. Los desgasificantes tradicionales como cloro, hexacloroetano y diclorodifluorometano (Freón 12), tienden a ser sustituidos debido a su alta emisión de contaminantes que atacan la capa de ozono. Esto ha impulsado el desarrollo de nuevos métodos de desgasificación, tales como, el uso de gases inertes los cuales tienen definitivamente una influencia directa sobre el

aumento de la calidad del producto, y en la completa eliminación de los gases contaminantes.

El proceso de desgasificación del aluminio consiste en la inyección de un flujo de gas de arrastre (Argón o Nitrógeno) en el aluminio fundido; dicha inyección debe llevarse a cabo antes de iniciar la colada del metal fundido. El mecanismo de desgasificación, consiste en la difusión del Hidrógeno a las burbujas del gas de arrastre, esto debido a las diferencias de presión parcial de Hidrógeno entre el gas de arrastre y el aluminio líquido.

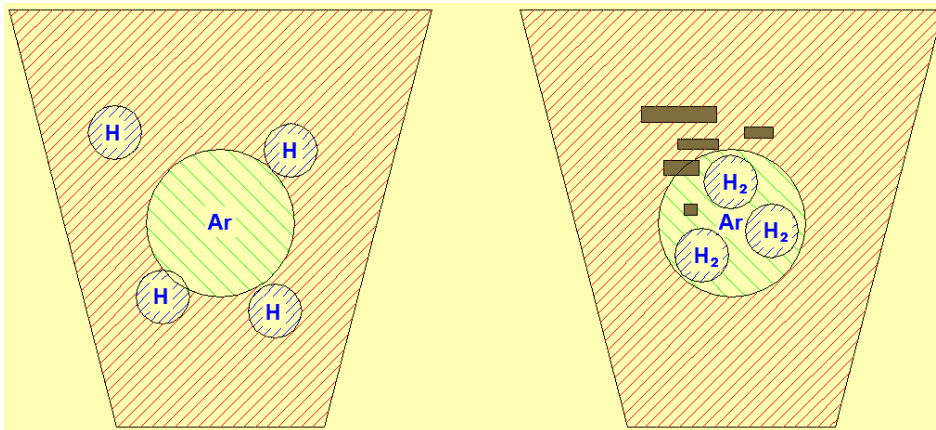


Figura 81. Burbuja de argón dentro de la colada de aluminio: 1ro.-La burbuja de argón funciona como cámara de vacío. 2do.- El hidrógeno monoatómico es absorbido dentro del Ar formando H_2 y arrastrando inclusiones.

Uno de los parámetros más importantes de la desgasificación del aluminio y que determina el grado de la eficiencia en la desgasificación, es el tamaño de la burbuja inyectada; cuando el tamaño de dicha burbuja es grande la desgasificación resulta inadecuada. Otros de los factores importantes en la desgasificación del aluminio son: el suministro de un número suficiente de burbujas y la protección de la superficie del metal líquido; esto, para evitar la reabsorción del Hidrógeno.

El Argón es un gas monoatómico, incoloro, inodoro, no corrosivo y no inflamable. El Argón no reacciona con ningún elemento ni compuesto, por lo que no requiere tanques de almacenamiento ni equipos de control de flujo especiales. Su eficiencia como desgasificante es muy alta y su emisión de contaminantes es nula; la remoción de Hidrógeno es mayor y los tiempos de desgasificación son menores que los del Nitrógeno.

La aplicación se la realiza mediante lanza durante 5 minutos y con un caudal de 2 litros por minuto, recomendado para aleaciones 356 y similares.



Imagen 20. Insuflado de argón en el crisol con metal fundido mediante lanza de acero inoxidable.

Posteriormente se procede a retirar toda la escoria que se forma en la superficie con ayuda de un colador de acero. Es muy importante que durante todo este proceso la temperatura no varíe demasiado y permanezca alrededor de 750°C.



Imagen 21. Retirado de la escoria formada sobre el metal fundido.

5.5. COLADO

Por último se vierte el metal fundido dentro del tragadero de cada molde a una altura aproximada de 20cm cuidando que no existan fugas de material por las uniones de las tapas de la caja y de que el caudal sea constante.



Imagen 22. Colado en el molde 1.

Se espera que el metal rebose por los respiraderos lo que garantiza una buena fluidez y un buen llenado.



Imagen 23. Colado en el molde 2.

Se deja enfriar, no muy lentamente para obtener un tamaño de grano fino, por lo que se retira de la arena en aproximadamente 30 minutos.



Imagen 24. Pieza de aluminio obtenida con sistema de alimentación y respiraderos.

Se repite el proceso para el caso de la aleación A195, con la diferencia que en este caso no es necesario un cálculo de cargas, pues la chatarra solo consiste en perfilaría de Duluminio.

5.6 DISEÑO DEL PROCESO DE SOLDADURA

5.6.1 PROCESO DE SOLDADURA

Tabla 5.6.1 Procesos Recomendados para la Soldadura de Metales y Aleaciones

PROCESO DE SOLDADURA	Acero dulce bajo carbono -tipos SAE 1010 y 1020	Aceros de mediano carbono -tipos SAE 1030 y 1050	Aceros de baja aleación - tipos SAE 2340, 3145, 4130 y 4350	Aceros austeníticos inoxidables tipos AISI 301, 310, 316 y 347	Aceros ferríticos y martensíticos inoxidables - tipos AISI 405, 410, 430	Aleaciones de alta resistencia y elevada temperatura - tipos 17-14, CuM, 16-25-6 y 19-9 DL	Hierro fundido y hierro gris	Aluminio y aleaciones de aluminio	Magnesio y aleaciones de magnesio	Cobre y aleaciones de cobre	Níquel y aleaciones de alto contenido de níquel	Plata	Oro, platino e iridio	Titanio y aleaciones de titanio
Arco metálico protegido	R	R	R	R	R	R	S	S	NA	NR	R	NR	NR	NA
Arco sumergido	R	R	R	R	S	S	NR	NR	NA	NR	S	NR	NR	NA
Soldadura TIG	S	S	S	R	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R
Soldadura MIG	S	S	S	R	S	S	NR	R	S	R	R	S	S	S
Soldadura por Arco con presión	R	R	R	R	S	S	NR	S	NR	S	S	S	S	S
Soldadura por puntos	R	R	R	R	S	S	NA	R	S	S	R	NR	S	S
Soldadura a Gas	R	R	S	S	S	S	R	S	NR	S	S	R	R	NA
Soldadura fuerte al horno	R	R	S	R/S	S	NR	NR	R	NR	S	R	S	S	S
Soldadura fuerte a soplete	S	S	NR	S	S	NR	R	R	NR	R	R	R	R	S

R=Recomendado

S= Satisfactorio

NR= No recomendado

NA=No aplicable

[MANUAL DE SOLDADURA Y CATALOGO DE PRODUCTOS; SOLDEXA; 7MA EDICIÓN; OERLIKON; PÁG. 32.]

Incluso para los expertos en la soldadura de aceros, el soldeo de las aleaciones de aluminio puede presentar un verdadero desafío.

La mayor conductividad térmica y el menor punto de fusión de las aleaciones de aluminio pueden fácilmente producir perforaciones a menos que los soldadores sigan los procedimientos prescritos.

También la alimentación del alambre durante el soldeo MIG (GMAW) presenta un reto debido a que el alambre es más blando que el acero, tiene una resistencia más baja y tiende a enredarse en los rodillos de arrastre.

En la soldadura por Arco Metálico con Gas, conocida como Proceso MIG/MAG, la fusión es producida por un arco que se establece entre el extremo del alambre aportado continuamente y la pieza a soldar. La protección se obtiene íntegramente de los gases suministrados simultáneamente con el metal de aporte.

Características del proceso

Este proceso permite:

- Excelente calidad de soldadura en casi todos los metales y aleaciones empleados por la industria.
- Mínima limpieza después de soldar.
- Arco y baño fundido claramente visibles para el soldador.
- Fácil trabajo en todas las posiciones, lo que depende del diámetro del alambre y de las variables del proceso.

Alta velocidad de trabajo.

- Exento de escoria.
- Cuando se hace uso de argón o helio (MIG), es para soldar sólo material no ferroso, aluminio, cobre, magnesio, etc.

La razón del uso de Argón o Helio como gas protector en estos materiales se debe al carácter oxidante del CO_2 .

5.6.2 PREPARACIÓN DEL METAL BASE

Para soldar el aluminio, los operarios deben limpiar cuidadosamente el material base y eliminar cualquier óxido de aluminio y contaminación por hidrocarburos procedentes de lubricantes o disolventes de corte.

El óxido de aluminio en la superficie del material funde a 2038°C mientras que el aluminio, metal base de debajo, funde a 660°C . Por ello, cualquier óxido que

quede en la superficie del metal base inhibirá la penetración del metal de aporte en la pieza.

Para eliminar los óxidos de aluminio, utilizar un cepillo de alambre de acero inoxidable o disolventes y soluciones decapantes. Si se usa un cepillo de acero inoxidable, cepillar solo en una dirección. Tener cuidado de no cepillar demasiado enérgicamente, ya que pueden incrustarse los óxidos en la pieza. Usar solo el cepillo para piezas de aluminio; no limpiar aluminio con un cepillo que haya sido utilizado para acero inoxidable o acero al carbono. Cuando se usen soluciones químicas decapantes, asegurarse de que han sido eliminadas de la pieza antes de soldar.

Para minimizar el riesgo de que los hidrocarburos de aceites o soluciones de corte entren en la soldadura, eliminarlos con un desengrasante. Verificar que el desengrasante no contenga hidrocarburos.

5.6.3 PRECALENTAMIENTO

Rara vez excede los 300° C pues se afectaría las propiedades del material base. La serie 5000 correspondiente a aleaciones Tratables Térmicamente (envejecibles) con 3% de Mg no deben precalentarse a más de 120°C por más de 15 minutos manteniendo la temperatura entre pasadas inferior a 150°C para prevenir exfoliación.

Aleaciones con 4 a 4,5 % de Mg (5083, 5086, 5456) no deben precalentarse a más de 90°C si hay peligro de Sobrecalentamiento.

A menudo una temperatura de 90°C al comienzo de la soldadura es suficiente para evitar problemas de falta de fusión sin necesidad de volver a reajustar los parámetros de soldadura una vez comenzada esta.

El aluminio no cambia de color con las variaciones de temperatura por debajo del punto de fusión, por lo tanto la observación visual no es forma de controlar la temperatura.

Por lo tanto se selecciona la temperatura de 90°C, para evitar problemas de falta de fusión.

Además, colocar puntos de soldadura al principio y al final de la zona a soldar ayudará la eficacia del precalentamiento. También debe precalentarse una

pieza de aluminio grueso cuando se suelda a una pieza delgada. En el caso de problemas de fusión insuficiente en el inicio, la solución puede ser la adición de chapas de inicio y fin de soldadura.

5.6.4 PARAMETROS DEL PROCEDIMIENTO

5.6.4.1 La técnica del empuje

Con aluminio, utilizar una técnica de empuje en lugar de arrastre, alejando la pistola fuera de baño, se conseguirá menor contaminación en la soldadura, y mejor acción limpiadora y cobertura de gas de protección.

5.6.4.2 Velocidad de avance

La soldadura del aluminio necesita ser realizada “caliente y rápida”. A diferencia del acero, la alta conductividad térmica del aluminio determina el uso de ajustes de amperajes, tensiones y velocidades de avance más altos. Si la velocidad de avance es demasiado baja, el soldador corre el riesgo de perforar la chapa, en especial, si es chapa delgada.

5.6.4.3 Gas de protección

El Argón, debido a su buena acción limpiadora y perfil de la penetración, es el gas de protección más comúnmente usado para la soldadura del aluminio. En la soldadura de las aleaciones de aluminio de la serie 5XXX un gas de protección mezcla de argón con helio, con un máximo del 75% de helio, minimizará la formación de óxido de magnesio.

La tarea, que cumplen los gases protectores arriba mencionados, es la de proteger al arco, al baño de fusión y al material de aporte contra el peligroso acceso de los gases de la atmósfera.

5.6.4.4 Alambre de soldadura

Para escoger el electrodo adecuado es necesario analizar las condiciones de trabajo en particular y luego determinar el tipo y diámetro de electrodo (alambres de 1,2 o 1,6 mm de diámetro) que más se adapte a estas condiciones.

Este análisis es relativamente simple, si el operador se habitúa a considerar los siguientes factores:

1. Naturaleza del metal base.
2. Dimensiones de la sección a soldar.
3. Tipo de corriente que entrega su máquina soldadora.
4. En qué posición o posiciones se soldará.

Por tanto, se seleccionó el alambre electrodo MIG AW 4043 según norma A.W.S. A 5-10, que es un alambre de alimentación semi-automática, cuyo depósito cumple perfectamente la norma ANSI/AWS ER 4043 del aluminio hasta 5% de silicio.

El procedimiento para soldar con este alambre electrodo, se aplica con proceso GMAW (MIG) con el uso de gas de protección Argón o mezclas (argón-helio), a un flujo entre 15 a 35 pies³/hr, mientras que el voltaje y amperaje es variable a regularse según, espesor, posición, gas y geometría de la unión.

Durante el soldeo, mantener la manguera de la pistola lo más recta posible para minimizar la resistencia a la alimentación. Verificar la correcta alineación entre los rodillos de arrastre y los tubos guía para prevenir el raspado del aluminio.

Utilizar rodillos de arrastre diseñados para aluminio. Ajuste la tensión del rodillo de arrastre para suministrar una tasa de alimentación constante. Tensión excesiva deformará el alambre y causará rugosidad y alimentación errática; tensión demasiado pequeña dará alimentación irregular. Ambas condiciones pueden conducir a un arco inestable y porosidad en la soldadura.

5.6.4.5 Soldaduras de forma convexa

En la soldadura del aluminio, la fisuración del cráter causa la mayoría de defectos. La fisuración proviene del alto valor de la dilatación térmica del aluminio y de las considerables contracciones que ocurren cuando se enfrían las soldaduras. El riesgo de fisuración es más grande con cráteres cóncavos, dado que la superficie del cráter se contrae y rompe cuando se enfría. Por ello, debe rellenarse el cráter de manera que quede convexo (formando un montículo). Al enfriarse la soldadura, la forma convexa del cráter compensará las fuerzas de contracción.

5.6.5 SELECCIÓN DEL EQUIPO

Cuando se selecciona una fuente de corriente para la soldadura MIG del aluminio, hay que considerar en primer lugar el método de transferencia: arco espray o arco pulsado.

Para el soldeo con arco espray puede utilizarse equipos de corriente constante (cc) y de tensión constante (cv). El arco espray toma un chorro minúsculo de metal fundido y lo pulveriza a través del arco desde el alambre hasta el metal base. Para aluminio grueso que requiere corrientes de soldeo superiores a 350 A, los equipos de corriente constante, cc, producen resultados óptimos.

La transferencia por arco pulsado se lleva a cabo, generalmente, con un equipo de tecnología inverter. Los equipos más recientes llevan instalados procedimientos de arco pulsado basados en el tipo y diámetro de alambre. En el MIG pulsado, una gota de metal de aporte se transfiere desde el alambre a la pieza en cada pulso de corriente. Este proceso proporciona menos salpicaduras y velocidades de avance más rápidas que las del soldeo por arco espray. También se tiene mejor control del aporte térmico (heat input), mayor facilidad de soldeo en posición y permite al operario soldar material delgado a bajas velocidades de alimentación y corrientes.

Para el soldeo del aluminio utilizar una espiral independiente para la pistola. Para evitar calentamiento del alambre, intentar restringir ambos finales de la camisa para eliminar separaciones entre la camisa y el difusor de gas de la pistola.

Cambiar las camisas a menudo para minimizar el potencial abrasivo del óxido de aluminio que causa problemas de alimentación.

Utilizar boquillas de contacto 0,4mm más grandes que el diámetro del alambre que se utilice, ya que las boquillas calientes se dilatan en forma oval y probablemente limitarían la alimentación del alambre. Generalmente, cuando una corriente de soldadura supera los 200 A, se debe utilizar una pistola refrigerada por agua para minimizar el aumento de temperatura y reducir las dificultades de la alimentación.

5.6.6 DETERMINACIÓN DE LA UNIÓN SOLDADA

La unión soldada debe tener las siguientes especificaciones:

1. Los materiales base alineados.
2. La unión de la junta es en "V", para aumentar la cantidad de aporte de material, debido al espesor de la unión.
3. El ángulo de bisel $\alpha=60^\circ$
4. La unión de la junta es a tope ya que genera el suficiente calor como para fundir el talón.
5. El talón usado como refuerzo es de 3 mm
6. No existe deslizamiento entre los metales base.

Todas las especificaciones del procedimiento de soldadura quedan estipuladas en el **Anexo 2 WPS**.

5.7. SOLDADURA Y ACABADOS

Una vez fundidas las partes de la antena se debe limpiar toda la arena con ayuda de una gratina o cepillo de acero, se cortan los alimentadores y se retiran las rebabas y se sacan los noyos; se deben limpiar bien las paredes internas para no agregar peso innecesario.



Imagen 25. Vistas frontal y superior de las partes de la antena limpias y sin el sistema de alimentación.

Se deben comprobar las medidas, pues la contracción dimensional puede variar en pequeñas proporciones y refrentar el exceso. Este sobredimensionamiento puede ser aprovechado para la preparación del bisel para proseguir con la soldadura.



Imagen 26. Comprobación de medidas en la parte 1 de la antena que debe ser 1250mm; tiene 6mm de sobredimensionamiento en su longitud.

Se preparan los biseles y las juntas, cuidando que la concetricidad sea adecuada y se procede a soldar con las recomendaciones técnicas descritas en el punto anterior. Limpiar bien los biseles para retirar los óxidos y asegurar una correcta penetración del cordón.

Las juntas se deben precalentar hasta aproximadamente 100 °C, para evitar las porosidades en la soldadura, puesto que al estar frío el aluminio, los gases y especialmente el hidrógeno no tienen tiempo de salir antes de que se solidifique el cordón.

El tipo de soldadura que se utilizó es MIG, con protección de argón, una corriente de 200 A, electrodo de alambre de aluminio de 1.1 mm de diámetro.

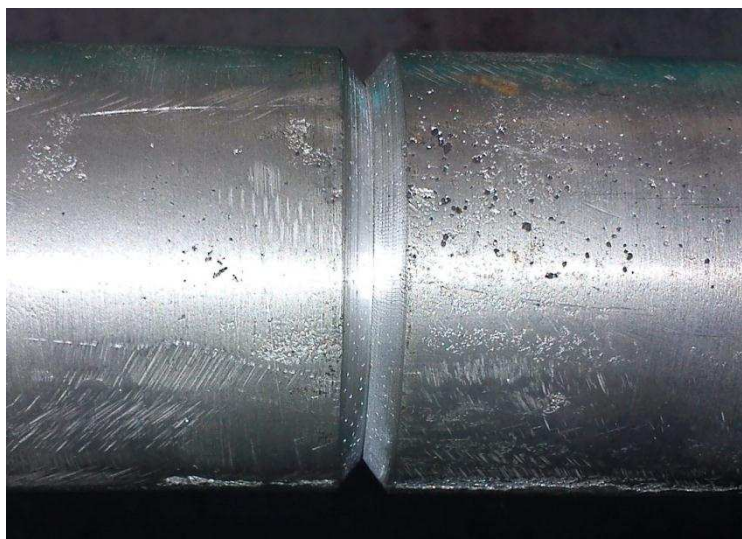


Imagen 27. Junta realizada entre las partes 3 y 4 de la antena. Similar a las otras dos juntas.

La junta es montada sobre el mandril del torno, lo que hace sencilla su rotación durante la soldadura, por lo que la velocidad de avance es de 1 revolución en 10 segundos o su equivalente de 17 mm/s.



Imagen 28. Montaje sobre el mandril del torno con ayuna de una luneta.



Imagen 29. Cordón de soldadura TIG, se puede distinguir la zona afectada por el calor.

Una vez terminada la soldadura se deben quitar las rebabas y dar el acabado final. Lo mejor es hacerlo torneando y después limando la superficie para evitar fallas en la geometría de la pieza.

Con el área de soldadura limpia, y luego de terminar la soldadura de los tres cordones, se debe realizar un tratamiento térmico para alivio de esfuerzos residuales.

5.8 TRATAMIENTO TÉRMICO

Un tratamiento térmico, en sentido amplio de la palabra, se refiere al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su estructura metalográfica o eliminar tensiones residuales. Cuando se aplica a aleaciones de aluminio, el término tratamiento térmico se refiere usualmente a las operaciones empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de las aleaciones de forja o de moldeo endurecibles por precipitación.

A continuación se abordarán los tratamientos térmicos de esferoidización y los tratamientos T5 y T6.

5.8.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ESFEROIDIZACIÓN DEL SILICIO³

Los tratamientos de esferoidización, al igual que los de modificación, permiten variar la forma y la distribución de los cristales de silicio eutéctico. La esferoidización se produce al calentar las muestras a temperaturas altas, próximas a la temperatura eutéctica, [500-550 °C], durante tiempos prolongados. La evolución del silicio depende de la estructura de partida y de la temperatura de tratamiento elegida. Así pues, el tratamiento de esferoidización puede potenciar las características mecánicas de la aleación aumentando la plasticidad y el alargamiento, sin pérdida de la resistencia mecánica.

Como consecuencia del tratamiento de esferoidización, las partículas de silicio experimentan una evolución en la que cabe distinguir tres etapas o fases que se comentan a continuación:

5.8.1.1 Etapa de subdivisión o escalonamiento

Este primer estado de la evolución de los cristales de silicio aparece en aquellos puntos más activos de la superficie del cristal, con mayor energía libre, llamados escalones de esferoidización. Los contornos o aristas vivas de los cristales aparecen redondeados después de la subdivisión, debido a la

³ PÁRAMO L., Víctor; "Esferoidización del eutéctico en las aleaciones aluminio silicio"; 1998

redisolución parcial del silicio eutéctico; su división produce una reducción de su longitud. Por el hecho de producirse la subdivisión de las partículas de silicio, su número aumenta y su morfología tiende hacia la forma ideal que es la esférica. En el caso de los cristales de silicio eutéctico pertenecientes a aleaciones sin modificar, esta primera etapa de escalonamiento aparece claramente. Mientras que en el caso de aleaciones modificadas, con silicio eutéctico, no se detecta escalonamiento debido a que los cristales de silicio se presentan ya redondeados. Sin embargo, en el caso de que exista silicio no modificado, sí se produce esta primera etapa. El escalonamiento tiene lugar en un amplio margen de tiempos y depende de la temperatura. A temperaturas bajas, esta primera etapa siempre tiene lugar, existiendo una subdivisión previa en estrechamientos o puntos de crecimiento de los brazos dendríticos. Los poliedros de silicio primario suelen cambiar de morfología para tiempos de tratamiento prolongados cuando la temperatura es baja, pero cuando son de temperatura cercana a la eutéctica, 550 °C, la evolución es más rápida. Los cristales de silicio primario tienden a disolverse. Parece tratarse siempre de un proceso de disolución por zonas más activas

5.8.1.2 Etapa de crecimiento

Tras producirse la subdivisión de las partículas de silicio, el siguiente paso es el decrecimiento, en el que unas partículas crecen a expensas de otras por la falta de homogeneidad del silicio en la fase matriz, lo que supone la existencia de un gradiente de concentración, y provoca un flujo o trasiego de átomos de silicio, desde las partículas de menor radio hacia las de mayor, con el fin de mantener el equilibrio de la interfase. En este estadio se consigue una redistribución más homogénea de las partículas de silicio, disminuye el número total de partículas, y su forma se hace más esférica. Este proceso se desarrolla de forma continua a tiempos de tratamiento prolongados.

5.8.1.3 Etapa de esferoidización

Se tiende a la forma más estable de las partículas de silicio, que es la esférica; la etapa de esferoidización se superpone a la de crecimiento, sin una separación clara. La evolución descrita se puede considerar válida para cualquier estructura, independientemente del contenido de silicio de la aleación. Un esquema de esta evolución se esquematiza en la siguiente figura:

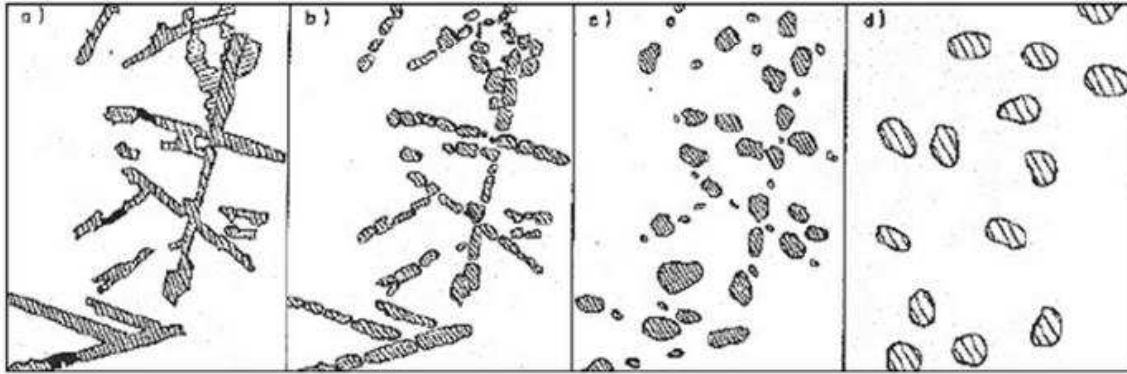


Figura 82. Representación de la evolución experimentada por los cristales de silicio eutéctico, durante el tratamiento de esferoidización: a) Estructura original, cristales de silicio ramificado, b) Primera fase del proceso de subdivisión de cristales, c) Engrosamiento y disminución del número de partículas, d) Estructura final idealizada, partículas esféricas

[\[HTTP://ES.SCRIBD.COM/DOC/54532651/TRATAMIENTOS-TERMICOS-DEL-ALUMINIO\]](http://es.scribd.com/doc/54532651/Tratamientos-Termicos-del-Aluminio)

5.8.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ESFEROIDIZACIÓN

El proceso de esferoidización está influenciado por una serie de factores, como son la temperatura a la que se efectúa el ensayo, el tiempo de tratamiento, la estructura departida (modificada o no modificada) y la composición de la aleación. Los cambios producidos a raíz del proceso de esferoidización, revierten en una variación de las propiedades mecánicas, dureza, alargamiento, etc. La redistribución de los cristales de silicio en la matriz de aluminio provoca una mejora en el comportamiento plástico y en la maquinabilidad de la aleación.

5.8.2.1 Influencia del tiempo de tratamiento

Anteriormente se ha indicado la evolución que experimentan las partículas de silicio en el proceso de esferoidización, durante el que se suceden tres etapas o fases, que evolucionan a medida que aumenta el tiempo de tratamiento. Las aleaciones de aluminio-silicio que han sido sometidas al proceso de modificación presentan un mayor grado de esferoidización que las no modificadas a tiempos de tratamiento menores. Esta misma situación se observa en las aleaciones moldeadas en molde permanente, con eutéctico fino, respecto a las moldeadas en arena. En las partículas de silicio el diámetro medio, la relación de tamaños y el número de partículas varían en función del tiempo de tratamiento. En la etapa de subdivisión o escalonamiento, el

diámetro medio de partícula disminuye debido a la fragmentación de las partículas. Posteriormente, en las etapas de crecimiento y esferoidización, se produce un aumento en el diámetro medio. El diámetro medio de cristal de silicio es mucho menor en las muestras modificadas que en las no modificadas. El número de partículas varía inversamente con el diámetro de partícula mientras que el volumen total de silicio permanece constante. En cuanto a la relación de tamaños, se produce inicialmente una mayor variación en las aleaciones no modificadas que en las modificadas, debido a la etapa de subdivisión. Lo mismo ocurre en las aleaciones moldeadas en arena respecto a las coladas en molde permanente.

5.8.2.2 Influencia de la temperatura

La temperatura de tratamiento juega un papel importante en la determinación de las características de las partículas de silicio. La velocidad de esferoidización es directamente proporcional a la temperatura del tratamiento. La energía de activación para el crecimiento es alta lo que indica que tal proceso es muy sensible a las fluctuaciones de la temperatura. La temperatura a seleccionar para el tratamiento térmico depende de la composición química de la aleación. El incrementar la temperatura supone el facilitar la difusión de los átomos de silicio, con lo que se logra una buena homogeneización en el seno de la matriz. Los ensayos de dureza muestran que el aumento de la temperatura de tratamiento provoca un descenso acusado de esta propiedad para el mismo tiempo de ensayo.

5.8.2.3 Influencia de la composición y estructura de partida

La composición y estructura de partida influyen directamente sobre el tiempo y temperatura empleados durante el proceso de esferoidización. El aspecto fibroso del silicio eutéctico de una aleación modificada, es decir, libre de aquellos puntos más activos de la superficie del cristal con mayor energía libre, supone que la primera etapa de subdivisión no se produzca, mientras que tiene lugar en la aleación no modificada. La temperatura de tratamiento se elige en función de la composición química, ya que temperaturas demasiado altas suponen la fusión de los intermetálicos situados en el límite de grano, que tienen una temperatura de fusión próxima a la temperatura eutéctica del sistema aluminio-silicio. En las aleaciones aluminio-silicio sin modificar, los

cristales de silicio eutéctico tienen forma acicular y ramificada, con contornos puntiagudos que favorecen la aparición de microgrietas y reducen la ductilidad de la aleación. Por otra parte, el silicio modificado, con formas redondeadas o más o menos esféricas, aumenta la plasticidad de la aleación y su resistencia a la propagación de grietas. La resistencia a la fatiga y a la rotura mejoran con tratamientos térmicos prolongados.

5.8.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS T5 Y T6

T5: Enfriado desde una alta temperatura durante el proceso de conformación y envejecido artificialmente.

T6: Tratamiento térmico de solución y luego envejecido artificialmente.

Cuando ciertas aleaciones de aluminio se mantienen a temperaturas inferiores a 250°C, después de templadas desde altas temperaturas (350°C ó más), aumenta su resistencia mecánica. El descubrimiento del endurecimiento estructural por envejecimiento, condujo al desarrollo de la primera aleación industrial, el Duraluminio. Desde entonces, las aleaciones de aluminio endurecibles por precipitación han adquirido una importancia práctica considerable, gracias a las mejoras continuas en sus características físicas y mecánicas específicas, y a su aptitud para la conformación (moldeo o colada continua o semicontinua), forja en caliente o en frío, etc. Este fenómeno de endurecimiento estructural no es específico de las aleaciones de aluminio, sino que se da también en aleaciones base cobre, magnesio, plomo o las superaleaciones base cobalto o níquel.

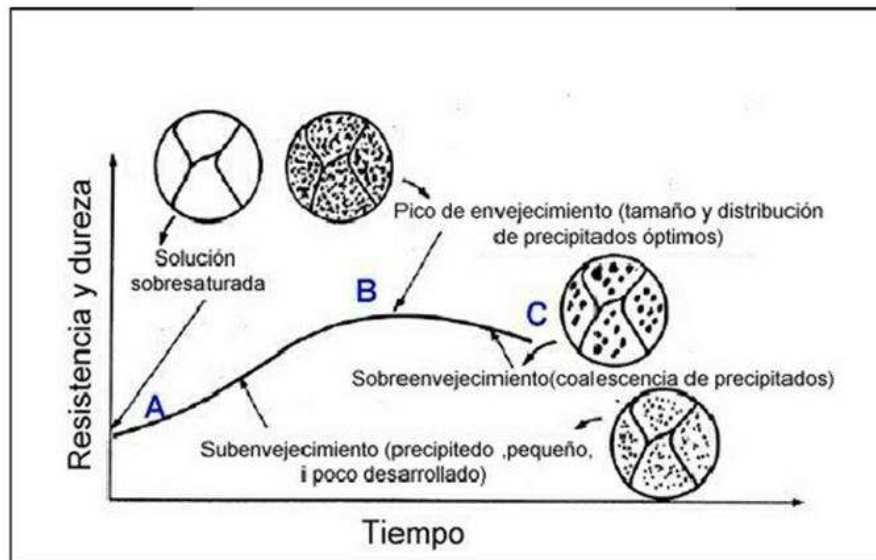


Figura 83. Evolución esquemática de la dureza y la resistencia de una aleación de aluminio de endurecimiento estructural. I) mantenido a temperatura ambiente después del temple. (II) mantenido a temperatura de revenido después del temple y maduración a temperatura ambiente.

[[HTTP://ES.SCRIBD.COM/DOC/54532651/TRATAMIENTOS-TERMICOS-DEL-ALUMINIO](http://es.scribd.com/doc/54532651/Tratamientos-Termicos-del-Aluminio)]

5.8.3.1 Características de la precipitación estructural

5.8.3.1.1 Criterios de composición y secuencia de tratamientos térmicos de las aleaciones

Considérese una aleación binaria aluminio-elemento. Para que sea apta al endurecimiento por precipitación es necesario que el elemento de aleación en la matriz de aluminio, presente en estado sólido una solubilidad creciente con la temperatura.

Después de la puesta en solución (generalmente entre 300 y 550°C dependiendo de la aleación), el endurecimiento por envejecimiento se debe a la formación de precipitados coherentes con la matriz, a partir de esta solución sobresaturada. Durante la etapa de maduración o envejecimiento natural, la aleación endurece progresiva y espontáneamente y la solución sólida se descompone para dar lugar a la formación de pequeñas zonas o agrupaciones de átomos de soluto. Estas agrupaciones están siempre situadas en los nudos de la red de aluminio, y están constituidas por pequeñas porciones de planos cristalográficos de la red de aluminio enriquecidas en átomos de soluto.

Estas zonas introducen distorsiones elásticas en la red de la matriz. En ciertos casos, esta precipitación se ve facilitada por la presencia de defectos en la red, tales como dislocaciones, que favorecen una difusión más elevada de átomos de soluto o acomodan los campos de deformación elásticos.

Un calentamiento posterior (envejecimiento), acentúa todavía más la descomposición de la solución sólida por la precipitación de más átomos, produciendo precipitados más finos (tamaño comprendido entre 2 y 50 nm) que endurecen todavía más la aleación, hasta un máximo de resistencia mecánica. La aparición de nuevo del precipitado de equilibrio sólo es posible mediante un sobre-envejecimiento efectuado a temperatura bastante alta, durante un tiempo superior al de máximo endurecimiento. El ablandamiento de la aleación está, entonces, regido por la coalescencia de precipitados, y los más grandes (del orden de 1 micrómetro) se hacen visibles al microscopio óptico. El sobre-envejecimiento produce una microestructura de equilibrio y los precipitados tienen generalmente una estructura Windmanstätten.

5.8.3.1.2 Secuencia de precipitación de las aleaciones de aluminio templadas

Por razones de orden termodinámico y cinético la solución sólida sobresaturada, obtenida por puesta en solución y temple, no da lugar a temperatura ambiente a la precipitación de la fase intermetálica de equilibrio. El endurecimiento de las aleaciones de aluminio a temperatura ambiente o por envejecimiento artificial, resulta de una descomposición secuencial de la solución sólida α y de un empobrecimiento progresivo en soluto de esta última, siguiendo las etapas que aparecen en la Tabla 5.8.3.1.2. La secuencia presentada en esta tabla no es válida exactamente para todos los sistemas pero se presenta como una guía general.

Tabla 5.8.3.1.2. Secuencia observada a menudo en las aleaciones endurecibles por envejecimiento

Estado bruto de temple	→ → envejecimiento → →		→sobre-envejecimiento
α_0	$\alpha_1 + GP$	$\alpha_2 + \beta'$	$\alpha_3 + \beta$
solución sólida	zonas GP	Precipitados metaestables β'	Precipitados de equilibrio β
ccc	Precipitados coherentes	Precipitados coherentes o semicoherentes	Precipitados incoherentes

La selección de las temperaturas de tratamiento es crítica ya que altas temperaturas pueden provocar la fusión parcial mientras que temperaturas bajas no ofrecen una completa homogeneización.

El tratamiento T5 tiene la ventaja de realizarse con el material bruto de colada, y sólo debe envejecer por tratamiento a baja temperatura. Es mucho más simple y menos costoso que el T6, y evita además muchas distorsiones que pueden aparecer en partes complejas al enfriar. De todas formas, el tratamiento T5 no provoca esferoidización del silicio eutéctico y consecuentemente las piezas así tratadas exhiben menor ductilidad que con el tratamiento T6. El tratamiento T5 se aplica a menudo para crear estabilidad dimensional del componente en servicio. El tratamiento T6 se utiliza generalmente para incrementar el límite elástico y la resistencia a tracción. Si se desea un producto que tenga buena maquinabilidad hay que incrementar la dureza. El T6 es ideal para elevar la dureza y la resistencia a tracción.

Los tratamientos T6 típicos de las aleaciones A356 y A357 son:

1. Puesta en solución 520-530°C durante 2-8 horas
2. Enfriamiento en agua a 20-80°C
3. Envejecimiento artificial 150-180°C durante 2-8 horas.

Los tratamientos T5 requieren:

1. Temple en proceso
2. Envejecimiento artificial 150-180°C durante 2-8 horas.

Durante la etapa final de ambos tratamientos, la dureza y la resistencia se incrementan gradualmente con el tiempo hasta llegar a un máximo, a partir del cual disminuyen (sobre-envejecimiento).

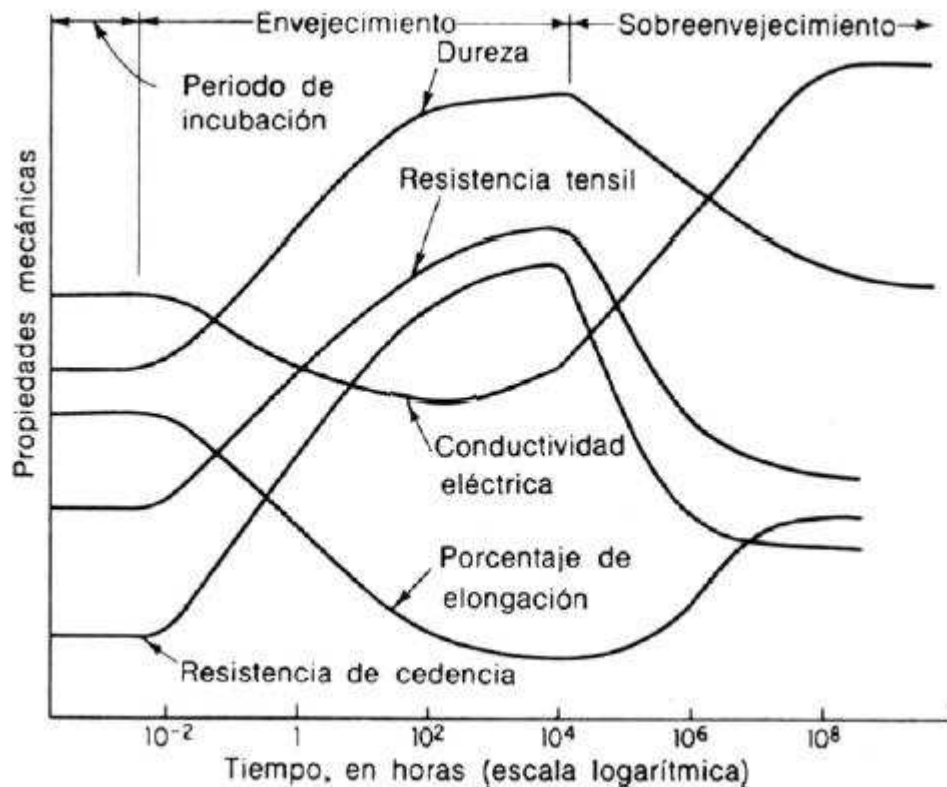


Figura 84. Variación de las propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio.

[FOLLETO DE CIENCIA DE MATERIALES; 2011, EPN, FIM]

5.8.4 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO TERMICO.

Se selecciona el tratamiento T6 el cual se recomienda para aleaciones de la serie 200 y 300, para lo cual se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se calientan las piezas a una temperatura de 500°C y mantenerlas durante 2 horas.
2. Al término del tiempo indicado enfriar las probetas en agua.
3. Calentar las piezas a una temperatura de 200°C y mantenerlas durante 2 horas.
4. Enfriar en agua a temperatura ambiente.

CAPITULO VI

PRUEBAS Y CONCLUSIONES

6.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN

6.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas ($\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ a 10^{-2} s $^{-1}$).

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young, que cuantifica la proporcionalidad anterior.
- Coeficiente de Poisson, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.
- Carga de rotura o resistencia a tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

6.1.2 ENSAYO PRACTICA DE LABORATORIO

El ensayo se lleva a cabo bajo la norma ASTM E8.

Las probetas para ensayos de tensión se fabrican en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta puede ser redonda, cuadrada o rectangular. Para la mayoría de los casos, en metales, se utiliza comúnmente una probeta de sección redonda. Para láminas y placas usualmente se emplea una probeta plana.



Imagen 30. Probetas para el ensayo de tracción

6.1.3 PROCEDIMIENTO

Se toma las medidas correspondientes a cada una de las probetas a ensayar.

Tabla 6.1.3 Detalle de dimensiones de las Probetas

ESQUEMA				
d	do	L	Lo	LR
3/4 "	1/2 "	5"	2,5"	1"

Preparar la máquina para ensayos a tracción: coloque los aditamentos correspondientes para sujetar la probeta.

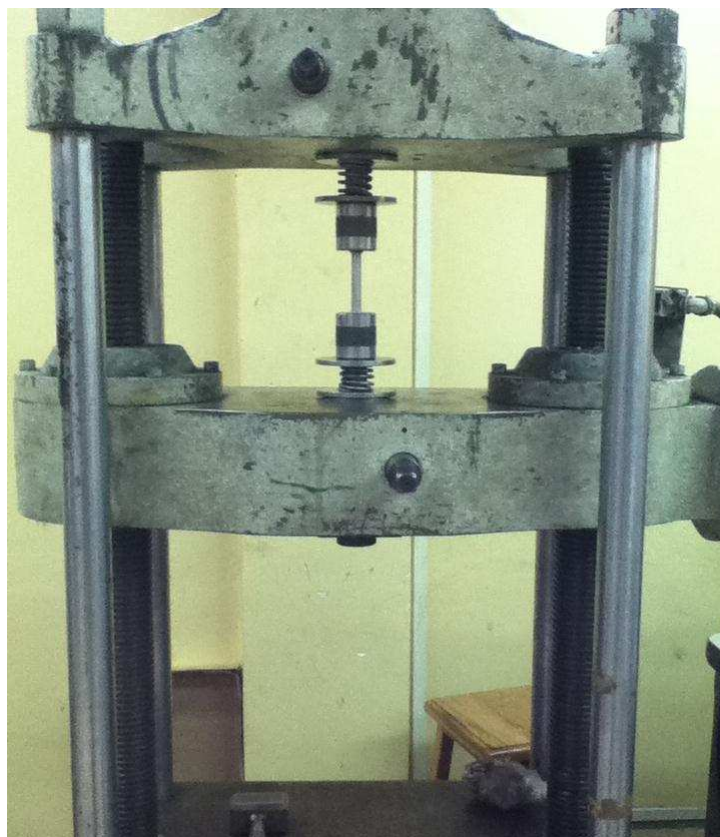


Imagen 31. Máquina universal de ensayos de tracción

Enroscar la probeta en los respectivos sujetadores, dejando que sobresalgan aproximadamente dos hilos de rosca en cada extremo.

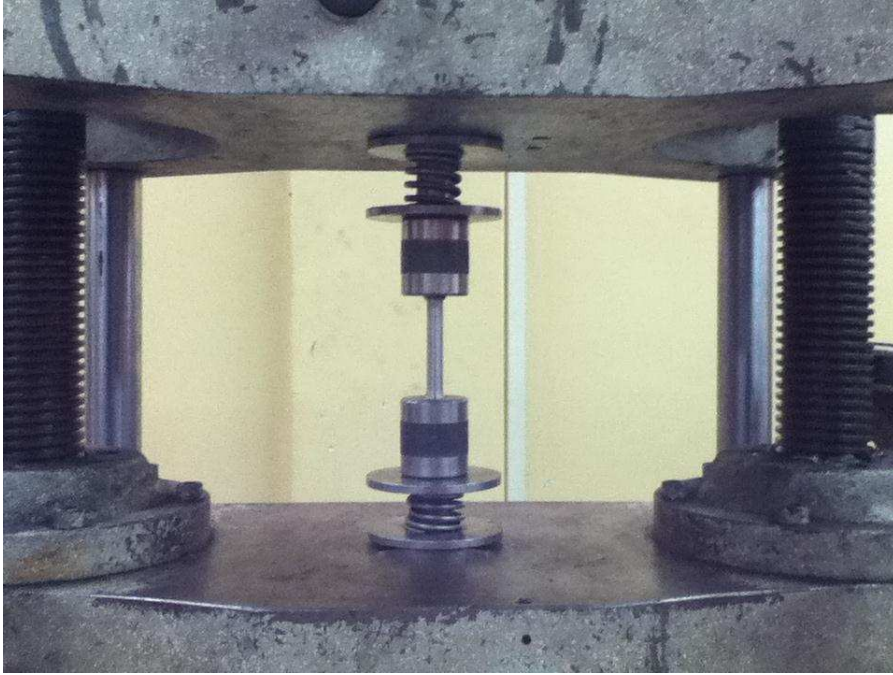


Imagen 32. Sujeción en los extremos roscados

Aplicar una pequeña precarga a la probeta hasta que el movimiento de la aguja en el manómetro sea inminente. Gradar el indicador en cero. Aplicar carga de una manera continua y lenta.

Una vez ocurra la falla, retirar las partes de la probeta ensayada, preséntelas y mida el diámetro de la sección de rotura así como la nueva longitud entre los puntos de calibración.



Imagen 33. Falla en probetas ensayadas

Colocar una nueva probeta en la máquina y repetir los pasos anteriores.

6.1.4 RESULTADOS

Tabla 6.1.4 Resultados obtenidos del ensayo de tracción

Resultados					
Probeta	Diámetro promedio (mm)	Carga Máxima		Resistencia a la tracción	
		(lbf)	(N)	(ksi)	(Mpa)
AlCu	12,36	4846	21556	26,1	180
AlSi	11,55	5073	22566	31,2	215

De los valores de resistencia obtenidos se puede observar que las aleaciones AlCu como AlSi tienen valores de resistencia a la tracción bastante aceptables tomando en cuenta que la aleación se obtuvo por fundición, esta resistencia resulta apropiada ya que el esfuerzo principal al que se encuentra sometida la antena es al de impacto.

6.2. ANÁLISIS METALOGRAFICO

6.2.1. ALEACIÓN DE ANTENA ORIGINAL

Se tomaron probetas de antenas originales y se realizaron metalografías y análisis químico. En las metalografías se obtuvieron los siguientes datos:

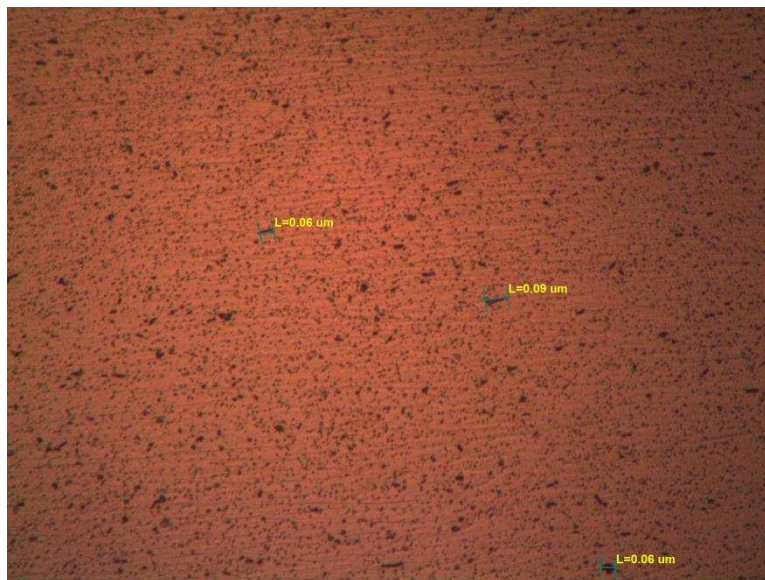


Imagen 34. Metalografía antena original sentido longitudinal 1000x.

A 1000x en sentido longitudinal se distinguen gran cantidad de microporosidades del orden de 0.6 micras, muy pocos elementos aleantes. Es muy notoria la alineación de los granos y poros, lo que confirma el proceso de fabricación por extrusión.

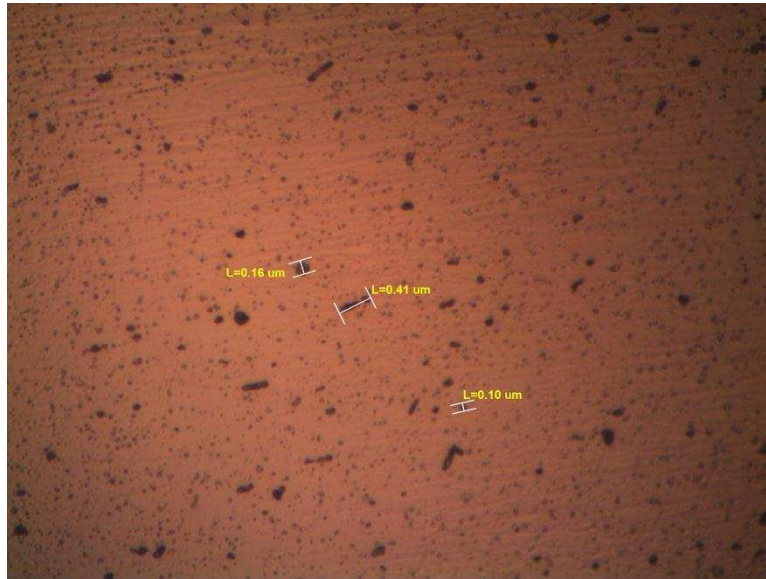


Imagen 35. Metalografía antena original sentido transversal 1000x.

En sentido transversal se distinguen las microporosidades de mayor tamaño, alrededor de 0.15 micras, y forma circular. También se distingue un mínimo grado de alineación de los granos.

6.2.2. ALEACIÓN A356

Esta aleación tiene silicio cobre y magnesio, presenta una buena cantidad de elementos aleantes como se muestra en la siguiente imagen. En color grisáceo esta el silicio, el rojizo pertenece al cobre, sobre la matriz de aluminio. No presenta porosidades a nivel microscópico, pero si en una cantidad considerable a nivel macro.



Imagen 36. Metalografía aleación A356 100x.



Imagen 37. Metalografía aleación A356 500x.

6.2.3. ALEACIÓN A195

Esta aleación obtenida únicamente a base de chatarra de DURALUMINIO presentó menor fluidez en el colado. Se ven claramente dendritas de cobre en la matriz de aluminio.

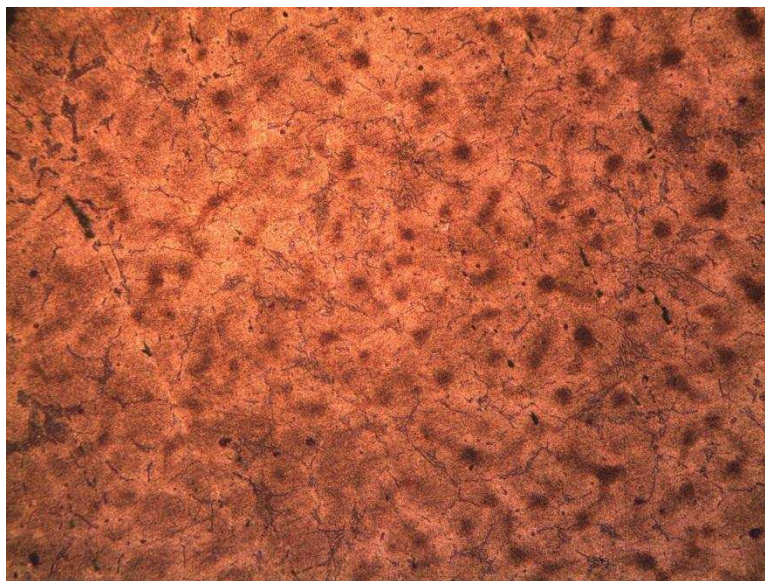


Imagen 38. Metalografía aleación A195 100x.

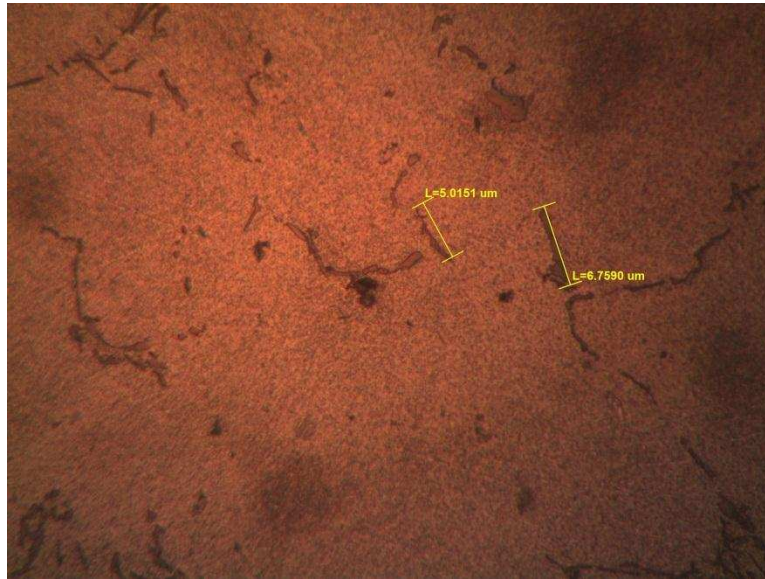


Imagen 39. Metalografía aleación A195 500x.

6.3. CONCLUSIONES

- Mediante el proceso de fabricación por fundición de las antenas se obtuvieron propiedades mecánicas muy cercanas a las antenas originales que fueron obtenidas por un proceso de extrusión.
- Las aleaciones obtenidas encajan con la designación ASTM, A356 para 6% de Si, 0,4% de Mg y 4% de Cu. Y A195 para 4% de Cu y 0.5% de Mg.
- Las piezas obtenidas son prototipos que deben ser probados y en base a los resultados serán mejorados tanto en su diseño como en el tipo de aleación, procedimiento de soldadura y, tratamiento térmico a realizar.
- Es necesaria la utilización de topes que sujeten y sirvan de apoyo a los noyos para asegurar la geometría interna y un espesor uniforme de toda la antena.
- Al fabricar los núcleos de los noyos de tipo flauta, se facilita, además del escape de gases durante la colada, el curado con CO₂ durante su fabricación.

- La aleación A195 comparada con la A356 presentó baja fluidez durante el colado, formó mayores rechupes en respiraderos y tragadero, y tuvo una elevada contracción al enfriarse.
- En aleaciones como la A356 (Al-Si-Cu) se debe usar tratamientos térmicos para mejorar las propiedades mecánicas, debido a que como se pudo observar en las metalografías, la estructura del metal proveniente directamente de fundición presenta una estructura irregular, y los materiales aleantes no precipitan en los granos de este, teniéndose una estructura de bajas propiedades mecánicas.
- La manera más efectiva de prever defectos de fundición como rechupes, porosidades, llenado incompleto del modelo, etc., así como para el diseño y dimensionamiento de sistemas de alimentación es utilizar primero el simulado con un software MEF. Este tipo de herramienta es bastante confiable, entregando datos que fueron muy similares a los reales anticipando defectos, mejorando tiempos de producción y reduciendo pérdidas de materiales, de insumos, y de tiempo y dinero.
- Resulta mucho más conveniente la fabricación de las antenas en el País, ya que éstas se han dejado de producir por parte de la compañía fabricante y se importan bajo pedido a un elevado costo, motivo por el cual es relevante realización de ésta tesis y la determinación del proceso de fabricación para que se inicie la producción local, dinamizando la industria, generando fuentes de empleo e implementando distintas tecnologías.

6.4. RECOMENDACIONES

- La aleación A356 fue más versátil durante todas las etapas de fabricación, pues fluye con mayor facilidad en pequeños espesores por la presencia de silicio, tiene menor tendencia a formar rechupes y acumula menos porosidades y se recomienda su utilización, pero se pone a consideración la utilización de la aleación A195 (4% Cu) pues esta tiene una mayor tenacidad.

- Para eliminar las porosidades es conveniente fundir en moldes completamente secos, con capa seca o coquilla.
- Para grandes producciones o en serie, como será el caso de las antenas, es más conveniente la fabricación de un molde permanente o coquilla mixta con lo que se mejora los acabados superficiales, tolerancias dimensionales y se maximiza la producción, optimizando tiempos. Los noyos se seguirán fabricando de arena curada.
- Desde el punto de vista de la colapsabilidad del noyo y para una fácil extracción del mismo una vez colada la pieza, es conveniente utilizar aditivos de curado suaves. Se deben hacer pruebas con aglutinantes o aglomerantes distintos del silicato de sodio, pues éste se endurece demasiado y se dificulta la extracción debido a la gran longitud de las piezas.
- Para la fabricación de noyos se recomienda que la arena se compacte por soplado para ahorrar tiempo en su producción.
- Además, para facilitar la extracción de los noyos se sugiere realizar el diseño y construcción de una máquina “desnoyadora” que igualmente disminuirá el trabajo y el tiempo empleado en este proceso.
- Es muy importante controlar el paralelismo de las caras entre el molde y el noyo para que la colada fluya sin generar turbulencia dentro del modelo obteniendo además un espesor homogéneo a lo largo de toda la pieza fundida y una cantidad menor de defectos tanto internos como superficiales.
- Se debe tomar como base el procedimiento estipulado la tesis “DETERMINACION DE LA METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DE ALEACIONES DE ALUMINIO DE FUNDICION MAQUINABLES SIN POROSIDADES” del Ing. Renato Garrido. Ya que con su aplicación se redujo notablemente la cantidad de defectos en las piezas obtenidas. Además, los porcentajes de materiales aleantes usados en la preparación de la aleación será un factor importante al momento de obtener piezas con menores defectos y de mejores propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVNER, S.; "Introducción a la Metalurgia Física"; Mcgraw Hill; 1983.
2. KALPAKJIAN, S.; "Manufactura, Ingeniería y Tecnología"; Pearson; 4ta ED.
3. METALS HANDBOOK, DESK EDITION; 2ND ED.; ASM; 1998.
4. NAVAS, E; "Métodos de Cálculo en Fundición"; Holguín; 1990.
5. FLEMINGS, Solidification Processing, USA, McGraw-Hill, 1974, 355p.
6. TITOV N. y STEPANOV Y, Tecnología del proceso de fundición, Moscú, Mir, 1981,460p.
7. TAYLOR H. [et al]., Foundry Engineering, USA, 1959,407p.
8. GOYOS L. y MARTINEZ H., Tecnología de Fundición II, Habana, 1994, 242p.
9. METALS HANDBOOK, VOL.15; "Casting"; ASM; 1992.
10. METALS HANDBOOK, VOL. 9; "Metallography And Microstructures"; ASM; 1992.
11. METALS HANDBOOK, VOL.02; "Properties And Selection: Nonferrous Alloys And Special-Purpose Materials"; ASM; 1992.
12. BEELEY P., Foundry Technology, Oxford, B.H., 2001,731p.
13. Manual de Soldadura y Catalogo de Productos; SOLDEXA; 7MA EDICIÓN; OERLIKON; PÁG. 32
14. CAPELLO E., Tecnología de Fundición, Roma, AFI, 1971, 475p
15. SHIGLEY MITCHELL., Diseño de Ingeniería Mecánica, Editorial Mc Graw-Hill; Cuarta edición 1983, 914p
16. GARRIDO R., "Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundición Maquinables sin Porosidades", Tesis, FIM-EPN, 2011.
17. Folleto de Ciencia de Materiales; 2011, EPN, FIM.

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS

ANEXO B: WPS

ANEXO C: Procedimiento para la obtención de las Antenas por fundición