

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DEL LLENADO DE UN MOLDE EN ARENA EN VERDE PARA FUNDICIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO BLANCO

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

MANUEL ALEJANDRO GARCÉS GARCÍA
alejo566@hotmail.com

DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR, M.Sc.
william.monar@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO, M.Sc.
william.venegas@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2016

DECLARACIÓN

Yo Manuel Alejandro Garcés García, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Manuel Alejandro Garcés García

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ingeniero Manuel Alejandro Garcés García bajo mi supervisión.

M.Sc. Willan Monar M.
DIRECTOR DE PROYECTO

M.Sc. William Venegas T.
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

*A mi esposa Sofya, mi hija Agustina y su hermano Samuel
mi más sincero agradecimiento por brindarme su apoyo y
con su presencia darme felicidad cada día.*

*A mis padres por apoyarme una vez más en esta larga
etapa de preparación y por darme la vida les doy las
gracias.*

*A los magísteres Willan Monar y William Venegas por su
ayuda y guía en la realización de este trabajo.*

*A mi colega y amigo, Gabriel Orozco, por su colaboración en
la realización de las fundiciones y su apoyo en la
interpretación de los resultados.*

*A todos aquellos que de una u otra forma han colaborado en
la realización de este trabajo.*

DEDICATORIA

Para mi mejor amiga y amada esposa Sofya, mi princesa Isabella Agustina y a mi hijo Samuel Alejandro dedico este trabajo con todo el cariño y amor que merecen por ser parte de mi vida.

Para mi padre Alfonso maestro y mentor, mi madrecita hermosa Rosa pureza y bondad hecha mujer dedico de igual manera este trabajo como recompensa a su dedicación y paciencia en la labor de ser los mejores padres.

Alejo & &

CONTENIDO

Declaración de responsabilidad.....	i
Certificación.....	ii
Agradecimiento	iii
Dedicatoria	iv
Contenido... ..	v
Resumen	xv
Abstract	xvi
Presentación	xvii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 FUNDAMENTOS DE LOS CFDs	3
1.4.1 METODOLOGÍA DE FUNCIONAMIENTO	4
1.4.2 MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN	5
1.4.2.1 Discretización espacial	6
1.4.2.2 Discretización de las ecuaciones	7
1.5 SOFTWARE CFD	9

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
2.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN PARA PIEZAS METÁLICAS	11
2.1.1 FUNDICIÓN CON MOLDES PERMANENTES	12
2.1.2 FUNDICIÓN CON MOLDES NO PERMANENTES	12
2.2 TIPOS DE PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES NO PERMANENTES	13
2.2.1 FUNDICIÓN CON MOLDE NO PERMANENTE Y PATRÓN PERMANENTE	13
2.2.1.1 Fundición con arena aglomerada	14
2.2.1.2 Fundición con moldeo en pasta	15
2.2.1.3 Fundición con molde de grafito apisonado	16
2.2.1.4 Fundición con arena no aglomerada	17
2.2.2 FUNDICIÓN CON MOLDE NO PERMANENTE Y PATRÓN DESCARTABLE	18
2.2.2.1 Fundición de precisión	19
2.2.2.2 Fundición con patrón de espuma perdida	20
2.2.2.3 Fundición por contra gravedad	21
2.2.2.4 Fundición por el proceso Replicast®	21
2.3 MATERIALES UTILIZADOS PARA CONSTRUIR MOLDES NO PERMANENTES	23
2.3.1 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA DE MOLDEO	23
2.3.1.1 Arena base	24
2.3.1.1.1 Arena cuarzosa	24
2.3.1.1.2 Arena de zirconio	24
2.3.1.1.3 Cromita	24
2.3.1.1.4 Chamota	25
2.3.1.1.5 Otros tipos de arenas	25
2.3.1.2 Aglomerantes y aglutinantes	25
2.3.1.2.1 Aglomerantes	25
2.3.1.2.2 Aglutinantes	26

2.3.1.3 Agua	26
2.3.1.4 Aditivos	27
2.3.2 ARENA EN VERDE	27
2.4 ALEACIONES UTILIZADAS PARA COLAR EN MOLDES NO PERMANENTES	28
2.4.1 ALEACIONES FERROSAS: HIERRO FUNDIDO	28
2.4.2 ALEACIONES FERROSAS: ACERO	28
2.4.3 ALEACIONES NO FERROSAS: OTROS METALES	28
2.4.3.1 Aleaciones de aluminio	29
2.4.3.2 Aleaciones de magnesio	29
2.4.3.3 Aleaciones de cobre	29
2.4.3.4 Aleaciones de níquel	29
2.5 DEFECTOS EN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN EN ARENA	30
2.5.1 DISCONTINUIDADES INHERENTES A LA FUNDICIÓN	30
2.5.2 DEFECTOS DE FUNDICIÓN	33
2.5.2.1 Defectos superficiales	33
2.5.2.2 Defectos de alimentación incompleta	35
2.6 ECUACIONES QUE RIGEN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN	35
2.6.1 LLENADO DEL MOLDE	36
2.6.1.1 Ley de conservación de la masa	38
2.6.1.2 Ley de conservación de la cantidad de movimiento	38
2.6.1.3 Ley de conservación de energía	39
2.6.2 SOLIDIFICACIÓN DEL METAL	40
2.6.2.1 Transferencia de calor por convección	41
2.6.2.2 Transferencia de calor por conducción	42
2.6.2.3 Ecuación de solidificación	43

CAPÍTULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE	45
3.1 DETERMINACIÓN DE LA PIEZA	45
3.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL A UTILIZARSE	46
3.3 DISEÑO DEL MOLDE NO PERMANENTE	47
3.3.1 PARTES DEL MOLDE	48
3.3.1.1 Cavidad de vertido	48
3.3.1.2 Canal de vertido	48
3.3.1.3 Respiraderos	49
3.3.1.4 Mazarotas	49
3.3.1.5 Machos	49
3.3.2 DISEÑO DEL MOLDE	49
3.3.2.1 Volumen y superficie de la pieza a fundirse	50
3.3.2.2 Cálculo de la mazarota y canal de vertido	51
3.3.2.3 Cálculo de la velocidad de vertido y el tiempo de llenado	53
3.3.2.4 Cálculo del tiempo de solidificación	54
3.3.2.5 Ubicación de la línea de partición	55
3.3.2.6 Ángulo de desmolde	56
3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE	57
3.5 COLADO Y FUNDICIÓN	61
CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN DEL LLENADO DEL MOLDE.....	64
4.1 MODELADO 3D DEL MODELO Y EL MOLDE	65
4.1.1 MODELADO 3D	65
4.1.2 CONSIDERACIONES DEL MALLADO	67
4.2 CONFIGURACIÓN DE FLUENT LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN	71
4.2.1 GENERAL Y MODELOS DE ESTUDIO	72
4.2.1.1 Opción general	72
4.2.1.2 Modelos de estudio	73
4.2.2 MATERIALES Y FASES	75

4.2.3	CONDICIONES DE CELDA Y DE BORDE	75
4.2.4	MÉTODOS DE SOLUCIÓN	76
4.2.5	FACTORES DE RELAJACIÓN E INICIALIZACIÓN	77
4.2.5.1	Los factores de relajación	77
4.2.5.2	Inicialización y ajuste inicial	78
4.2.6	ACTIVIDADES DE CÁLCULO Y SIMULACIÓN	79
4.2.6.1	Actividades de cálculo	79
4.2.6.2	Simulación	79
4.3	POST PROCESO DE LA SIMULACIÓN	80
4.3.1	VISUALIZACIÓN DEL LLENADO	81
4.3.1.1	Escala de tiempo y curva de convergencia	81
4.3.2	VISUALIZACIÓN DE LA SOLIDIFICACIÓN	85
4.3.2.1	Escala de tiempo y curva de convergencia	85
4.3.3	DETECCIÓN DE POSIBLES ÁREAS DE FALLA	90
4.4	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	94
	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.1	CONCLUSIONES	97
5.2	RECOMENDACIONES	98
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Composición química del aluminio 1050 en % en peso	47
Tabla 3.2 Propiedades físicas y termodinámicas del aluminio 1050	47
Tabla 5.1 Parámetros de mallado	69
Tabla 5.2 Criterio de calidad: calidad de elemento	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología de funcionamiento software CFD	4
Figura 1.2 Discretización de variables	5
Figura 1.3 Malla estructurada 2D con elementos cuadriláteros	6
Figura 1.4 Malla no estructurada en 2D con elementos triangulares	7
Figura 2.1 Tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón permanente	13
Figura 2.2 Molde de arena aglomerada y sus partes.....	14
Figura 2.3 Molde fabricado con yeso	15
Figura 2.4 Patrón de madera usado para producir un molde de grafito apisonado	16
Figura 2.5 Orden del proceso para el moldeo al vacío con arena	18
Figura 2.6 Tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón descartable	18
Figura 2.7 Proceso de fundición de precisión	19
Figura 2.8 Patrón de espuma de poliestireno y pieza fundida	20
Figura 2.9 Fundición por contra gravedad	21
Figura 2.10 Patrón de poliestireno recubierto con una capa de cerámica	22
Figura 2.11 Horneado del molde para eliminar el patrón de poliestireno	23
Figura 2.12 Inclusiones en pieza fundida	31
Figura 2.13 Contracción en pieza fundida	31
Figura 2.14 Porosidades en pieza fundida	32
Figura 2.15 Juntas frías en pieza fundida	32
Figura 2.16 Desgarre en pieza fundida	32
Figura 2.17 Bucle en pieza fundida maquinada	33
Figura 2.18 Ejemplo de transferencia de calor por convección	41
Figura 2.19 Ejemplo de transferencia de calor por conducción	42
Figura 3.1 Render de pieza fundida en aluminio blanco	46
Figura 3.2 Flange de aluminio blanco con inserto de caucho	46
Figura 3.3 Partes de un molde no permanente	48
Figura 3.4 Propiedades físicas de la pieza tomadas de SolidWorks	50

Figura 3.5 Ubicación de la mazarota y altura de tapas de la caja de moldeo	53
Figura 3.6 Ubicación de la línea de partición	56
Figura 3.7 Ángulos de desmolde, externo e interno	56
Figura 3.8 Patrón centrado dentro del bastidor para moldeo	57
Figura 3.9 Arena apisonada dentro del bastidor	57
Figura 3.10 Izquierda. Vista del patrón en la mitad del molde	58
Figura 3.11 Colocación del patrón del bebedero en su posición	58
Figura 3.12 Molde listo para remoción de excesos de arena	59
Figura 3.13 Mitad inferior del molde con la cavidad perfectamente moldeada	59
Figura 3.14 Mitad superior del molde con la cavidad perfectamente moldeada	60
Figura 3.15 Izquierda. Bastidores siendo retirados del molde	60
Derecha. Molde listo para el colado	
Figura 3.16 Chatarra para la fundición	61
Figura 3.17 Metal fundido dentro del horno	61
Figura 3.18 Vertido del metal fundido en el molde	62
Figura 3.19 Izquierda, metal del bebedero solidificado	62
Derecha, rompimiento del molde	
Figura 3.20 Piezas fundidas	63
Figura 4.1 Dimensiones generales del patrón	65
Figura 4.2 Patrón de la pieza modelado en 3D	66
Figura 4.3 Vista de modelo de la cavidad interna del molde	66
Figura 4.4 Vista del modelo del patrón en DesignModeler en ANSYS	67
Figura 4.5 Mallado generado para la pieza	69
Figura 4.6 Estadística de los elementos en la malla	70
Figura 4.7 Árbol de procesos de configuraciones de Fluent	71
Figura 4.8 Configuración de opciones generales en Fluent	73
Figura 4.9 Modelos de estudio de Fluent utilizados en este trabajo	74
Figura 4.10 Condiciones de borde para el llenado	76
Figura 4.11 Ventana de Fluent durante una simulación	80
Figura 4.12 Simulación del proceso de llenado, vista lateral	82

Figura 4.13 Simulación del proceso de llenado, vista en perspectiva	83
Figura 4.14 Curva de convergencia del proceso de llenado	84
Figura 4.15 Simulación del proceso de solidificación	86
Vista lateral, t = 0 s a t = 12,6 s	
Figura 4.16 Simulación del proceso de solidificación	87
Vista lateral, t = 14,4 s a t = 27,0 s	
Figura 4.17 Simulación del proceso de solidificación	88
Vista en perspectiva, t = 0 s a t = 12,6 s	
Figura 4.18 Simulación del proceso de solidificación	89
Vista en perspectiva, t = 14,4 s a t = 27,0 s	
Figura 4.14 Curva de convergencia del proceso de llenado	90
Figura 4.15 Posible formación de una burbuja de aire	91
Figura 4.16 Visualización de singularidad, posible fallo de llenado	92
Figura 4.17 Posible generación de un rechupe en brazo derecho	93
Figura 4.18 Posible área de fallo en zonas con cambio abrupto de geometría ..	93
Figura 4.19 Falla por burbuja de aire en una pieza fundida	95
Figura 4.20 Falla por insuficiente llenado y rechupe	95
Figura 4.21 Desgarre de una pieza fundida	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Composición del aluminio usado en las fundiciones... ..	I
Anexo 2: Análisis de tiempo de simulación vs número de elementos.....	II
Anexo 3: Pieza fundida junto a su patrón	III
Anexo 4: Piezas con falla	IV

RESUMEN

El presente trabajo investigativo es un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante la técnica prueba-error en fundición y el uso de software de simulación CFD en las etapas de diseño y optimización de moldes en la industria de la fundición, su objetivo es mostrar a los empresarios de la pequeña y mediana industria a nivel nacional que el uso de esta tecnología resulta beneficioso para reducir costos operativos asociados al realizar ensayos para la fabricación de modelos y moldes de piezas y la optimización de las mismas en sus fundiciones. El proyecto se centra en el uso del software ANSYS Fluent, por medio del cual se pretende realizar simulaciones del llenado de moldes y solidificación de piezas para anticipar fallas que podrían ocurrir antes de recurrir a los ensayos prácticos mismos que representan un gasto elevado lo que reduce el porcentaje de utilidades. Para los análisis se ha realizado el cálculo de las dimensiones del molde y de las variables tales como velocidades, caudales, tiempos de flujo y de enfriamiento mismos que posteriormente se utilizaron en la configuración del software, una vez realizadas las simulaciones con el fin de validar los resultados obtenidos se recurrió a comparar los mismos con los ensayos prácticos realizados para tener así una corroboración de datos mismos que tuvieron buenas impresiones.

Palabras clave: CFD, dinámica de fluidos computacional, fundición, llenado, molde, solidificación.

ABSTRACT

The present investigation is a comparative analysis of the results obtained through the technique test-error in foundry and the use of a CFD simulation software in the stages of design and optimization of molds in the foundry industry, its aim is to show to the business men of the national small and medium industry that the use of this technology produces a gain to reduce operative costs associated with the tests for patterns and molds manufacture and the optimization of the same ones in his foundries. This project focuses on the use of the ANSYS software, through of which it is pretended to perform mold filling and pieces solidification simulations to predict failures that might happen before resort to the practical tests that represents a high expense and they also reduce the utility percentage. For the analysis there has performed the calculation of mold dimensions and variables such as speeds, flows, flow and cooling times which later were used in software configuration, once simulations are performed, to validate the results they were compared with the practical essays performed and in this way there was a data corroboration same as had good impressions.

Keywords: CFD, computational fluid dynamics, foundry, filling, mold, solidification.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo hace hincapié en la implementación del uso de software CFD para la predicción de fallas en los procesos de fundición con el objetivo de proporcionar una herramienta para la reducción de costos y la optimización de recursos y procesos en la industria nacional.

En un inicio se detalla el porqué y para que de este trabajo así como los objetivos propuestos a cumplirse. También se realiza una breve introducción a los fundamentos de los programas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) y se menciona las capacidades del software que se utilizará, este es ANSYS Fluent.

Se presenta un marco teórico sobre los procesos de fundición, los materiales que se usan en la misma y se detalla resumidamente sobre la defectología que existe en la industria de la fundición. También se hace un análisis de los algoritmos y ecuaciones matemáticas que rigen la física de los procesos de fundición.

A continuación, se hace la introducción al diseño y cálculo de las variables para los moldes así como se muestra el proceso seguido para la construcción de los mismos en arena en verde, estos luego servirán para el colado de las piezas de prueba.

Como la parte principal de este trabajo, se revisa como fue la configuración del software y las simulaciones del llenado y solidificación para con los datos recogidos de estas proceder a la validación y comparación de resultados obtenidos en el software y en la fundición real.

Para finalizar, se hace entrega de las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido a lo largo de este trabajo investigativo.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los precedentes y el porqué el desarrollo de este trabajo investigativo tiene importancia como base para iniciar la implementación de el uso de software especializado en la industria de la fundición ecuatoriana en la etapa de diseño de productos nuevos y la optimización de productos que se encuentran en producción.

Se muestran también el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo mismos que a través del desarrollo de los capítulos siguientes se irán cumpliendo para llegar a fundamentar la realización de este trabajo.

Se analizará de manera básica los fundamentos de funcionamiento de los programas CFD que son utilizados en la actualidad a nivel mundial para el análisis de la dinámica de fluidos en diversas áreas de la ingeniería.

Finalmente, se realizará una introducción a las características del software ANSYS y su módulo Fluent que se utilizará en este trabajo para realizar la simulación del llenado de un molde.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Con el pasar del tiempo y el incremento de las herramientas informáticas, se ha facilitado la posibilidad de simular los procesos de fundición de metales, estas herramientas se han venido usando para permitir predecir defectos e irregularidades durante el llenado y la solidificación de piezas.

La fundición es un proceso altamente complejo donde se combinan el flujo de metal en la cavidad del molde y la transferencia de calor, la consolidación del método de los elementos finitos ha permitido que este fenómeno entre tantos otros se pueda simular con ventajas evidentes, el uso de computadoras cada vez más potentes ha permitido la creación de modelos cada vez más exactos y cercanos a la necesidad real.

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 la misma, con mucha frecuencia se realizan tecnologías en la que mayormente interviene la experiencia de los especialistas y estas necesitan de un número grande de pruebas para llegar al éxito, por supuesto con un considerable gasto para la empresa.

Sin embargo, la actual competitividad existente en el entorno industrial obliga a las empresas a disminuir el tiempo de puesta en el mercado de un producto y a aumentar su productividad.

Todo ello, hace que sean necesarios estudios alternativos que mejoren el rendimiento de los métodos productivos utilizados.

De ahí que se hace necesario que dentro de la industria de la fundición en el Ecuador se implementen nuevos procesos que permitan mejorar la competitividad, bajando los costos de producción, utilizando para esto los avances tecnológicos (software) para realizar tareas que en el pasado se tenían que realizar artesanalmente por ensayos prueba-error lo que consumía altos recursos de energía, material y mano de obra.

Una vez obtenidos los datos reales y los del software, se podrá determinar cuan efectiva y precisa es la simulación de llenado de moldes para abaratar costes de diseño y producción de piezas fundidas de aluminio blanco.

En esta propuesta de proyecto de investigación y desarrollo se busca realizar un aporte a la Industria de la Fundición Ecuatoriana introduciendo el uso de herramientas informáticas dentro de la etapa de diseño y optimización de los modelos para los moldes de piezas de aluminio blanco a fundirse en arena en verde.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y simular el llenado de un molde en arena en verde para fundición de piezas en aluminio blanco.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los fundamentos teóricos y matemáticos que hacen posible el proceso de simulación numérica, para esto se deberá analizar los conceptos de la dinámica de fluidos computacional CFD.
- Diseñar el modelo y moldes a utilizarse para la fundición de las piezas de prueba.
- Construir y realizar la fundición de las piezas de prueba.
- Realizar un modelo computacional para el análisis de llenado y solidificación para moldes en arena en verde para fundición de piezas de aluminio blanco.
- Simular efectivamente el proceso de llenado y solidificación de un molde en arena en verde para piezas de aluminio blanco.

1.4 FUNDAMENTOS DE LOS CFD'S

Los actuales avances tecnológicos en términos de computación y velocidad de procesamiento permiten acuñar el término dinámica de fluidos computacional conocida por su acrónimo CFD, que es la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de líquidos y gases. Los computadores se utilizan para simular el movimiento de los fluidos dentro de superficies tales como tuberías, túneles, entre otras de geometrías incluso más complejas. Para esto se realiza la simplificación de las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos y con el uso de los supercomputadores actuales se puede llegar a tener resultados aproximados bastante cercanos a la realidad en muchos casos, esta ventaja ha generado la expansión del uso de estas técnicas a nivel mundial en diversas industrias.

El continuo avance en las técnicas de métodos numéricos y los algoritmos usados para resolver las ecuaciones diferenciales mediante métodos de aproximación ha permitido el uso de computadores de escritorio y portátiles de gama media y alta para utilizar los diversos software de simulación de CFD disminuyendo también el margen de error, la verificación de los datos obtenidos mediante estos programas se la realiza posteriormente en modelo físicos hechos a escala.

La base fundamental de casi todos los problemas de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, que definen el flujo en cualquier fase gaseosa o líquida, pero no ambos a la vez, estas ecuaciones pueden simplificarse mediante la eliminación de los términos que describen comportamientos viscosos para producir las ecuaciones de Euler, con una mayor simplificación mediante la eliminación de los términos que describen vorticidad se obtienen las ecuaciones de potencial, y por último para las pequeñas perturbaciones en los flujos subsónicos y supersónicos estas ecuaciones se puede linealizar para producir las ecuaciones de potencial linealizadas. Históricamente, estos métodos fueron desarrollados para resolver ecuaciones de potencial linealizadas. [1]

1.4.1 METODOLOGÍA DE FUNCIONAMIENTO

Para la simulación de problemas en cualquiera de los diferentes tipos de software de CFD se debe cumplir con un ciclo determinado, la figura 1.1 muestra la metodología de funcionamiento de este software y se detalla a continuación:

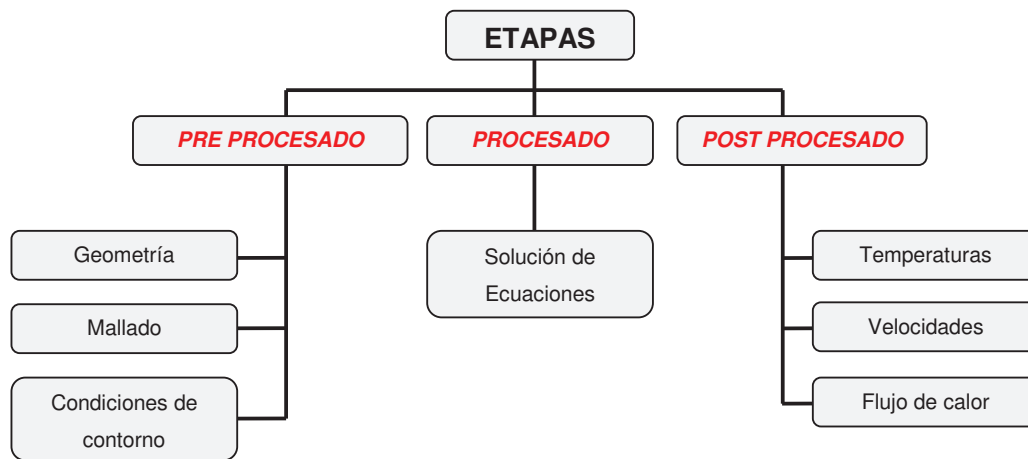


Figura 1.1 Metodología de funcionamiento software CFD

(Fuente: Propia)

En todos los casos se sigue el mismo procedimiento básico:

En el PRE PROCESADO se define la geometría del problema y sus límites físicos, el volumen ocupado por el fluido y por los sólidos se divide para crear el

mallado, se definen las condiciones de contorno, por ejemplo, las ecuaciones de movimiento, parámetros de convección, tipo de materiales entre otros.

Durante el PROCESADO se inicia la simulación, el software resuelve las ecuaciones de forma iterativa hasta llegar a una convergencia de la solución.

Finalmente en el POST PROCESADO los resultados se pueden visualizar y analizar utilizando una interfaz la cual en algunos casos permite ver los mismos a manera de movimientos con diferentes tonalidades. Una parte importante de este paso es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y de fácil comprensión de los resultados obtenidos.

1.4.2 MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN

Se llama discretización a la aproximación de una variable continua en un número finito de puntos, esto se lo puede observar en la figura 1.2.

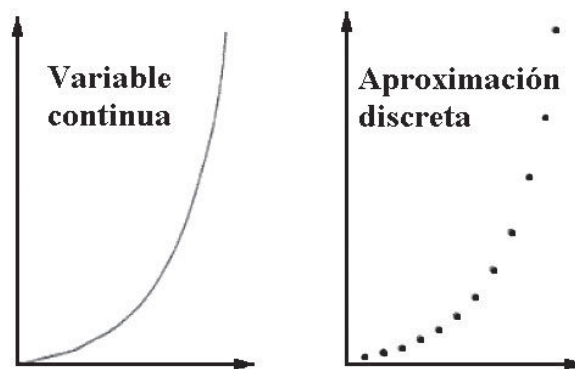


Figura 1.2 Discretización de variables

(Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>)

En la dinámica de fluidos computacional se discretiza el flujo continuo, este se aproxima por un número finito de valores en puntos llamados nodos, también se discretiza las ecuaciones de movimiento, es decir, se aproximan en función de los valores en los nodos con lo que se tiene que de las ecuaciones integrales (continuas), se obtienen ecuaciones algebraicas (discretas), que se resuelven y se obtiene los valores de las variables en todos los nodos del sistema. [2]

1.4.2.1 Discretización espacial

Para poder aplicar los conceptos de la dinámica de fluidos computacional el primer paso a seguir es la discretización espacial del dominio y sobre esta se calculará luego la aproximación numérica de las variables. Con el uso de métodos numéricos existen varias formas de realizar la discretización del dominio, se las puede clasificar de tres maneras diferentes: por elementos finitos, por diferencias finitas y por volúmenes finitos. En los tres casos se necesita previamente tener una discretización geométrica del dominio para luego poder también discretizar las ecuaciones que gobiernan los fenómenos físicos involucrados en el flujo. Para esto se utiliza una técnica denominada mallado, misma que se puede diferenciar en dos tipos que son los mallados estructurados y los no estructurados.

En el mallado estructurado cada nodo está identificado por coordenadas cartesianas y se puede denotar con los vectores unitarios i , j , k . La forma de los elementos para 2 dimensiones son cuadriláteros (figura 1.3), y para tres dimensiones se utiliza hexaedros. Las mallas estructuradas pueden representarse en un sistema cartesiano y curvilíneo. En el primer caso, las líneas que separan los elementos son siempre paralelas al sistema de coordenadas; por el contrario, en los sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto en estudio.

Algunos flujos pueden considerarse axis simétricos, en estos casos las ecuaciones de flujo pueden ser expresadas también en coordenadas polares en lugar de coordenadas cartesianas. [3]

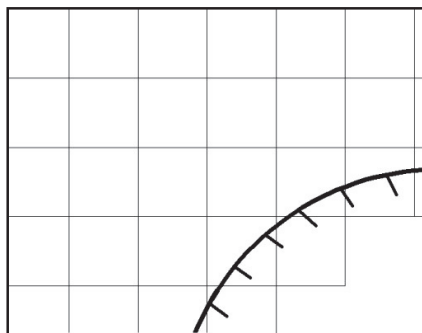


Figura 1.3 Malla estructurada 2D con elementos cuadriláteros

(Fuente: <http://www.e-cooling.com/es/malla.htm>)

En el mallado no estructurado (Fig. 1.4) cada elemento de la malla no tiene un orden en particular, se tiene una malla que se adapta a la geometría de estudio con el uso de diferentes formas de elemento sin orden alguno. Los elementos de la malla son en este caso una mezcla de triángulos y cuadriláteros para dos dimensiones y de tetraedros y hexaedros para tres dimensiones.

Este tipo de mallado es de gran utilidad al usarlo en geometrías complejas ya que se mezclan varias formas de elementos de malla que se adaptan más fácilmente a la geometría del dominio.

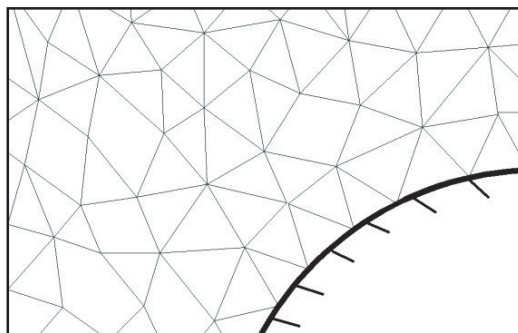


Figura 1.4 Malla no estructurada en 2D con elementos triangulares
(Fuente: <http://www.e-cooling.com/es/malla.htm>)

1.4.2.2 Discretización de las ecuaciones

Como se menciona anteriormente luego de la discretización del dominio del problema se procede a la discretización de las ecuaciones que gobiernan el flujo. Para ello existen algunos métodos de discretización como son el de los elementos finitos, de las diferencias finitas y de los volúmenes finitos.

El método de los elementos finitos como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos, generando una malla. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad del mismo.

Este método resulta muy atractivo por el uso de mallas no estructuradas. Además es empleado para el caso particular de fluidos no newtonianos. El método de los

elementos finitos tiene una base matemática muy rígida. Sin embargo, en ciertos casos, el método es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, siendo el gasto computacional mucho mayor. Esto explica porque el método de los volúmenes finitos se ha hecho más popular en el software CFD. Sin embargo, ambos métodos se combinan en ocasiones normalmente en mallas estructuradas, como por ejemplo la discretización de flujos viscosos. [4]

El método de las diferencias finitas se utiliza en análisis numérico para calcular de manera aproximada las soluciones a ecuaciones diferenciales usando ecuaciones diferenciales finitas para aproximar derivadas.

Este método emplea el desarrollo en series de Taylor para la discretización de las derivadas de las variables de flujo. El error en este caso es proporcional al término de mayor orden de la serie. Una ventaja importante de este método es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas.

Por otro lado, este método requiere una malla estructurada, con lo cual el campo de aplicación se ve reducido a algunos problemas, normalmente con geometrías sencillas. Además, este método no puede aplicarse directamente en coordenadas curvilíneas, teniéndose que transformar las ecuaciones de Navier-Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema.

Por este motivo, el método de las diferencias finitas solo es aplicable en algunas geometrías sencillas. [5]

El método de los volúmenes finitos es un método para representar y evaluar ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas. Al igual que el método de las diferencias finitas y de los elementos finitos, los valores se calculan en elementos discretos en una geometría mallada. Volumen finito se refiere al pequeño volumen que rodea a cada nodo de una malla.

En el método de los volúmenes finitos, las integrales que contienen un término de divergencia en una ecuación diferencial parcial son convertidas a integrales de superficie utilizando el teorema de la divergencia. Estos términos se evalúan luego como flujos en las superficies de cada volumen finito. Debido a que el flujo

de entrada en un volumen dado es idéntico al flujo de salida de un volumen adyacente, este método es conservativo.

Una gran ventaja del método de volúmenes finitos es que se formula fácilmente para permitir mallas no estructuradas. El método se utiliza en muchos paquetes de dinámica de fluidos computacional.

1.5 SOFTWARE CFD

Existe variedad de software para aplicaciones CFD, dicho software se desarrolla, comercializa y presta bajo términos de licencia de los diferentes fabricantes del mismo. Entre los más conocidos se encuentran, entre otros SolidWorks Flow Simulation®, Autodesk CFD®, ANSYS CFX-CFD-Fluent®, FloEFD CATIA®, y entre los que se hallan más especializados en el ámbito de simulación de procesos de fundición se encuentran QuickCast, ProCast, Vulcan, SolidCast entre otros.

En la realización de este trabajo investigativo se plantea el uso del software ANSYS y su módulo CFD Fluent, ANSYS es un programa ampliamente utilizado en la industria por sus excelentes cualidades no solo en la simulación de problemas que involucran fluidos sino también en otros campos de la ingeniería.

El módulo Fluent de ANSYS puede ser utilizado para el modelado de movimiento de fluidos, transferencia de calor, y reacciones químicas. Proporciona flexibilidad de realización del mallado, incluyendo la capacidad de resolver problemas de flujo usando mallas no estructuradas que se pueden generar sobre geometrías complejas con relativa facilidad. Soporta diferentes tipos de malla triangular y cuadrilátera para 2D, y para 3D tetraédrica, hexaédrica, piramidal, de cuña, poliédrica, y mezclado híbrido de mallas.

En la interfaz de modo de solución se establecen las condiciones de contorno se define las propiedades del fluido, la manera de ejecución de la solución, el refinamiento de la malla, post-procesamiento y visualización de los resultados.

Fluent tiene la capacidad para resolver diferentes tipos de problemas como flujos de estado estable o transitorio, flujos con características no viscosas, flujo laminar y flujo turbulento, flujos con fluidos newtonianos o no newtonianos, transferencia de calor incluyendo convección forzada, natural y mixta, transferencia de calor conjugada (sólido/fluido), problemas con radiación de calor, simulación de modelos de cavitación, aplicaciones de fusión/solidificación utilizando el modelo de cambio de fase. [6]

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN PARA PIEZAS METÁLICAS

Como uno de los más antiguos métodos de manufactura, la fundición implica verter metal fundido en la cavidad de un molde que contiene la forma y dimensiones de la pieza a fabricarse. Los procesos de fundición se pueden dividir en varias categorías, los principales procesos son la fundición en moldes no permanentes con patrones permanentes, la fundición en moldes no permanentes con patrones descartables y la fundición en moldes permanentes.

En el caso de la fundición con moldes no permanentes, fabricados con arena aglomerada u otro material granular suelto, los patrones pueden ser permanentes como es típico en la fundición en arena o descartables como la fundición con espuma perdida y la fundición de precisión. Cuando los patrones son permanentes, el molde debe ser separable en dos o más partes para permitir que se pueda retirar el patrón. Para conseguir piezas con cavidades internas se utiliza corazones que son formas separadas del molde que se colocan dentro del mismo, así se puede obtener formas que no serían prácticas de realizar en el mismo molde.

Los moldes permanentes deben ser separables en dos o más piezas para permitir que se retire la pieza en bruto del molde. Con patrones descartables, las limitaciones de dos o más partes separables del molde no son necesarias, el medio de moldeo solo debe envolver al patrón descartable y mantener su forma durante el vertido de metal fundido y su solidificación. Después de que la pieza se ha solidificado, la arena u otro medio de moldeo es sacudido y retirado de la misma.

La fundición de piezas utilizando procesos con moldes no permanentes con cualquiera de los patrones permanentes o descartables es un método de moldeo muy versátil que provee una gran libertad de diseño en términos de tamaño, forma y calidad del producto final. [7]

2.1.1 FUNDICIÓN CON MOLDES PERMANENTES

Los procesos de fundición con moldes permanentes implican la producción de piezas moldeadas por colada de metal fundido en moldes metálicos permanentes utilizando gravedad, baja presión, vacío o presión centrífuga.

La mayoría de piezas fabricadas en moldes permanentes son de aluminio y sus aleaciones. Otros metales también pueden ser usados en moldes permanentes incluyendo magnesio, zinc, aleaciones de cobre entre otros. El uso de moldes permanentes es particularmente adecuado para la producción de un alto volumen de piezas fundidas obteniéndose un espesor de pared bastante uniforme y pocas rebabas. Se limita a la producción de piezas en cantidades altas para justificar el coste de los moldes.

Los métodos de fundición con moldes permanentes más comunes se pueden clasificar en: fundición por gravedad, fundición por baja presión, fundición por contra gravedad y fundición a presión. [8]

2.1.2 FUNDICIÓN CON MOLDES NO PERMANENTES

Los procesos de fundición con moldes no permanentes son ampliamente utilizados, el método de moldeo depende de varios factores tales como el tamaño y forma de la pieza, cantidad, herramientas y el metal fundido que se vierte en el molde.

Las características de los moldes no permanentes para fundición deben abordar cuatro requerimientos básicos, en primera instancia deben tener la capacidad de ser moldeables en la forma deseada alrededor de algún tipo de patrón mismo que tendrá la forma de la pieza que se desea reproducir, el ser capaces de mantener la forma mientras se vierte el metal fundido evitando el desprendimiento de pedazos del mismo o el colapso de las cavidades internas, la capacidad de

mantener su forma mientras el metal fundido se solidifica y el tener la capacidad de romperse y desprenderse fácilmente después que el metal solidifique . [9]

2.2 TIPOS DE PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES NO PERMANENTES

Existen varias formas de realizar fundición con moldes no permanentes, entre ellas se puede subdividir dos tipos bien diferenciados que son: La fundición con moldes permanentes y con patrón permanente y la fundición con moldes permanentes y con patrón descartable.

2.2.1 FUNDICIÓN CON MOLDE NO PERMANENTE Y PATRÓN PERMANENTE

La Figura 2.1 muestra los tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón permanente clasificados según el tipo de material utilizado para la fabricación del molde:

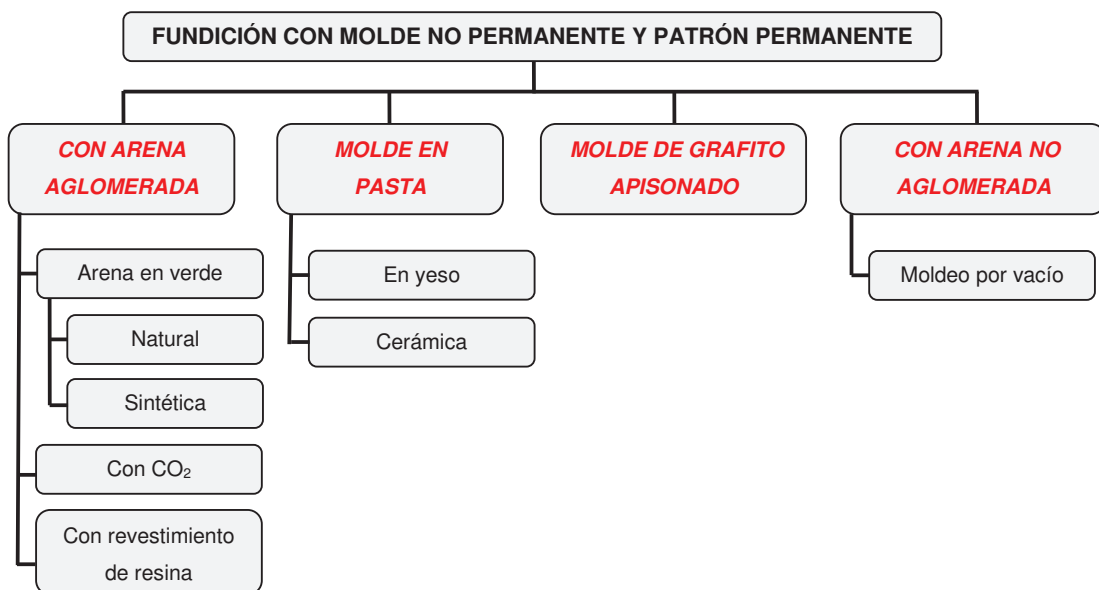


Figura 2.1 Tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón permanente
(Fuente: ASM International, Casting design and performance. Pág. 10)

2.2.1.1 Fundición con arena aglomerada

Es un método común y antiguo de fundición, consiste en construir un molde con arena húmeda mezclada con aglutinantes para proporcionarle resistencia, dependiendo del aglutinante se puede diferenciar en moldeo con arena en verde, con CO_2 y con revestimiento de resina. La Figura 2.2 muestra un molde de arena aglomerada y sus partes.

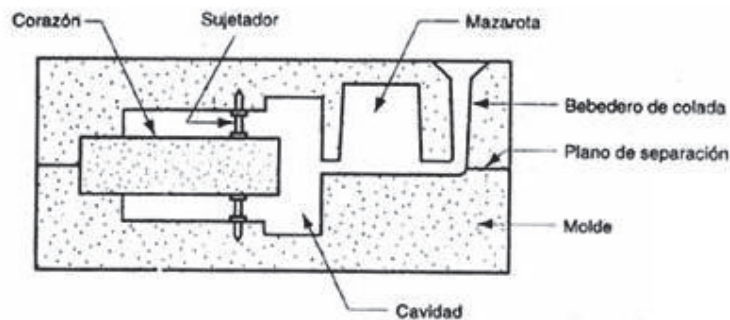


Figura 2.2 Molde de arena aglomerada y sus partes

(Fuente: <https://www.quora.com/What-is-chills-and-chaplet-in-moulding>)

En el primer caso de moldeo con arena en verde este nombre se lo toma debido a que la arena es simplemente compactada en cajas para darle la forma del patrón sin necesidad alguna de endurecer el molde por horneado, una gran ventaja de este tipo de moldeo es que la arena se puede reutilizar muchas veces antes de ser desechada.

En el moldeo con CO_2 se utiliza arena mezclada con silicato de sodio, seguido se inserta gas CO_2 a presión en el molde con lo que se logra que la arena compactada previamente se endurezca, el acabado superficial en este tipo de moldeo es bastante bueno y se puede crear geometrías bastante complejas.

Por último en el moldeo con revestimiento de resina que es un método muy parecido al de arena en verde, se crea un revestimiento de pared delgada alrededor de la forma de la cavidad interna del molde aplicando resinas para endurecer la pared interna del molde para lograr una mejor precisión dimensional y mejor acabado superficial. Se suele aplicar mediante el uso de rociadores agua de melaza, aceite de linaza ó soluciones similares para luego mediante calor o al

ambiente dejar secar para eliminar la humedad y endurecer el revestimiento. Se suele utilizar para pequeñas y medianas piezas que requieren alta precisión.

2.2.1.2 Fundición con moldeo en pasta

Es un método común y de fácil producción, tiene la ventaja de ofrecer un grado de precisión dimensional alto y buen acabado superficial a un costo no tan elevado. Con este método de moldeo se puede utilizar patrones fabricados de madera, plástico, caucho, yeso, etc. El material del molde es una mezcla en pasta de diversos materiales que se dejan fraguar al ambiente o mediante el uso de hornos.

Cuando se utiliza yeso como material para el molde se tiene un proceso similar al moldeo con arena, este tipo de proceso solo puede ser usado con materiales no ferrosos, ya que la temperatura máxima de trabajo del yeso bordea los 1200°C. Se puede producir piezas de pequeño y gran tamaño utilizando este proceso. La Figura 2.3 muestra un molde fabricado con yeso.



Figura 2.3 Molde fabricado con yeso

(Fuente: http://www.johngregory.co.uk/asp/clock_moulds.asp)

Se debe utilizar aditivos para mejorar las propiedades del yeso, las proporciones utilizadas aproximadamente son de 70-80% yeso y 20-30% aditivos, por lo

general se utiliza talco u oxido de magnesio para prevenir el agrietamiento y reducir el tiempo de fraguado del molde.

Por su lado, el moldeo en pasta con cerámica es una combinación entre el moldeo con yeso y el moldeo de precisión. En este caso se utiliza como material el silicato de etilo, silicato de zirconio, sílice fundida, oxido de aluminio, agentes aglutinantes y agua para crear la pasta. Este tipo de moldes deben ser secados con antorcha o en hornos para adquirir la dureza y grado de humedad requeridos.

Tiene la desventaja de no ser rentable para producciones grandes ya que el material del molde no es reutilizable. Como ventaja con este proceso se puede realizar fundición con materiales ferrosos y no ferrosos ya que el molde resiste altas temperaturas.

2.2.1.3 Fundición con molde de grafito apisonado

La fundición con moldes de grafito apisonado es una tecnología en la que el patrón puede ser fabricado de madera, metal o plástico. El molde se encuentra revestido con grafito, esto con el fin de evitar que el metal fundido reaccione con las paredes del molde (Fig. 2.4). Este tipo de fundición se utiliza para aleaciones de titanio y zirconio. Se puede moldear muchas piezas usando los mismos patrones construidos originalmente para la fundición de otros metales.



Figura 2.4 Patrón de madera usado para producir un molde de grafito apisonado

(Fuente: <http://www.asminternational.org/emails/enews/img/amp16603p029.pdf>)

El titanio es muy reactivo cuando esta fundido, por ello se usa el grafito como recubrimiento del molde, el polvo de grafito se mezcla con agua, jarabe de resina

y almidón como aglutinantes. Esta mezcla se comprime neumáticamente y es apisonada alrededor del patrón para formar el molde.

El molde se seca al aire durante aproximadamente 24 horas para conseguir una resistencia de molde en crudo (sin curar) antes de que se cure primero a baja temperatura para evitar la generación de vapor y de agrietamientos durante la cocción final. El tiempo de cocción depende del grosor y la forma del molde. Los moldes se cuecen por encima de 1500°F para realizar el curado final y para quemar los aglutinantes, dando como resultado un molde duro y rígido. [10]

2.2.1.4 Fundición con arena no aglomerada

Los procesos de moldeo que usan arena no aglomerada son una alternativa viable para los procesos de moldeo con arena aglomerada.

El moldeo al vacío es una variación del proceso de moldeo con arena aglomerada, se utiliza para la mayoría de metales ferrosos y no ferrosos. En este proceso se mantiene la forma del patrón en la arena que no contiene aglutinantes mediante un vacío.

El patrón está especialmente diseñado con ventilaciones para que el vacío pueda generarse a través del mismo. Una hoja delgada de polietileno calentada se coloca sobre el patrón y toma su forma mediante un vacío, Figura 2.5 (A). Luego se coloca una caja con arena especialmente diseñada para este propósito sobre el patrón y se hace vibrar para compactar la arena formando también en este paso el bebedero, Figura 2.5 (B). Se coloca otra capa plástica sobre la arena y se aplica vacío para mantener la forma del patrón mientras se retira el mismo, Figura 2.5 (C y D).

El mismo procedimiento se realiza para la otra mitad del molde, luego se cierra el mismo. Se vierte el metal fundido a través del bebedero manteniendo el vacío ya que el plástico se evapora, esto hace que la arena conserve la forma del patrón hasta que el metal fundido solidifica. Una vez el metal se solidifica se quita el vacío de la caja y la arena se suelta de la pieza fundida.

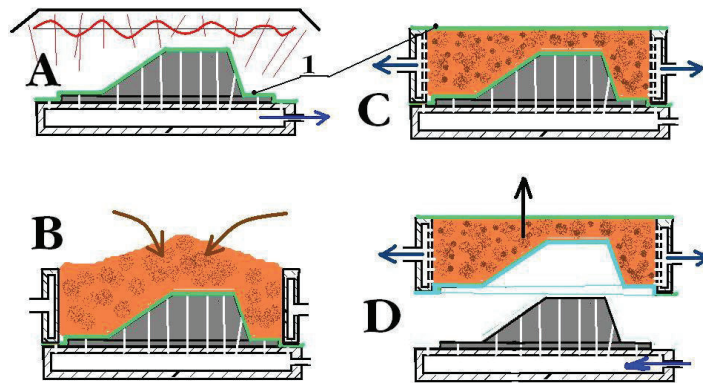


Figura 2.5 Orden del proceso para el moldeo al vacío con arena
 (Fuente: <http://www.wynndanzur.com/casting-processes.html>)

Este proceso tiene la ventaja de ofrecer una alta precisión dimensional, poder tener espesores de pared de hasta 2 mm y un buen acabado superficial. Otras ventajas también son la ausencia de defectos por humedad de la arena, el no uso de aglutinantes y el no desgaste del patrón ya que nunca entra en contacto con la arena. Como desventaja tiene el ser un proceso más lento que el de arena en verde por lo que es adecuado para un volumen de producción medio.

2.2.2 FUNDICIÓN CON MOLDE NO PERMANENTE Y PATRÓN DESCARTABLE

La Figura 2.6 muestra los tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón descartable, en algunos casos estos métodos son derivaciones o mejoras que se han realizado a otro tipo de métodos de fundición.



Figura 2.6 Tipos de fundición con moldes no permanentes y patrón descartable
 (Fuente: ASM International, Casting design and performance. Pág. 10)

2.2.2.1 Fundición de precisión

El proceso de moldeo para fundición de precisión es una técnica conocida también como proceso de moldeo con cera perdida, ya que se deriva de este tipo de moldeo. El moldeo por cera perdida fue desarrollado hace más de 5.500 años y se conoce que fue usado en principio en el antiguo Egipto y la China. El uso moderno de este proceso a nivel industrial se llama fundición de precisión.

La fundición de precisión (Fig. 2.7) es un proceso de manufactura en donde un patrón desechable de cera es recubierto con un material cerámico refractario (molde). Luego, cuando el material cerámico se endurece toma la forma del patrón de la pieza a fundirse. La cera se derrite y se saca del molde dejando entonces el molde listo para el vertido del material fundido. Una vez el metal fundido se vierte y se solidifica se rompe el molde quedando solo la pieza fundida.

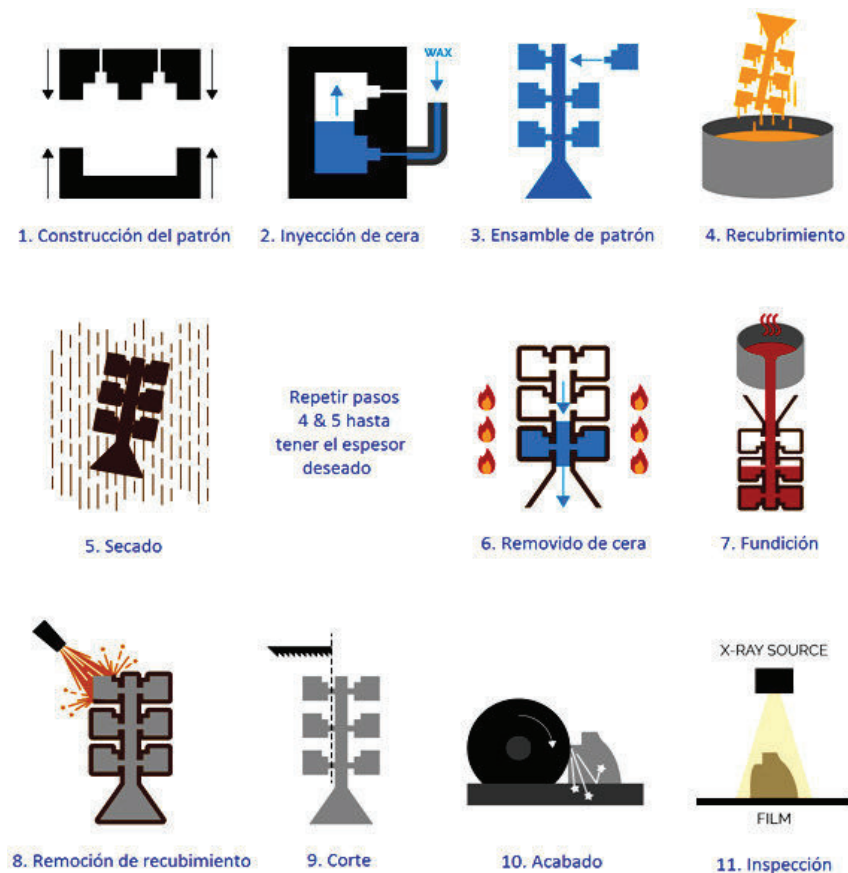


Figura 2.7 Proceso de fundición de precisión

(Fuente: <http://americancastingco.com/investment-casting-process/>)

Algunas de sus ventajas son, el patrón no necesita ángulo de salida en su construcción, un buen acabado superficial, tolerancias dimensionales buenas y muchas veces la pieza fundida no necesita ser maquinada. A su vez como desventajas se tiene que este proceso es caro y por ello se limita a producciones pequeñas, también se necesita de tiempos de preparación más extensos que en otros procesos.

2.2.2.2 Fundición con patrón de espuma perdida

El proceso de fundición con patrón de espuma perdida es un tipo de proceso en el que el patrón se desecha evaporándolo, similar al moldeo con cera perdida este tiene la ventaja de que no se necesita fundir previamente el patrón para dejar el molde vacío antes de verter el metal fundido sino que este se vierte directamente en el molde lo cual funde y evapora el patrón que está fabricado con espuma de poliestireno. La figura 2.8 muestra un patrón de espuma de poliestireno y la pieza fundida.

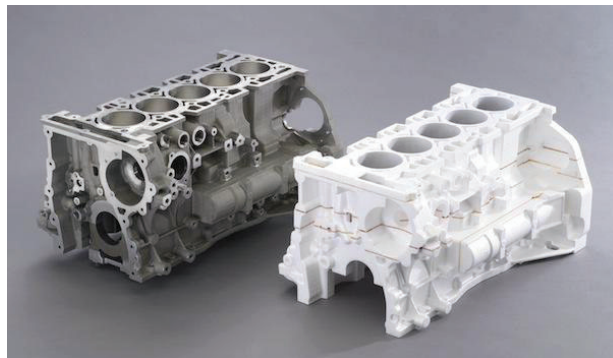


Figura 2.8 Patrón de espuma de poliestireno y pieza fundida

(Fuente: <http://mkdb.ru/lgm/>)

El patrón de espuma de poliestireno se recubre con una capa de cerámica refractaria, a través de inmersión u otros métodos. Una vez el recubrimiento se seca este se coloca en una caja de arena no aglomerada y se compacta por medio de mesas de vibración. Esta capa de recubrimiento protege el patrón de la erosión que le puede ser causada por la arena y a su vez cuando se evapora permite la permeabilidad necesaria para que el vapor del patrón fundido escape del molde.

2.2.2.3 Fundición por contra gravedad

La fundición por contra gravedad es una variación a la fundición de precisión, los moldes se fabrican de manera similar también utilizando patrones de cera perdida, la variante en este proceso es que en lugar de verter el metal fundido dentro del molde, este se encuentra en una cámara separada debajo de la cámara que contiene el molde, estas se conectan mediante un canal que tiene una válvula que controla el flujo. Figura 2.9.

En la cámara superior donde se encuentra el molde se genera un vacío el cual llena el molde con metal fundido. Cuando se solidifica el material dentro del molde se libera el vacío y el metal fundido restante regresa a la cámara inferior. Este proceso se patentó en 1.972 por Hitchiner Manufacturing.

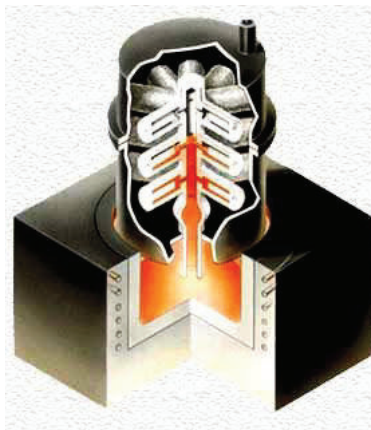


Figura 2.9 Fundición por contra gravedad

(Fuente: https://sfsa.org/tutorials/leverarm/Valve_20.htm)

Este proceso es más eficiente que el de gravedad ya que utiliza menos material que este, debido a que el metal fundido que se encuentra en el canal que conecta las dos cámaras no se solidifica cuando se retira el vacío este regresa a la cámara del horno donde no necesita ser fundido nuevamente puesto que aun se encuentra en estado líquido.

2.2.2.4 Fundición por el proceso Replicast®

El proceso Replicast® fue desarrollado como una variante al proceso de fundición con moldes fabricados mediante patrones de espuma perdida. Investigaciones exhaustivas en el campo de la metalurgia han demostrado que el proceso de

fundición con patrones de espuma perdida contamina la mayoría de los tipos de acero, por ello se recomienda no utilizar este método de fundición con aleaciones de acero ya que la contaminación producida por la espuma de poliestireno fundido crea zonas dentro de la fundición donde las propiedades mecánicas son inferiores a las requeridas lo que puede desembocar en fallos de servicio en las piezas de acero fundidas mediante este método. [11] La figura 2.10 muestra un patrón de poliestireno recubierto con una capa de cerámica mismo que se utilizará en un proceso Replicast®



Figura 2.10 Patrón de poliestireno recubierto con una capa de cerámica
(Fuente: <http://www.precisionalloys.uk/process>)

En el proceso Replicast® se utiliza un molde de cerámica horneado hecho de un material inerte. Como patrón se utiliza una pieza moldeada en espuma de poliestireno, este no requiere líneas de partición, núcleos ni ángulos de salida, las piezas de poliestireno pueden ser simplemente pegadas unas a otras para crear geometrías complejas. Luego se recubre el patrón con varias capas de cerámica para dar forma al molde. Lo que hasta este paso lo hace muy parecido al proceso de fundición de precisión. [12]

Seguido, el poliestireno es totalmente incinerado al hornear el molde (Fig. 2.11), esto se lo realiza previo a colocar el metal fundido dentro del mismo, esto permite que una amplia gama de aleaciones pueda ser usada en el molde creado desde aceros inoxidables de ultra bajo carbono a aleaciones basadas en níquel.

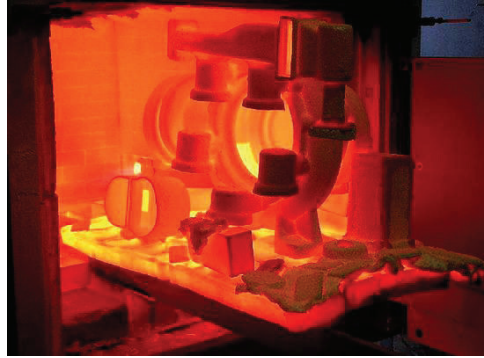


Figura 2.11 Horneado del molde para eliminar el patrón de poliestireno
(Fuente: <http://www.precisionalloys.uk/process>)

Esta es básicamente la diferencia entre el proceso Replicast® y el proceso de espuma perdida mediante el cual el metal fundido consume y ocupa el espacio ocupado por el patrón de espuma de poliestireno, lo que es inadecuado para la inmensa mayoría de componentes de acero ya que el poliestireno contiene 92% en peso de carbono. [13]

2.3. MATERIALES UTILIZADOS PARA CONSTRUIR MOLDES NO PERMANENTES

Como se menciona anteriormente existen varios materiales con los cuales se puede construir moldes no permanentes para fundición. En este caso se va a detallar más a fondo las arenas ya que son el material de preferencia que es utilizado en la fundición de piezas de aluminio a nivel nacional y que es el caso de este trabajo.

El moldeo para fundición en arena consiste en una técnica de elaboración de moldes utilizando una mezcla de materiales con arena para obtener las propiedades deseadas para el molde.

2.3.1 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA DE MOLDEO

Para la fabricación de moldes no permanentes con arena no basta solamente el uso de arena común, se necesita una mezcla de varios ingredientes dependiendo el tipo de material fundido a usarse y el tamaño de la pieza entre otros.

De allí se puede desprender el uso de varios compuestos como son la arena base, los aglomerantes y aglutinantes, el agua y los aditivos. A continuación se detalla brevemente la composición de las mezclas de moldeo comúnmente usadas.

2.3.1.1 Arena base

La arena base es un material granular que tiene un tamaño de grano de 0,05 a 2 mm. Se la encuentra en minas o a orillas de ríos. Las arenas tienen diversas clasificaciones, para este trabajo se describe en forma general algunos tipos de las mismas.

Según su composición se las puede clasificar de la siguiente manera:

2.3.1.1.1 Arena cuarzosa

La arena cuarzosa o de sílice es un mineral no metálico que contiene aproximadamente 70% de óxido de silicio (SiO_2), sus granos son de forma irregular y van entre finos a gruesos, posee un densidad de unos $2,8 \text{ g/cm}^3$, y una temperatura de fusión de 1.713°C . Es la más comúnmente usada por ser muy abundante en la naturaleza, de fácil extracción y de costo de producción bajo.

2.3.1.1.2 Arena de zirconio

Este tipo de arena posee excelentes propiedades refractarias, una baja dilatación térmica y gran conductividad térmica, se compone de silicato de zirconio (ZrSiO_4), tiene una densidad de $2,7 \text{ g/cm}^3$ y su temperatura de fusión es de 2.400°C . Se caracteriza por su abundancia en la corteza terrestre y es utilizado para fabricación de moldes y machos sometidos a temperaturas altas como para la fundición de piezas de acero.

2.3.1.1.3 Cromita

Este tipo de arena destaca por su alta refractariedad, baja expansión térmica y buena conductividad térmica. Tiene una gran cantidad de cromita (FeCr_2O_4), también contiene magnesio, aluminio o titanio. Su composición es de aproximadamente 46% óxido de cromo (Cr_2O_3), 27% óxido ferroso (FeO), 15%

óxido de aluminio (Al_2O_3), 10% óxido de magnesio (MgO) y 1% óxido de silicio (SiO_2). Su densidad oscila entre 2,4 a 2,8 g/cm^3 y la temperatura de fusión entre 1.450 a 1.850 °C.

Se utiliza para fundición de piezas de acero y tiene excelentes prestaciones para uso con aceros al cromo, cromo-níquel y aceros al manganeso. Posee la ventaja de ser menos reactiva con el óxido de manganeso en comparación con la arena cuarzosa.

2.3.1.1.4 Chamota

La chamota es un material granular que contiene un alto porcentaje de sílice y alúmina. Su contenido es de mínimo 40% óxido de aluminio (Al_2O_3), 30% óxido de silicio (SiO_2), un máximo de 4% óxido de hierro (FeO) y 2% óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO). Su densidad es de 2,6 g/cm^3 y su temperatura de fusión es de 1.780°C.

Su uso es adecuado para aceros inoxidables, aceros al carbono, aleaciones de aluminio, aleaciones de níquel, hierro fundido y cobre.

2.3.1.1.5 Otros tipos de arenas

Existen otros tipos de arena para fundición entre ellas están la arena de Olivino que contienen forsterita (Mg_2SiO_4) y fayalita (Fe_2SiO_4), la arena de bauxita que contiene un 75% de alúmina (Al_2O_3), arenas sintéticas, entre otras.

2.3.1.2 Aglomerantes y aglutinantes

Se llama aglomerantes y aglutinantes a los materiales que se utilizan para unir los granos de la arena y obtener características mejoradas para la misma en la mezcla de moldeo. Después de la arena base son los componentes más importantes en la mezcla de moldeo.

2.3.1.2.1 Aglomerantes

Son sustancias orgánicas o inorgánicas que se utilizan para pegar y endurecer las partículas de arena entre sí, requieren de un proceso químico o termoquímico de

fraguado o curado. Entre los aglomerantes utilizados en la mezcla de moldeo se encuentran los inorgánicos cementosos: como el cemento portland, silicatos como el de sodio, orgánicos como: aceites vegetales, linaza, las resinas pudiendo estas ser: termoplásticas, termoendurecibles, autofraguantes, furánicas, alquílicas, epóxicas, etc.

2.3.1.2.2 Aglutinantes

Son sustancias arcillosas que por su naturaleza necesitan un porcentaje de agua para producir su efecto. Los aglutinantes se utilizan en la mezcla de moldeo con el fin de ligar los granos de arena y darles resistencia en estado húmedo y seco.

Unos de los aglutinantes más usados son la bentonita que es una arcilla de grano fino su fórmula general es $(Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O)$ con punto de fusión de 1.250 a 1.300°C y la caolinita que es un mineral de arcilla con composición química $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ llamada silicato acuoso de aluminio, su temperatura de fusión es de 1.787°C.

Los aglutinantes deben reunir ciertas características como son la fácil capacidad de mezclarse por la superficie de los granos de arena, el asegurar una buena resistencia en estado seco y húmedo, el brindar a la mezcla de moldeo plasticidad suficiente para que llene todas las cavidades del molde, no deben adherirse al patrón ni a la caja de moldeo, no deben desprender demasiados gases durante el secado y llenado del molde.

2.3.1.3 Agua

Dentro de la mezcla de moldeo el agua (H_2O) es un elemento prioritario, debe estar presente en alrededor de un 6% en su composición, su función es la de reaccionar con los aglutinantes activándolos permitiendo su expansión.

El uso excesivo del agua en la mezcla de moldeo es contraproducente debido a que genera vapor al momento del llenado del molde.

2.3.1.4 Aditivos

Los aditivos son materiales que se agregan a las arenas base para mejorar sus características, el grafito por ejemplo mejora la refractariedad de la arena.

Otro aditivo que se utiliza es la melaza que mejora la cohesión superficial de los granos de arena, lo que impide su desmoronamiento y picado en el proceso de colado.

Para mezclas de moldeo cuando se fabrican machos de formas complejas se utiliza como aditivo harina, azúcar o ceniza; para permitir que luego del colado se pueda realizar una extracción más fácil ya que estos los vuelven frágiles y muy colapsibles al impacto.

2.3.2 ARENA EN VERDE

El término "arena en verde" viene del hecho de que la arena tiene cierta cantidad de humedad al momento de ser moldeada y a su vez colada la pieza.

La arena en verde está compuesta en su mayoría por arena silícica, bentonita y agua, esta arena debe tener una gran capacidad refractaria que es la capacidad de resistir altas temperaturas sin fundirse o degradarse.

La cantidad de arcilla y agua que se tienen en la mezcla de moldeo puede alterar la resistencia del molde fabricado en arena en verde, así como puede cambiar la permeabilidad y otras propiedades físicas.

Otras características importantes son: el tamaño del grano, la distribución de tamaños del grano en la mezcla y la forma de los granos. Los granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial en la fundición, pero los granos grandes son más permeables, para que los gases escapen durante el vaciado. Los moldes hechos de granos irregulares tienden a ser más fuertes que los moldes de granos redondos debido al entrelazado de los granos, pero esto tiende a restringir la permeabilidad. [14]

2.4 ALEACIONES UTILIZADAS PARA COLAR EN MOLDES NO PERMANENTES

A nivel general son pocas las aplicaciones en las que se utiliza metales puros para fabricar piezas fundidas, se utiliza mucho más las aleaciones metálicas ya que se puede obtener con estas mejorar las propiedades del metal principal. Por ello es más conveniente hablar de fundición de aleaciones que del metal puro. Una clasificación de las aleaciones colables en moldes no permanentes es:

2.4.1 ALEACIONES FERROSAS: HIERRO FUNDIDO

El hierro fundido es la más importante industria de fundición a nivel mundial. Anualmente se funde mas toneladas de hierro en peso que la suma de de todos los otros metales usados en fundición. La temperatura promedio de vaciado para el hierro fundido bordea los 1.400°C. Entre las fundiciones de hierro más comunes están: hierro gris, hierro blanco, hierro nodular, hierro maleable y fundiciones de aleación de hierro.

2.4.2 ALEACIONES FERROSAS: ACERO

Otra importante industria en fundición a nivel mundial es la del acero, que es el material por excelencia utilizado para la fabricación de casi todo tipo de maquinas, estructuras y demás. Aun así la fundición en acero presenta diversos problemas como es la temperatura de solidificación que en aceros de bajo carbono esta por los 1.440°C, lo que significa que la colada debe estar a unos 1.650°C al momento del vaciado. A esta temperatura el acero es altamente reactivo y se oxida fácilmente por lo que requiere procesos especiales al momento del vaciado. Aun así por su gran resistencia, costo y prestaciones la industria de fundición de acero está bastante tecnificada.

2.4.3 ALEACIONES NO FERROSAS: OTROS METALES

Una industria algo más pequeña pero no menos importante a nivel mundial es la de las fundiciones no ferrosas, en esta se encuentran varios materiales entre los que destacan las aleaciones de aluminio, magnesio, estaño, cobre, zinc, níquel y el titanio.

2.4.3.1 Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio son fácilmente manejables debido a que la temperatura de fusión del aluminio puro es 660°C por lo que la temperatura de vaciado es mucho menor que en el caso de los hierros y aceros. Utilizando estas aleaciones se puede producir formas complejas y debido a su bajo peso y su facilidad de maquinado es un material atractivo para la fundición.

2.4.3.2 Aleaciones de magnesio

El magnesio destaca por su bajo peso, por lo cual sus aleaciones a su vez son livianas. Gracias a su resistencia a la corrosión y su alta tenacidad y resistencia vs su peso estas aleaciones se han vuelto muy atractivas para la fabricación de piezas en la industria automotriz donde se fabrican mayormente aros, carcasas de cajas de cambios, volantes, blocks para motores refrigerados por aire, bombas de agua entre otros.

2.4.3.3 Aleaciones de cobre

Las aleaciones de cobre son muy atractivas debido a su resistencia a la corrosión su apariencia y sus propiedades antifricción. Entre las más utilizadas están el latón, bronce y el bronce al aluminio.

El punto débil de estas aleaciones es su alto costo, entre sus usos más comunes están los accesorios para instalaciones sanitarias, partes de propulsores marinos, componentes de bombas hidráulicas y la joyería.

2.4.3.4 Aleaciones de níquel

Las aleaciones de níquel destacan por su resistencia al calor y a la corrosión, por lo que se utilizan para piezas que trabajan a altas temperaturas como motores de propulsión a chorro, partes de cohetes, escudos contra calor y otros. Debido a sus punto de fusión no son aleaciones tan fáciles de fundir.

2.5 DEFECTOS EN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN EN ARENA

Los procesos de fundición generalmente pueden presentar defectos en la pieza fundida, estos defectos dependen de uno o varios factores como el tipo de material, el tipo de proceso, la temperatura de la colada, etc. Estos defectos afectan muchas veces simplemente la estética de las piezas pero en otros casos se puede tener afecciones estructurales lo cual no es deseable.

El conocimiento del origen, naturaleza, tamaño, orientación y zonas de ubicación de tales defectos en las piezas fundidas es de gran interés para los encargados de control de calidad y los encargados del diseño del proceso de fundición.

De todos estos defectos se puede clasificar tres grupos bien diferenciados, las discontinuidades inherentes, las discontinuidades superficiales y las discontinuidades subsuperficiales.

Las discontinuidades inherentes se forman normalmente cuando el metal es fundido y vaciado se asocian con la solidificación del metal, entre ellas están las costuras, porosidades, inclusiones no metálicas, rechupes, segregaciones.

Discontinuidad superficial se refiere a aquellas fallas que se pueden observar a simple vista, entre estas se encuentran las grietas de solidificación que pueden ser longitudinales o transversales, grietas de entallado en caliente y frío, pliegues.

Y las discontinuidades subsuperficiales por su parte no se pueden ver ya que como su nombre lo indica están bajo la superficie por lo que se pueden ver cortando las piezas o con ensayos no destructivos como rayos x u otros. Entre estas discontinuidades están las inclusiones que pueden ser metálicas o no metálicas, rechupes o llamadas también contracciones, porosidades y segregaciones.

2.5.1 DISCONTINUIDADES INHERENTES A LA FUNDICIÓN

Existen varias discontinuidades inherentes a la fundición, se producen al momento del vaciado del metal fundido en los moldes y durante la solidificación, entre estas están: Las inclusiones(Figura 2.12), que son materiales extraños que

se han mezclado con la colada entre estos están la arena, escorias, materiales extraños.



Figura 2.12 Inclusiones en pieza fundida
(Fuente: Propia)

Contracciones llamadas también rechupes (Figura 2.13), estas se dan por un mal diseño de las mazarotas o por el uso de moldes sin precalentar lo suficiente.



Figura 2.13 Contracción en pieza fundida
(Fuente: Propia)

Porosidades (Figura 2.14), se crean por vapores que se forman dentro de la colada o ingreso de aire al momento del vaciado, tienen la forma de burbujas en el material.



Figura 2.14 Porosidades en pieza fundida
(Fuente: Propia)

Colada interrumpida y juntas frías (Figura 2.15), se crean durante el enfriamiento del metal en diferentes frentes de solidificación.



Figura 2.15 Juntas frías en pieza fundida
(Fuente: Propia)

Desgarres (Figura 2.16), son fisuras que se observan en la superficie de la piezas, en varios casos estas se originan durante el enfriamiento.



Figura 2.16 Desgarre en pieza fundida
(Fuente: Propia)

Bucles y darts (Figura 2.17), son defectos causados por el desprendimiento de capas de arena del molde a causa de presiones de vapor por sectores con baja permeabilidad.



Figura 2.17 Bucle en pieza fundida maquinada
(Fuente: Propia)

2.5.2 DEFECTOS DE FUNDICIÓN

En la fundición aparecen defectos que no son casualidad sino que se podrían corregir ya que son causados en la mayoría de veces por condiciones controlables durante el proceso de manufactura. Durante la fusión, colado y solidificación no se puede tener un control completo ni perfecto sobre todos los parámetros por lo cual no es de sorprender que las fundiciones se vean afectadas con una gran variedad de defectos que otros productos fabricados con otros métodos no tienen. Entre los defectos encontrados en las fundiciones se encuentran:

2.5.2.1 Defectos superficiales

Estos defectos se presentan como superficies rugosas o ásperas que son causados por la arena del molde o temperaturas de vaciado muy elevadas. En algunos casos la penetración del metal fundido entre los granos de arena del molde son un problema serio.

Cuando se funde acero ocurre una reacción superficial entre el metal y el molde que puede causar mucha rugosidad ya que el hierro se oxida y al combinarse con la sílice se forma fayalita. Otro caso es en la fundición de magnesio en este la cara de contacto del metal con el molde se oxida formando una superficie negra y

áspera. Estos problemas pueden ser controlados añadiendo agentes inhibidores a la mezcla de moldeo tales como ácido bórico o fluoroborato de amonio.

Entre los defectos comunes de fundición están las juntas frías, piezas incompletas, inclusiones, aire atrapado, arrastres de arena, bucles y darts.

Las juntas frías y las piezas incompletas son el resultado de verter el metal fundido demasiado frío. Se visualizan mayormente en piezas con espesores de pared delgada. Estos defectos pueden controlarse elevando la temperatura de la colada al momento del vertido y mejorando el diseño de los bebederos.

Las inclusiones son partículas extrañas de otros productos diferentes al material de la colada que se han mezclado con esta por un manejo inapropiado del metal fundido y su entorno. Para controlar este tipo de defectos se debe realizar una limpieza adecuada de los hornos cucharones y demás herramientas.

Cuando el molde tiene demasiada humedad o por un mal vertido de la colada se suele tener burbujas de aire atrapado que se reconoce por tener forma de ampollas pequeñas algo oxidadas que están cercanas a la superficie del molde. Se las encuentra en fundiciones de aluminio y magnesio principalmente.

A su vez cuando la mezcla de moldeo ha perdido sus características por la reutilización de la misma varias veces sin reponer los aglutinantes y aditivos usados se suele tener arrastres de arena, en este caso el metal fundido al ingresar al molde arranca partículas de arena del bebedero o de las paredes del molde. Estos defectos se pueden notar por que la geometría de la piezas presenta pequeñas depresiones irregulares en distintas partes de la pieza.

Los bucles y darts suelen ser traslapos y costras metálicas que se producen por capas de arena que se cortan de la superficie del molde cuando el metal aun no ha llenado la cavidad. La expansión no uniforme del molde también desarrolla esfuerzos que cortan capas de arena que luego son rodeadas por el metal fundido produciendo los bucles. A menudo una presión elevada de vapor en una zona de poca permeabilidad puede producir esfuerzos que produzcan las darts. Para evitar estos defectos se suele utilizar mezclas de moldeo con alta plasticidad o

utilizando aserrín mezclado en la arena como un agente amortiguador de expansión del molde.

2.5.2.2 Defectos de alimentación incompleta

Los defectos más comunes en las fundiciones se da por el fenómeno de la contracción del metal al momento de la solidificación. De ahí que el diseño de las mazarotas y los bebederos debe ser adecuado para permitir que al momento del llenado y posterior solidificación exista suficiente material en el molde para evitar las contracciones o rechupes en las superficies de la pieza fundida.

Aun así las contracciones no son el único defecto producido por la alimentación incompleta del molde. También tenemos agrietamientos internos y externos; y por el uso de corazones y sus soportes

Los agrietamientos internos son discontinuidades que aparecen dispuestas radialmente dentro de las fundiciones, más comúnmente en los aceros. Suelen observarse con ensayos como los rayos x y se visualizan como brazos extendidos de un pulpo. Por su parte los agrietamientos externos tienen su origen por la oposición al movimiento que tiene el metal fundido que se está solidificando dentro del molde o por diferentes velocidades de enfriamiento entre secciones con paredes gruesas y delgadas, esto crea esfuerzos en las superficies que crean grietas. Los ensayos con partículas magnetizables y los de tintas penetrantes permiten observar este tipo de defectos.

Los soportes usados para sostener los corazones en piezas con cavidades muchas veces no se funden por completo cuando la colada ingresa al molde lo que produce defectos. Una temperatura baja de la colada o el uso de soportes demasiado robustos suele ser la causa para que esto suceda.

2.6 ECUACIONES QUE RIGEN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

Dentro del proceso de fundición se diferencian dos etapas, la primera es el llenado donde se tiene el metal fundido y en estado líquido, y la segunda que es la solidificación donde se tiene el cambio de fase de estado líquido a sólido.

Como se mencionó durante el llenado el metal se encuentra en estado líquido, el comportamiento de la colada se puede analizar utilizando formulaciones de mecánica de fluidos tradicional ya que el metal se comporta como un fluido newtoniano, es decir se puede considerar que la viscosidad del mismo es constante en el tiempo, aun así, se debe recordar que la viscosidad del fluido si depende de la temperatura.

Una vez completado el llenado del molde el metal empieza su transición desde el estado líquido al estado sólido, esta etapa se denomina solidificación, durante esta etapa el metal fundido cede calor hacia las paredes del molde por conducción directa entre las superficies de contacto y también de manera interna por convección natural.

Los problemas que involucran un cambio de fase como es el caso de la fundición son problemas que han atraído mucho interés a los investigadores de las aplicaciones en la que los programas de CFD pueden jugar un papel importante ya que la resolución de estos por métodos matemáticos exactos es muy complicada puesto que las ecuaciones de gobierno del cambio de fase son expresados en derivadas parciales o en formas integrales complejas.

Estos problemas de cambio de fase juegan un rol significativo en muchas aplicaciones industriales. El reto principal de este tipo de problemas es la presencia de una interface líquido-sólido en el material fundido lo que implica un fuerte acoplamiento entre la masa y la transferencia de calor. [15]

2.6.1 LLENADO DEL MOLDE

Como se menciono anteriormente durante el llenado el metal fundido se comporta como un líquido, entonces en este caso se puede analizar su movimiento dentro del molde con ecuaciones de mecánica de fluidos.

La mecánica de fluidos es una rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos sean estos gases o líquidos. En esta se parte de varias hipótesis, mismas sobre las cuales se desarrollan los conceptos y se obedece ciertas leyes en particular como son la ley de conservación de la masa, la ley de conservación de la cantidad de movimiento y la ley de conservación de la energía.

Las ecuaciones de la mecánica de fluidos fueron formuladas aplicando los principios de conservación de la mecánica clásica y la termodinámica a los fluidos. Estas ecuaciones tienen formulaciones de forma diferencial y también de forma integral dependiendo del tipo de problema que se desee analizar. A las ecuaciones que vienen formuladas en forma diferencial y que se van a detallar a continuación se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un grupo de ecuaciones formuladas en el siglo XIX por los físicos Claude-Louis Navier (1.785-1.836) y George Gabriel Stokes (1.819-1.903), se definen como un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales mismas que describen el movimiento de un fluido, son aplicables a fluidos newtonianos. No existe una solución general para este grupo de ecuaciones y solo en ciertos casos mediante simplificaciones se puede hallar una solución analítica por lo cual en la mayoría de ocasiones se recurre al análisis numérico para obtener soluciones aproximadas de las mismas.

Las ecuaciones de Navier-Stokes se componen de tres ecuaciones dependientes del tiempo, la ecuación de la conservación de masa, tres ecuaciones de conservación de movimiento y una ecuación de conservación de la energía. Estas ecuaciones tienen cuatro variables independientes que son las coordenadas espaciales x , y , z y una en el dominio del tiempo t . También hay seis variables dependientes que son la presión, la densidad, la temperatura y las tres componentes del vector de velocidad, todas estas variables dependientes son funciones de las cuatro variables independientes. Se observa de igual manera la aparición del número de Reynolds que expresa un parámetro del tipo de flujo (laminar o turbulento), el flujo de calor, el tensor de Reynolds y el número de Prandtl que es una proporcionalidad entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

Cabe destacar que todas las variables dependientes aparecen en cada ecuación. Para resolver un problema de flujo se debe resolver las cinco ecuaciones simultáneamente, por ello se dice que las ecuaciones de Navier-Stokes son un sistema de ecuaciones acopladas. Se tiene también otra ecuación que debe ser resuelta para hallar la solución del sistema de ecuaciones ya que se tiene cinco

ecuaciones para seis incógnitas, esta ecuación es la ecuación de estado que contiene la presión, temperatura y la densidad del fluido. [16]

A continuación se detallan las ecuaciones de Navier-Stokes con la ley de conservación de la cual se derivan.

2.6.1.1 Ley de conservación de la masa

La ley de conservación de la masa también llamada ley de Lomonósov-Lavoisier nos dice que, un sistema cerrado contiene siempre la misma cantidad de materia, es decir su masa se mantiene constante, esto asegura la conservación de la masa.

Esta ley aplicada a un fluido se puede definir enunciando que en un conducto continuo con secciones A_1 y A_2 el fluido que pasa a través de estas es el mismo, es decir la masa que entra es igual a la masa que sale de conducto.

La ecuación de continuidad que es la que expresa la ley de la conservación de masa en su forma diferencial es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Donde, ρ es la densidad, t es el tiempo y $\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k}$ es la velocidad del fluido.

2.6.1.2 Ley de conservación de la cantidad de movimiento

En el año de 1.687 Isaac Newton (1.642 - 1.727), publica lo que hoy en día se conoce como las tres leyes del movimiento de Newton, una de estas leyes establece la conservación de la cantidad de movimiento. La ley de conservación de la cantidad de movimiento establece que la cantidad de movimiento total de un sistema cerrado, es decir, un sistema que no se encuentra afectado por fuerzas externas y cuyas fuerzas internas no son disipativas, no puede ser cambiada y permanecerá constante en el tiempo.

La ecuación que expresa la ley de conservación de la cantidad de movimiento y las ecuaciones que expresan la conservación de momento en su forma diferencial son:

Cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \rho f + \nabla \cdot \tau \quad (2.3)$$

Momento en X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2.4)$$

Momento en Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (2.5)$$

Momento en Z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (2.6)$$

Donde, ρ es la densidad, t es el tiempo, f es la densidad de fuerza sobre el cuerpo, v es la velocidad del fluido, τ es el tensor de Reynolds y Re_f es el número de Reynolds.

2.6.1.3 Ley de conservación de energía

La ley de conservación de energía enuncia que la cantidad de energía en un sistema físico aislado cualquiera permanecerá invariable en el tiempo, dicha energía puede transformarse en otro tipo de energía. Por tanto, esta ley nos dice que la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma.

Esta ley se refiere al primer principio de la termodinámica, aun así, si en un sistema no se pierde energía, por el segundo principio de la termodinámica la energía se degrada siendo este un proceso irreversible, aun así esto no implica el

incumplimiento de ley la conservación de la energía sino más bien una transformación de la energía dentro del sistema.

La ecuación que expresa la ley de conservación de energía en su forma diferencial es:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{v^2}{2} \right) = -\nabla \cdot (\rho u) + \nabla \cdot (\tau' \cdot u) + \rho f \cdot u + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.7)$$

Donde, ρ es la densidad, t es el tiempo, τ es el tensor de Reynolds, f es la densidad de fuerza sobre el cuerpo, k es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, ν es la viscosidad dinámica del fluido, e es la energía interna y u es la velocidad del fluido.

2.6.2 SOLIDIFICACIÓN DEL METAL

Siguiendo el proceso de fundición, una vez ha concluido el llenado del molde el siguiente paso es la solidificación del metal, acto en el cual el metal fundido cede calor por diferentes medios de transferencia de calor a las paredes del molde. En estos momentos la temperatura del metal que está en estado líquido baja a un nivel en el cual empieza su transición al estado sólido.

Es esta sección se va a analizar los tipos de transferencia de calor que se dan en el proceso de solidificación y como es el caso de estudio de este trabajo investigativo se va también a analizar la formulación que utiliza específicamente el software ANSYS Fluent para simular el cambio de fase del material.

La transferencia de calor es el proceso en el cual se propaga el calor entre distintos medios. La rama de la física que estudia estos mecanismos de transferencia se llama transferencia de calor. A nivel universal se conocen tres mecanismos diferentes de transferencia de calor: la convección, la conducción y la radiación.

La transferencia de calor se da siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas entre dos o más sistemas que se encuentran interactuando, este proceso se dará mientras se llegue a alcanzar un equilibrio térmico, es decir,

cuando las temperaturas de todos los sistemas que se hallan interactuando se iguales. Cabe mencionar que una vez empieza la transferencia de calor entre sistemas, esta no puede ser detenida solamente puede retardarse.

2.6.2.1 Trasterferencia de calor por convección

Se llama convección al mecanismo de transferencia de calor el cual se caracteriza por transportar el calor entre las zonas de diferentes temperaturas mediante el movimiento de un fluido. La transferencia de calor por convección se puede dar de manera natural o forzada. El movimiento del fluido entre las zonas a diferentes temperaturas se da debido a la diferencia de densidades resultante del gradiente de temperatura en el medio.

La ecuación que expresa la transferencia de calor por convección viene formulada por la ley de enfriamiento de Newton que expresa que: " la tasa de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores". La ecuación que expresa la transferencia de calor por convección se visualiza a continuación.

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_f) \quad (2.8)$$

Donde, T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo, T_f es la temperatura del fluido en un punto alejado del cuerpo, A_s es el área del cuerpo que se encuentra en contacto con el fluido y h es el coeficiente de convección.



Figura 2.18 Ejemplo de transferencia de calor por convección

(Fuente: <http://termoycalor.blogspot.com/2015/12/mecanismos-de-transferencia-de-calor.html>)

2.6.2.2 Transferencia de calor por conducción

Como es conocido la transferencia de calor de un cuerpo hacia otro siempre se da desde el de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. La transferencia de calor por conducción se da cuando existe contacto directo entre cuerpos o sistemas que interactúan entre si y que tienen diferentes temperaturas.

La transferencia de calor por conducción se da por el intercambio de la energía interna de los cuerpos, este intercambio de energía interna se debe a la combinación de energía cinética y potencial de las partículas del cuerpo más caliente que al chocar con el cuerpo de menor temperatura le transmiten su energía, la conducción de calor se da en todos los estados de la materia.

La ecuación que expresa la transferencia de calor por conducción en una sola dirección es la siguiente:

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{kA}{e}(T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

Donde, $T_1 - T_2$ es la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos en contacto, A es el área de contacto entre los cuerpos, k es el valor de la conductividad térmica y e es el espesor del material.

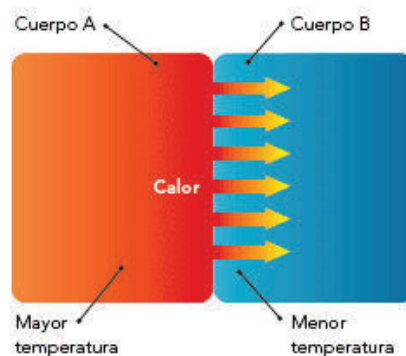


Figura 2.19 Ejemplo de transferencia de calor por conducción

(Fuente: <http://termoycalor.blogspot.com/2015/12/mecanismos-de-transferencia-de-calor.html>)

2.6.2.3 Ecuación de solidificación

Existen varios métodos para resolver problemas que involucren solidificación, en este caso se va a hablar sobre la formulación utilizada por el software ANSYS Fluent que es el que se utilizó para la simulación de la solidificación.

ANSYS Fluent se puede utilizar para resolver problemas de flujo que involucran solidificación y/o fusión que tienen lugar a una sola temperatura como es con los metales puros o a un rango de temperaturas como es el caso de las aleaciones. En lugar de seguir el frente de solidificación de forma explícita, ANSYS Fluent utiliza una técnica llamada enthalpy-porosity formulation. La zona en transición líquido-sólido es tratada como una zona porosa donde la porosidad es igual a la fracción líquida, y se añaden términos de disipación a las ecuaciones de momento para tener en cuenta la caída de presión causada por la presencia de material sólido. También se añaden términos de disipación a las ecuaciones de turbulencia para tener en cuenta la reducción de la porosidad en las regiones solidas. [17]

Se utiliza el término zona porosa a la zona donde se tienen la transición líquido-sólido, esta región es aquella donde la fracción líquida se encuentra entre 0 y 1. Cuando el metal se ha solidificado totalmente en una región, la porosidad se vuelve 0 y por lo tanto también las velocidades se vuelven 0. La fracción líquida se calcula en cada iteración basándose en un equilibrio de la entalpia del sistema.[18]

A continuación se da una visión general de la teoría de la solidificación aplicada a las ecuaciones planteadas por los desarrolladores de esta teoría. [18]

Dentro de la ecuación de energía la entalpia total del material se calcula como la suma de la entalpia en ese momento h , y el calor latente ΔH .

$$H = h + \Delta H \quad (2.10)$$

Donde: $h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT$ y h_{ref} es la entalpia de referencia, T_{ref} es la temperatura de referencia y C_p es el calor específico a presión constante.

La fracción líquida β , puede ser definida como: $\beta=0$ si $T < T_{sólido}$ y, $\beta=1$ si $T < T_{líquido}$.

$$\beta = \frac{T - T_{sólido}}{T_{líquido} - T_{sólido}} \quad \text{si } T_{sólido} < T < T_{líquido} \quad (2.11)$$

El contenido de calor latente puede ser escrito en términos del calor latente del material L entonces se tendrá $\Delta H = \beta L$, donde el contenido de calor latente puede cambiar entre 0 para sólido y L para líquido.

Entonces la ecuación de energía en problemas de solidificación se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2.12)$$

Donde: H es la entalpía total, ρ es la densidad, \vec{v} es la velocidad del fluido y $S = -\delta H \frac{\partial g_1}{\partial t}$ donde g_1 es la fracción volumétrica de la fase. [20]

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE

Como parte de este trabajo de investigación se realizará el diseño del molde de arena en verde y el modelado en computador del patrón para la fundición de piezas de aluminio blanco.

Para el diseño del molde se partirá primeramente de un patrón establecido el cual se fabrica actualmente en los talleres de la empresa FUNSA S.A con sede en la ciudad de Quito, Parroquia Conocoto.

Como primera parte de este trabajo de investigación se va a determinar las dimensiones y el uso de la pieza a fundirse, las propiedades físicas y térmicas del material del cual se la fabricará y luego proceder al diseño del molde de arena en verde en el cual se fundirá.

Seguido se va a construir varios moldes y se procederá a realizar el colado y fundición de varias piezas que serán utilizadas luego para verificación y comparación del llenado real con los datos obtenidos en la simulación del llenado del molde.

3.1 DETERMINACIÓN DE LA PIEZA

La empresa de fundición FUNSA S.A. produce piezas de ajuste para accesorios sanitarios para varias empresas del país. Entre ellas se encuentra la pieza de la cual se va a diseñar el molde, misma que se aprecia en la figura 3.1 a continuación, el número de piezas producidas por la empresa anualmente es de aproximadamente 18.000 unidades. En la figura 3.1 se observa una renderización de la pieza.



Figura 3.1 Render de pieza fundida en aluminio blanco
(Fuente: Propia)

Esta pieza fundida se utiliza para el acople y soporte de urinarios a las tuberías de desagüe, por lo que forma conjunto con una pieza de caucho (figura 3.2) para brindar estanqueidad al momento de evacuar las aguas residuales, de ahí que también necesita ser una pieza resistente a la corrosión.



Figura 3.2 Flange de aluminio blanco con inserto de caucho
(Fuente: <http://www.edesa.com.ec/index.php?idSeccion=98&idProducto=523>)

3.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL A UTILIZARSE

A nivel nacional en Ecuador la industria de la fundición tanto de aleaciones ferrosas como no ferrosas se basa mayormente en el reciclaje y reutilización de chatarra de diferentes fuentes. Esta chatarra forma parte en los procesos de fundición como materia prima en las empresas nacionales mismas que con la experiencia y el paso de los años han desarrollado sus técnicas de clasificación para obtener la aleación adecuada de acuerdo al uso de las piezas que se va a fabricar.

En este caso la empresa FUNSA S.A utiliza para realizar la colada de fabricación de sus piezas pistones, radiadores, carcasas de cajas de cambios, material de litografía de imprentas, entre otros

Para este caso el material que se utiliza exclusivamente para realizar la fundición de las piezas son planchas de aluminio litográfico que corresponden a las series de aluminio 1050 o su equivalente DIN 1712 el cual tiene un 99,5% de pureza en aluminio. Los valores de la composición química del material y sus propiedades físicas y termodinámicas se detallan en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente a continuación, mismas que fueron proporcionadas por la empresa de fundición FUNSA S.A.

Tabla 3.1 Composición química del aluminio 1050 en % peso

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Max	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0	0,07	0,05	0,03	99,50

(Fuente: FUNSA S.A.)

Tabla 3.2 Propiedades físicas y termodinámicas del aluminio 1050

Densidad (g/cm³)	2,70	Coefficiente de dilatación térmica (°K⁻¹x10⁶)	23,6
Temperatura de fusión (°C)	658-660	Conductividad térmica (W/m°K)	220
Módulo de elasticidad (MPa)	69.000	Calor específico (J/kg°K)	960
Coefficiente de Poisson	0,33	Modulo de Young (GPa)	70

(Fuente: FUNSA S.A.)

Una comparación de los valores de la composición química del aluminio utilizado antes de la fundición y una vez realizada esta se puede observar en el anexo 1.

3.3 DISEÑO DEL MOLDE NO PERMANENTE

En el diseño del molde se debe tomar en consideración diversos factores para tener un buen diseño. Primeramente en esta sección se va a repasar unos breves conceptos sobre las partes que forman un molde para luego proceder al diseño del mismo.

3.3.1 PARTES DEL MOLDE

Un molde está formado por varias partes que cumplen diferentes funciones por lo cual para tener un buen diseño se debe pensar en todos los aspectos del mismo, basándose en la complejidad de la pieza a fundirse ya que de ella depende la colocación o no de algunas partes en el molde. En la figura 3.3 se puede observar las partes de un molde.

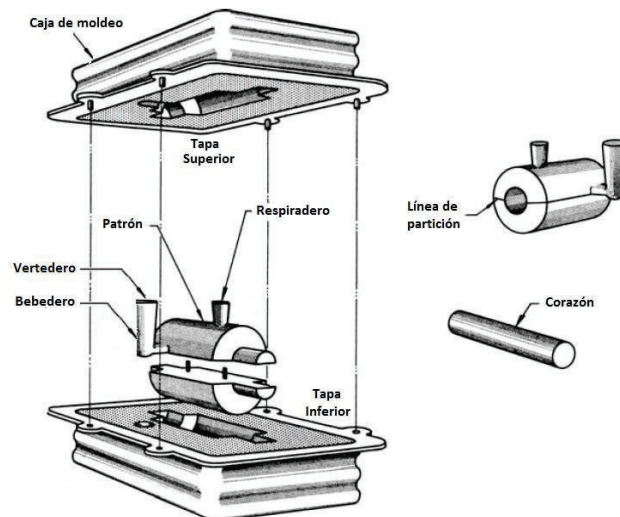


Figura 3.3 Partes de un molde no permanente

(Fuente: ASM International, Casting design and performance. pág. 11)

3.3.1.1 Cavidad de vertido (Vertedero)

La cavidad de vertido conocida también como vertedero es un canal con forma de cono piramidal que sirve para el vaciado del metal fundido por ello su posición en el molde y el tamaño de este es de vital importancia.

Su función es la de facilitar el vertido por lo cual debe tener un diámetro mayor que el canal de vertido esto con el fin de atenuar el flujo del metal fundido hacia el interior del molde.

3.3.1.2 Canal de vertido (Bebedero)

El canal de vertido es el conducto por el cual el metal fundido ingresa al molde, está ubicado a continuación del vertedero y puede formar una sola parte junto con el mismo.

Al momento del llenado este canal debe permanecer siempre lleno para evitar el ingreso de aire al molde y debe ser lo suficientemente consistente para evitar la erosión de sus paredes al ingreso de la colada.

3.3.1.3 Respiraderos

Los respiraderos son canales u orificios colocados para facilitar la salida de aire del molde al momento del llenado. Se colocan en la parte alta del molde aunque en ocasiones se puede prescindir de ellos si el molde es lo suficientemente poroso para que el aire salga sin necesidad de estos.

3.3.1.4 Mazarotas

Las mazarotas son cavidades internas o externas en los moldes que son ajenas a la pieza donde se acumula el metal fundido. Su función es la de aportar con material extra a la pieza al momento de la solidificación cuando se produce contracción evitando así los rechupes. Su diseño es importante ya que debe mantener el metal fundido en estado líquido mientras la pieza se solidifica.

En algunos casos en piezas pequeñas se puede usar los mismos bebederos como mazarotas.

3.3.1.5 Machos (Corazones)

Cuando se va a fabricar piezas con cavidades internas como es el caso de culatas de motor es necesario el uso de machos. Los machos se colocan dentro del molde antes del llenado y son removidos posteriormente a la solidificación. Deben poseer buena resistencia a la erosión y no deben ser demasiado colapsables.

3.3.2 DISEÑO DEL MOLDE

Como ya se menciona anteriormente el molde posee varias partes que deben ser diseñadas previo la construcción del mismo, también es necesario determinar la ubicación de ciertas partes para un correcto diseño. A continuación se detalla la obtención de los parámetros del molde.

3.3.2.1 Volumen y superficie de la pieza a fundirse

Como paso inicial para empezar con el diseño del molde para la pieza a fundirse es necesario conocer el volumen de la misma, así como también la superficie exterior que será la que se encuentre en contacto directo en el molde mediante la cual se disipa el calor del material hacia el molde.

Para esto anteriormente se utilizaba métodos artesanales muchas veces demorados como es la medición manual de la geometría de un patrón que en casos de piezas de geometría complicada se vuelven incluso poco exactos. En este caso se modeló la pieza en el software SolidWorks basándose en las especificaciones y dimensiones del cliente quien adquiere las piezas a la empresa FUNSA S.A. En la figura 3.4 se puede apreciar las propiedades de la pieza proporcionadas mediante el software en los que se visualizan los valores del volumen y la superficie de la pieza.

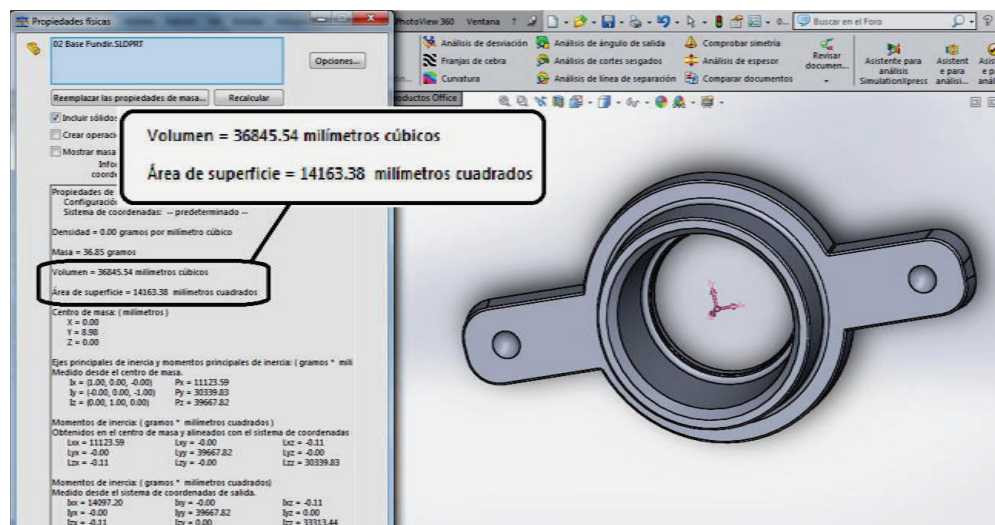


Figura 3.4 Propiedades físicas de la pieza tomadas de SolidWorks.

(Fuente: Propia)

Se puede visualizar que la pieza tiene un volumen de 36.845,54 mm³ y una superficie total de 14.163,38 mm².

3.3.2.2 Cálculo de la mazarota y canal de vertido

En la industria de la fundición se conoce como mazarotas a los depósitos colocados en zonas estratégicas del molde con el fin de contener el mayor tiempo posible el metal fundido en estado líquido el cual debe actuar como reserva de material al momento de la solidificación y contracción de la pieza fundida.

Se realiza el cálculo de la mazarota con el fin de obtener el diámetro y la altura óptimas de la misma para que cumpla con su función. La forma esférica es la más eficiente para las mazarotas pero por su dificultad de construcción dentro del molde se utiliza mayormente mazarotas cilíndricas.

Existen dos criterios para el cálculo de la mazarotas, en este caso se utilizó los dos criterios y se tomó el valor más alto para asegurar el correcto cumplimiento de la función de la mazarota. El primer criterio se basa en el volumen que propone que el volumen total de las mazarotas debe ser mayor al volumen de la contracción de la pieza. El segundo criterio es el de los módulos el cual propone que el módulo de enfriamiento de la mazarota debe ser mayor al módulo de enfriamiento de la pieza.

A continuación se detalla el proceso de cálculo utilizando *el criterio del volumen*.

$$V_{maz} = V_{pieza} * k * c \quad (3.1)$$

donde, V_{maz} es el volumen de la mazarota, V_{pieza} es el volumen de la pieza, c es el coeficiente de contracción volumétrica del metal (aluminio aprox. 6%) y, k es el coeficiente dependiente del tipo de mazarota (normal $k= 2,5$; exotérmica $k = 1,5$)

$$V_{maz} = 5,52675 \text{ cm}^3$$

Con este volumen se calcula el diámetro de la mazarota la cual será de forma cilíndrica, se utilizará la relación entre diámetro y altura de $h = 2d$.

$$V_{maz} = (\pi/4) * d^2 * h; \quad (3.2) \quad \text{reemplazando } h = 2d$$

$$V_{maz} = (\pi/2) * d^3; \quad \text{igualamos a } V_{maz} = 5,52675 \text{ cm}^3$$

$$\text{tenemos entonces:} \quad d = 1,521 \text{ cm} \wedge h = 3,042 \text{ cm}$$

Ahora mediante *el criterio de los módulos de enfriamiento* se procede a realizar el siguiente cálculo. El concepto de modulo de enfriamiento es una simplificación de la regla de Chvorinov's, fue concebido por Wlodawer el cual demostró que existe una relación entre el tiempo de solidificación y el parámetro V/A de la ecuación para calcular el tiempo de solidificación. [21]

$$M_{pieza} = V_{Pieza} / A_{Pieza} \quad (3.3)$$

$$M_{pieza} = 0,26014$$

$$\text{Se recomienda el uso de } M_{Maz} = 1,2 * M_{pieza} \quad (3.4)$$

$$\text{entonces; } M_{Maz} = 0,312168$$

Entonces si la mazarota es cilíndrica y $M_{Maz} = V_{Maz} / A_{Maz}$, se puede calcular el diámetro de la mazarota.

$$M_{Maz} = (\pi * r^2 * h) / ((2 * \pi * r^2) + (2 * \pi * r * h))$$

$$\text{Reemplazando } h = 2d = 4r \text{ se obtiene } M_{Maz} = 2 * r / 5$$

$$r = 0,78042 \text{ cm} \quad \wedge \quad d = 1,56084 \text{ cm} \quad \wedge \quad h = 3,12168$$

$$V_{Maz} = 5,973 \text{ cm}^3.$$

Por lo tanto se toma el valor más alto de los anteriormente calculados como referencia para las dimensiones de la mazarota, mismo que sería de un volumen de $5,973 \text{ cm}^3$.

Una práctica habitual en piezas de pequeño tamaño es el uso del canal de vertido como mazarota. En este caso dada la geometría de la pieza y para evitar la posterior remoción de mazarota y canal de vertido se va a unir estas dos partes en una sola. Se tiene en cuenta que la mazarota tenga su propio volumen para evitar rechupes y dar al canal de vertido un tamaño igualmente adecuado. Para ello se va a verificar que la altura de la tapa superior de la caja de moldeo cumpla con la siguiente proporción.

$$h_{tapa} \geq h_{Maz} + h_{Pieza} \quad (3.5)$$

$$h_{\text{tapa}} = 5,32168 \text{ cm}$$

Como medida de seguridad se va a optar por una altura de 6 cm para la tapa superior de la caja de moldeo al igual que para la tapa inferior de la misma. La figura 3.5 muestra la ubicación de la mazarota bajo el canal de vertido y la altura de las tapas de la caja de moldeo.

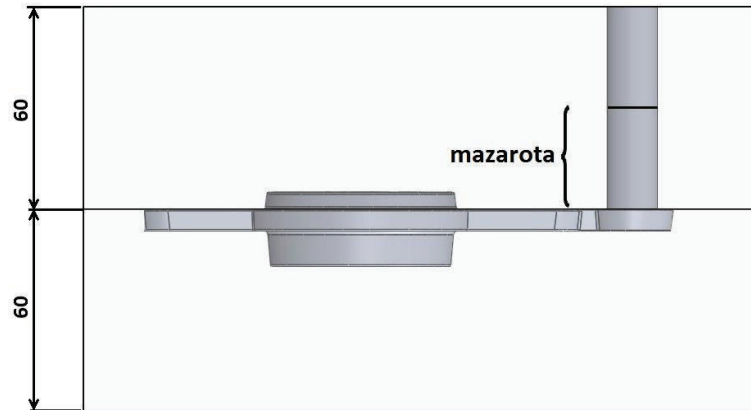


Figura 3.5 Ubicación de la mazarota y altura de tapas de la caja de moldeo
(Fuente: Propia)

3.3.2.3 Cálculo de la velocidad de vertido y el tiempo de llenado

Para el cálculo de la velocidad de vertido se utilizará la formulación de Torricelli.

$$v = (2 * h * g)^{1/2} \quad (3.6)$$

Donde, v es la velocidad de vertido, h es la altura entre el pico de descarga de la cuchara de vertido de colada al vertedero y g es la aceleración de la gravedad.

entonces; $v = 0,443 \text{ m/s}$

Ahora para conocer el tiempo de llenado es necesario conocer el caudal volumétrico. Por tanto:

$$Q = v * A_b \quad (3.7)$$

Donde, Q es el caudal volumétrico, v es la velocidad de vertido y A_b es el área transversal del bebedero.

$$Q = 0,00008475 \text{ m}^3/\text{s} = 8,475 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora se calcula el tiempo de llenado del molde.

$$t_{llenado} = V_{pieza} / Q \quad (3.8)$$

$$t_{llenado} = 0,4347 \text{ s}$$

Este tiempo de llenado es referencial y para condiciones en las cuales el flujo de metal fundido se realizara por toda el área transversal del vertedero, esto en condiciones reales no es viable ya que el chorro de metal fundido que ingresa al molde es menor a esta área, para compensar esto se dará un producto por 3 a este tiempo para el correcto funcionamiento de la simulación posterior, el valor de este factor de seguridad no ha sido tomado al azar sino que fue escogido en base al promedio de tiempos de llenado recogidos al momento en que se realizó la fundición física de los modelos de prueba.

3.3.2.4 Cálculo del tiempo de solidificación

Para el cálculo del tiempo de solidificación se utilizó el concepto de la regla de Chvorinov, esta es una relación matemática formulada en el año de 1940 por Nicolas Chvorinov que establece una relación entre el volumen y la superficie de la pieza como una proporcionalidad al tiempo de solidificación de la misma. Esta regla fue formulada basada en experiencias y ensayos empíricos en los cuales Chvorinov demostró que a iguales condiciones externas, una pieza con mayor superficie externa y menor volumen se enfriaría más rápidamente que otra pieza que tenga menor superficie externa y un volumen mas grande. Esta relación se visualiza en la siguiente ecuación.

$$t_{solidificación} = B \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (3.9)$$

Donde, $t_{solidificación}$ es el tiempo de solidificación, B es la constante del molde (min/cm^2), V es el volumen de la pieza, A es el área de la pieza que está en contacto con el molde y n es una constante con un valor de 2.

Como se mencionó anteriormente B es la constante del molde, esta depende de las propiedades del molde mismo y del metal que se va a colar. El valor de la constante B se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$B = \left[\frac{\rho_m L}{(T_m - T_o)} \right]^2 \left[\frac{\pi}{4k\rho c} \right] \left[1 + \left(\frac{c_m \Delta T_s}{L} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

Donde:

Son propiedades del molde: k conductividad térmica (W/m.°K), ρ densidad (kg/m³), c calor específico (J/kg °K), T_o temperatura inicial (°K)

Son propiedades del metal: ρ_m densidad del metal (kg/m³), L calor latente de fusión (J/kg), T_m temperatura de fusión/solidificación del metal (°K), C_m calor específico (J/kg °K), ΔT_s es el sobrecalentamiento (°K) ($T_{\text{vertido}} - T_m$)

Reemplazando los valores y realizando los cálculos se tiene:

$$B = 4,628551 \frac{\text{min}}{\text{cm}^2}$$

Entonces:

$$t_{\text{solidificación}} = 4,628551 \text{ min/cm}^2 \left(\frac{36,845 \text{ cm}^3}{141,63 \text{ cm}^2} \right)^2$$

$$t_{\text{solidificación}} = 0,31325 \text{ min} = 18,79 \text{ s}$$

3.3.2.5 Ubicación de la línea de partición

La línea de partición es aquella que separa las dos mitades de un molde. Por lo general esta línea debe ubicarse de tal manera que abarque un plano único de la pieza con lo que las rebabas del metal no sean muy notorias. En este caso se colocó la línea de partición en el plano inferior de la espalda de la pieza como se observa en la figura 3.6.

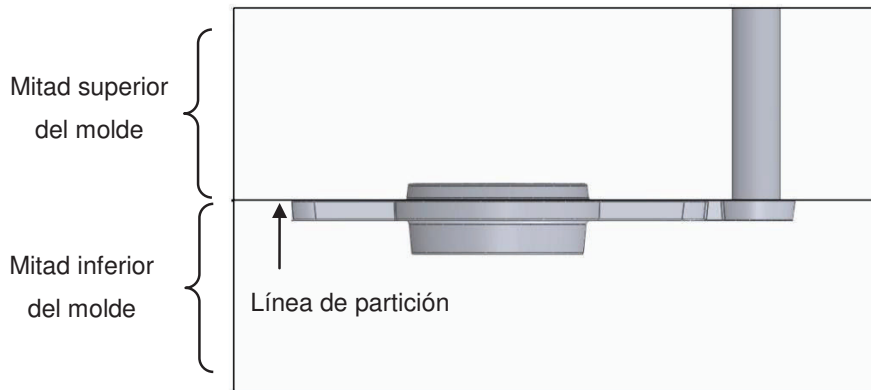


Figura 3.6 Ubicación de la línea de partición
(Fuente: Propia)

3.3.2.6 Ángulo de desmolde

El ángulo de desmolde es aquel que se coloca en las caras del patrón para permitir la extracción del mismo sin dañar la superficie del molde. Dependiendo de la calidad del patrón y la resistencia al desmoronamiento del molde este ángulo varía entre 3°y 6°. En las caras internas se suele colocar un ángulo de desmolde mayor ya que la fundición se contrae desde afuera hacia adentro de la pieza.

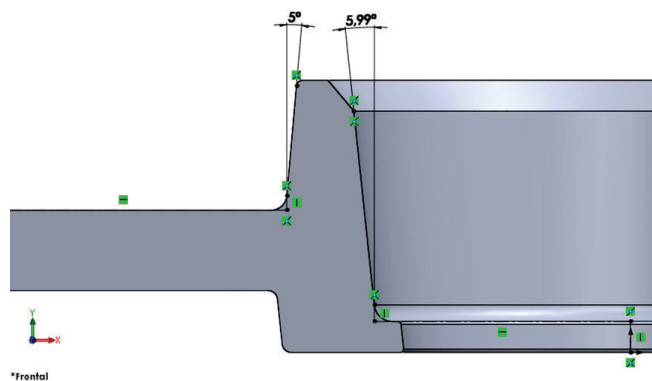


Figura 3.7 Ángulos de desmolde, externo e interno.
(Fuente: Propia)

3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MOLDE

Una vez obtenidas las dimensiones más importantes del molde se procedió a construir el mismo, para esto se utilizo bastidores en los que se fabrican varias piezas los cuales tienen una dimensión interna de 60mm de altura, 120 mm de ancho y 240 mm de largo, espacio suficiente para colocar cómodamente el patrón de la pieza.

Como paso inicial se coloca el patrón sobre la placa para moldear y se coloca la primera mitad del bastidor procurando centrar el patrón en su interior como muestra la figura 3.8



Figura 3.8 Patrón centrado dentro del bastidor para moldeo.

(Fuente: Propia)

Seguido se coloca la arena dentro del bastidor y se procede a apisonar aplicando una presión moderada de compactación (Figura 3.9).



Figura 3.9 Arena apisonada dentro del bastidor

(Fuente: Propia)

Se remueve el exceso de arena que se halla sobre el bastidor utilizando una regla metálica, se gira el conjunto y se remueve la placa para moldear obteniéndose la primera mitad del molde (Figura 3.10 Izquierda), se espolvorea arena sílice seca sobre la superficie del molde para evitar que al apisonar la otra parte del molde este se pegue estropeándolo (Figura 3.10 Derecha).



Figura 3.10 Izquierda. Vista del patrón en la mitad del molde.

Derecha. Molde espolvoreado con arena sílice seca.

(Fuente: Propia)

Se coloca la otra mitad del bastidor y se centra el patrón que permitirá crear la geometría del bebedero y la mazarota. (Figura 3.11)



Figura 3.11 Colocación del patrón del bebedero en su posición.

(Fuente: Propia)

Nuevamente se llena el bastidor con arena y se apisona, ahora se retira con cuidado el patrón del bebedero de su posición para no colapsar el canal y se limpia el exceso de arena con la regla metálica. (Figura 3.12)



Figura 3.12 Molde listo para remoción de excesos de arena.
(Fuente: Propia)

Entonces se puede separar con suavidad las dos mitades del bastidor para retirar el patrón. Este paso ha de ser con suma delicadeza ya que de si se lo hace de mal manera se puede estropear totalmente las cavidades del molde y se tendría que desechar el mismo. Las figuras 3.13 y 3.14 muestran las dos mitades del molde donde se aprecia las cavidades creadas mismas que mantienen la forma del patrón. Nótese en la figura 3.14, se puede apreciar fielmente la cavidad que será el bebedero y mazarota del molde.



Figura 3.13 Mitad inferior del molde con la cavidad perfectamente moldeada.
(Fuente: Propia)



Figura 3.14 Mitad superior del molde con la cavidad perfectamente moldeada.

(Fuente: Propia)

Pues se tiene entonces el molde prácticamente listo, como último paso se procede a unir nuevamente las dos mitades del bastidor con la precaución de no golpearlas entre sí para evitar que el molde vaya a colapsar. Luego se coloca el conjunto en el lugar donde se va a realizar el vertido y se remueve el bastidor (Figura 3.15 Izquierda) lo que permite apreciar el molde de arena terminado. (Figura 3.15 Derecha).



Figura 3.15 Izquierda. Bastidores siendo retirados del molde.

Derecha. Molde listo para el colado.

(Fuente: Propia)

3.5 COLADO Y FUNDICIÓN

Una vez los moldes se encuentran listos se prepara a continuación el material para realizar la colada, como se menciona anteriormente el material utilizado para las piezas es chatarra de aluminio 1050 que se obtiene del reciclaje de placas para litografía, en la figura 3,16 se observa la chatarra que se utiliza en la colada



Figura 3.16 Chatarra para la fundición

(Fuente: Propia)

Entonces se coloca el material dentro del horno y se eleva la temperatura a unos 710 °C para obtener un sobrecalentamiento del material lo que asegurará que en el transporte del metal fundido hacia los moldes se tenga una buena temperatura para que el material corra dentro de la cavidad del molde. (Figura 3.17)

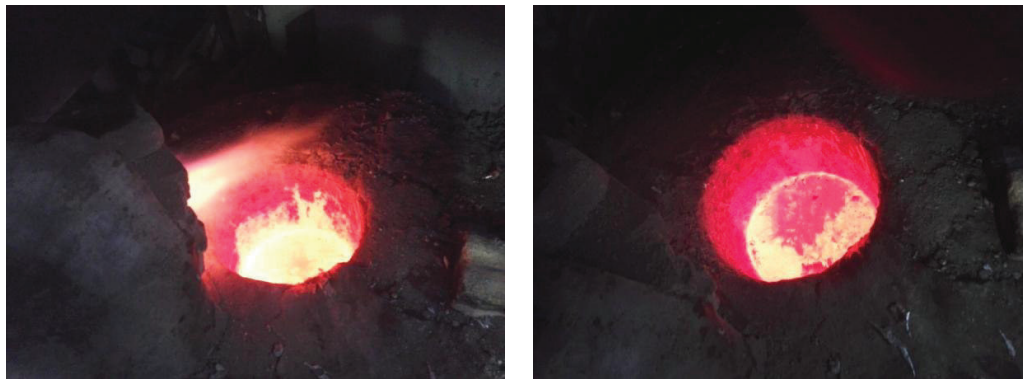


Figura 3.17 Metal fundido dentro del horno

(Fuente: Propia)

Una vez se tiene el metal a la temperatura deseada se procede al colado dentro de los moldes, para ello se utiliza cucharones precalentados los cuales tienen una capacidad aproximada de 250 cm³ para el llenado de unos 5 a 6 moldes. Con esto

se realiza el vertido en cada uno de los moldes. En la figura 3.18 se puede observar el proceso de vertido del metal fundido dentro de los moldes.



Figura 3.18 Vertido del metal fundido en el molde
(Fuente: Propia)

Teniendo en cuenta el tiempo de solidificación se espera por un tiempo algo mayor para romper los moldes y liberar las piezas fundidas (Figura 3.19). Se debe tener cuidado ya que aunque las piezas están totalmente solidificadas la temperatura de las mismas aun es elevada y puede ocasionar quemaduras si se las manipula sin tomar las respectivas precauciones.



Figura 3.19 Izquierda, metal del bebedero solidificado
Derecha, rompimiento del molde
(Fuente: Propia)

Entonces se limpia las piezas fundidas y se puede realizar una inspección minuciosa de la calidad de las mismas, una vez revisadas las piezas que se encuentren en estado óptimo pueden pasar a los procesos siguientes para su terminado. En este caso por el objetivo de este trabajo investigativo es de interés nada mas la inspección de calidad para verificar el correcto llenado y la aparición de defectos en las piezas fundidas. La figura 3.20 muestra algunas piezas fundidas dejándose enfriar antes de ser inspeccionadas.



Figura 3.20 Piezas fundidas

(Fuente: Propia)

CAPÍTULO IV

4. SIMULACIÓN DEL LLENADO DEL MOLDE

El proceso prueba-error que se practica casi en la totalidad de la pequeña y mediana empresa de fundición a nivel nacional tiene un alto costo económico, por ello la finalidad de este trabajo investigativo es analizar las ventajas de realizar simulaciones del llenado del molde para poder predecir con antelación posibles defectos que podrían darse en el modelo real.

Para esto primeramente se va a realizar el modelado 3D del patrón y del molde con sus partes utilizando el software SolidWorks. Seguido, mediante el uso del software ANSYS y su módulo Fluent se va a realizar la simulación del llenado del molde y la solidificación de la pieza. Esta permitirá observar paso a paso el llenado y el avance del frente de solidificación, con esto se podría predecir la aparición de defectos y se podría modificar los modelos para optimizarlos a fin de tener un mejor llenado ahorrando así el gasto de materiales e insumos que se necesitaría para realizar los ensayos prueba-error.

Con esta simulación se conseguiría entonces demostrar a las empresas que utilizando medios informáticos en el proceso de diseño de futuras piezas ahorrarían dinero al evitar los costos que demandaría la fabricación física de varios patrones y moldes antes de llegar a la producción de la pieza final.

En este capítulo se va a detallar como fue el proceso de modelado y el proceso para la configuración de la simulación del llenado del mismo y la solidificación de la pieza.

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizó diversas maneras para obtener los resultados de la simulación, finalmente se optó por realizar el llenado en una simulación independiente de la simulación de la solidificación, esto con el fin de acortar los tiempos de simulación y para reducir la carga computacional del equipo utilizado.

4.1 MODELADO DEL PATRÓN Y DEL MOLDE

4.1.1 MODELADO 3D

Como parte inicial del proceso de modelado se usa las dimensiones del patrón, la figura 4.1 muestra las dimensiones generales del patrón a ser modelado.

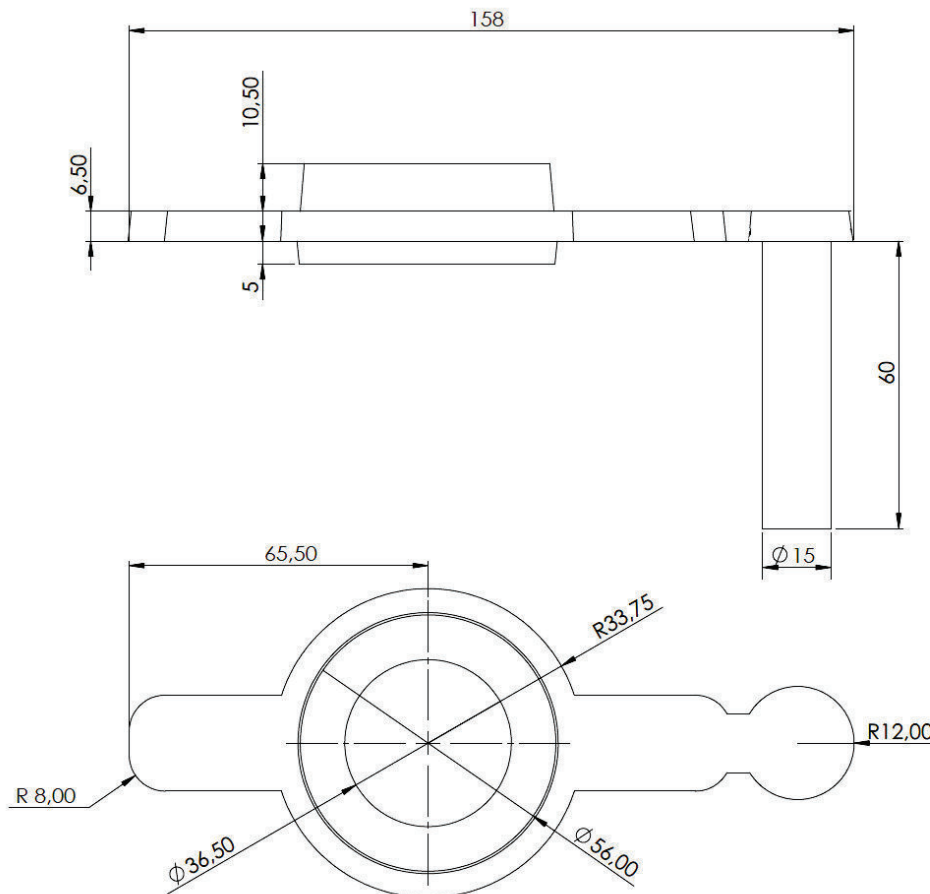


Figura 4.1 Dimensiones generales del patrón.

(Fuente: Propia)

Se modela el patrón junto con el canal de vertido en la posición en la cual se utiliza. La figura 4.2 muestra el patrón y el canal de vertido modelados en el software CAD 3D SolidWorks.

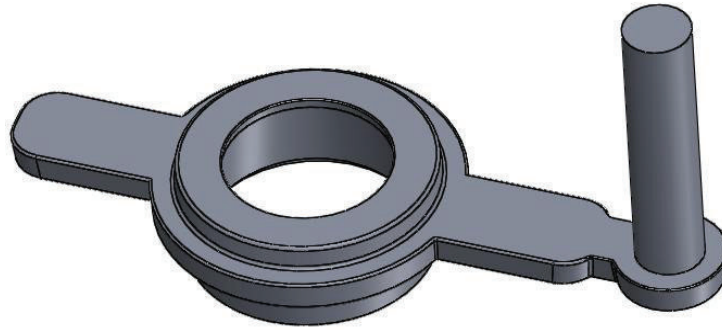


Figura 4.2 Patrón de la pieza modelado en 3D.

(Fuente: Propia)

Se modela de igual manera utilizando el software SolidWorks el molde, este posee las medidas de las cajas de moldeo que tienen interiormente un largo de 240 mm por 120 mm de ancho y 60 mm de altura por cada mitad. La figura 4.3 muestra una vista en corte del molde donde se aprecia claramente la cavidad interna del mismo la cual posee la forma del patrón de la pieza.

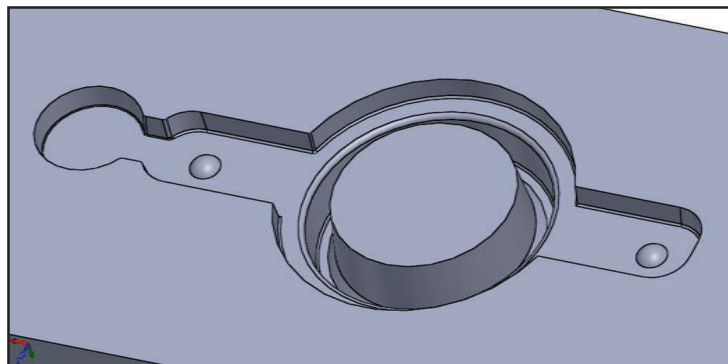


Figura 4.3 Vista de modelo de la cavidad interna del molde.

(Fuente: Propia)

En cuanto al modelado del patrón y del molde este paso se encuentra concluido con esto. El archivo de SolidWorks se puede guardar con su formato nativo o en otros formatos para su posterior uso en ANSYS.

Para la simulación del llenado y solidificación del molde se utilizó el software ANSYS y su módulo Fluent. En la parte inicial de la configuración del software se debe realizar la importación del archivo al entorno de ANSYS para ello se utiliza el módulo DesignModeler en el cual se importa la geometría del modelo. La figura

4.4 muestra la geometría del patrón dentro del módulo de edición de geometría de ANSYS.

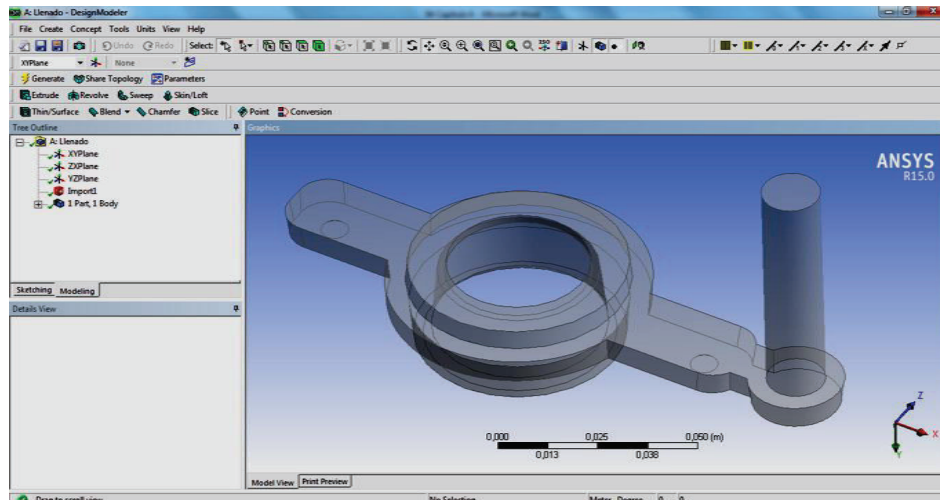


Figura 4.4 Vista del modelo del patrón en DesignModeler en ANSYS

(Fuente: Propia)

Cabe mencionar que para la simulación del llenado se utilizó solamente la geometría del patrón ya que el uso del molde se tornó innecesario ya que este llevaba un gasto computacional grande que no influencia en nada al resultado de las simulaciones y lo que se pretende estudiar es lo que sucede con el metal fundido mas no el comportamiento del molde. Por tanto de aquí en adelante se observa solamente en las figuras siguientes el patrón y no se visualiza el molde.

4.1.2 CONSIDERACIONES DEL MALLADO

Dentro del entorno de los diversos software CAD/CAE de simulación de todos los tipos de fenómenos físicos el mallado juega un papel sumamente importante ya que de este depende en gran manera la convergencia de la solución, el gasto computacional y el margen de error que se genere en los resultados obtenidos.

También el tipo de elemento de malla juega un papel muy importante en las simulaciones computacionales, así pues, una malla con elementos cuadriláteros/hexaédricos es bastante apropiada para los casos con geometrías básicas donde se tiene un dominio sin cambios bruscos de geometría no así, las

mallas con elementos triangulares/tetraédricos que se ajustan mucho mejor a dominios de geometría compleja.

Cuando se trabaja con geometrías complejas un mallado no estructurado es recomendable ya que requiere un número menor de elementos que un mallado estructurado. Esto se debe a que las primeras permiten que los elementos se agrupen en regiones seleccionadas del dominio, mientras que se puede requerir de demasiados elementos en zonas que no se necesita al utilizar mallas estructuradas.

Otro criterio a considerar es la densidad del mallado conocido también como refinamiento de malla. Un criterio errado de varias personas que comienzan el uso de este tipo de software es el pensar que el uso de una malla más fina conlleva a una solución óptima, esta afirmación es correcta pero también se debe tener en cuenta la capacidad de cálculo del equipo utilizado para realizar la simulación puesto que, el uso de mallas demasiado finas trae consigo un gasto computacional alto mismo que dependiendo del caso o fenómeno a estudiar muchas veces no es necesario. En el anexo 2 se puede observar un análisis de los tiempos de simulación vs el número de elementos.

Por último y no menos importante están la suavidad de malla, el esquinamiento de los elementos y la relación de aspecto de los mismos. La suavidad de la malla se define como el cambio volumétrico entre elementos adyacentes, donde cambios violentos de volumen conllevan a un error elevado por la diferencia existente en la derivadas parciales de las ecuaciones de flujo en su forma discreta.

El esquinamiento de los elementos se puede definir como la diferencia entre la forma del elemento y la forma de un elemento equilátero del mismo tipo y volumen, los elementos demasiado esquinados suelen traer problemas de convergencia por ello es recomendable tener en mallados con elementos cuadriláteros/hexaédricos vértices con ángulos de elemento lo más cercanos posible a 90° y para elementos triangulares/tetraédricos ángulos cercanos a 60° y siempre menores a 90° .

La relación de aspecto del elemento es una medida del estiramiento del mismo. El uso de relaciones de aspecto demasiado altas puede conllevar a problemas de convergencia por ello es recomendable no utilizar relaciones mayores a 5:1. [22]

Para este caso en particular después de probar con diferentes configuraciones en las simulaciones se definió los parámetros de la malla como se detallan a continuación en la tabla 5.1. La malla generada con los parámetros detallados se puede visualizar en la figura 4.5.

Tabla 5.1 Parámetros de mallado

PARÁMETROS DE MALLADO	
Suavizado	Medio
Transición de suavidad	Suave
Tamaño mínimo	1 mm
Tamaño máximo	7 mm
Mínimo tamaño de cara	3,5 mm
Tipo de elementos	Tetraédricos
Tipo de mallado	No estructurado
Número de elementos	12.012
Número de nodos	3.070

(Fuente: Propia)

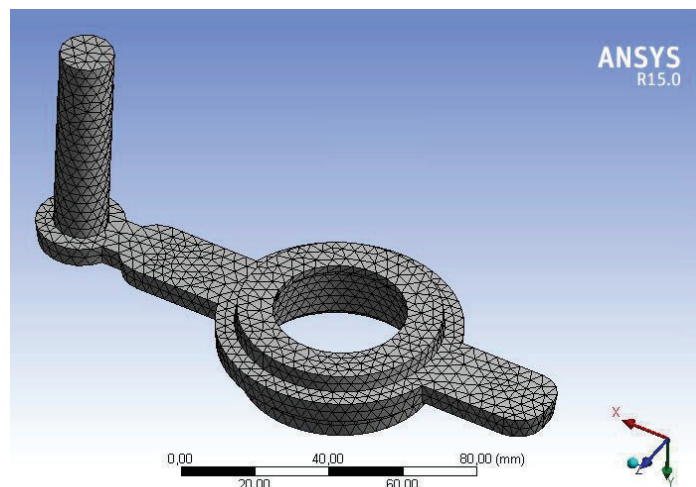


Figura 4.5 Mallado generado para la pieza

(Fuente: Propia)

En relación al criterio de calidad utilizado en el mallado se utilizó el de calidad de elemento. En la tabla 5.2 se muestran los valores recomendados para el criterio y se ve también el número de elementos que se encuentran cercanos al mismo. En la parte baja de la tabla se visualiza el número de elementos que se encuentran en un rango de tres desviaciones estándar del promedio que son los elementos de buena calidad que contiene la malla mismos que representan un 98,85 % del total de elementos de la malla. La gráfica estadística de los elementos de la malla se muestra en la figura 4.6.

Tabla 5.2 Criterio de calidad: calidad de elemento

CRITERIO DE CALIDAD: CALIDAD DE ELEMENTO			
Mínimo	<i>Recomendado</i>	<i>Obtenido</i>	<i>N° de elementos</i>
	0,2	0,319274	5
Máximo	<i>Recomendado</i>	<i>Obtenido</i>	<i>N° de elementos</i>
	1	0,999914	≈ 1.500
Promedio	<i>Recomendado</i>	<i>Obtenido</i>	<i>N° de elementos</i>
	0,8	0,8184473	≈ 3.260
Elementos	<i>Calidad Buena</i>		<i>Calidad Baja</i>
	11.874		138

(Fuente: Propia)

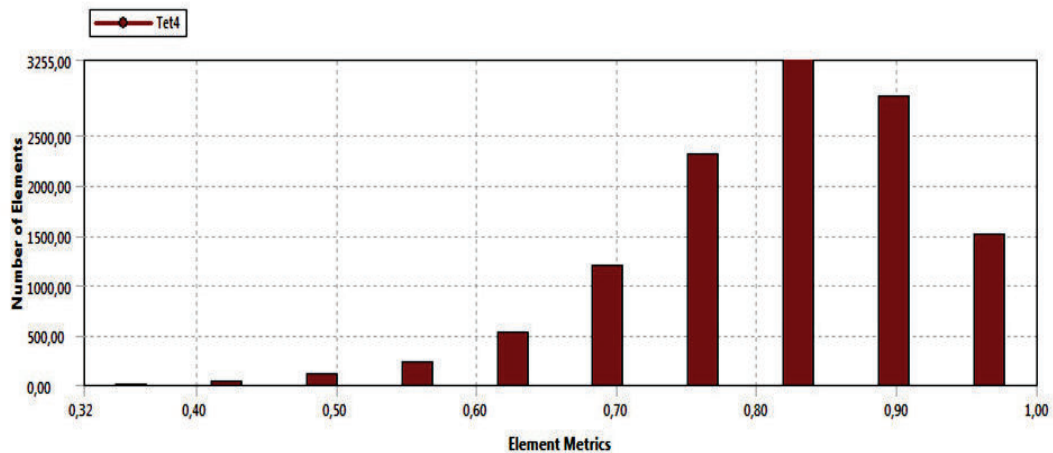


Figura 4.6 Estadística de los elementos en la malla

(Fuente: Propia)

4.2 CONFIGURACIÓN DE FLUENT LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN

Como se menciona anteriormente para tener mejores resultados y mejorar los tiempos de simulación se dividió el estudio en dos partes, en este apartado se hablara sobre las configuraciones de Fluent para las dos etapas.

Dentro de Fluent existe un árbol de procesos en el cual se configura paso a paso los diferentes parámetros disponibles y que rigen el fenómeno físico, a continuación se detalla las opciones utilizadas para las simulaciones. En la figura 4.7 se observa el árbol de procesos para las configuraciones de Fluent.

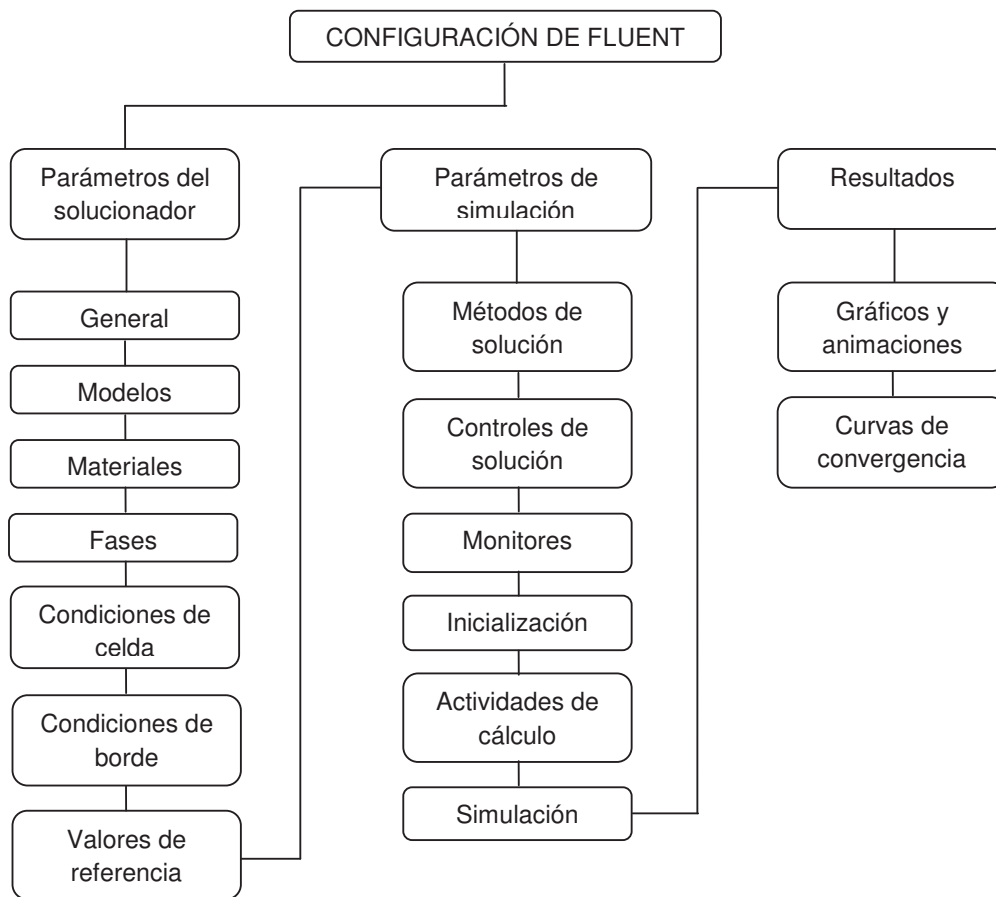


Figura 4.7 Árbol de procesos de configuraciones de Fluent
(Fuente: Propia)

4.2.1 GENERAL Y MODELOS DE ESTUDIO

4.2.1.1 Opción General

Dentro de la opción general de Fluent se puede configurar varias opciones para el solucionador y realizar un chequeo a la calidad del mallado. Como anteriormente utilizando el módulo de mallado de ANSYS se estableció la malla este paso no se hace necesario

En las opciones de configuración del solucionador se selecciona el tipo de algoritmo que el software utilizará para realizar los cálculos, también se debe especificar si el problema se analizará en estado estático o transitorio es decir en el dominio del tiempo y aquí se debe asignar la magnitud y las componentes de la gravedad si dentro del problema es significativo incluir este valor en los cálculo.

En este caso se escogió el algoritmo de solución basado en la presión ya que este es el único compatible con el modelo multifase de Fluent del cual se hablara más adelante y para el tratamiento de las velocidades se utilizó la formulación de velocidad absoluta.

El solucionador basado en la presión emplea un algoritmo que pertenece a los así llamados métodos de proyección [23], en este tipo de métodos la ecuación de la presión se deriva de la ecuación de continuidad y las ecuaciones de momento. Ya que estas ecuaciones son no lineales y acopladas entre sí el proceso de solución implica realizar iteraciones en las que todo el conjunto de ecuaciones se resuelve varias veces hasta que la solución llegue a converger. [24] En lo que respecta a la formulación de la velocidad se utilizó la de velocidad absoluta que es la más adecuada en dominios donde no existe rotación del fluido. [25] La figura 4.8 muestra la ventana de opciones generales de Fluent utilizada.

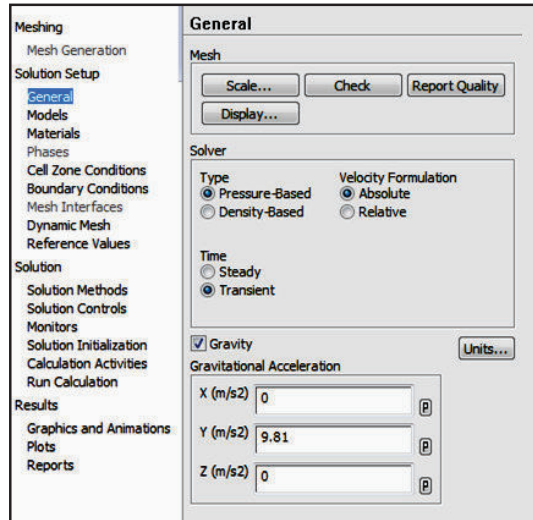


Figura 4.8 Configuración de opciones generales en Fluent
(Fuente: Propia)

4.2.1.2 Modelos de estudio

Fluent posee algunos modelos de estudio en su programación, para este trabajo se utilizó los modelos multifase y de viscosidad con los que se simuló el llenado de la cavidad del molde y el modelo de solidificación y fundición para la solidificación del metal dentro del mismo.

El modelo multifase permite tratar con sistemas en los que se tiene diferentes tipos de estado de la materia sean estos del mismo material o de diferentes materiales. Existen tres formulaciones del modelo multifase, la que se utilizó es la de volumen de fluido ya que esta es compatible con el solucionador basado en la presión. El modelo de volumen de fluido puede tratar con dos o más fluidos inmiscibles para resolver un único conjunto de ecuaciones de momento dando seguimiento a la fracción volumétrica de cada uno de los fluidos a través del dominio. Con esto se puede modelar sistemas donde existe movimiento de diferentes fluidos a la vez y una interacción directa de los mismos como es este caso donde el aire que se encuentra dentro de la cavidad del molde es desplazado de a poco por el metal fundido que ingresa al mismo.

Por otro lado se utilizó el modelo de viscosidad, con este modelo se puede configurar parámetros para flujo no viscoso, laminar o turbulento. En este caso se utilizó el modelo $k-\epsilon$ que es el modelo más común en CFD, este es un modelo que

utiliza dos ecuaciones para describir el flujo la una representa a la energía cinética turbulenta k y la otra es la disipación de energía generada por la turbulencia ϵ .

Por último se utilizó el modelo de solidificación y fundición que permitió la visualización del avance del frente de solidificación metal fundido dentro del molde. Como se menciona anteriormente en el capítulo dos sección 2.6.2.3 Fluent utiliza una técnica en la cual la zona de transición entre el estado sólido y líquido es tratado como un zona porosa donde la fracción líquida varía entre 1 y 0 para representar el estado en que se encuentra cada elemento del dominio. Cabe mencionar que para utilizar el modelo de solidificación y fundición el software por defecto activa el modelo de energía ya que este es necesario para que se resuelva el sistema de ecuaciones junto con las que gobiernan la solidificación y la fundición.

La figura 4.9 muestra las ventanas principales de los cuatro modelos de estudio que se utilizó en este trabajo.

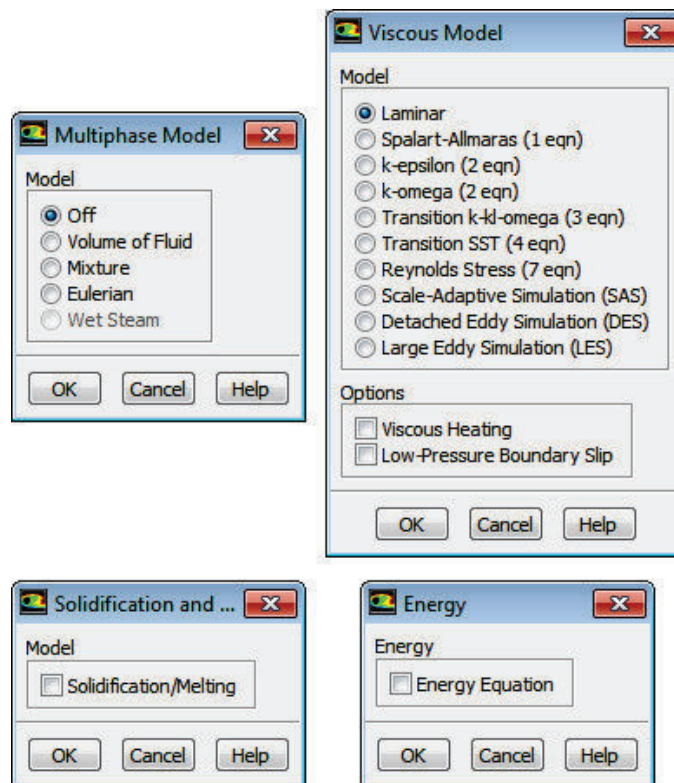


Figura 4.9 Modelos de estudio de Fluent utilizados en este trabajo
(Fuente: Propia)

4.2.2 MATERIALES Y FASES

Luego de la selección de el o los modelos a utilizarse se define los materiales y sus respectivas fases para la simulación. El material a utilizarse fue definido como un aluminio para placa litográfica 1050 que tiene un 99,5% de aluminio puro, sus propiedades se observan en la sección 3.2 de este escrito. Para el aire se utilizó las propiedades por defecto del mismo que se encuentran en la base de datos de Fluent.

En tanto a las fases, la fase uno se la definió como aire y la fase dos será el aluminio, se debe tener en cuenta que para la correcta definición de este material el mismo debe estar colocado en la zona de estado como un fluido ya que si por error se coloca como un sólido la simulación no sería correcta.

Dependiendo el tipo de modelo escogido como se mencionó anteriormente se realizó las simulaciones es dos etapas, una que es el llenado y la otra que es la solidificación, se debe tener presente que en la ventana de configuración del material las propiedades a ser ingresadas del mismo cambian según el o los modelos escogidos por tanto se hace énfasis en siempre verificar las correctas propiedades del material antes de iniciar un proceso de simulación.

4.2.3 CONDICIONES DE CELDA Y DE BORDE

Con el fin de que el software reconozca que la geometría que se está utilizando se debe interpretar como un límite dentro del cual se va a tener el dominio del fluido es necesario configurar como una condición en el apartado de condiciones de celda que la geometría vaya a ser tratada como fluido. Este paso aunque parece muy básico es el que especifica qué tipo de estado se tiene en el interior de esta geometría.

Las condiciones de borde se pueden definir como los límites que existen entre una zona y otra de un mismo sistema. Se coloca estas condiciones de borde con el fin que el software reconozca cada zona del sistema con sus respectivos límites y parámetros ya que en un mismo sistema puede tenerse por ejemplo varias entradas y salidas de flujo mismas que se pueden encontrar a diferentes temperaturas, presiones u otros parámetros que el software debe reconocer como

tales para un buen procesamiento de los datos y tener así un cálculo satisfactorio de lo que se necesita simular.

En la figura 4.10 se puede apreciar las condiciones de borde para la etapa de llenado con los cuales se realizó la simulación.

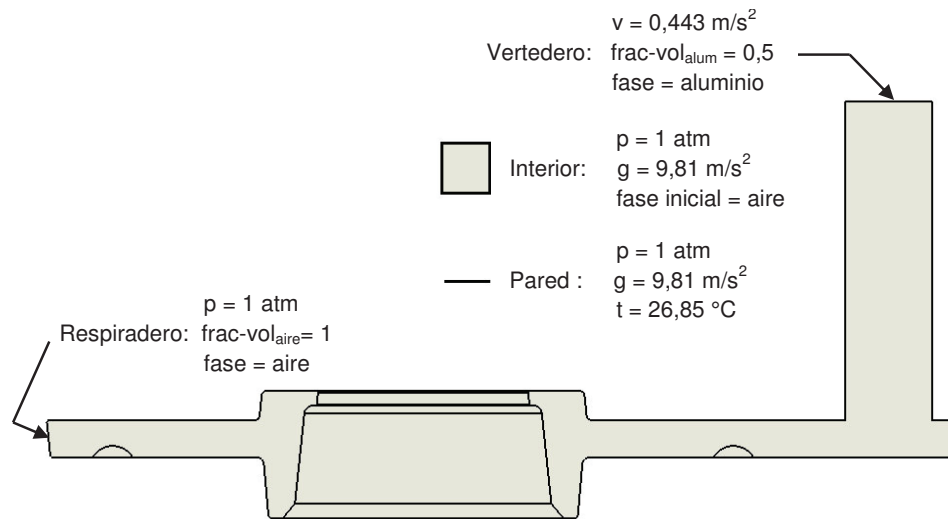


Figura 4.10 Condiciones de borde para el llenado

(Fuente: Propia)

4.2.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Dentro de los métodos de solución que tiene Fluent existen varios tipos dependiendo de la formulación que se utilizó en los parámetros generales. En este caso se utilizó la formulación basada en la presión la cual posee cuatro maneras de solución de las ecuaciones de estado del sistema, estas son SIMPLE, SIMPLEC, PISO y COUPLED, la teoría de cada una de ellas es bastante larga y algo compleja por lo cual simplemente se dirá que luego de analizar cada una de ellas se optó por el método PISO.

El método PISO es un método de solución basado en los métodos SIMPLE y SIMPLEC, una de las limitaciones de estos dos métodos es que las velocidades y los correspondientes flujos no satisfacen el balance de momentos después de que la ecuación de corrección de la presión es resuelto. Como resultado, estos cálculos se deben repetir hasta que el balance este completo. Para mejorar la eficiencia de estos cálculos, el algoritmo PISO realiza dos correcciones

adicionales. la corrección de los elementos vecinos y la corrección de asimetría. [26]

Para la discretización de las ecuaciones de gobierno del sistema Fluent usa una técnica de control basada en el volumen para convertir las ecuaciones que como se dijo están en derivadas parciales a ecuaciones algebraicas cuya solución puede ser hallada numéricamente. Esta técnica de control de volumen consiste en la integración de las ecuaciones de gobierno en cada elemento del dominio, obteniéndose las ecuaciones discretas para la solución del sistema. [27]

Las técnicas de discretización para las ecuaciones del sistema se han dejado en sus parámetros por defecto, así como la formulación para el estado transitorio.

4.2.5 FACTORES DE RELAJACIÓN E INICIALIZACIÓN

4.2.5.1 Los factores de relajación

El método de solución basado en la presión usa factores de relajación de las ecuaciones para controlar la actualización de las variables calculadas en cada iteración. Esto quiero decir que todas las ecuaciones resueltas usando el método de solución basado en la presión y algunos de los usados con el método basado en la densidad tendrán factores de relajación asociados con ellas.

En Fluent, los factores de relajación por defecto para todas las variables están establecidos de tal manera que se acercan a ser óptimos para la mayoría de casos, pero en algunos de ellos en particular es prudente reducir los factores de relajación inicialmente. Para la mayoría de los estudios de flujo, los factores de relajación por defecto no requieren ser modificados, pero, si la solución tiene un comportamiento inestable o divergente es necesario reducir el valores de estos factores para las ecuaciones de presión, momento, energía cinética turbulenta k y la disipación de energía por turbulencia ϵ (épsilon).

Los desarrolladores de ANSYS Fluent recomiendan el uso de los factores de relajación por defecto, aun así, también recomiendan que para un óptimo desempeño del solucionador se debe incrementar los factores de relajación para la o las ecuaciones que se desee mejorar a valores más altos de los que se tiene por defecto. [28]

Para el desarrollo de este trabajo, se optó por el uso de los factores de relajación por defecto de Fluent ya que en muchas de las simulaciones realizadas se obtuvo buenos resultados, aunque también en algunas pruebas se tuvo que utilizar diferentes factores de relajación ya que se tenía divergencia en las soluciones.

4.2.5.2 Inicialización y ajuste inicial

Antes de empezar con la simulación se debe realizar una inicialización para proveer a Fluent de condiciones iniciales sobre las cuales realizar los cálculos. Este paso es de vital importancia y se debe tener mucha cautela al realizarlo ya que de este depende que el problema que se quiere simular tenga un buen resultado. Por ejemplo, si se está estudiando el caso de solidificación que compete a este trabajo y no se realiza una correcta inicialización y ajuste inicial de la temperatura de las paredes del molde se podría tener problemas como que no se llegaría a observar la solidificación o esta se realizaría en un tiempo mucho mayor o menor del que debería.

Fluent tiene tres tipos de inicialización la estándar, FMG (Full Approximation Storage) y la híbrida, la inicialización FMG no está disponible para problemas que envuelven flujos turbulentos ni multifase, [29]

La inicialización estándar fue la que se eligió ya que esta permite configurar desde que zona del sistema se debe tomar los valores referenciales para la solución del sistema cosa que la inicialización híbrida no permite puesto que realiza un proceso matemático de ajuste de los valores iniciales realizando interpolaciones de las condiciones de borde. [30] [31]

Una vez se ha realizado la inicialización del problema de ser necesario se debe realizar un ajuste inicial de los parámetros para la o las distintas zonas del sistema. En este caso es necesario para la simulación del llenado ajustar el valor de la fracción volumétrica de la fase aluminio en un valor de 0 dentro de la pieza para representar que al momento de iniciar la simulación el interior de la misma se encuentra vacío.

En la simulación de la solidificación por su parte se debe ajustar el valor de la temperatura de las paredes del molde en un valor algo mayor al de la temperatura

ambiental, en este caso se colocó 373 °K, dado que al momento del llenado la temperatura del molde sube por el contacto del metal fundido antes de que se inicie el proceso de solidificación. [32]

4.2.6 ACTIVIDADES DE CÁLCULO Y SIMULACIÓN

4.2.6.1 Actividades de cálculo

Para obtener una animación de la solución de la simulación se debe configurar dentro del menú de actividades de cálculo las secuencias que se desea guardar, Fluent posee dependiendo de los modelos de estudio que se activen varios parámetros para visualizar.

En este caso para la simulación del llenado se recurrió a crear una secuencia del cambio de la fracción volumétrica de la fase aluminio para poder visualizar como va ingresando el metal a la cavidad del molde. Para la simulación de la solidificación se creó una secuencia de visualización del cambio de la fracción líquida dentro del volumen interno de la pieza.

4.2.6.2 Simulación

Como paso final del proceso de configuración de ANSYS Fluent se debe seleccionar los parámetros de tiempo adecuados para empezar con los cálculos. En este apartado se debe seleccionar el número de pasos de tiempo, el tamaño de cada paso de tiempo y el número de iteraciones por paso de tiempo que se desea realizar dentro de la simulación. Para ello es necesario saber que significa cada uno de estos parámetros y las posibles reacciones de la solución ante los cambios de las mismas.

En una situación de flujo en estado transitorio es decir que depende del tiempo se utilizan los pasos de tiempo. Un paso de tiempo es el cambio incremental en el tiempo para el cual se resuelven las ecuaciones de gobierno del flujo. El tiempo de cálculo del flujo depende de este y del número de pasos de tiempo así por ejemplo, si se tiene 10 pasos de tiempo con un incremento de 0,1 segundos se tendrá un tiempo total de simulación de 1 segundo.

Pero existe otro parámetro a tomar en cuenta para la correcta convergencia de la solución ya que esta no depende tan solo del tamaño del paso de tiempo y el número de pasos también se tiene que considerar el número de iteraciones realizadas por el solucionador por cada paso de tiempo. El número de iteraciones por paso de tiempo se puede definir como la cantidad de veces que el solucionador resuelve las ecuaciones de flujo para tratar de estabilizar la solución.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizó diversas pruebas utilizando diferentes métodos de solución, cambiando los factores de relajación, el tamaño de pasos de tiempo y el número de estos así como las iteraciones y diversos otros ajustes para tratar de tener una simulación que se ajuste lo más posible a una solución óptima del sistema. En la figura 4.11 se puede observar la ventana de Fluent mientras se realiza un proceso de simulación.

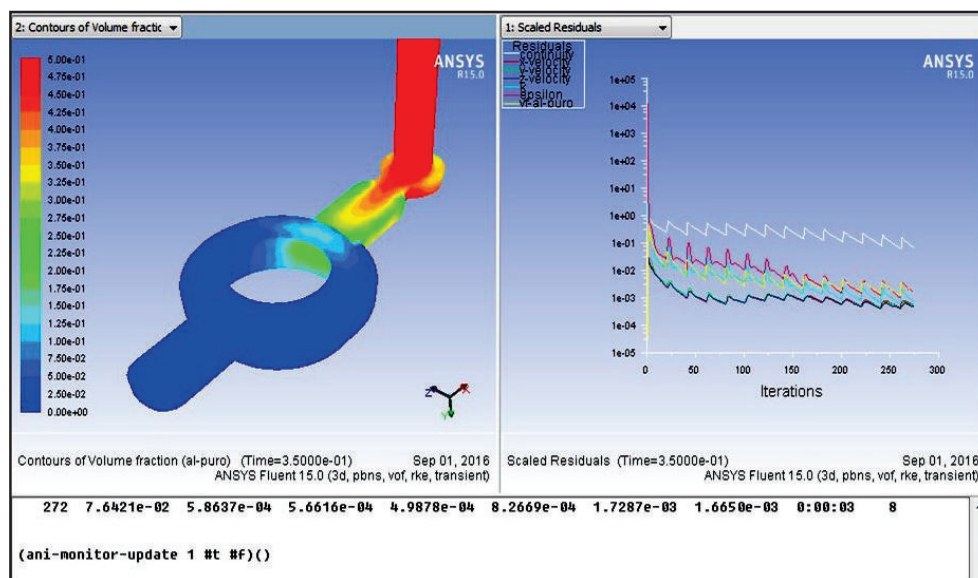


Figura 4.11 Ventana de Fluent durante una simulación

(Fuente: Propia)

4.3 POST PROCESO DE LA SIMULACIÓN

Una vez realizada la simulación, el siguiente paso es la visualización de los resultados obtenidos y la interpretación de los mismos. En esta sección se observa y analiza paso a paso lo que sucede en el interior de la cavidad del molde al momento del llenado y la posterior solidificación del metal. Basándose en estas visualizaciones se podrá detectar posibles áreas de fallo en las diferentes etapas

del proceso las cuales servirían como referencia para realizar una mejora del diseño del molde o a su vez del patrón.

4.3.1 VISUALIZACIÓN DEL LLENADO

Como se mencionó en el capítulo anterior en la sección 3.3.2.3 para la simulación se utilizó como tiempo de llenado el tiempo teórico que se calculó multiplicado por un factor de tres como compensación a este tiempo de llenado. De allí que el tiempo de simulación para el llenado se configuró en 1,30 segundos con pasos de tiempo de 0,025 segundos.

4.3.1.1 Escala de tiempo y curva de convergencia

La figura 4.12 muestra el proceso de llenado en una vista lateral, en intervalos de 0,2 segundos, la figura 4.13 muestra el mismo proceso en vista de perspectiva. En las figuras se puede visualizar paso a paso como el fluido ingresa y va llenando la cavidad del molde, estos resultados muestran el avance de la fracción volumétrica de la fase aluminio.

La fracción volumétrica, misma que en las figuras se muestra en la escala de colores al lado izquierdo de cada recuadro, representa la cantidad porcentual de la fase aire (azul) y la fase aluminio (rojo) y sus valores intermedios en los elementos de la malla en la pieza de estudio.

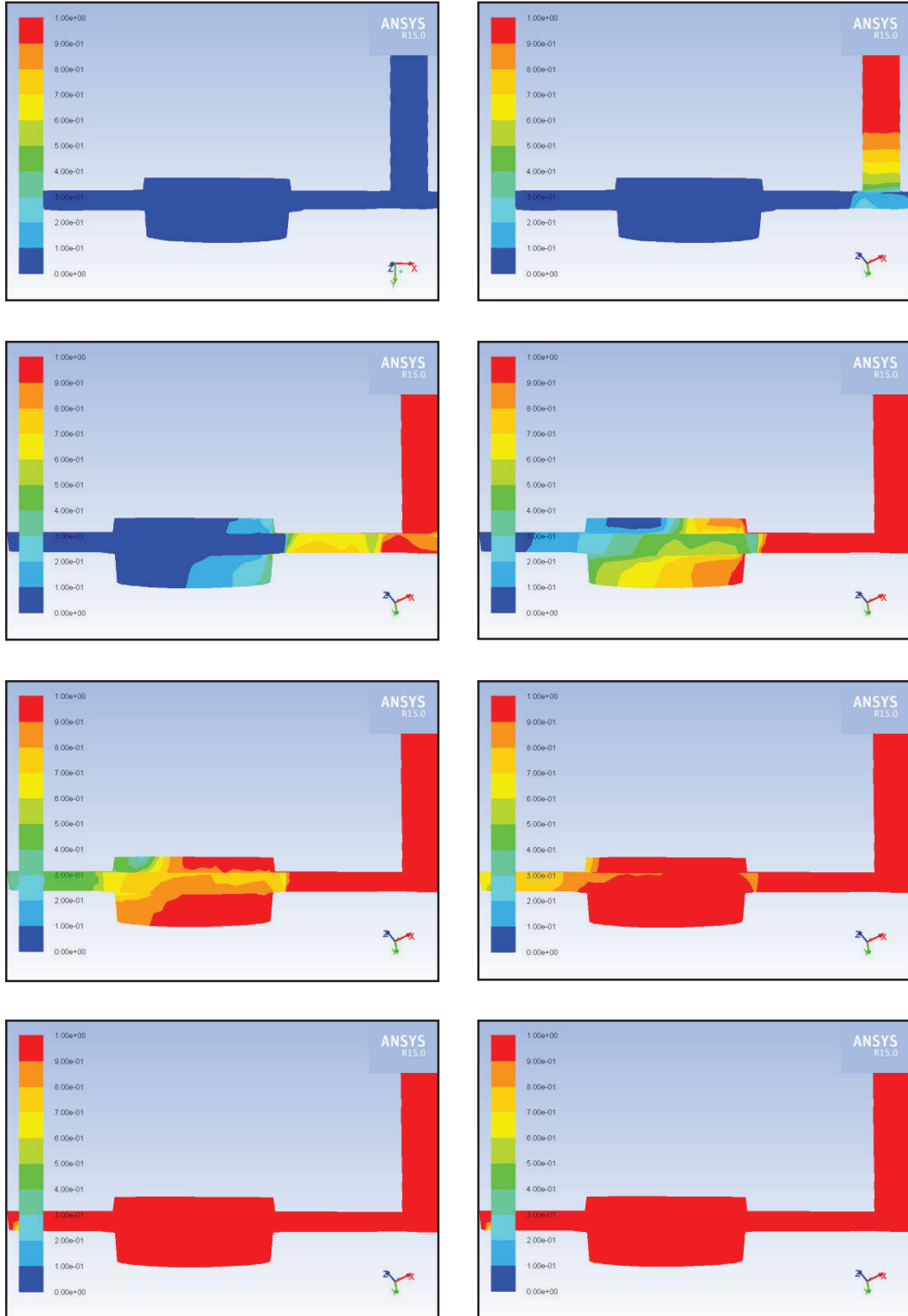


Figura 4.12 Simulación del proceso de llenado, vista lateral
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción volumétrica)

(Fuente: Propia)

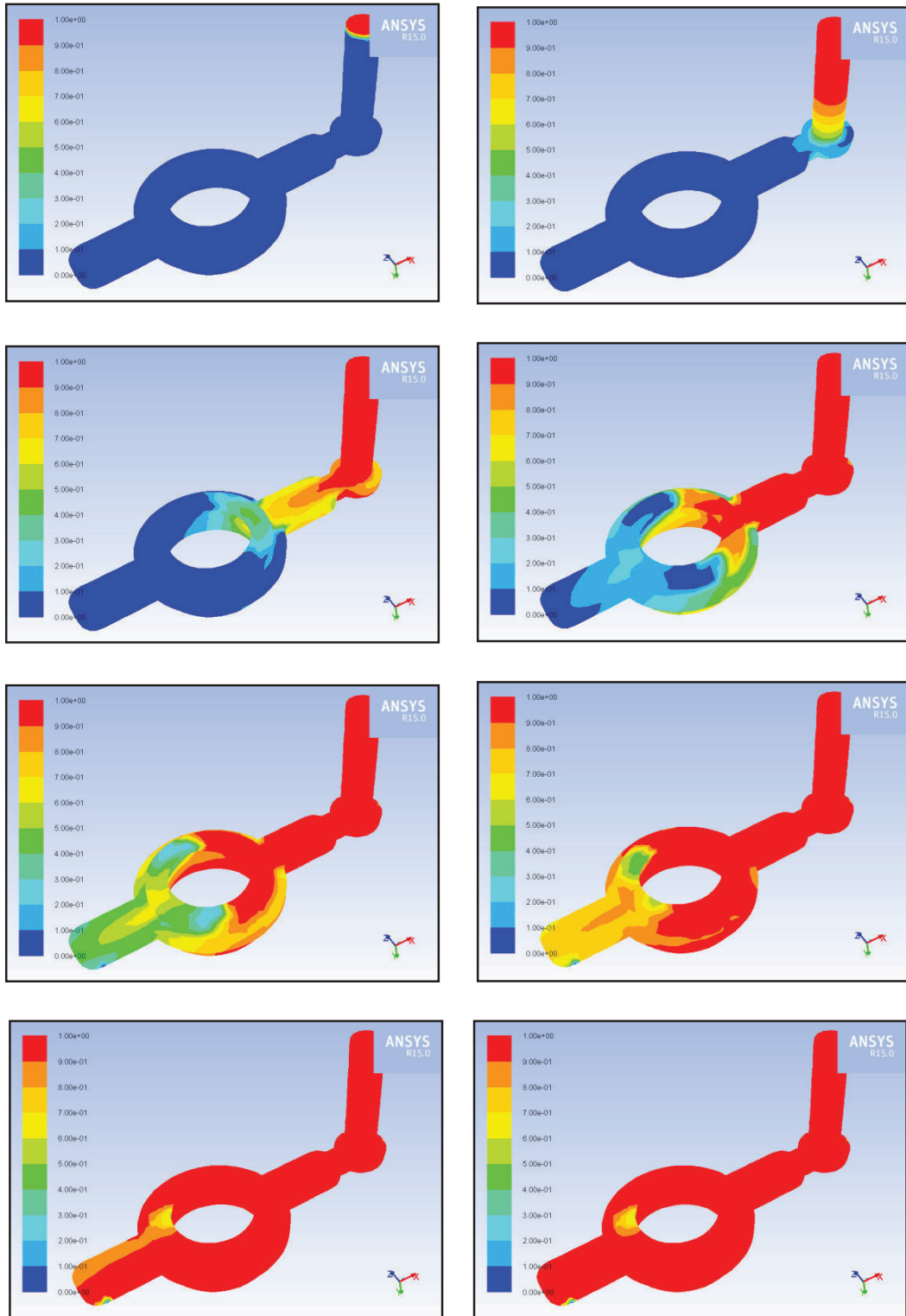


Figura 4.13 Simulación del proceso de llenado, vista en perspectiva
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción volumétrica)
 (Fuente: Propia)

Como criterio de convergencia en análisis transitorios los desarrolladores de ANSYS Fluent proponen que una de las siguientes condiciones debe darse.

- Para que exista convergencia debe satisfacerse que:
 - Todas las ecuaciones del sistema cumplen con una tolerancia específica en todos los elementos.
 - La solución no cambia con el paso de varias iteraciones
 - Se debe tener un balance entre la masa, momentos y la energía.
- Se debe monitorear la convergencia usando las curvas de convergencia
 - Generalmente si se tiene un decrecimiento de tres órdenes de magnitud en las curvas de convergencia esto indica al menos que existe una convergencia cualitativa. En este punto las características más importantes del flujo se han establecido.
- Se debe monitorear la convergencia cualitativa
 - Revisar las variables relevantes y sus cantidades para tener una confirmación.
 - Asegurarse que las leyes de conservación de energía, masa y calor se cumplan. [33]

La figura 4.14 muestra que la solución cumple con la tolerancia especificada.

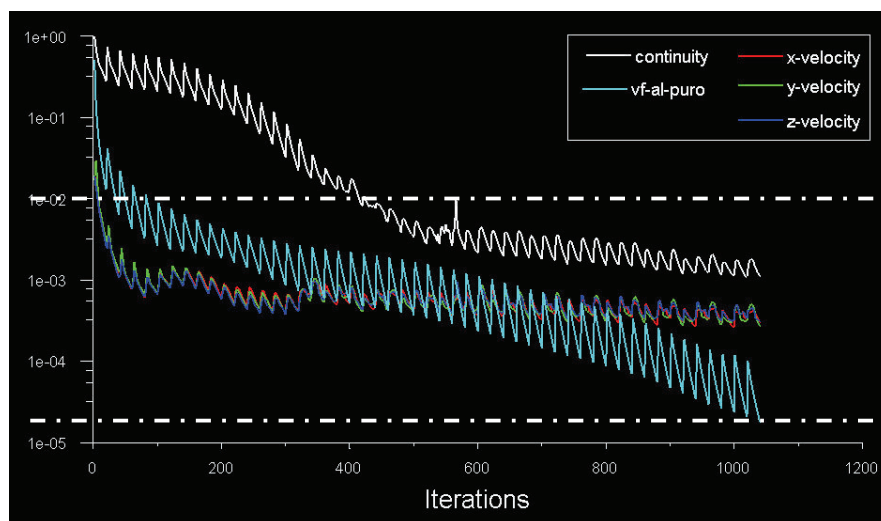


Figura 4.14 Curva de convergencia del proceso de llenado
(Fuente: Propia)

4.3.2 VISUALIZACIÓN DE LA SOLIDIFICACIÓN

En la sección 3.3.2.4 de este trabajo se realizó el cálculo del tiempo estimado de solidificación, mismo que tuvo un valor de 18,79 segundos. Este valor como se mencionó es estimado ya que la regla de Chvorinov es un cálculo empírico basado en formulaciones obtenidas experimentalmente pero que se acerca mucho a los tiempos de solidificación reales de las piezas fundidas. Por ello para la simulación se utilizó un tiempo mayor, este tiempo se estableció en 30 segundos con pasos de tiempo de 0,1 segundos.

4.3.2.1 Escala de tiempo y curva de convergencia

La figura 4.15 y 4.17 muestran la solidificación en los tiempos entre 0 y 12,6 segundos en intervalos de 1,8 segundos, la figura 4.16 y 4.18 muestran los tiempos entre 14,4 y 27 segundos con intervalos de 1,8 segundos. Las figuras se muestran en vistas lateral y perspectiva respectivamente, estas representan el avance de la fracción líquida de las fases en la pieza.

La fracción líquida, misma que en las figuras se muestra en la escala de colores al lado izquierdo de cada recuadro representa una cantidad adimensional, con valores máximo de 1 y mínimo de 0 que representan las fases líquida y sólida respectivamente y sus valores intermedios.

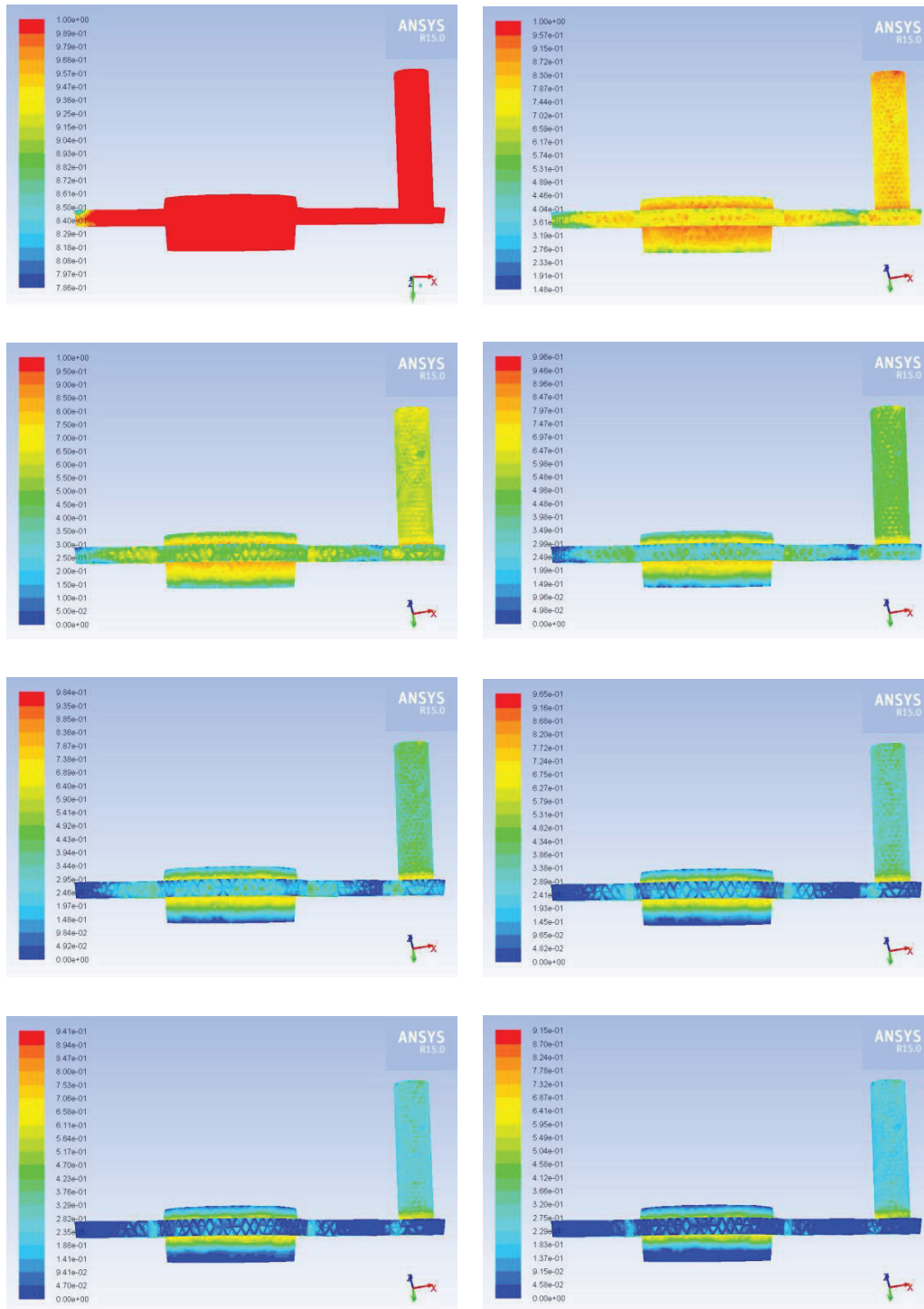


Figura 4.15 Simulación del proceso de solidificación.
 Vista lateral, $t = 0$ s a $t = 12,6$ s
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción líquida)
 (Fuente: Propia)

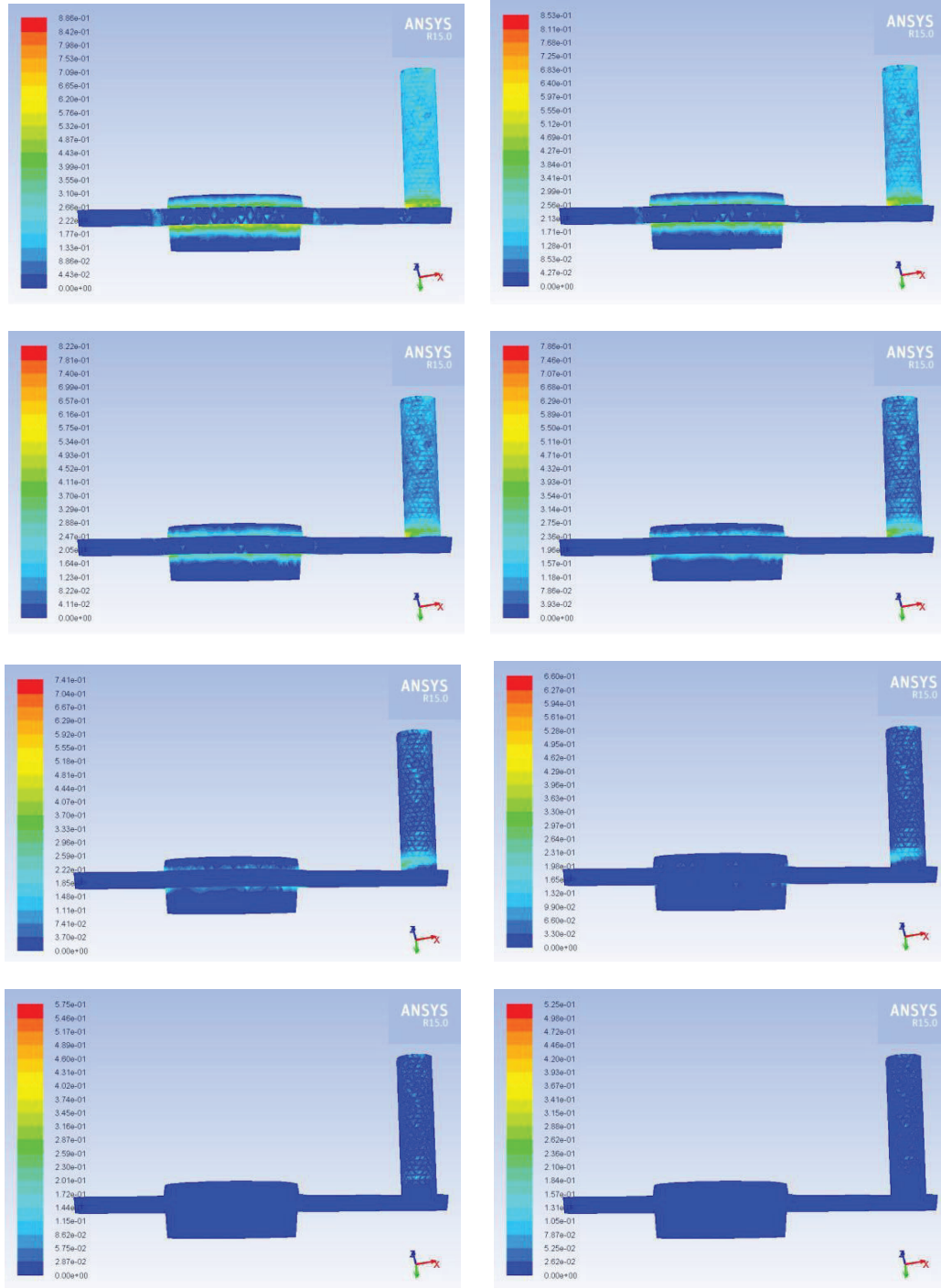


Figura 4.16 Simulación del proceso de solidificación.
 Vista lateral, $t = 14,4 \text{ s}$ a $t = 27,0 \text{ s}$
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción líquida)
 (Fuente: Propia)

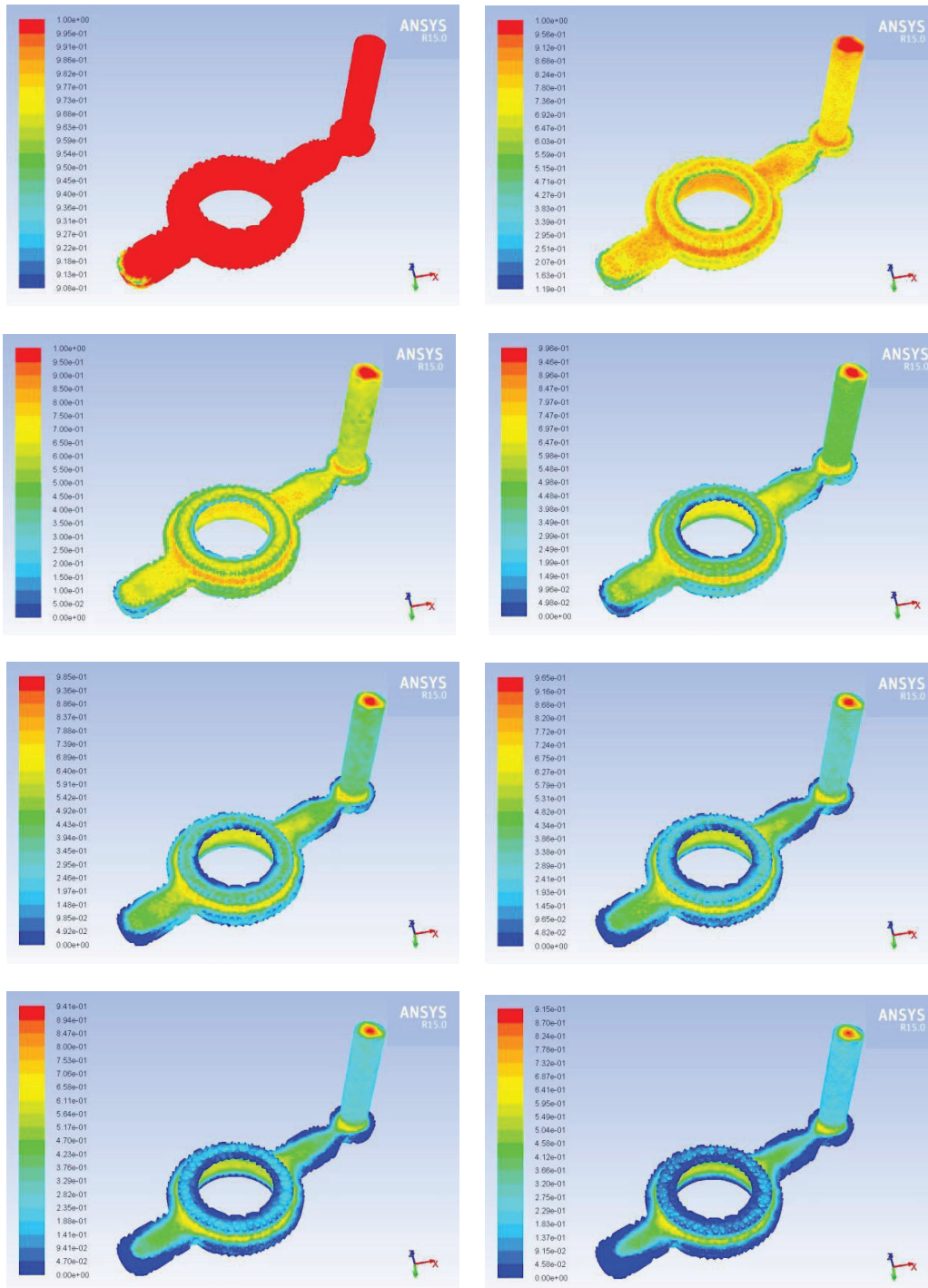


Figura 4.17 Simulación del proceso de solidificación.
 Vista en perspectiva, $t = 0$ s a $t = 12,6$ s
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción líquida)
 (Fuente: Propia)

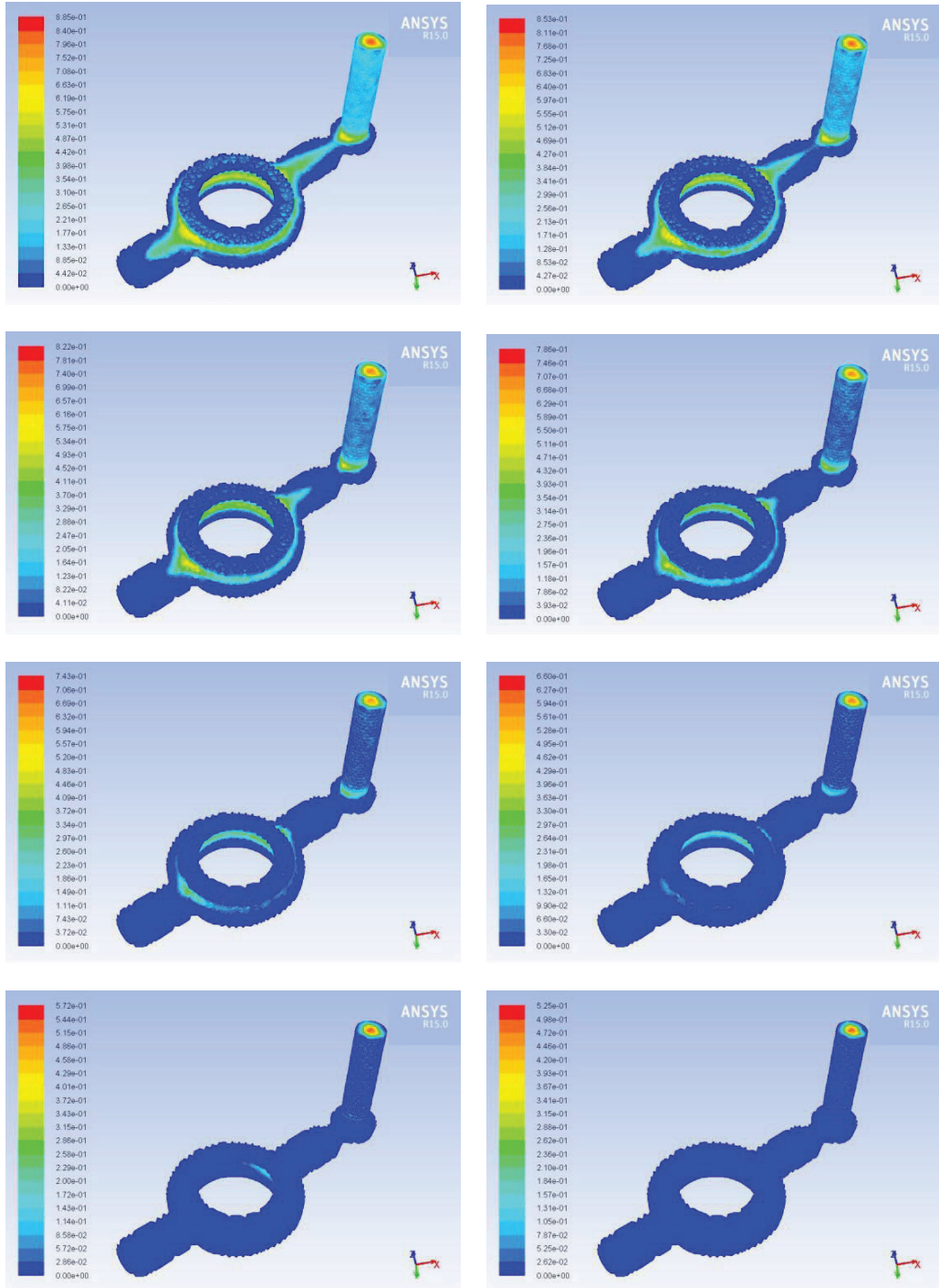


Figura 4.18 Simulación del proceso de solidificación.
 Vista en perspectiva, $t = 14,4$ s a $t = 27,0$ s
 (La escala de colores muestra el valor de la fracción líquida)
 (Fuente: Propia)

En el caso de la solidificación para dar un criterio de convergencia se usó los parámetros citados anteriormente para el proceso de llenado. La figura 4.19 muestra la curva de convergencia del proceso de solidificación.

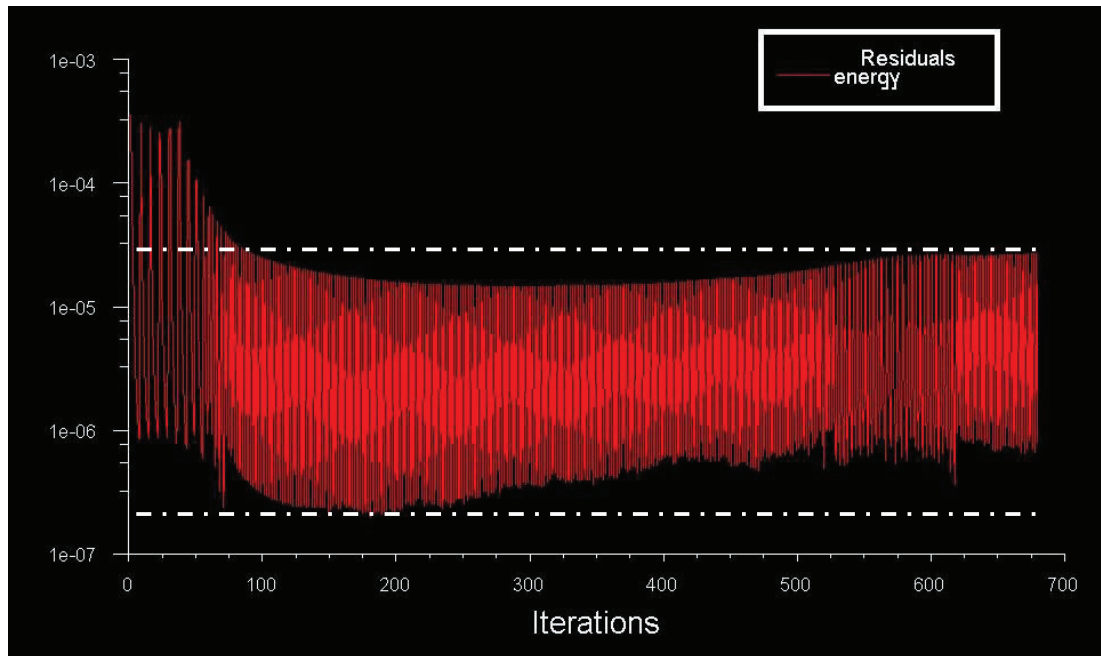


Figura 4.14 Curva de convergencia del proceso de llenado

(Fuente: Propia)

4.3.3 DETECCIÓN DE POSIBLES ÁREAS DE FALLA

La detección de posibles áreas de falla en las piezas que se desea fundir es un objetivo primordial de las empresas de fundición las cuales desean reducir al máximo el porcentaje de piezas rechazadas.

Con tal fin se propuso mostrar que el uso de software para simular los procesos de fundición pueden ser una herramienta que ayude a detectar tempranamente posibles lugares donde se puede tener defectos.

En este caso se muestra a continuación áreas en las cuales durante el llenado y solidificación se podría pensar que existirían fallas. Con esto no se quiere decir que esto vaya a ocurrir, pero existe la posibilidad de que se originen en estas áreas ya que se ha detectado allí condiciones que podrían desembocar en estas.

La figura 4.15 muestra a un tiempo de 1 segundo durante el llenado en la zona señalada por la flecha la formación de lo que se presume puede ser el origen de una falla, en esta área se podría tener una burbuja de aire atrapada. De allí se supone la formación de una concavidad en la superficie de la pieza al momento de la solidificación en el caso de que la permeabilidad del molde sea escasa o nula en la zona y el aire no logrará salir.

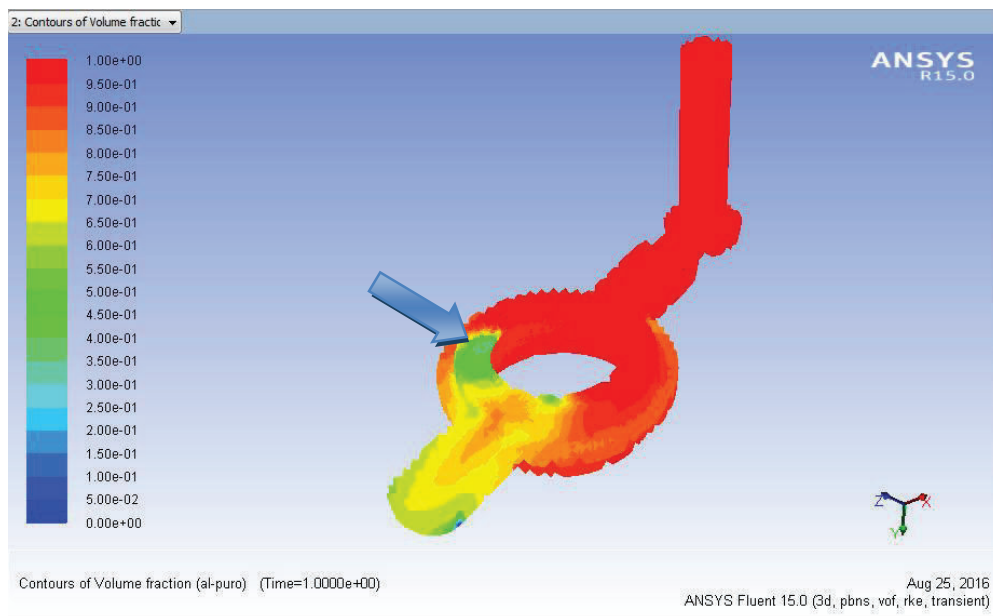


Figura 4.15 Posible formación de una burbuja de aire
(Fuente: Propia)

La figura 4.16 es una captura a un tiempo de 1,25 segundo de simulación. En esta se observa que el llenado en su momento final no se completa, por lo que se presume que existe un problema de llenado en esta zona debido tal vez al enfriamiento temprano de la colada al llegar al final del molde, este problema podría ser causado por tener un vertido con una temperatura demasiado baja para un correcto corrimiento del metal.

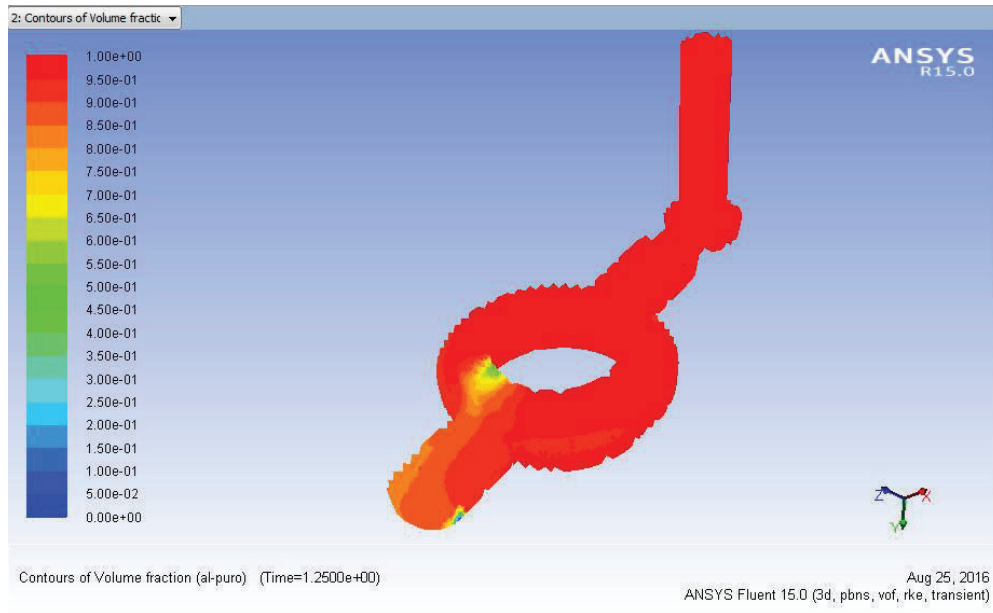


Figura 4.16 Visualización de singularidad, posible fallo de llenado
(Fuente: Propia)

También se podría atribuir esto a una falta de tiempo de simulación pero se aclara que se realizó varias simulaciones con tiempos mayores y esta singularidad en la pieza se detectó en la gran mayoría de estas aun con tiempos de simulación de 2 o más segundos por lo que se ha pensado en ella como una posible área de falla.

La figura 4.17 muestra una zona en la cual la solidificación que ya ha iniciado (tiempo = 3,3 segundos) desde las paredes externas hacia adentro de la pieza empieza a volverse poco uniforme en las áreas de unión del anillo más alto y en la unión entre el anillo principal y el brazo del lado derecho de la figura. Esto nos da lugar a la suposición de que si este patrón continua así podría generar después un rechufe en la zona.

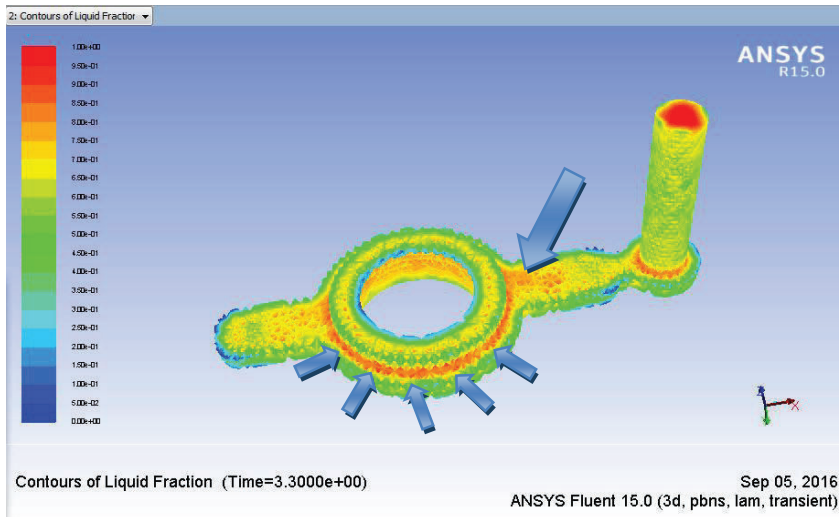


Figura 4.17 Posible generación de un rechufe en brazo derecho
(Fuente: Propia)

La figura 4.18 muestra la solidificación a un tiempo de 6,9 segundos. En esta se observa donde apuntan las flechas que en la zona color amarillo el metal se encuentra en un estado mayormente líquido que en zonas adyacentes color verde por lo que se presume podría tenerse un rechufe que se mencionó anteriormente y tensiones residuales lo que generaría posibles fisuras. Esto se supone ya que en la geometría se tiene un cambio abrupto de espesores justamente en la unión de los brazo con el anillo de la pieza cosa que favorece a la aparición de puntos calientes.

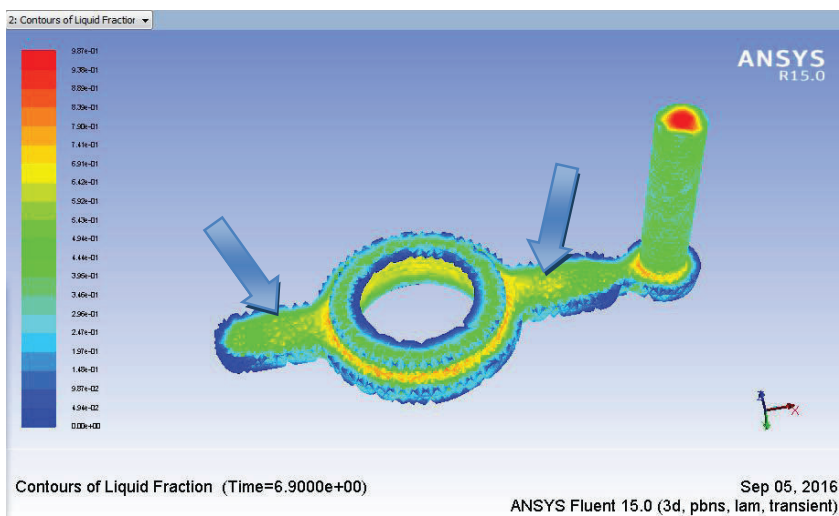


Figura 4.18 Posible área de fallo en zonas con cambio abrupto de geometría
(Fuente: Propia)

Como se mencionó al inicio de esta sección lo que se trata es predecir posibles áreas de fallo, la idea y la utilidad de los software CFD y otros de diseño mecánico es ayudar a los ingenieros en las etapas de diseño y optimización a detectar zonas susceptibles antes de realizar los ensayos prácticos. Ahora que mediante el uso del software se analizaron los resultados y se verificó las posibilidades de falla se va a cotejar estos datos con los ensayos prácticos que se realizó.

4.4 VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Varias etapas fueron cumplidas durante esta investigación, las de mayor interés para este apartado son dos de ellas, las simulaciones del llenado y solidificación y los ensayos de fundición realizados en moldes reales.

Puesto que anteriormente se realizó el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en las simulaciones ahora es necesario validar y comparar los mismos con la realidad, es decir, con las piezas fundidas en los moldes fabricados.

Durante la planificación de este trabajo se pretendió como meta inicial realizar 12 moldes y realizar el colado dentro de los mismos pero en el transcurso del mismo se definió aumentar el número de estos a 100. A continuación se observan las fallas detectadas en los modelos fundidos como parte de la validación y comparación de datos.

La figura 4.19 muestra una falla en el brazo de la pieza. Esta falla se origina debido a una burbuja de aire atrapada en el interior del molde posiblemente por falta de permeabilidad del mismo. Las fallas por burbujas de aire se predijeron en la sección anterior.

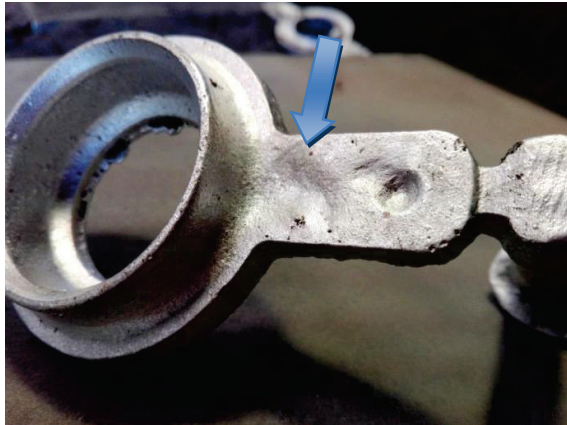


Figura 4.19 Falla por burbuja de aire en una pieza fundida.
(Fuente: Propia)

En la figura 4.20 se puede observar en la parte superior de la pieza una falla por falta de material al momento del llenado, también se nota claramente un rechupe ubicado en el brazo de la pieza en la parte derecha de la imagen.

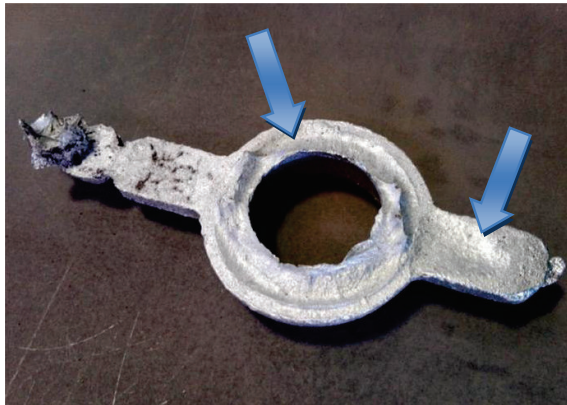


Figura 4.20 Falla por insuficiente llenado y rechupe
(Fuente: Propia)

Como resultado de una extracción muy temprana y de las tensiones residuales en la pieza se puede observar en la figura 4.21 un desgarro.

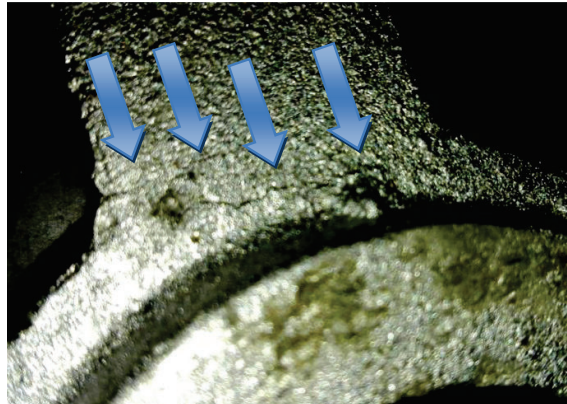


Figura 4.21 Desgarre de una pieza fundida
(Fuente: Propia)

Como se puede observar en las piezas fundidas se tiene fallas originadas en las zonas predichas o en unos casos en otras zonas. Cabe recalcar que se obtuvo más piezas con falla no solamente las que se predijo sino también por problemas de desprendimientos de partes del molde, las imágenes de las mismas se han compilado en el anexo 2 de este escrito para referencia de su existencia.

Como parte final de este trabajo se ha mostrado que el uso de software para la predicción de fallas es una gran herramienta existente hoy en día, si bien su correcta utilización y su uso dependen mucho del operador y de quien analiza los datos obtenidos se puede recomendar a las empresas de fundición pequeñas y medianas el uso de este tipo de herramientas ya que podría ser de mucha utilidad en la etapa de diseño y optimización de piezas fundidas no solo de aluminio sino también de materiales como el hierro, bronce entre otros.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez concluido este trabajo resta pues detallar las respectivas conclusiones y recomendaciones sugeridas, a la espera de que estas puedan servir como aporte para la realización de temas afines o avances a este.

5.1 CONCLUSIONES

El objetivo primordial de este trabajo se ha logrado, se ha podido demostrar que existe la posibilidad de con el uso de software de simulación predecir fallos, esto sí es utilizado por las empresas de fundición como una herramienta de trabajo puede resultar en una mejora de la productividad.

Se ha logrado simular de manera satisfactoria el proceso de llenado y de solidificación de una pieza de aluminio dentro de un molde de arena en verde utilizando los valores calculados para tal fin.

La implementación y uso de las nuevas tecnologías como es el software CFD es posible en las fundiciones del país, esto con el fin de mejorar los procesos productivos.

Es necesario tener conocimiento de la base científica sobre la cual trabaja el software dado que esto permite dar una correcta configuración del mismo, logrando así tener buenos resultados en las simulaciones.

Dada la carga computacional del análisis numérico de este tipo de problemas, es necesario realizar simplificaciones adecuadas dependientes del tipo de fenómeno a estudiar. Esto ayuda a reducir el costo computacional y por tanto los tiempos de cálculo.

Las singularidades que se presentaron en la simulación del llenado se consideraron como zonas de fallo ya que con el aumento del tiempo de cálculo estas continuaban dándose en las mismas zonas.

Se logró predecir satisfactoriamente algunos fallos que podrían generarse, aun así los ensayos prácticos también son necesarios para corroborar y complementar los análisis realizados en computador.

Este trabajo es un aporte a la industria de fundición del país y se espera que sirva también como un aporte a futuras investigaciones.

5.2 RECOMENDACIONES

Mediante los resultados obtenidos en este trabajo, se observa que este da lugar a futuros temas de investigación que den continuidad para profundizar en áreas específicas que no se ha alcanzado a cubrir.

Se debería realizar un programa de introducción y capacitación sobre el uso de software en procesos productivos de fundición para miembros de empresas de este tipo a nivel nacional.

La simplificación del modelo y la división del proceso general en partes independientes mejora los tiempos de cálculo y la carga computacional.

La calidad de la malla influye en los resultados, aun así, una malla más refinada no siempre significa una mejora sustancial de la solución, a diferencia de lo que ofrece una malla bien estructurada.

En piezas de geometrías complicadas se puede recurrir en condiciones que ameriten a realizar simplificaciones como el uso de condiciones de simetría.

Referencias Bibliográficas

- [1] Awate P. & Hargude N., *CFD - Introduction and Application, International Engineering Research Journal*. [En línea]. Disponible en: <http://www.ierjournal.org/sveri/30.CFD - Introduction and Application.pdf>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [2] Sánchez V. Jesús., *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapítulo+3.pdf>. pág. 1. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [3] Sánchez V. Jesús., *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapítulo+3.pdf>. pág. 3. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [4] Sánchez V. Jesús., *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapítulo+3.pdf>. pág. 3. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [5] Sánchez V. Jesús., *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapítulo+3.pdf>. pág. 4. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [6] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent getting started guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Getting%20Started%20Guide.pdf> pág. 14. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [7] ASM International., *Casting design and performance*, United States of America. Ohio: Materials Park, 2009. Pág. 9 - 10
- [8] ASM International., *Casting design and performance*, United States of America. Ohio: Materials Park, 2009. Pág. 16 - 18

- [9] ASM International., *Casting design and performance*, United States of America. Ohio: Materials Park, 2009. Pág. 13
- [10] Stephanie O'Connor., *Titanium rammed graphite castings for military applications*. [En línea]. Disponible en: <https://www.atimetals.com/markets/defense/Documents/Defense%20Casting%20Article.pdf> [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [11] Castings Technology International., *The replicast process*. [En línea]. Disponible en: <http://www.castingstechnology.com/public/documents/Replicast%20Article.pdf>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [12] Castings Technology International., *Replicast comparisons*. [Fuera de línea]. Disponible en: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/SCPreplicastComparisons.asp> [Último acceso: 2016 junio 13]
- [13] Castings Technology International., *Replicast main*. [Fuera de línea]. Disponible en: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/scpreplicastmain.asp> [Último acceso: 2016 junio 13]
- [14] Quiminet.com., *La fundición en arena, un proceso de calidad*. 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.quiminet.com/articulos/la-fundicion-en-arena-un-proceso-de-calidad-2577704.htm> [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [15] Belhamadia Y, Kane A & Fortin A., *An enhanced mathematical model for phase change problems with natural convection*. [En línea]. Disponible en: <http://www.math.ualberta.ca/ijnamb/Volume-3-2012/No-2-12/2012-02-05.pdf>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [16] Nancy Hall, NASA, *Navier-Stokes Equations 3 dimensional unsteady*. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html> [Último acceso: 2016 septiembre 14]
- [17] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Documentation 17.1 Overview*. [En línea]. Disponible en: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node350.htm>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]

- [18] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Documentation 17.3 Introduction*. [En línea]. Disponible en: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node352.htm>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [19] Voller V. R. and Prakash C., *A fixed-grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems*. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931087901529>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [20] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>. Pág. 603 [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [21] ASM International., *Casting design and performance*, United States of America. Ohio: Materials Park, 2009. Pág. 68
- [22] Correa Allepuz E., *Optimización del difusor con álabes del compresor centrífugo de una planta de desalación mediante CFD*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+%C3%9Anico%252F07.ANEXO+I.pdf>. [Último acceso: 2016 septiembre 05]
- [23] Chorin. A. J., *Numerical solution of Navier-Stokes equations. Mathematics of computation. Vol.22, Pág. 745 - 762. 1968.*
- [24] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide.18.1.1 Pressure-Based Solver*. [En línea]. Disponible en: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node361.htm#uns-scheme> [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [25] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Pág 541. [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [26] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>. Pág. 650-651 [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [27] ANSYS, Inc., *ANSYS Icepak User's Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Icepak%20Users%20Guide.pdf>. Pág 905. [Último acceso: 2016 septiembre 07]

- [28] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Pág 1418. [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [29] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf> f. Pág. 686 [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [30] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf> f. Pág. 683 [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [31] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Pág 1445 - 1447. [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [32] ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*. [En línea]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Pág 1447 - 1449. [Último acceso: 2016 septiembre 07]
- [33] ANSYS, Inc., *ANSYS Consumer Training Material. Fluent Lecture 5* [En línea]. Disponible en: http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture05-solver-settings.pdf [Último acceso: 2016 septiembre 07]

ANEXO 1

COMPOSICIÓN DEL ALUMINIO USADO EN LAS FUNDICIONES

COMPOSICIÓN DEL ALUMINIO UTILIZADO ANTES DE LA FUNDICIÓN

Tabla 3.1 Composición química del aluminio 1050 en % peso

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Max	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0	0,07	0,05	0,03	99,50

(Fuente: FUNSA S.A.)

COMPOSICIÓN DEL ALUMINIO UTILIZADO DESPUÉS DE LA FUNDICIÓN

Tabla Anexo 1 Composición química del aluminio 1050 en % peso

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Max	0,235	0,40	0,05	0,05	0,044	0	0,064	0,05	0,027	99,60

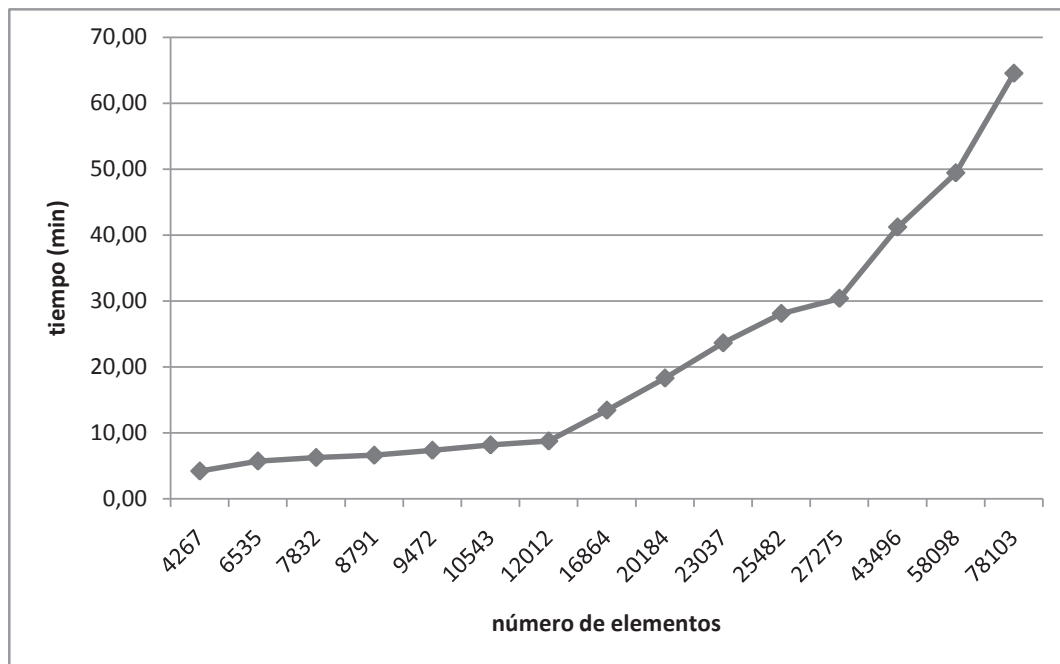
(Fuente: FUNSA S.A.)

Los valores aquí comprendidos son referenciales sobre la calidad del aluminio empleado en la fabricación de piezas sanitarias en la empresa de fundición FUNSA S.A., y fueron proporcionadas por la misma para su uso netamente referencial al autor de este trabajo.

ANEXO 2

ANÁLISIS DE TIEMPO DE SIMULACIÓN VS NÚMERO DE ELEMENTOS

n° elementos	tiempo (min)
4267	4,20
6535	5,72
7832	6,25
8791	6,60
9472	7,35
10543	8,15
12012	8,75
16864	13,43
20184	18,30
23037	23,63
25482	28,10
27275	30,38
43496	41,20
58098	49,42
78103	64,52

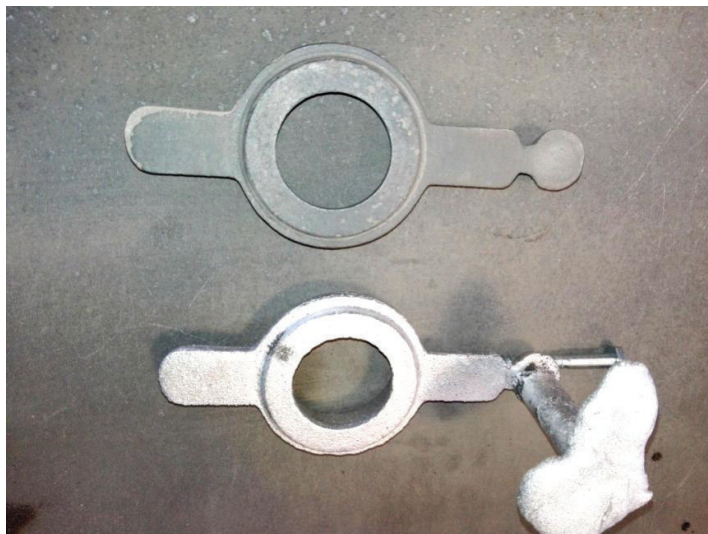


(Fuente: Propia)

ANEXO 3

PIEZA FUNDIDA JUNTO A SU PATRÓN

1. Vista Superior

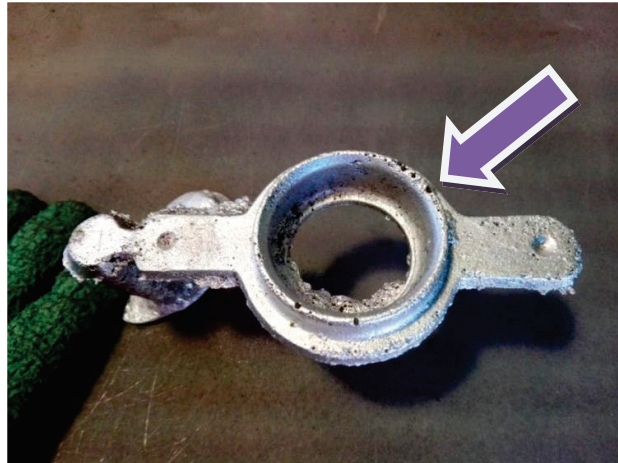


2. Vista Inferior

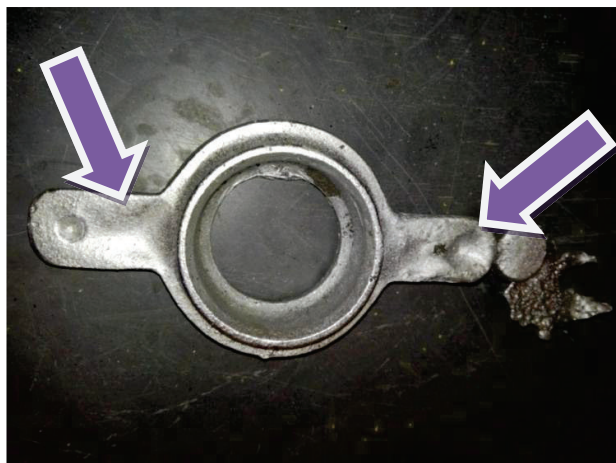
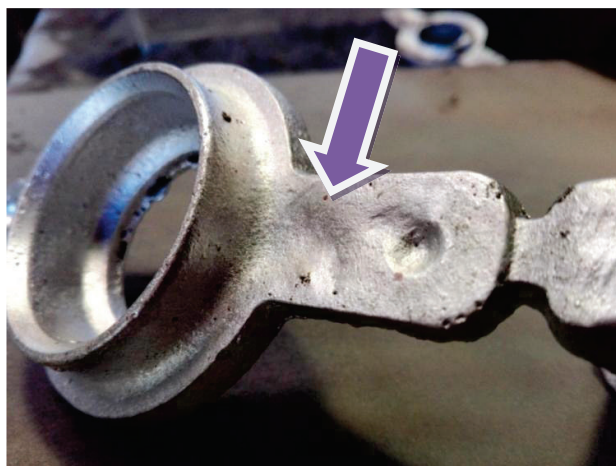


ANEXO 4 PIEZAS CON FALLA

1. Inclusiones de arena



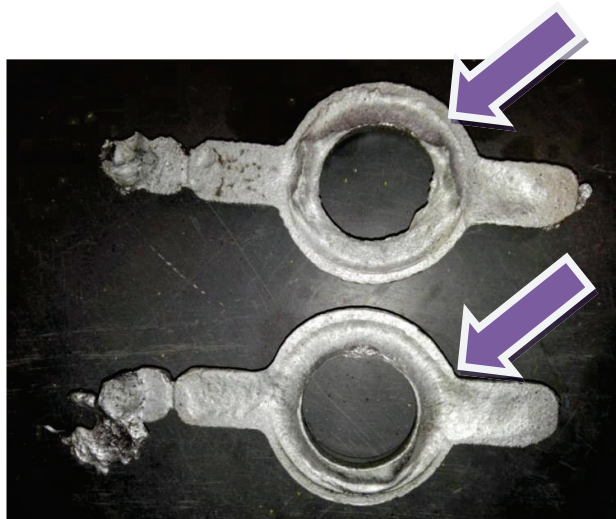
2. Burbujas de aire



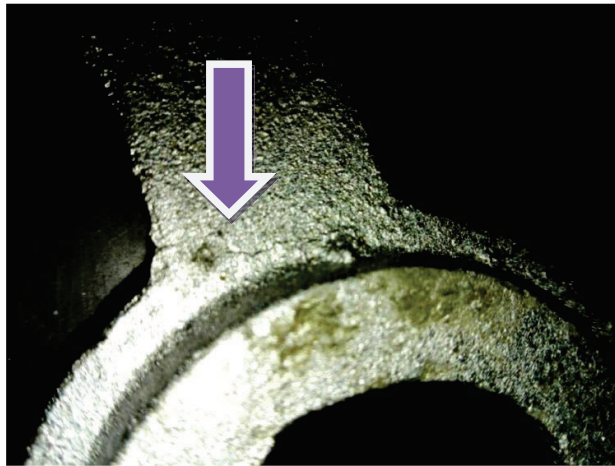
3. Deltas



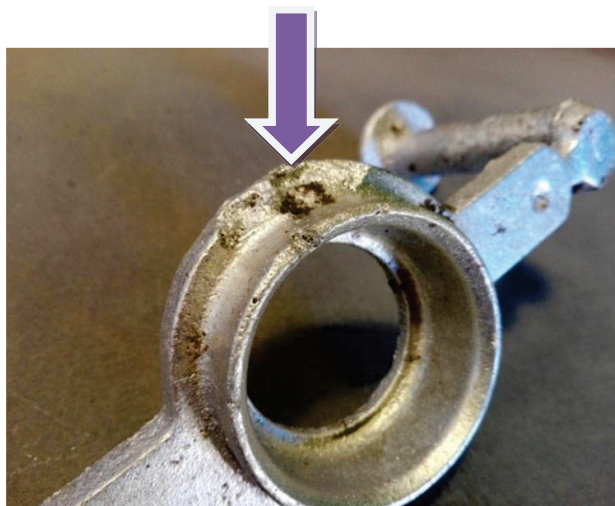
4. Falta de material en el llenado



5. Fisuras



6. Desprendimientos de arena





7. Defectos por mala compactación del molde

