



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS EXPERIENCIAS DE  
FUNDICIÓN REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE LA  
SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

**Gregory Eduardo Chumbes Macharé**

**ASESORES: Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán  
Dr. Ing. Julio Acosta Sulcahuamán**

Lima, marzo del 2010

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ



SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE EXPERIENCIAS DE  
MATERIALES EN EL LABORATORIO DE LA

Gregory Eduardo Chumbes Macharé

© 2010, Gregory Eduardo Chumbes Macharé.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Esta tesis con el mismo pie comparar simulación enseñanza

El capítulo teoría imp Simulación para los al del Vulcar

El capítulo ensayo/sin notorio y localización mediante el software cual ayuda porosidad

Para final temperatur calor durar dificultad de utilización / real: chat convincent Este result evaluar los

## RESUMEN

Esta tesis desarrolla la simulación del proceso de fundición de un elemento cilíndrico con el programa de elementos finitos Vulcan 8.0, a la par de la ejecución real de la misma pieza en el laboratorio de la Sección de Ingeniería Mecánica, con el objetivo de comparar los resultados de los procesos, evaluar la capacidad de la herramienta de simulación utilizada y de esta manera contribuir a la aplicación del software a la enseñanza universitaria.

El capítulo 1 es la base teórica de la tesis y por lo tanto está dedicado a subrayar la teoría importante del conjunto: Proceso de fabricación (Fundición)/Herramienta de Simulación (Vulcan), mientras que el Capítulo 4, resulta ser una guía de simulación para los alumnos de las clases de Laboratorio de Fundición en donde el uso del software del Vulcan forma parte de la experiencia académica.

El capítulo 2 y 3, conforman el cuerpo de este trabajo, y aquí los resultados del conjunto ensayo/simulación son comparados en base a los defectos presentados. El defecto más notorio y perjudicial en la pieza fundida es el rechufe. Mediante la simulación, al localización de dicho defecto se logra predecir con una muy buena aproximación mediante el criterio de solidificación de materiales denominado fracción sólida. Además, el software permite observar la evolución de vectores de velocidad durante el llenado, lo cual ayuda a evaluar zonas de alta turbulencia y por lo tanto focos de aparición de porosidades y defectos.

Para finalizar el capítulo 3, se presentan gráficos de evolución de la variable temperatura versus tiempo con el objetivo de analizar el fenómeno de la transferencia de calor durante la solidificación del material. Finalmente se comprueba que, a pesar de las dificultades presentadas durante el desarrollo de la investigación, como por ejemplo la utilización de un material de colada distinto para cada procedimiento (virtual: AlSi7Mg / real: chatarra de aluminio), los resultados presentados por el software Vulcan son muy convincentes. Los defectos reales son localizados con gran precisión en la pieza virtual. Este resultado permite afirmar que este programa posee una muy buena capacidad para evaluar los diseños preliminares de una fundición.



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS EXPERIENCIAS DE FUNDICIÓN REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE LA SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA : Materiales # 58

PROPUESTO POR : Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán

ASESORES : Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán  
Dr. Ing. Julio Acosta Sulcahuamán

ALUMNO : Gregory Eduardo Chumbes Macharé

CÓDIGO : 20020334.0.12

FECHA : 17 de noviembre de 2006

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

El proceso de fundición es una de las alternativas más importantes en la manufactura de piezas a nivel mundial. Mediante este proceso se pueden producir piezas de geometría compleja, pero sus costos de fabricación son relativamente elevados.

La aplicación de métodos computacionales en el análisis del proceso de fundición permite desarrollar la simulación con gran aproximación al fenómeno termo-mecánico, con el objetivo de predecir y corregir los defectos del proceso en forma virtual en la fase de diseño. Actualmente se desarrollan sofisticadas herramientas de simulación numérica, con la finalidad de mejorar la calidad de los procesos y reducir los costos debidos a la construcción de prototipos en la fase de experimentación.

El objetivo del tema propuesto es el estudio comparativo de las experiencias que se realizan en el Laboratorio de Fundición de la Sección de Ingeniería Mecánica y la correspondiente simulación numérica en un programa de elementos finitos. Mediante este trabajo se pretende incorporar la herramienta computacional a las experiencias de laboratorio, con la finalidad de mejorar la enseñanza universitaria. De esta manera se espera contribuir al conocimiento y mejora de la práctica de este proceso de manufactura en la industria nacional.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO  
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

Introducción

1. Antecedentes y estudios preliminares
2. Experiencias que se realizan en el Laboratorio de Fundición
3. Simulación de procesos de fundición mediante el método de elementos finitos
4. Propuesta para introducir la simulación numérica en las experiencias del Laboratorio de Fundición

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

*Máximo: 100 páginas*



Dr. Ing. Quino Valverde G.  
Asesor

Dr. Ing. Julio Acosta S.  
Asesor



A Dios

A Erika y Estéfano por el amor  
y la felicidad.

A Luis, Mirina y Pamela por el  
apoyo en todos los momentos.

A mi familia entera por la unión

## AGRADECIMIENTOS

A mis queridos asesores de tesis: Dres. Quino Martín Valverde Guzmán y Julio Acosta Sullcahuamán por su asesoramiento científico y estímulo para seguir creciendo personal y profesionalmente. Asimismo ofrecer mi gratitud al Sr. Arturo García Villanueva por la experiencia transmitida en los aspectos teóricos y prácticos del proceso de fundición y al Sr. Sócrates Cutipa Castelo por su disposición y colaboración para ejecutar los ensayos de fundición indicados en el presente documento. Finalmente, deseo destacar el total apoyo en los ensayos por parte del Sr. Roberto Muñoz.

Finalmente deseo agradecer al Ing. Martín Solina, por la disposición al solicitar la licencia del software, ya que sin su colaboración el tiempo para terminar este trabajo hubiese sido mucho mayor.

Nuevamente un agradecimiento sincero a cada una de estas personas ya que sin su ayuda no hubiera sido posible este logro.

## INDICE DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN .....	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS .....	ii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
I. ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PREMILINARES .....	4
1.1 El proceso de fundición .....	6
1.1.1 El proceso de fundición en molde de arena .....	7
1.1.2 Defectos del proceso de fundición .....	10
1.2 La simulación numérica .....	11
1.3 Software de elementos finitos “VULCAN 8.0” .....	14
1.3.1 Pre – procesamiento de datos .....	14
1.3.1.1 Construcción de la geometría mediante el Vulcan 8.0 .....	16
1.3.1.2 Discretización mediante Vulcan 8.0 .....	18
1.3.1.3 Definición de datos en el Vulcan 8.0 .....	21
1.3.2 Procesamiento o Análisis de datos .....	31
1.3.3 Post - Procesamiento de datos .....	34
II. EXPERIENCIAS QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN .....	40
2.1 Componentes del proceso .....	40
2.1.1 Modelos .....	40
2.1.2 Molde .....	43
2.1.3 Metal de fundición .....	45
2.2 Ensayo de fundición realizado en el Laboratorio SIM – PUCP .....	45
2.2.1 Elementos para el ensayo .....	45
2.2.2 Herramientas para el ensayo .....	46
2.2.3 Condiciones para el ensayo .....	47
2.2.4 Procedimiento de ensayo .....	47

2.2.5	Resultados del ensayo .....	48
III.	SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	51
3.1	Pre – procesamiento de datos en Vulcan .....	53
3.1.1	Creación del modelo geométrico .....	53
3.1.2	Discretización .....	56
3.1.3	Definición de Datos .....	58
3.2	Procesamiento de datos en Vulcan .....	59
3.3	Post - procesamiento de datos en Vulcan .....	61
3.3.1	Análisis del llenado.....	61
3.3.2	Análisis de la Solidificación Térmica.....	65
3.3.3	Coefficientes de transferencia de calor .....	68
IV.	PROPUESTA PARA INTRODUCIR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA EN LAS EXPERIENCIAS DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN ....	71
4.1	Consideraciones previas a la simulación .....	72
4.2	Guía de simulación para ensayos de Fundición en el Laboratorio SIM PUCP (Parte I) .....	73
4.3	Consideraciones para el ensayo .....	76
4.4	Guía de simulación para ensayos de Fundición en el Laboratorio SIM PUCP (Parte II).....	76
	CONCLUSIONES .....	80
	BIBLIOGRAFÍA .....	82
	ANEXOS .....	83
	Anexo A: Solidificación Termo mecánica.....	84
	Anexo B: Procedimiento para corrección de superficies en la interface del Vulcan.....	86
	Anexo C: Generación Alternativa de malla.....	87
	Anexo D: Propiedades de la aleación de Aluminio.....	88

Anexo E: Propiedades de la arena de moldeo.....	90
Anexo F: Estudio de los coeficientes de Transferencia de Calor .....	91

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Importancia de la simulación en el proceso de fundición.....	5
Figura 1.2 Fundición con molde permanente y desechable .....	6
Figura 1.3 Confección de modelos machos y molde para la fabricación de una parte fundida.....	8
Figura 1.4 Colada del metal .....	8
Figura 1.5 Etapas de solidificación y enfriamientos de los componentes del proceso .....	9
Figura 1.6 Defectos comunes: llenado incompleto, erosión del molde, gránulos fríos, rechupe interno, desgarramiento en caliente y aparición de grietas en el molde .....	10
Figura 1.7 Etapas del proceso de fundición virtual .....	11
Figura 1.8 Interface del Vulcan 8.0.....	15
Figura 1.9 Menú Archivo .....	16
Figura 1.10 Creación de agujero en superficie del molde.....	17
Figura 1.11 Utilización de capas ó layers.....	17
Figura 1.12 Tipos de elementos finitos del Vulcan 8.0.....	18
Figura 1.13 Opciones importantes para el enmallado en Vulcan.....	19
Figura 1.14 Pasos para realizar el enmallado en Vulcan 8.0.....	20
Figura 1.15 Módulos del Vulcan para la definición de datos.....	21
Figura 1.16 Módulo para definición del problema (Pestañas Tipo de Proceso / General /Simetrías de izquierda a derecha).....	22
Figura 1.17 Asignación de nuevos componentes de la fundición en el Módulo para la definición del material.....	24
Figura 1.18 Ventana para la edición de las propiedades del material .....	25
Figura 1.19 Sub-módulo de llenado (Pestañas Componentes de fundición / Estrategia /Contactos/HTC Ambiente/Salida Especial).....	29
Figura 1.20 Pestaña Estrategia del Sub-módulo de Solidificación Térmica .....	30
Figura 1.21 Pestaña Salida Especial del Sub-módulo de Solidificación Térmica.....	31
Figura 1.22 Módulos del Vulcan para el cálculo del proceso .....	31

Figura 1.23 Menú Calcular.....	33
Figura 1.24 Interface para el post-procesamiento .....	34
Figura 1.25 Método para cargar archivos desde el Menú Resultados del Vulcan .....	35
Figura 1.26 Resultados según el tipo de operación a analizar.....	36
Figura 1.27 Vistas Bidimensionales: enfriamiento de la pieza en llenado, enfriamiento del conjunto pieza-molde en la solidificación térmica .....	36
Figura 1.28 Estilos de Visualización, de izquierda a derecha, body lines y body bound.....	37
Figura 1.29 Manejo de capas en el Pos-Procesamiento .....	37
Figura 1.30 Opciones del menú Cortar .....	38
Figura 1.31 Creación de gráficos (Opción Evolución de punto).....	39
Figura 1.32 Resultados del Vulcan para el Análisis de solidificación Térmica.....	39
Figura 2.1 Modelos de las piezas .....	41
Figura 2.2 Modelos de rebosaderos y bebederos .....	42
Figura 2.3 Modelos de canales de colada y ataques.....	42
Figura 2.4 Modelo de macho o núcleo.....	42
Figura 2.5 Bastidor de moldeo .....	43
Figura 2.6 Bastidores del laboratorio SIM – PUCP .....	44
Figura 2.7 Modelo de madera.....	45
Figura 2.8 Dimensiones de mazarota en mm .....	46
Figura 2.9 Herramientas para el ensayo .....	46
Figura 2.10 Procedimiento para fundición en SIM – PUCP .....	48
Figura 2.11 Defecto de rechupe en la superficie cilíndrica superior de la pieza.....	49
Figura 2.12 Defecto de erosión e inclusión de arena en la superficie del bebedero.....	50
Figura 3.1 Generación de la geometría con SolidWorks.....	51
Figura 3.2 Distanciamiento entre rebosadero y plano superior del molde.....	52
Figura 3.3 Importación de elementos, de izquierda a derecha vista superior e isométrica .....	54

Figura 3.4 Visualización Plana de componentes.....	54
Figura 3.5 Creación de agujero para vertido de metal colada.....	55
Figura 3.6 Generación del volumen del molde.....	56
Figura 3.7 Generación de malla.....	57
Figura 3.8 Cálculo del proceso para las operaciones de llenado y Solidificación.....	60
Figura 3.9 Evolución del frente de metal líquido.....	62
Figura 3.10 Distribución de la velocidad representado por vectores.....	63
Figura 3.11 Distribución de la temperatura en la sección de la pieza durante el llenado de la pieza.....	64
Figura 3.12 Fracción Sólida Final en el modelo 3D y la sección de la pieza.....	65
Figura 3.13 Evolución de la Fracción Sólida en la sección de la pieza.....	66
Figura 3.14 Evolución de la Temperatura en la sección de la pieza.....	67
Figura 3.15 Resultados HTC convección variable.....	69
Figura 3.16 Resultados HTC conducción variable.....	70
Figura 4.1 Modelo geométrico del eje.....	73
Figura 4.2 Enmallado del eje.....	73
Figura 4.3 Evolución del frente de avance del metal líquido.....	77
Figura 4.4 Distribución de los vectores velocidad durante el llenado.....	77
Figura 4.5 Evolución de la Temperatura durante el llenado del molde.....	78
Figura 4.6 Plano transversal de corte.....	78
Figura 4.7 Evolución de la fracción durante la etapa de la Solidificación - Enfriamiento de la pieza.....	79
Figura 4.8 Evolución de la Fracción Sólida vista 3D.....	79
Figura A Sub-Módulo de Solidificación Termo mecánica.....	84
Figura B Procedimiento para corrección de superficies en la Interface del Vulcan 8.0.....	86
Figura C Generación de la malla con la opción Asignar tamaño de elementos.....	87
Figura E Valores HTC conducción/convección para ensayos en molde de arena con AlSi7Mg.....	92

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Datos ingresados para el Módulo 1, Características del problema .....	58
Tabla 3.2 Datos ingresados en el Módulo 2, Componentes de la fundición .....	58
Tabla 3.3 Datos ingresados para el Módulo 3, Operación de llenado.....	59
Tabla 3.4 Datos ingresados para el Módulo 3, Operación de Solidificación Térmica....	59
Tabla D Propiedades de la Aleación AlSi7Mg .....	88
Tabla E Propiedades de la Arena Verde.....	90

## INTRODUCCIÓN

Esta tesis forma parte de un conjunto de proyectos de investigación, realizados dentro de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Todos estos proyectos se enfocan en el desarrollo de la simulación numérica de los procesos de fabricación de piezas. Dentro del conjunto de estos procesos se encuentra el proceso de fundición, el cual consiste en verter metal líquido en un molde que posee una forma similar al de la pieza a fabricar, esperar la solidificación del metal y finalmente retirar la pieza.

Es conocido que el proceso no es tan sencillo como se describe en el párrafo anterior. Este proceso presenta fenómenos térmicos, de mecánica de fluidos y termo mecánicos complejos como por ejemplo: la transferencia de calor entre el metal y los componentes del sistema (molde, machos, ambiente exterior), las consiguientes contracciones del material, el campo de turbulencias generadas en el llenado o la aparición de tensiones residuales en la pieza fundida en la etapa de enfriamiento del proceso.

La poca capacidad de control de dichos fenómenos genera defectos indeseados en las piezas fundidas. En épocas pasadas para conocer y controlar los defectos producidos; los expertos realizaban ensayos de prueba y error con la finalidad de generar leyes prácticas que puedan regir el comportamiento de estos fenómenos. Actualmente con el conocimiento avanzado de leyes físicas y matemáticas combinado con el uso de potentes computadoras se crean softwares comerciales capaces de recrear y evaluar

virtualmente el proceso con sus fenómenos. Dicho proceso virtual es conocido como simulación computacional.

Por lo tanto, la simulación con técnicas computacionales permite la detección y localización de los defectos en geometrías virtuales antes de fabricar piezas reales mediante la modificación de variables, parámetros o condiciones. Estas condiciones afectan el proceso y generan resultados mediante los cuales es posible analizar los fenómenos físicos. De esta manera se consigue reducir los costos de producción del proceso, lo que contribuye directamente en el desarrollo económico y tecnológico de la industria nacional.

Debido a la cercana relación entre industria y los centros de enseñanza y capacitación, es necesario implementar esta nueva tecnología de simulación de procesos de fabricación en los centros de enseñanza superior.

La presente tesis propone la aplicación de la técnica computacional de los elementos finitos para realizar la simulación del proceso de fundición de una pieza ensayada en el laboratorio. Para esto se utilizará el software comercial “VULCAN”, desarrollado por la empresa QUANTECH ATZ en conjunto con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE). De esta manera lo que se pretende es incorporar la herramienta computacional a la enseñanza universitaria, con la finalidad de mejorar las experiencias de laboratorio dirigidas a los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

En primera instancia, este trabajo abarca el estudio de la tecnología de la fundición en arena, la tecnología de la simulación y específicamente el estudio del software “Vulcan 8.0”. Para el estudio del proceso de fundición en arena se realizó una amplia búsqueda de información a través de textos e Internet, con la finalidad de mostrar la importante relación y transición del proceso real hacia un proceso virtual previo. Luego se propone el estudio del manual del “Vulcan”, por lo tanto se realizaron lecturas del manual de la interfaz GID, después se realizaron aplicaciones de ejemplos enfocados a la creación de entidades geométricas dentro de la interfaz del programa, finalmente se complementó esta etapa con simulación del ejemplo del tutorial básico.

Posteriormente a estos estudios, se realizará el ensayo de fundición de un elemento cilíndrico con los componentes, herramientas y condiciones presentes en el laboratorio de la Sección de Ingeniería Mecánica (SIM-PUCP). Finalmente, se realizará la modelación y simulación del proceso de fundición de dicho eje en la Sala de Investigación Asistida por Computadora (INACOM-PUCP), con la aplicación del software Vulcan 8.0. Esta metodología de investigación conllevará al conocimiento del proceso y de la herramienta computacional, además de visualizar, validar y comparar los resultados de la simulación con los obtenidos en forma experimental.

Finalmente, a partir de la experiencia obtenida se propondrá una guía de trabajo para que los estudiantes de la Sección de Ingeniería Mecánica puedan incluir la simulación como una etapa del diseño de piezas fabricadas por fundición.

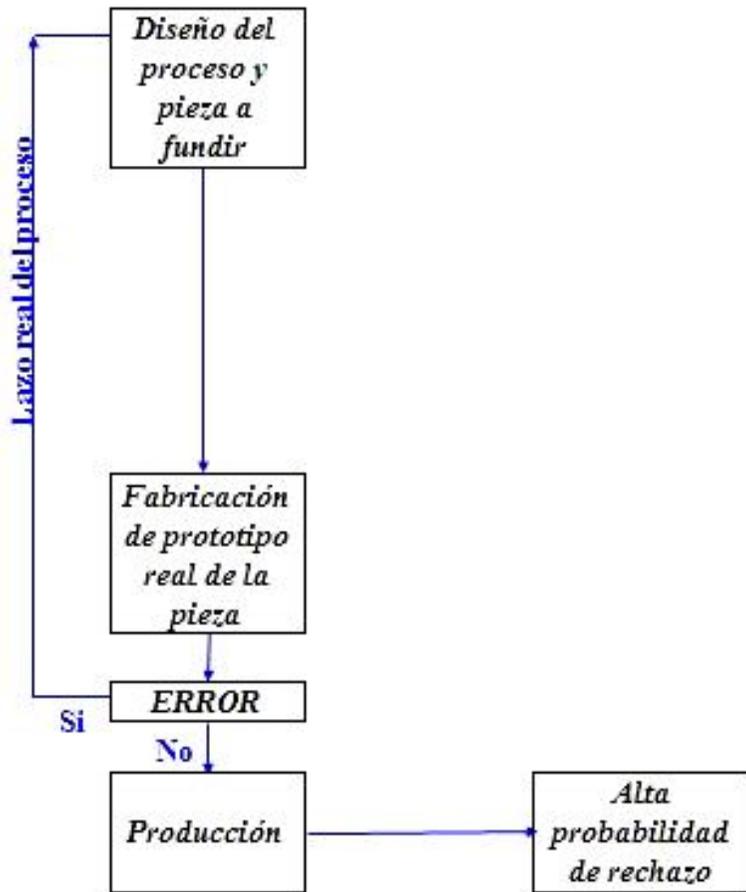


## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PRELIMINARES

El siguiente capítulo presenta una breve descripción del proceso de fundición y la simulación numérica enfocada a dicho proceso. Finalmente se detalla las características de la herramienta computacional, el software comercial Vulcan 8.0, utilizado para realizar la simulación del proceso, el cual mediante elementos finitos discretiza el modelo geométrico, luego mediante el “solver” resuelve ecuaciones diferenciales en cada punto de la malla generada, para finalmente mostrar los resultados obtenidos para el análisis. De acuerdo a los resultados obtenidos, en capítulos posteriores se deberá analizar si se obtienen soluciones aproximadas al proceso de fundición real y de esta manera evaluar las capacidades y limitaciones del software, con los objetivos de mejorar la calidad de la pieza fundida y reducir los costos de experimentación basados en la fabricación de prototipos para ensayos de prueba y error. Por lo tanto con la aplicación del software se obtiene localizar y eliminar defectos en etapas anteriores a la manufactura real de la pieza. Tal como muestra la figura 1.1, el software logra crear un lazo virtual importante y como consecuencia obtener una pieza fundida final con una baja probabilidad de rechazo [MINGO, 2004].

Proceso de fundición convencional



Aplicación de la herramienta computacional en el proceso de fundición

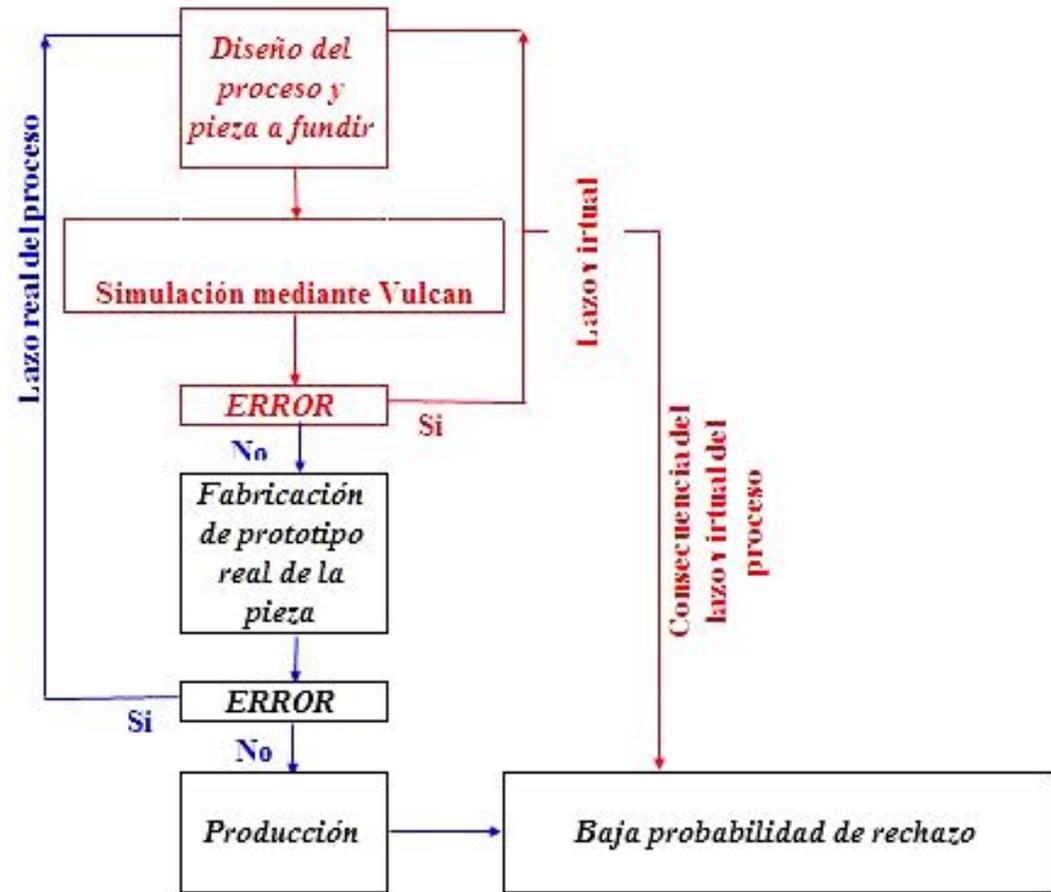


Figura 1.1: Importancia de la simulación en el proceso de fundición

## 1.1 El proceso de fundición

El proceso de fundición es un proceso de manufactura de piezas sin arranque de viruta, y para su propósito utiliza material fundido. Este proceso consiste en el formado de una pieza mediante el vaciado de metal fundido en un recipiente con la forma de la pieza u objeto (molde hueco) y esperar a que se endurezca al enfriarse, de esta manera la pieza procesada adopta la forma del molde hueco, finalmente se abre el molde y se obtiene una pieza de forma aproximada a la diseñada.

El proceso de fundición es usado para la fabricación de piezas de formas complicadas, debido a que la fabricación de estas piezas por otros métodos resultaría difícil o antieconómica.

El proceso de fundición es clasificado de acuerdo con los diferentes tipos de moldes en:

- Procesos de fundición con molde permanente.
- Procesos de fundición con molde desechable (no permanente).

Las operaciones con molde permanente se realizan con un molde de metal y se caracteriza por una alta velocidad de producción de piezas y un buen acabado superficial de las mismas. Dentro de estas operaciones se encuentra la fundición en matrices.

En las operaciones de fundición con molde desechable, éste se destruye para remover la parte fundida. Estos moldes se fabrican de arena, yeso, arcilla, barro, etc. Dentro de estas operaciones se encuentra la fundición en arena.

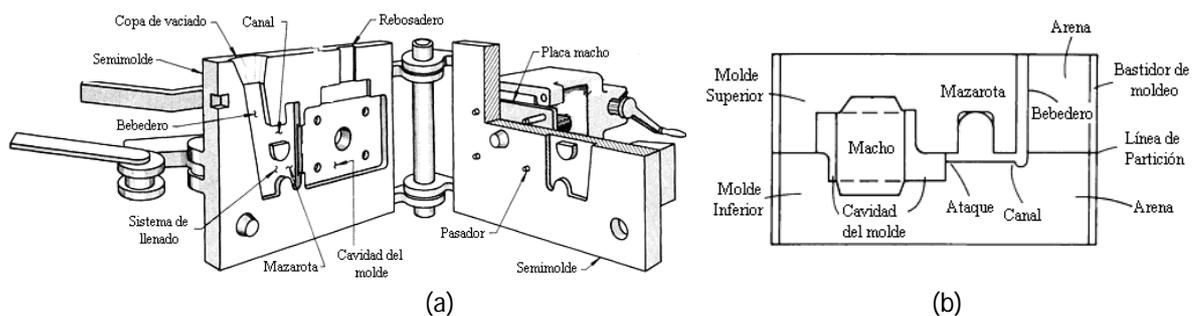


Figura 1.2: Tipos de moldes, (a) Molde permanente (b) Molde desechable [ASM, 1998]

### 1.1.1 El proceso de fundición en molde de arena

La fundición en arena es el proceso más utilizado y el más importante en la actualidad, la producción de piezas por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje total de fundición aunque se requiera un nuevo molde por cada proceso y por tanto las velocidades de producción sean limitadas. El proceso de fundición en molde de arena permite moldear casi todas las aleaciones; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes.

Para una descripción más detallada del proceso y de los parámetros que involucra se describirá las etapas de un proceso de fundición en arena:

**a. Diseño y confección de modelos y machos (corazones):** Para lograr la confección del molde es necesario modelos para definir las superficies externas. El modelo será ligeramente más grande que la pieza debido a la contracción y los excesos para el maquinado de la pieza final, además de incluir canales de alimentación y mazarotas necesarias para el llenado y alimentación del molde. Los materiales que se usan para hacer estos modelos incluyen la madera, los plásticos y los metales. Si la pieza posee superficies internas se necesita un macho para definir las, es decir un macho es un modelo de tamaño natural de las superficies interiores de la pieza. El macho se inserta en la cavidad del molde antes del vaciado, para que al fluir el metal fundido, solidifique entre la cavidad del molde y el macho, formando así las superficies internas de la fundición. El macho se hace generalmente de arenas especiales compactadas. El tamaño real del macho debe incluir los excesos por contracción y maquinado al igual que el modelo.

**b. Confección del molde:** El molde de arena es una cavidad que tiene la forma geométrica de la pieza que se va fundir. La arena de moldeo usualmente es sílice mezclada con distintos tipos de aglutinantes. El molde está contenido en una caja de moldeo que consta de dos partes: molde superior (cope en inglés) y molde inferior (drag en inglés). Las partes de la caja se mantienen en una posición definida, separadas por un plano de separación y unidas mediante pernos o pasadores.

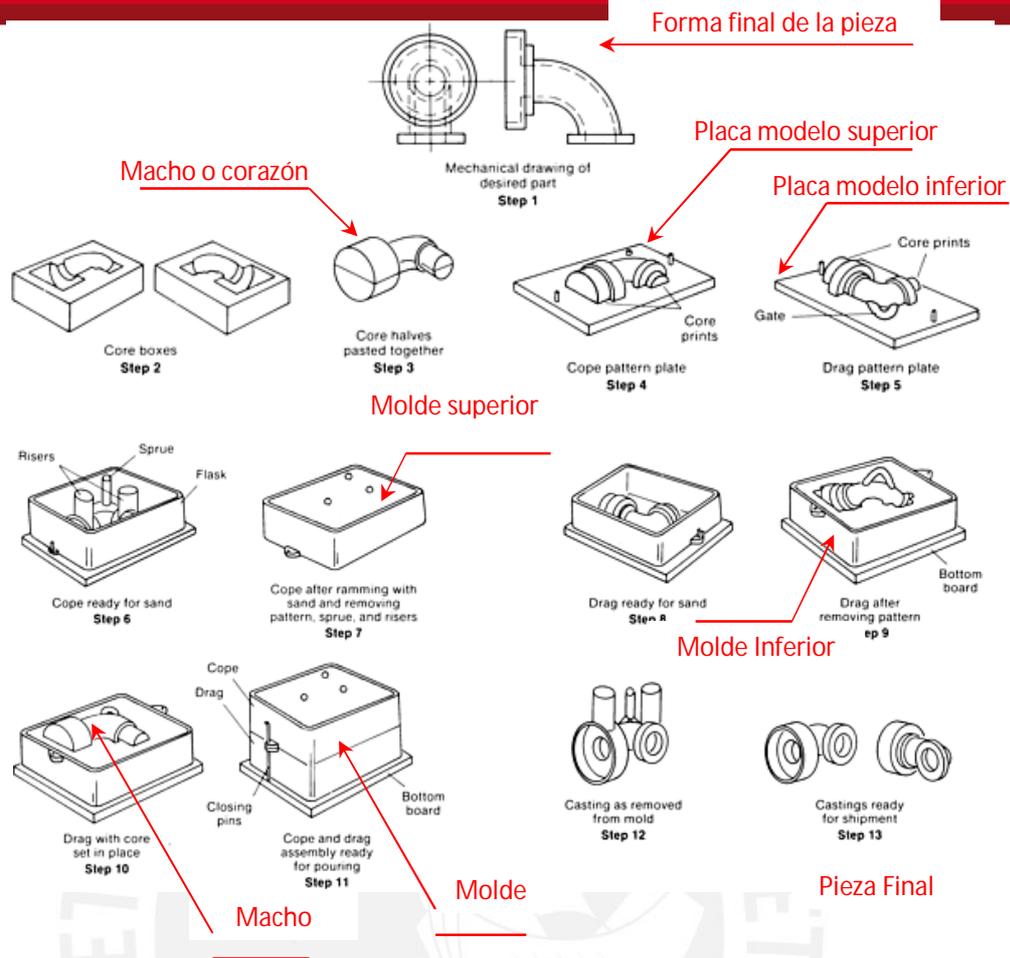


Figura 1.3: Confección de modelos machos y molde para la fabricación de una parte fundida [ASM, 1998]

**c. Fusión y colada del metal:** La fusión consiste en calentar el metal hasta llevarlo al estado líquido, mientras que la colada consiste en verter el metal fundido en la cavidad del molde. Para ello el molde de arena debe ser construido con unos conductos de paso llamados sistema de conductos de colada que llevan el metal vaciado hacia la cavidad de molde. El principal propósito de este sistema es llenar de metal la cavidad del molde.

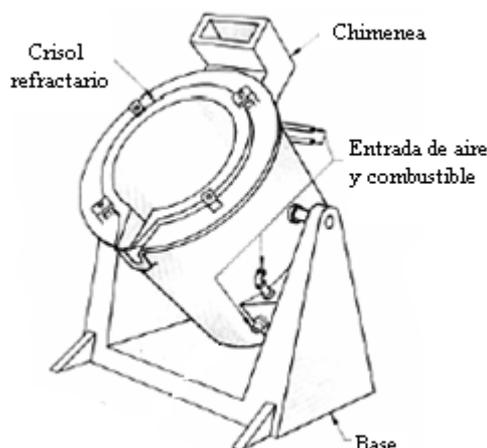


Figura 1.4: Horno basculante utilizado para la fusión y colada del metal [ASM, 1998]

**d. Solidificación y enfriamiento de la pieza:** Después de verter el metal líquido en el molde éste se enfría y se solidifica como consecuencia de la transferencia de calor entre los componentes del sistema: metal fundido - molde (conducción /convección libre/ radiación), molde y el ambiente (convección) tal y como se muestra en la figura 1.5. Los parámetros que la solidificación involucra incluyen el tiempo de enfriamiento del metal/material del molde y la contracción. Es una etapa crítica del proceso por que se generan defectos en el producto final si el diseño del proceso no es adecuado. Por lo tanto, es en esta etapa donde se considera el estudio de la solidificación direccional y el diseño de mazarotas.

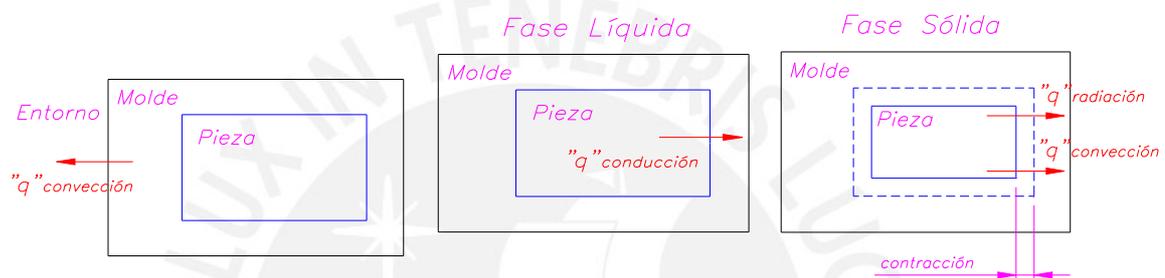


Figura 1.5: Etapas de solidificación y enfriamiento de los componentes del proceso [PONS, 2004]

**e. Desmoldeo:** A la posterior rotura del molde, extracción de la pieza y remoción de los machos de arena se denomina desmoldeo.

**f. Desbarbado y limpieza.** El desbarbado consiste en la eliminación de los conductos de colada, mazarota y rebabas procedentes de la junta de ambas caras del molde, a la vez que la limpieza superficial involucra remover la arena adherida a la superficie de la fundición y de esta manera mejorar la apariencia de la superficie.

**g. Inspección del producto:** Se necesita la inspección del producto para detectar la aparición de posibles defectos del proceso.

**h. Tratamiento térmico y maquinado de la pieza:** Finalmente, la pieza puede requerir tratamiento térmico con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas; y/o mecanizado por medio de máquinas herramientas si es que se necesita precisión en las medidas finales de la pieza para el ensamble en algún mecanismo.

### 1.1.2 Defectos del proceso de fundición:

Los defectos que se presentan en la pieza manufacturada merman la calidad del producto final, por lo tanto es necesario predecirlos para corregirlos. Estos defectos son generados en las etapas críticas del proceso de fundición, y se pueden corregir con un adecuado diseño del molde, el sistema de conductos de colada y los sistemas de mazarotas. El diseño involucra un importante número de factores como por ejemplo:

- La cavidad debe proporcionar una solidificación direccional tal que la solidificación debe progresar desde la superficie de la pieza en contacto con el molde a la parte del metal más caliente (mazarota) compensando así la contracción de solidificación y por lo tanto evitar el rechupe.
- Se debe controlar las condiciones tales como la temperatura de colada, velocidad de colada, secciones transversales de la pieza con el objeto de evitar el defecto conocido como el llenado incompleto.
- La contracción de la pieza no debe ser restringida por las paredes del molde para no provocar tensiones mecánicas en la pieza y generar el desgarramiento en caliente o la aparición de grietas en el molde de arena.

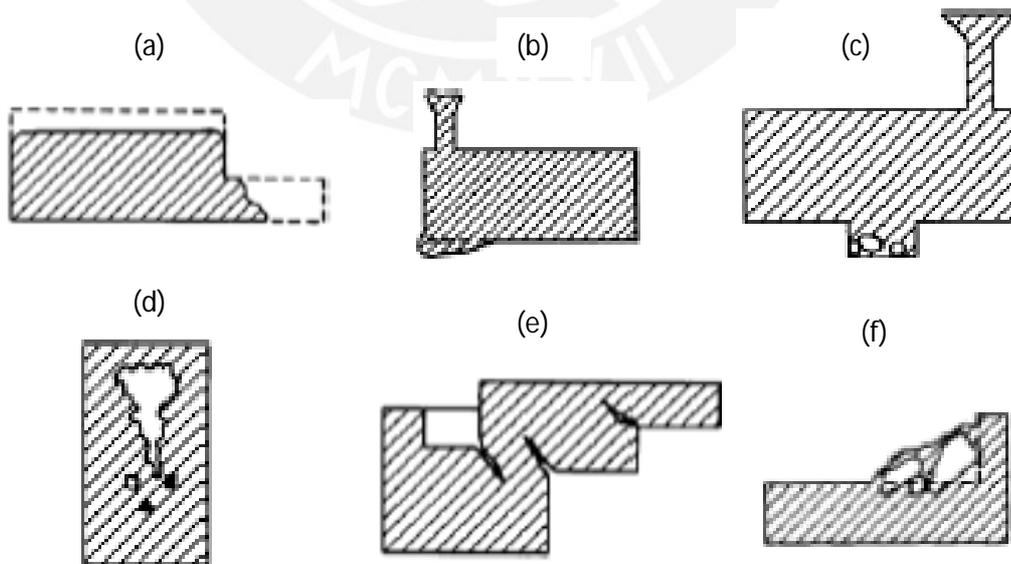


Figura 1.6: Defectos comunes: (a) Llenado incompleto (b) Erosión del molde (c) Gránulos fríos (d) Rechupe interno (e) Desgarramiento en caliente (f) Aparición de grietas [ASM,1998]

## 1.2 La simulación numérica aplicada al proceso de fundición

La simulación numérica de los procesos de fundición consiste en reproducir en un ámbito computacional las etapas importantes que involucra el proceso de fabricación de una pieza en forma real. Estas etapas son:

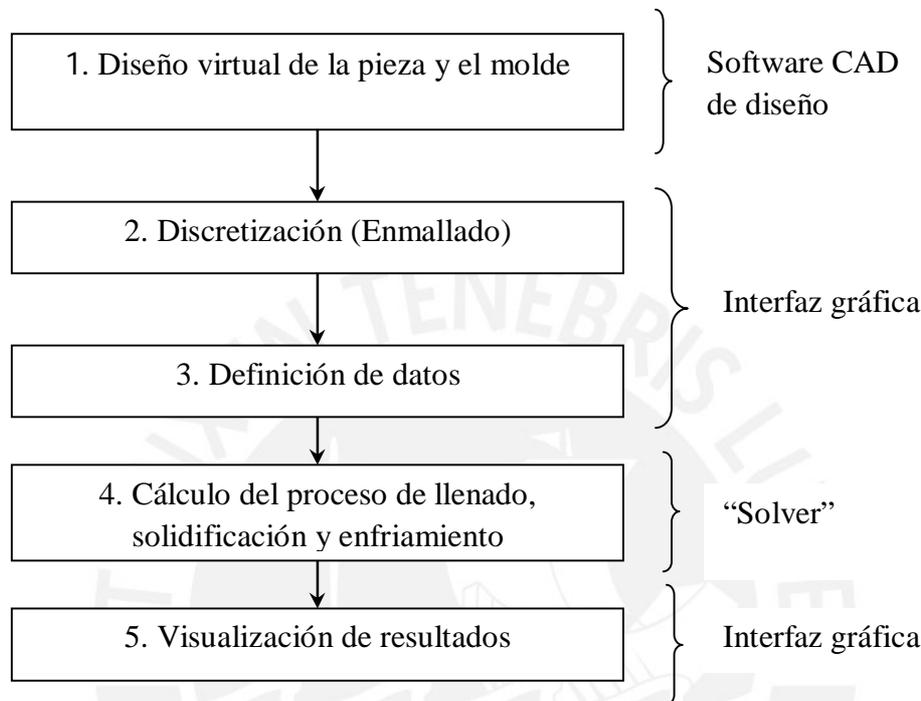


Figura 1.7: Etapas del proceso de fundición virtual

**a. El diseño y construcción del modelo virtual de los elementos del proceso de fundición (modelamiento geométrico del molde virtual y la pieza virtual),** es realizado en un software de diseño (CAD), el cual crea las entidades geométricas de los componentes tales como puntos, líneas, áreas y volúmenes. Para ello es necesario crear la geometría de cada componente del proceso, por ejemplo: molde, pieza fundida, corazón. Sistemas de llenado, etc. La gran mayoría de los programas de simulación importa la geometría de los componentes desde un software de diseño conocido con extensiones compatibles entre ambos programas, mientras que otros pocos permiten la generación de entidades desde la interfaz del programa, para lo cual es necesario aprender el manejo de las funciones para generación de geometría.

**b. Los procesos de llenado, solidificación y enfriamiento,** son calculados por un software solucionador de elementos finitos ("Solver"), el cual realiza el análisis

numérico basado en la solución de millones de ecuaciones diferenciales en los puntos de la malla de las entidades geométricas discretizadas. Para realizar la simulación de un proceso de fundición se requiere resolver ecuaciones para los modelos matemáticos del llenado, solidificación y enfriamiento. Para la mayoría de herramientas de simulación el llenado de metal líquido se fundamenta principalmente en la solución de las siguientes ecuaciones [MINGO, 2004]:

**Ecuación de balance de masa:** Describe la ley de conservación de la masa.

$$\frac{\partial \rho(T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(T)u_i)}{\partial x_i} = 0$$

**Ecuación de Navier – Stokes:** Describe el movimiento de un fluido.

$$\frac{\partial(\rho(T)u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho(T)u_i)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial p(x)}{\partial x_i} + \mu(T) \frac{\partial^2(u_i)}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{2}{3} \mu(T) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

$i = j = k = 1, 2, 3, x_i \in \Omega$

**Ecuación de Energía:** Describe la distribución del calor en una región en el transcurso del tiempo.

$$\frac{\partial(\rho(T)cT)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho(T)cT)}{\partial x_j} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} + q$$

**Ecuación de Estado:** Describe las propiedades de un fluido.

$$PV = nRT$$

**Ecuación de Difusión:** Describe el fenómeno de la difusión

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(C)}{\partial x_j} = D_g \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} + q$$

#### Glosario de términos

$u_i$  : Velocidades

$t_i$  : Tiempo

$P_i$  : Presiones

$T_i$  : Temperatura

$q_i$  : Flujo de calor

$C_i$  : Concentración de gases

$\rho(T, t)$  : Densidad

$\mu(T, t)$  : Viscosidad

$c(T, i)$  : Calor específico

$\lambda(T, t)$  : Conductividad térmica

$D_g(T, t)$  : Coeficiente de difusión

A las etapas antes mencionadas para ejecutar el proceso de fundición virtual, son añadidas otras etapas necesarias, donde se debe generar toda la información requerida para que el programa reconozca los elementos para el proceso (molde y pieza), y muestre los resultados del análisis. Estas etapas se mencionan a continuación:

**c. Discretización,** es la etapa donde es creada una malla compuesta de nodos y pequeños volúmenes de geometría muy simplificada (tetraédrica, cúbicas, etc.), la cual ocupa el volumen de la geometría inicial. Es decir se dividen las entidades geométricas iniciales en un número discreto de elementos volumétricos para evaluar las ecuaciones de acuerdo a un método numérico adoptado. Dentro de los métodos numéricos más utilizados se puede mencionar: volúmenes de control, diferencias finitas, elementos finitos, etc.

**d. Definición de datos,** en esta etapa cada software presenta una base de datos para la edición de las propiedades termo físicas de los materiales, un ambiente de trabajo para definir el tipo de proceso de fundición a simular y el tipo de operación a evaluar (llenado, solidificación). Además al finalizar esta etapa es necesario para el usuario ingresar de la forma más precisa las condiciones iniciales y de borde como los coeficientes de transferencia de calor (HTC), la permeabilidad, la velocidad de llenado, etc; debido a que estas condiciones repercuten altamente en la simulación del proceso.

**e. Visualización de resultados,** en esta etapa se realiza el manejo de los resultados, en su mayoría se desarrolla un muestreo de las variables primitivas (temperaturas, velocidades, presiones), lo cual se logra al realizar un seguimiento de las variables en los nodos de la malla creada, ello además se complementa con las animaciones del llenado del metal y el proceso de solidificación-enfriamiento de los componentes. A medida que evolucionan los resultados, la mayoría de programas desarrolla funciones de criterio para poder detectar fallas o defectos en el proceso virtual como por ejemplo el criterio de la fracción sólida o el criterio de la densidad del material.

### 1.3 Software de elementos finitos “VULCAN 8.0”

El programa “Vulcan 8.0” es un software comercial desarrollado por la empresa Quantech ATZ en colaboración con el Centro Internacional de métodos numéricos en ingeniería (CIMNE), este programa utiliza el método numérico de los elementos finitos para la solución de las ecuaciones diferenciales. Dicho método permite modelar el proceso de fundición de geometrías complejas tridimensionales, además de abordar y considerar en las simulaciones el problema termo mecánico adyacente al proceso.

El programa “Vulcan 8.0”, es una herramienta computacional compuesta por una interfaz gráfica y un software solucionador (“solver”). La interfaz es la parte del software encargada de interactuar con el usuario en cuanto a la construcción de la geometría, la adquisición de datos, la generación de la malla y la presentación de resultados, mientras que el “solver” posee la capacidad de evaluar y solucionar las ecuaciones diferenciales generadas por el método de los elementos finitos en cuanto a los problemas de llenado, solidificación y enfriamiento. “Vulcan” utiliza la interfaz GID y el “solver” COMET, los cuales crean y comparten archivos para realizar la simulación del proceso.

En conclusión, el software “Vulcan 8.0” es una interfaz de usuario gráfico-interactivo usada para la definición, preparación, visualización y análisis de todos los datos relacionados a la simulación numérica de un proceso de fundición [CIMNE, 2000]. Para esto, el manejo de los datos se realiza en tres etapas diferenciadas:

Primera etapa:	<b>Pre – procesamiento de los datos</b>
Segunda etapa:	<b>Procesamiento o análisis de los datos</b>
Tercera etapa:	<b>Post – procesamientos de los datos</b>

#### 1.3.1 Pre – procesamiento de datos

En esta etapa inicial se utiliza la interfaz del Vulcan para construir la geometría, definir los datos y generar el enmallado; esta interfaz está compuesta de ventanas, íconos, menús, entradas de textos y una amplia área gráfica para el dibujo, y puede ser configurada por el usuario con el objetivo de usar tantos menús y ventanas como

requiera la aplicación. En la figura 1.8, se detalla gráficamente la distribución de la interfaz del Vulcan 8.0 para el procesamiento de datos.

La barra de menús posee las opciones necesarias para el desarrollo del proyecto, e incluye las opciones de las demás barras mostradas en la pantalla mediante iconos, por lo tanto permite la construcción de geometrías a través del menú **“Geometría”**, o la importación de geometrías a través del menú **“Archivo”**. Para la importación es necesario que el documento importado haya sido grabado en el software de diseño como un tipo de archivo compatible con el Vulcan. En la figura 1.9, se muestra las opciones para la importación, donde resalta la extensión IGES, además de las opciones del menú archivo, las cuales son en su mayoría para el manejo del proyecto (Nuevo, Abrir, Guardar como, Importar, Imprimir, etc.).

Para terminar esta introducción es necesario recalcar la importancia de la ventana de mensajes en el uso de las diversas opciones del Vulcan. Esta ventana se activa inmediatamente después de activar cualquier opción de la interfaz y guía al usuario en el uso adecuado de la opción seleccionada.

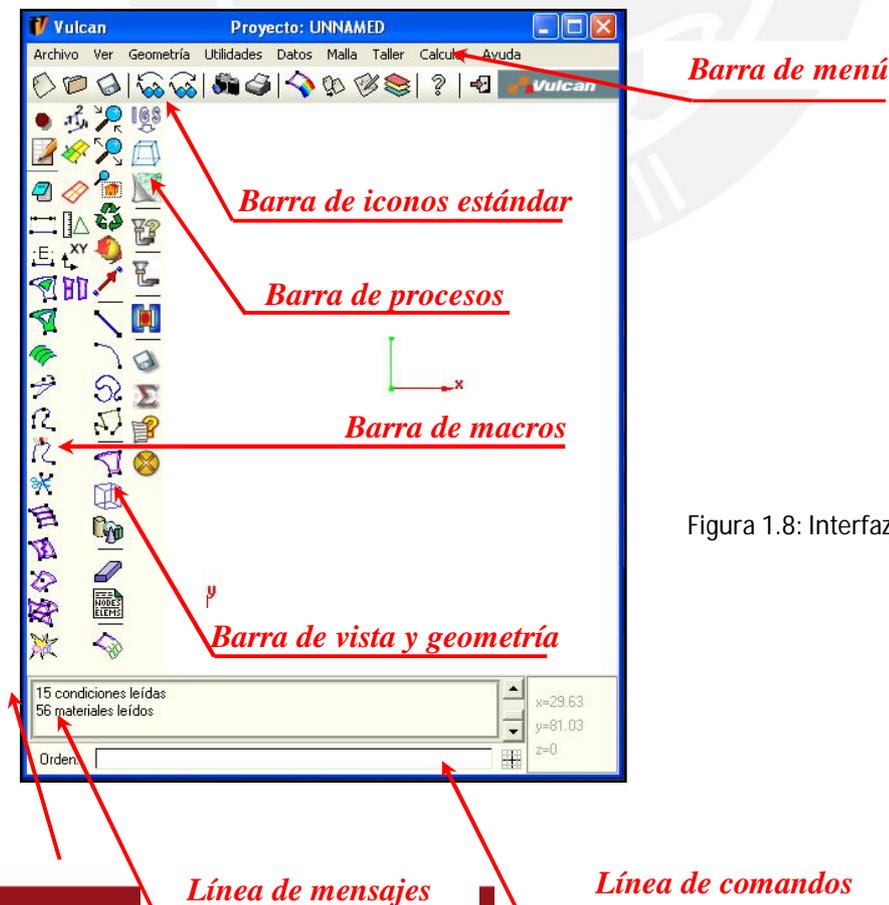


Figura 1.8: Interfaz del Vulcan 8.0

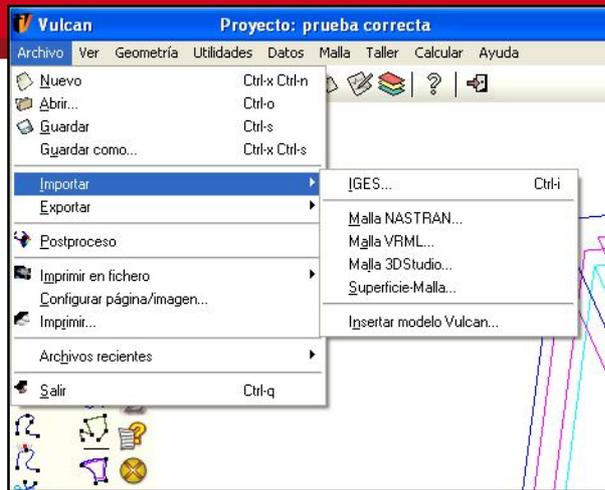


Figura 1.9: Menú Archivo

### 1.3.1.1 Construcción de la geometría mediante el Vulcan 8.0

Los volúmenes de las entidades se pierden en la importación de la geometría y debido a que el “solver” necesita volúmenes para la aplicación del método de los elementos finitos, es necesario reconstruir dichos volúmenes luego de la importación (volumen de la pieza y volumen del molde), para ello previamente es necesario generar la superficie de entrada del metal líquido (agujero para colada). Esta opción se encuentra dentro del menú “**Geometría**” como se observa en la figura 1.10.

En la figura 1.10, además se muestra la diferenciación de las entidades geométricas en la interfaz del programa mediante colores (puntos negros, líneas azules, superficies lilas, volúmenes celestes). Esta diferenciación es producto de la jerarquización de las entidades geométricas por parte del Vulcan, esto significa que una entidad de más alto nivel es construida sobre entidades de menor nivel. Por ejemplo: una línea tiene dos entidades de menor nivel (puntos), cada uno a los extremos de la línea. Si dos líneas están compartiendo un extremo, están realmente compartiendo el mismo punto, el cual es una entidad única [CIMNE, 2000].

Como se observa en los ejemplos, “Vulcan” se basa en los siguientes 4 niveles de entidades geométricas: puntos, líneas, superficies y volúmenes. De esta manera, para construir la geometría con “Vulcan”, en primer lugar se deben definir puntos, juntarlos para formar líneas, crear superficies cerradas a partir de las líneas y definir volúmenes cerrados con las superficies.

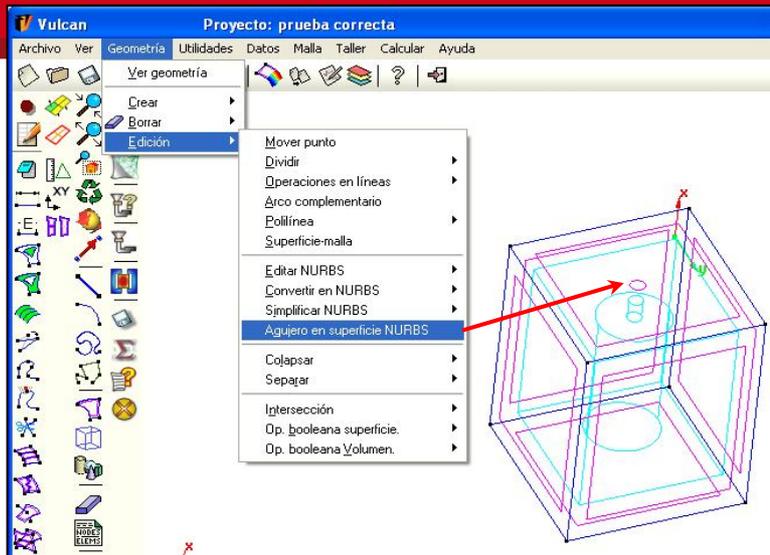


Figura 1.10:  
Creación de agujero  
en la superficie del  
molde

El programa ofrece muchas otras opciones para la creación, visualización y manejo de los campos geométricos, estas incluyen: copiar y mover entidades, crear macros y animaciones, configurar la posición de las barras de herramientas, configurar el ambiente de trabajo y el uso de capas o “layers”.

En la figura 1.11 se muestra la ubicación de la opción “Capas”. Una primera aplicación de esta opción se realiza antes de la importación de la geometría y consiste en crear las capas y asignar los elementos geométricos correspondientes a cada una (Capítulo 3, página 55). En adelante esta opción se usa a través del proceso como por ejemplo en la reconstrucción de los volúmenes (Capítulo 3, página 57).

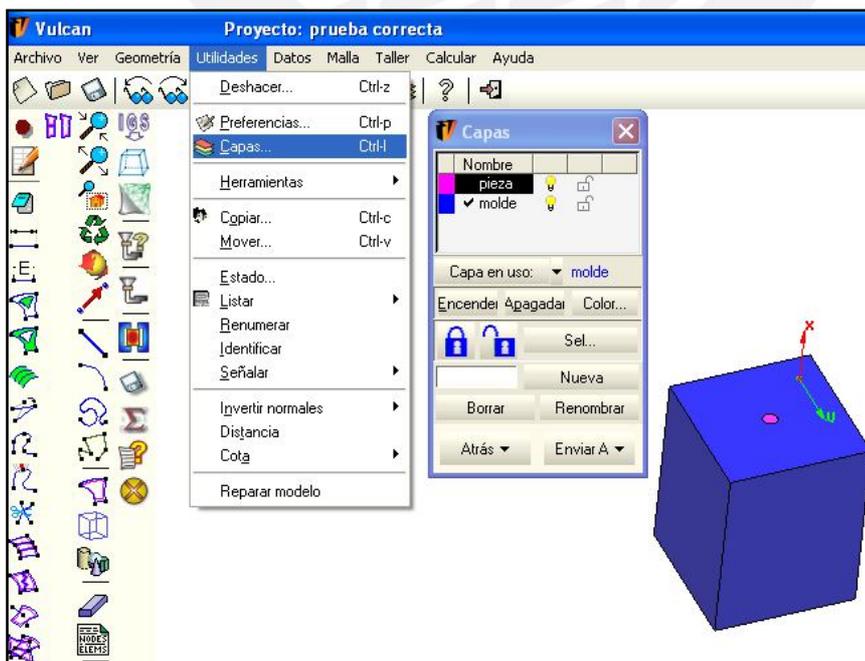


Figura 1.11:  
Utilización de capas  
o “layers”

### 1.3.1.2 Discretización mediante Vulcan 8.0

Vulcan usa el parámetro tamaño del elemento volumétrico para realizar el enmallado de los componentes. El tamaño del elemento está dado por el lado promedio del correspondiente elemento. Estos lados pueden resultar triángulos o cuadriláteros dependiendo del tipo de elemento. El software “Vulcan” dispone de los siguientes tipos de elementos [CIMNE, 2000]:

Lineales: Para líneas

Triangulares y cuadrilaterales: Para superficies

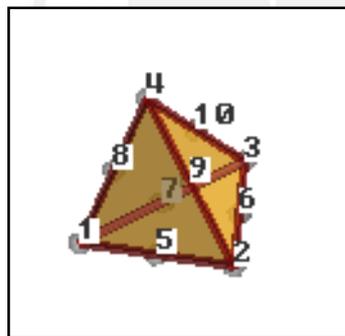
Tetraédricos y hexaédricos: Para volúmenes

Sólo Puntos: Sólo para volúmenes

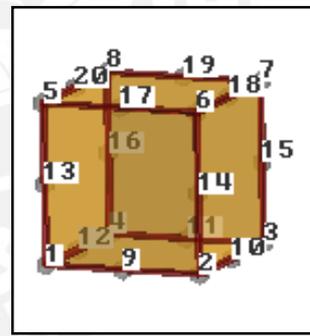
Lineales y cuadrilaterales: Para superficies en contacto

Lineales, Prismáticos y hexaédricos: Para volúmenes de contacto

En la figura 1.12 se visualizan dos tipos de elementos para entidades volumétricas.



Elemento tetraédrico de 10 nodos



Elemento hexaédrico de 20 nodos

Figura 1.12: Tipos de elementos finitos del Vulcan 8.0

Cada elemento está compuesto por nodos. El mayor número de estos nodos en un elemento indican un mayor orden o grado y por lo tanto mayor precisión en el enmallado y en los resultados.

Dentro de las opciones del programa para la generación del enmallado, Vulcan presenta una opción de autogeneración de malla o creación de una malla por defecto, esta opción asigna al elemento un tamaño calculado automáticamente por el software según las dimensiones de la pieza, ó el último tamaño dado por el usuario a un

enmallado previo. El usuario puede escoger el tamaño de elemento por defecto o asignar tamaños de elementos a las diferentes entidades geométricas según desee obtener mayores concentraciones de elementos en las piezas, esto se logra con la ayuda de la opción **“No estructurada”** del menú **“malla”**. Otra opción interesante que este menú presenta para geometrías complejas donde existan dimensiones variadas de los componentes, consiste en asignar **“tamaños de elementos por error cordal”**, para lo cual el programa exige un máximo y mínimo tamaño de elemento y un error cordal (la máxima distancia entre el elemento generado y la geometría real), de esta manera se logra que el enmallado se ajuste a la geometría. Estas opciones se muestran en la figura 1.13.

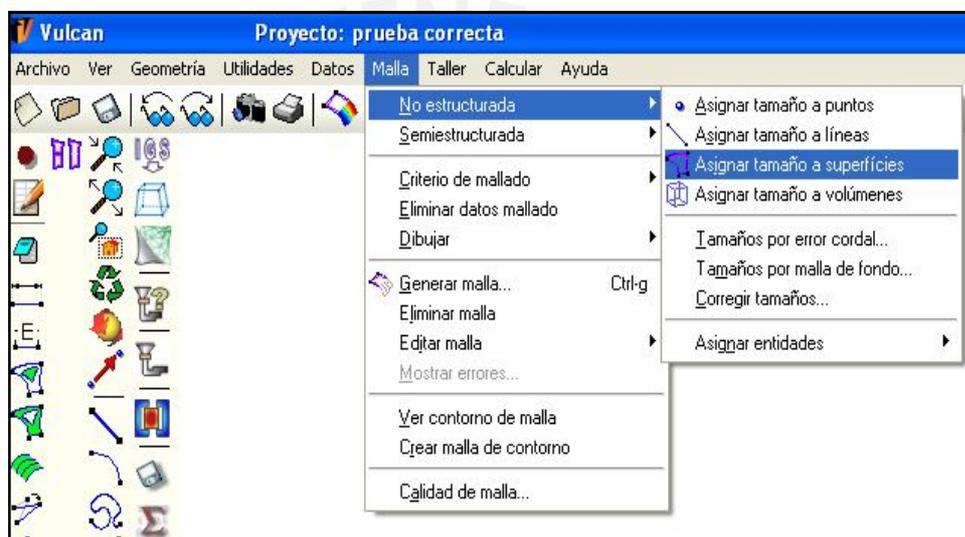


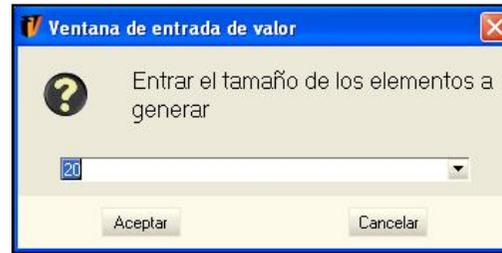
Figura 1.13: Opciones importantes para el enmallado en Vulcan

Una vez realizado el paso anterior, el avance en el enmallado es mostrado por una barra de progreso que indica el número de superficies o volúmenes generados relativos al número total de superficies o volúmenes, inmediatamente después aparece una ventana de comprobación del final del enmallado, la cual además indica la cantidad de nodos y elementos generados. Esta cantidad define la fineza de la malla, es decir mientras más fina la malla, más pequeños los elementos volumétricos, por lo tanto se obtiene más precisión en la simulación aunque el tiempo para el cálculo se incrementa. En conclusión para realizar un buen enmallado, se debe contrastar la fineza de la malla con el tiempo que toma el cálculo de la misma.

El proceso de generación de malla se visualiza en la figura 1.14, donde además se contrasta entre la imagen (e) y (f) dos enmallados con diferente tamaño de elemento.



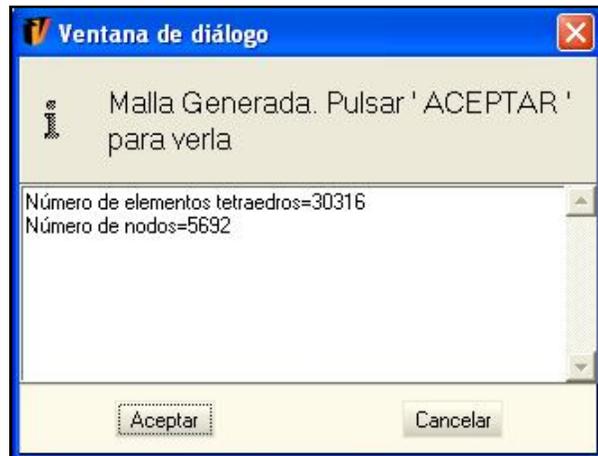
(a)



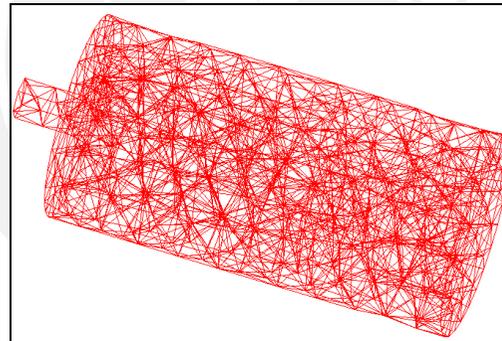
(b)



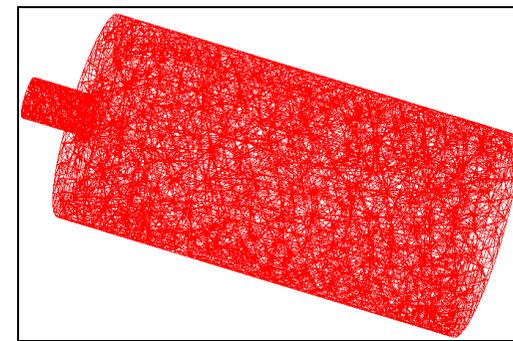
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 1.14: Pasos para realizar el enmallado en Vulcan 8.0 – (a) Menú malla (b) Ventana de ingreso para el parámetro tamaño de elemento (c) Progreso del enmallado (d) Fin de enmallado (e) Malla con tamaño de elemento = 20 mm (f) Malla con tamaño de elemento = 8 mm

### 1.3.1.3 Definición de datos en el Vulcan 8.0

Vulcan 8.0 posee un taller de trabajo con el objetivo de guiar al usuario a través de esta etapa del programa. Este taller está dividido en tres módulos, los cuales se pueden hallar en el menú Taller y se observan en la figura 1.15. El taller de trabajo permite seleccionar valores para el ingreso de propiedades desde la base de datos, ingresar y seleccionar valores o condiciones del problema o asignar datos a la geometría a través de las capas.

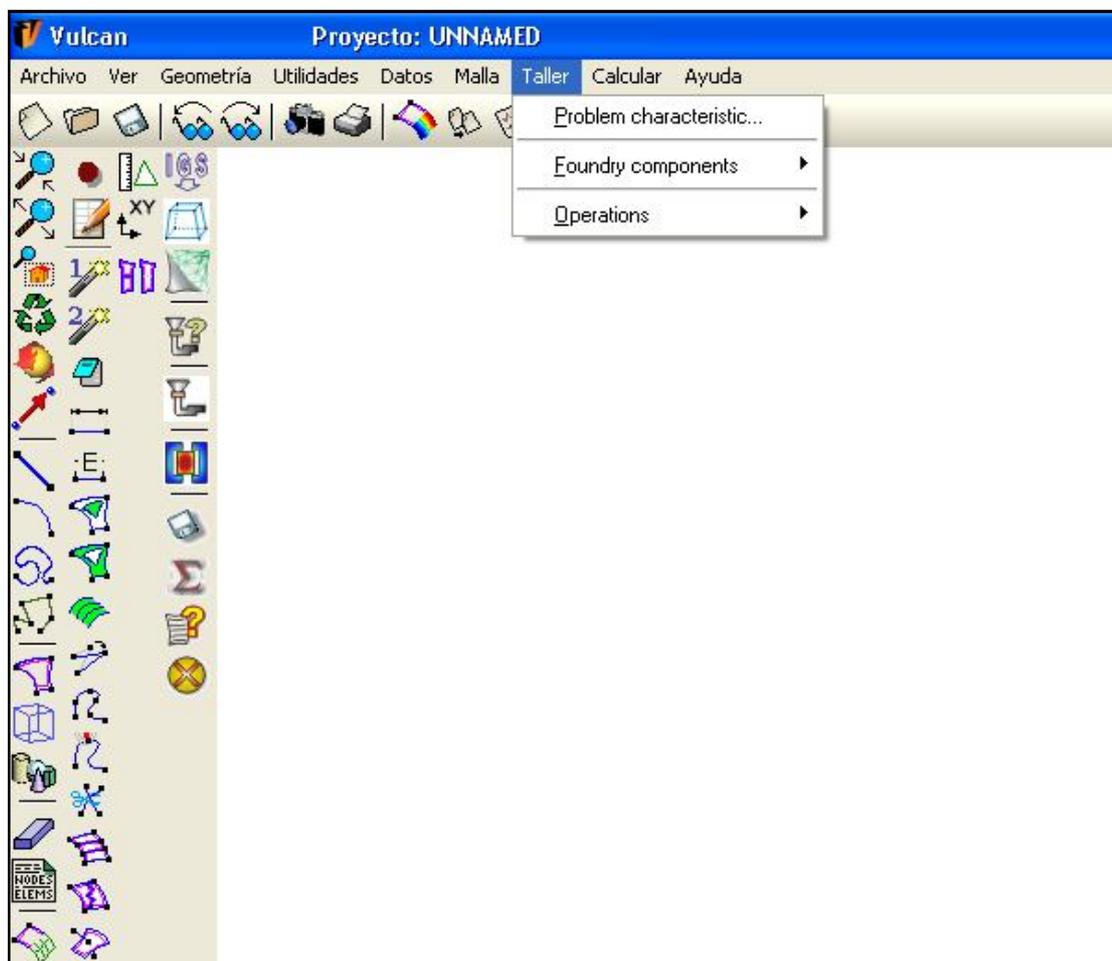


Figura 1.15: Módulos del Vulcan para la definición de datos

El módulo 1, definición de las características del problema, se muestra en la figura 1.16, este módulo se encuentra dividido en tres secciones que se activan a través de pestañas. La primera pestaña, “**Tipo de proceso**”, permite elegir el procedimiento de colada: colada por gravedad, colada a baja presión y colada a alta presión.

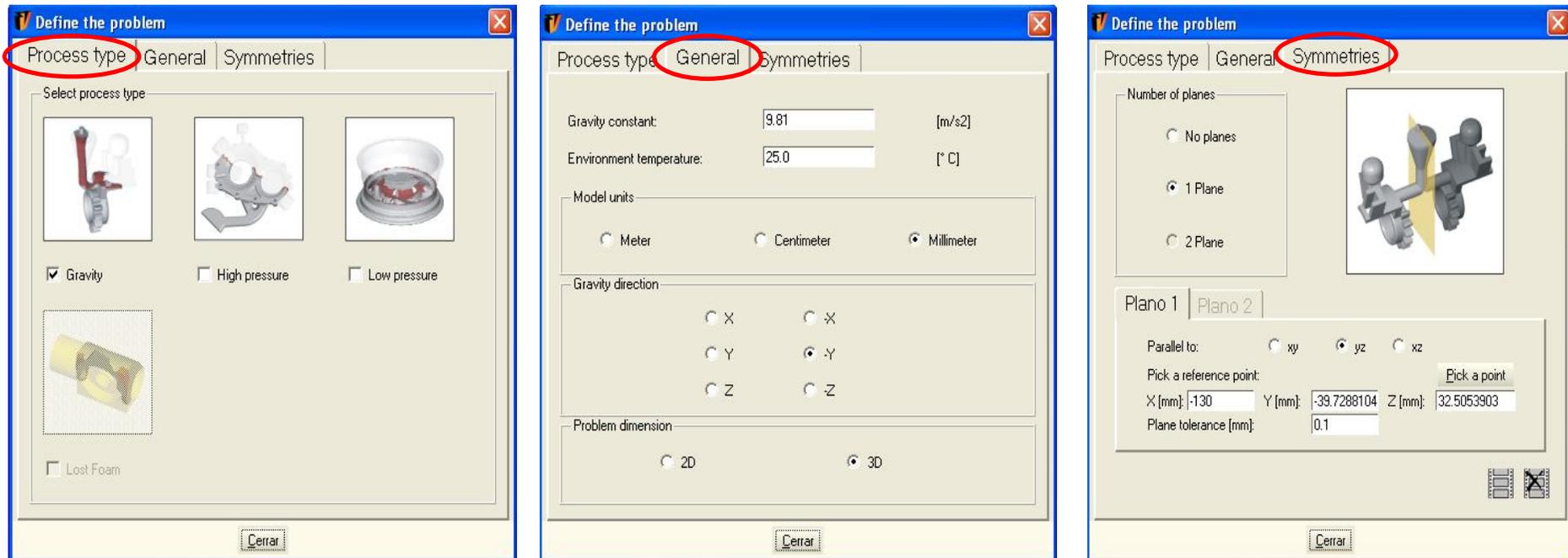


Figura 1.16: Módulo para definición del problema (Pestañas Tipo de Proceso/General/Simetrías)

Inmediatamente después de elegir el tipo proceso, el programa actualiza el taller y adecua las opciones del tercer módulo según el proceso seleccionado.

La pestaña “**General**”, permite ingresar o editar condiciones generales del problema tales como parámetros que influyen de manera externa al proceso, por ejemplo: el módulo y dirección de la gravedad, la temperatura del ambiente; o características que definen la geometría como las dimensiones y unidades del dibujo.

Es importante mencionar que para definir y seleccionar la dirección de la gravedad se debe visualizar la dirección de los ejes principales (X, Y, Z) en la interfaz y constatar en la geometría la dirección del llenado. En la mayoría de los casos el software automáticamente localiza el agujero de entrada y asume la gravedad con una dirección normal a dicho agujero.

La pestaña “**Simetría**”, permite acelerar la simulación al analizar la pieza dividida en dos planos de simetría y no la pieza completa, lo cual retardaría el proceso de cálculo. Esta pestaña propone la elección de hasta dos planos de simetría de la pieza paralelos a los ejes principales, y para lo cual requiere la señalización de un punto en las entidades geométricas.

El módulo 2, definición de los componentes de la fundición, en primer lugar reconoce las capas disponibles creadas anteriormente, con el objetivo de que el usuario asigne a que capa corresponde cada componente de la fundición, para esto es necesario utilizar las flechas (◀▶) e inmediatamente las capas disponibles son modificadas de disponibles a asignadas. Si es necesario se crean nuevos componentes dentro del módulo. El módulo crea y elimina componentes a través de los iconos inferiores etiquetados con los símbolos “+” y “-“. Por ejemplo, como se observa en la figura 1.17, inmediatamente después de seleccionar el icono “+” aparece una ventana para seleccionar un tipo de componente según el usuario requiera (parte, molde, corazón, sistema de llenado o portadas, sistema de alimentación o mazarotas, filtro). A medida que el usuario agrega componentes, éstos se pueden visualizar al lado izquierdo del módulo lo cual significa que cada componente está listo para la asignación de capas y selección de materiales. Vulcan utiliza una base de datos de materiales según el tipo de componente a seleccionar o

permite crear nuevos materiales con la opción “Nuevo/ Editar”. Para ambos casos los materiales son definidos a través de propiedades.

Las propiedades de la base de datos de materiales está organizada como se muestra en la figura 1.18, es una ventana dividida en pestañas etiquetadas por el tipo de propiedades del material (de fluidos, térmicas, mecánicas, de cambio de estado).

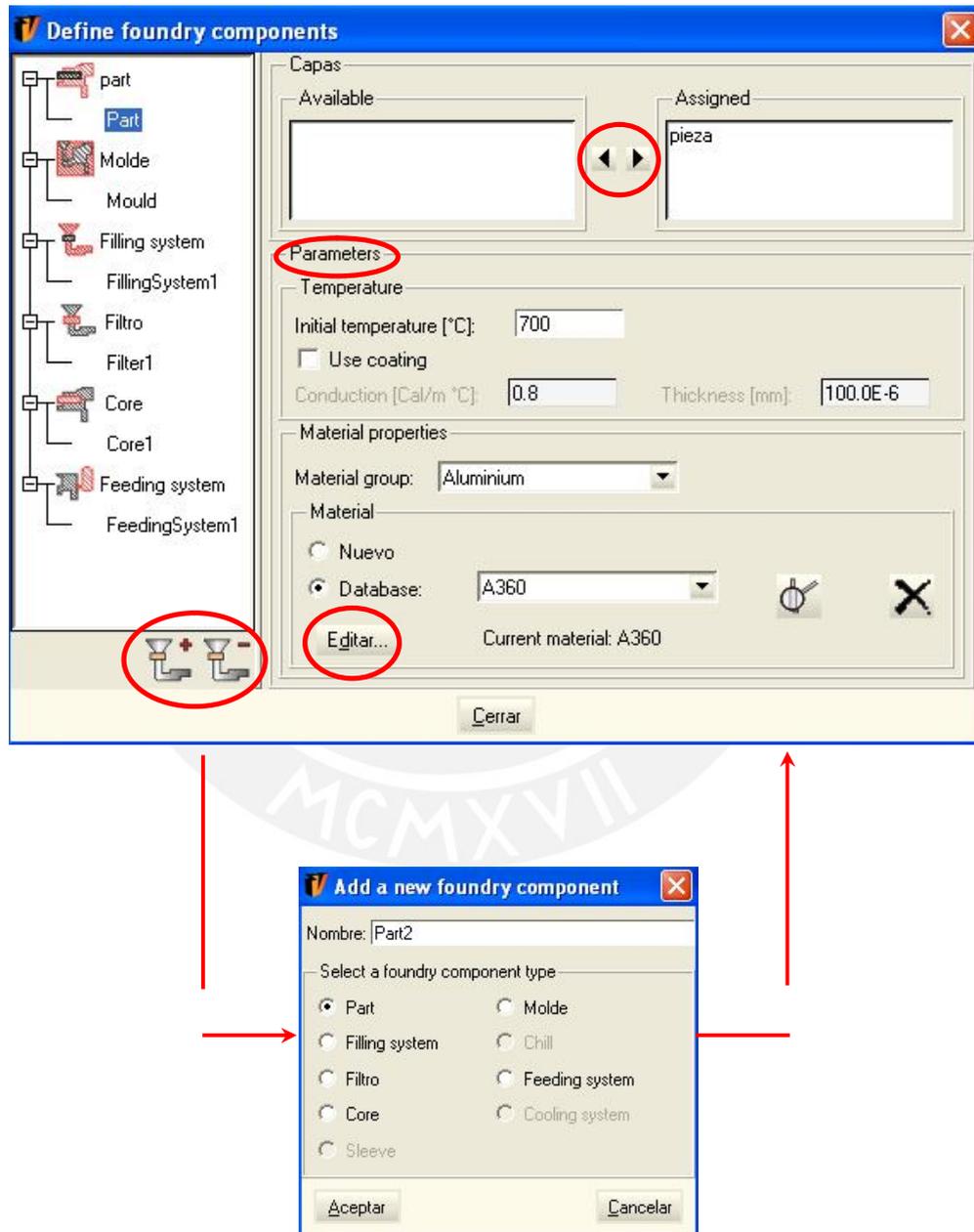


Figura 1.17: Asignación de nuevos componentes de la fundición en el Módulo para la definición del material

El módulo separa las propiedades dependientes de la temperatura y genera una tabla y una gráfica de la función, en caso contrario si se trata de una propiedad independiente, aparece un recuadro con el valor de propiedad.

Si se desea usar los materiales de la base de datos, los valores de los recuadros y tablas son automáticamente completados, por lo tanto solo se necesita editar los recuadros de parámetros situados en la parte media del módulo.

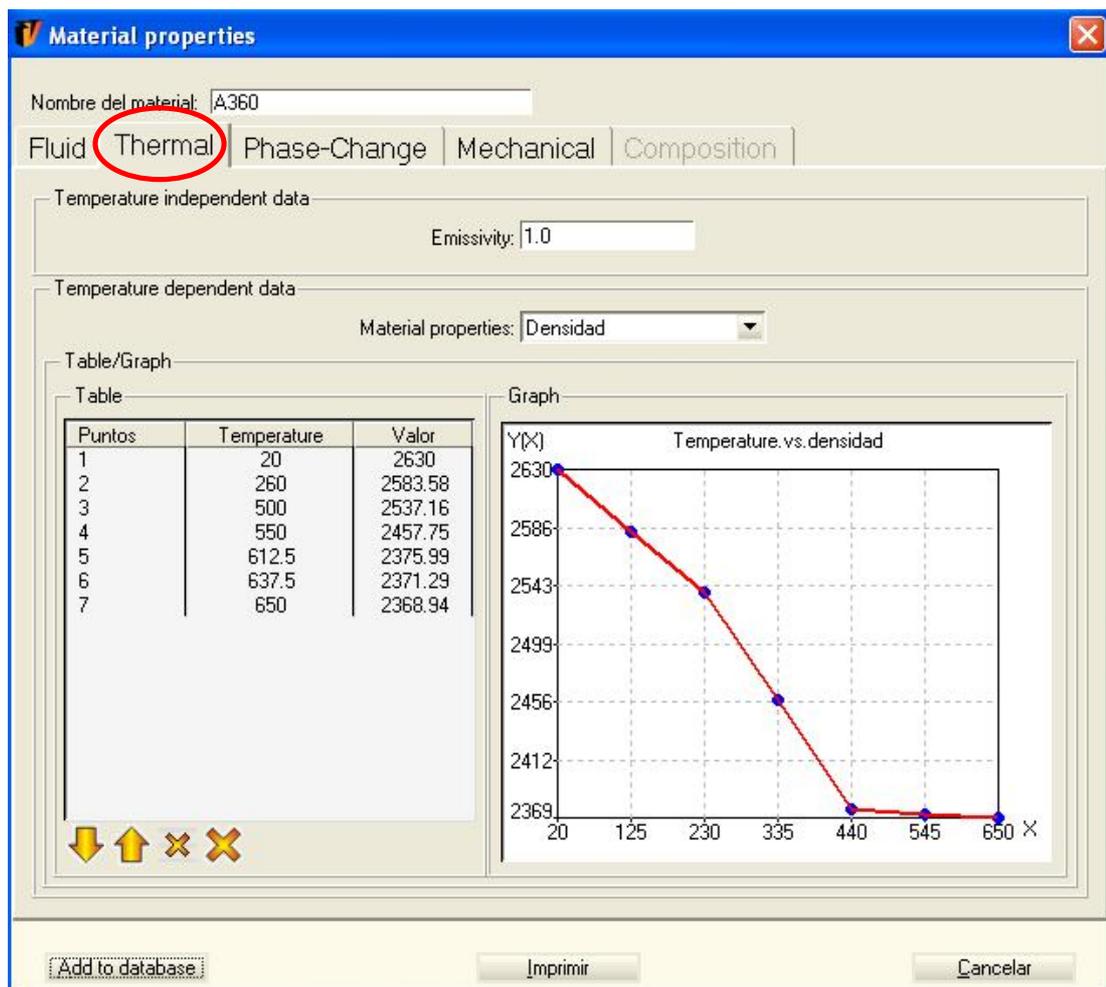


Figura 1.18: Ventana para la edición de las propiedades del material

Se considera “**parámetros**” a la temperatura inicial del material y al posible uso de un recubrimiento protector. En teoría la Temperatura inicial es una condición inicial referida a la temperatura de vaciado para la pieza, y para el molde es posible considerarla como la temperatura de ambiente o un valor menor alrededor de ella. El “coating” [MINGO, 2004] o recubrimiento es una capa líquida que se aplica al

molde para disminuir el efecto de los colapsos térmicos y como consecuencia el rompimiento del molde, además en el caso de fundición con molde permanente esta capa facilita la extracción de la pieza. Por lo tanto esta condición permite simular el efecto térmico de este recubrimiento a partir del espesor y la conductividad térmica del recubrimiento.

Es importante considerar que la temperatura de vaciado es la temperatura del metal fundido al instante de iniciar el vertido en el molde y existe una diferencia con la temperatura de la pieza al inicio de la solidificación (llamada temperatura liquidus en una aleación y punto de fusión en un metal puro). Por lo tanto se debe ingresar como temperatura de vaciado un valor superior a la temperatura de fusión o liquidus. Para esto, un valor de la temperatura de inicio de la solidificación bastante útil y fácil de observar se encuentra en la base de datos del Vulcan, a través de la siguiente ruta Módulo Definición de Materiales/Editar.../pestaña Cambio de fase.

El módulo 3, definición de la operación, consta de 3 sub -módulos: sub -módulo de llenado, sub-módulo de Solidificación Térmica y sub-módulo de Solidificación Termo mecánica (Ver Anexo A). Estos módulos son usados en pares según el análisis que el usuario requiera (Análisis Térmico ó Análisis Termo mecánico) y siempre está incluido el sub-módulo de llenado. Al igual que en el anterior módulo, se sigue el mismo proceso para añadir una nueva operación. Al hacer clic en el icono “+”, aparece una ventana con opciones para elegir el tipo de operación a añadir.

En el software Vulcan 8.0 mediante la simulación del llenado del molde se puede predecir [QUANTECH, 2007]:

- Evolución del frente de avance del metal líquido
- Distribución de la velocidad durante el llenado
- Distribución de la presión en los conductos de llenado y en las superficies del molde
- Pérdida de temperatura y posible solidificación durante el llenado.

En la figura 1.19, se detalla el sub módulo de llenado, que igual a los otros sub módulos es una ventana dividida en pestañas etiquetadas de la siguiente manera: **“Componentes de la fundición”/ “Estrategia”/ “Contactos”/ “HTC Ambiente”/**

“**Salida Especial**”. Es necesario mencionar que el contenido de algunas pestañas difiere según el tipo de operación a realizar por el usuario.

El sub-módulo de llenado permite modelar el llenado con o sin molde, para esto en primer lugar se deben habilitar desde las capas disponibles, las capas con el nombre de los componentes de la fundición que el usuario desea simular, con la ayuda de los iconos (◀▶), tal y como se muestra en la figura 1.19.

Los parámetros que definen la etapa del llenado en el proceso de fundición se editan en las pestañas “**Estrategia**” y “**Contactos**”. En la parte superior del sub-módulo, el usuario debe elegir el parámetro que rige la velocidad de llenado.

- “Flow Rate” (Tasa del flujo): Primera opción que permite al usuario ingresar el valor del flujo en  $\text{dm}^3/\text{s}$ . Mediante la ecuación de la continuidad de la masa, se obtiene el parámetro velocidad de llenado.

$$\dot{Q} = v \cdot A$$

$\dot{Q}$ : Caudal o flujo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $v$ : Velocidad  
 $A$ : Sección transversal

- “Filling Time” (Tiempo de llenado): Opción que define la velocidad de llenado del molde mediante el ingreso de un valor para el tiempo de llenado en segundos.

$$\dot{Q} = \frac{V}{t}$$

$V$ : Volumen ( $\text{m}^3$ )  
 $t$ : Tiempo (s)

- “By gravity”: Mediante el uso de esta opción el programa asume a la gravedad como parámetro regulador de la velocidad de llenado. El usuario no necesita ingresar ningún valor, debido a que la gravedad ya fue ingresada en el primer módulo/ Pestaña General. Esta opción se utiliza con frecuencia en los procesos de colada por gravedad.

$$\vec{v} = c \sqrt{2gH_{ef}}$$

$\vec{v}$ : Caudal o flujo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $c$ : Coeficiente empírico  
 $H_{ef}$ : Altura efectiva de llenado (m)

[SANDOVAL,1989]

Como se mencionó previamente, este sub módulo permite simular la evolución de la temperatura a través del proceso de llenado, para esto en la siguiente pestaña **“Contactos”**, el programa reconoce el contacto existente entre el molde y la pieza (metal fundido) en el proceso, y propone una ventana para la edición de los valores de los coeficientes de transferencia de calor (HTC), tanto para la conducción como para la convección. De esta manera se pretende simular la transferencia de calor entre la interfaz molde – pieza, el valor de HTC de conducción es usado en la etapa de llenado en donde el metal se encuentra en fase líquida, mientras que el valor HTC de convección es usado en la etapa de solidificación, al producirse la contracción de la pieza solidificada y son generados espacios de aire.

Mediante la siguiente pestaña **“HTC Ambiente”** el programa evalúa automáticamente las transferencias de calor de los componentes de la fundición con el ambiente. Entre el molde y el ambiente el calor es transferido por convección, por lo tanto el valor del coeficiente es constante y depende del material.

Finalmente en la pestaña **“Salida Especial”** el programa representa la frecuencia para generar información de post-proceso. En el caso de la figura 1.19, por cada 1% de llenado, un archivo de post proceso es generado para su posterior visualización. El sub-módulo de Solidificación Térmica (Etapa de solidificación-enfriamiento) permite el ingreso de los datos para que el solucionador pueda calcular [QUANTECH, 2007]:

- Evolución de la temperatura durante la solidificación de la pieza fundida dentro del molde.
- Predicción de “puntos calientes” durante el proceso de solidificación, causa de posibles defectos.
- Tiempos de solidificación en todos los puntos de la pieza.
- Evolución de la fracción sólida
- Tiempos de desmolde, permitiendo una simulación del enfriamiento de la pieza al aire libre o bien usando cualquier otro tipo de tratamiento térmico.
- Estimación de los tiempos de enfriamiento

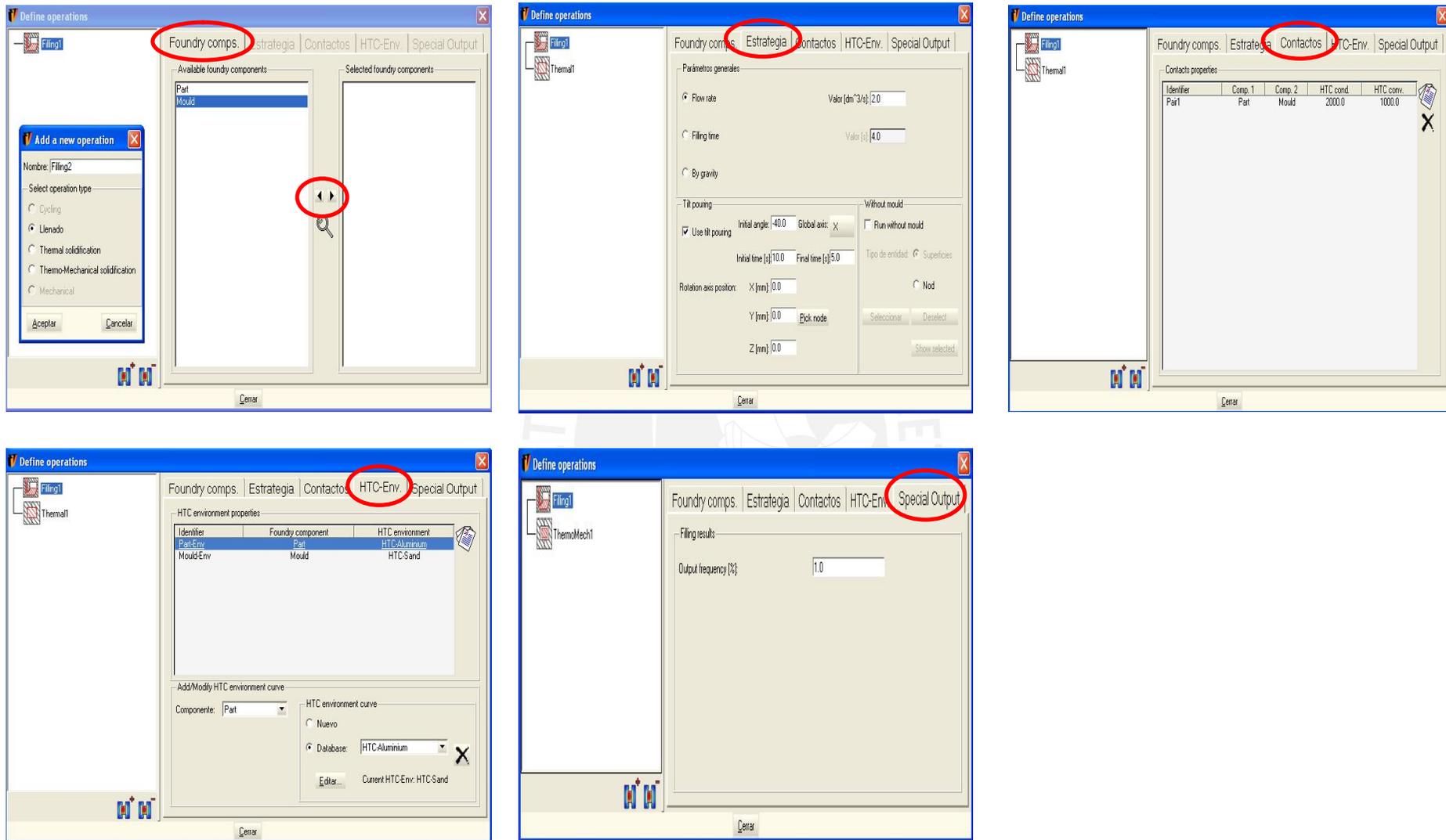


Figura 1.19: Sub-módulo de llenado (Pestañas Componentes de fundición/Estrategia/Contactos/HTC Ambiente/Salida Especial)

Para lograr estos objetivos, el sub- módulo posee algunas pestañas con contenido diferente al sub-módulo de llenado, específicamente las pestañas **“Estrategia”/“Salida especial”**. Como se muestra en la figura 1.20, en primer lugar la pestaña **“Estrategia”**, ubicada en la zona de Parámetros Generales, pregunta al usuario si desea simular el proceso de desmolde, además de permitir la elección de los componentes para dicha operación. Inmediatamente después el módulo requiere el criterio para finalizar el proceso o los procesos (si el Proceso de desmolde es activado). Las opciones viables para el usuario son el Tiempo o Temperatura de la pieza fundida.

En la pestaña **“Salida Especial”**, mostrada en la figura 1.21 deben ser seleccionados los resultados y la frecuencia de salida de los archivos de resultados para visualizar posteriormente en el post-procesamiento.

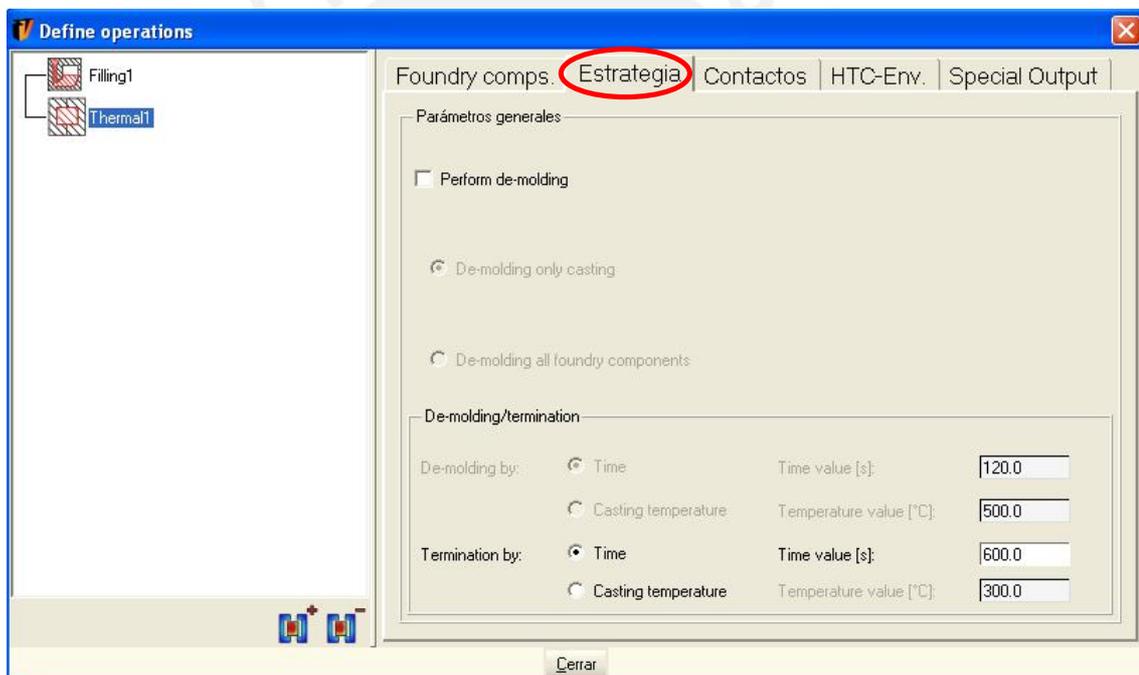


Figura 1.20: Pestaña Estrategia del Sub-módulo de Solidificación Térmica

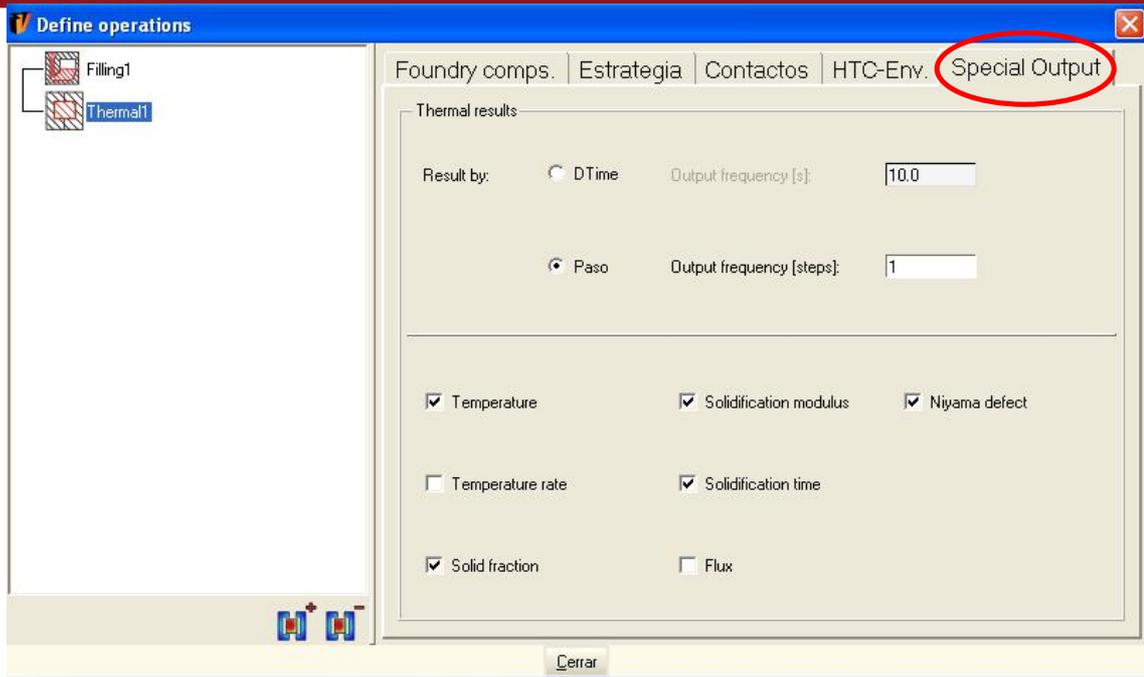


Figura 1.21: Pestaña Salida Especial del Sub-módulo de Solidificación Térmica

### 1.3.2 Procesamiento o Análisis de datos

Vulcan posee dos módulos de simulación: un primer módulo de cálculo fluido-dinámico (CFD) para la simulación del proceso de llenado de moldes y un segundo módulo termo-mecánico acoplado (CTM) para los análisis de solidificación y enfriamiento de las piezas. En la figura 1.22 se muestran ambos módulos.

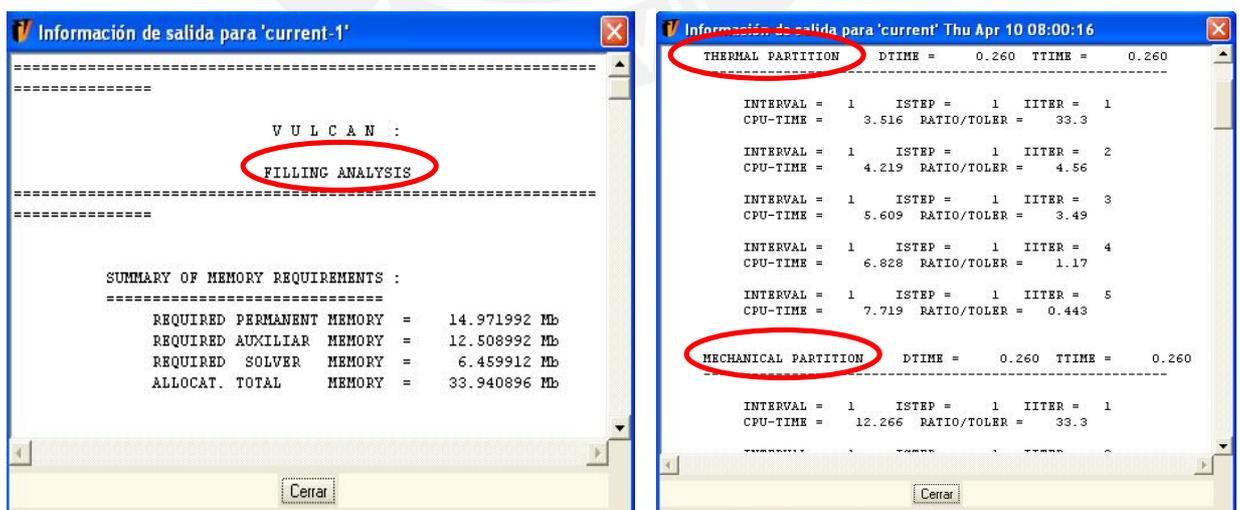
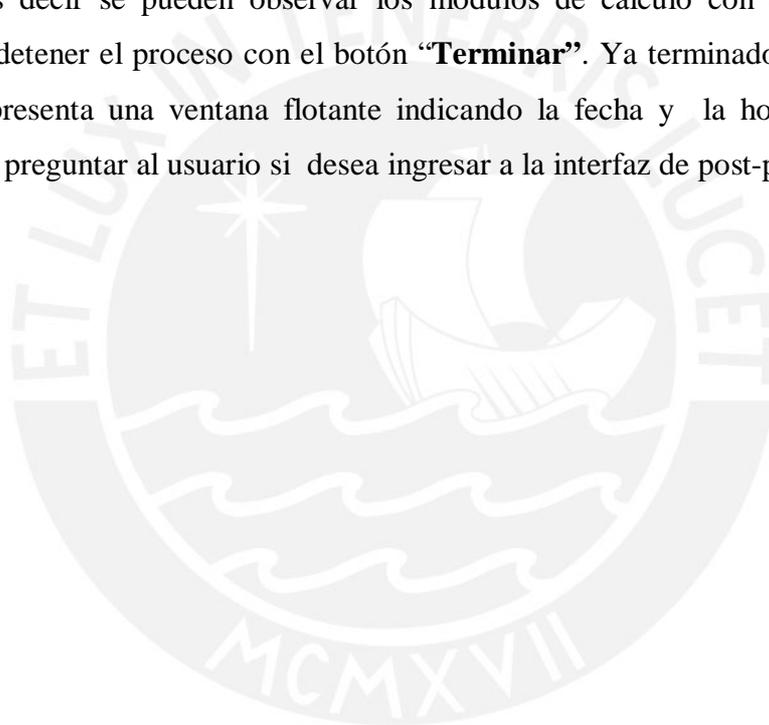


Figura 1.22: Módulos del Vulcan para el cálculo del proceso

El primer paso para activar esta opción, es ingresar a través del menú **“Calcular”** como se muestra en la figura 1.23 inmediatamente después una ventana aparece en la pantalla. Dicha ventana permite seleccionar las operaciones a calcular y la precisión del solucionador. Las simulaciones pueden ser hechas con mayor o menor precisión, se debe señalar que al incrementar la precisión, el cálculo tomará más tiempo para finalizar.

El menú **“Calcular”** también permite acceder a la Ventana de procesos Esta ventana muestra el estudio que se lleva a cabo además de permitir el control sobre proceso de cálculo, es decir se pueden observar los módulos de cálculo con el botón **“Ver salida”** o detener el proceso con el botón **“Terminar”**. Ya terminado el proceso, el software presenta una ventana flotante indicando la fecha y la hora de término, además de preguntar al usuario si desea ingresar a la interfaz de post-procesamiento.



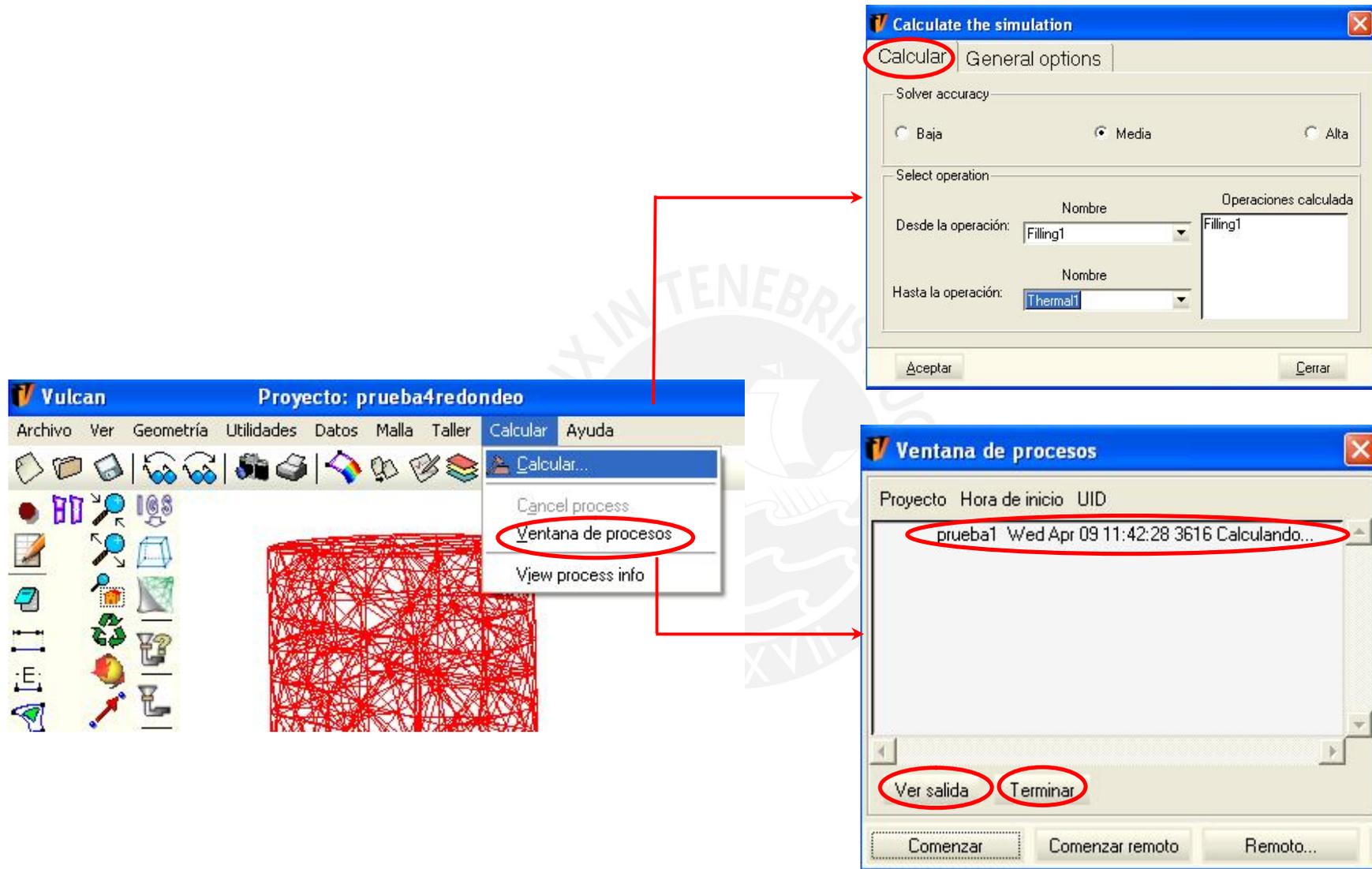


Figura 1.23: Menú Calcular

### 1.3.3 Post - Procesamiento de datos

En esta etapa final, Vulcan usa la interfaz GID y presenta una forma fácil de visualizar los resultados permitiendo al usuario evaluarlos e interpretarlos de forma muy eficiente. El estudio de los resultados de la simulación se puede realizar visualizando gráficas y mapas de evolución de las principales variables del problema en cada instante del análisis.

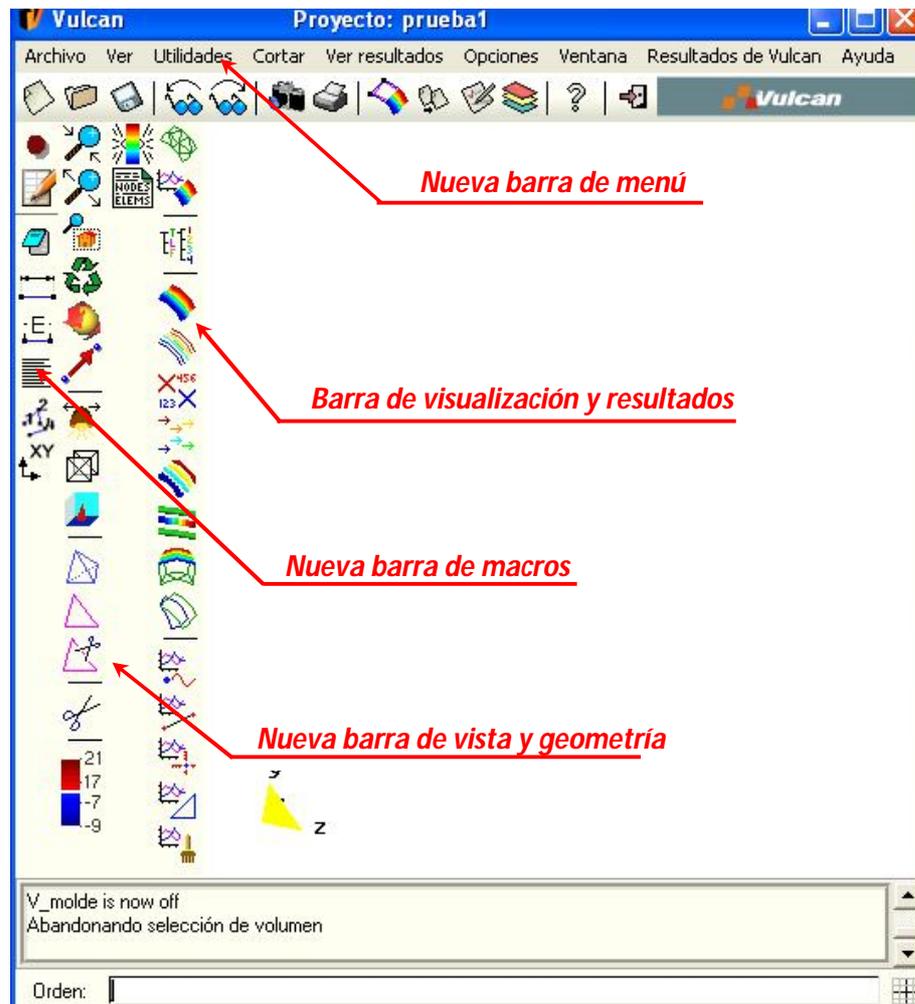


Figura 1.24: Interfaz para el post-procesamiento

De la misma manera es posible estudiar el problema en el interior de las piezas mediante cortes y secciones. La información post-procesada puede ser fácilmente extraída a través de imágenes en diferentes formatos (JPG, GIF, TIFF, EPS, PS) o a través de animaciones de la evolución temporal de las variables que intervienen en el problema (formatos MPEG y AVI). Para esto la interfaz de programa varía con respecto al Pre – procesamiento como se muestra en la Figura 1.24. La barra de procesos desaparece, por otra parte una barra de visualización de resultados es

añadida, además que la barra de macros, la barra de geometría y visualización y la barra de menús son modificadas para el análisis de los datos en el post-procesamiento.

Con el icono  , ubicado en la barra estándar, es posible ingresar a la interfaz de post-procesamiento desde la interfaz de pre-procesamiento o viceversa, luego para iniciar el análisis de datos, es necesario cargar los archivos desde el menú “**Resultados del Vulcan**” tal y como se muestra en la figura 1.25, inmediatamente aparece una ventana, en la cual el usuario debe indicar desde donde se van a cargar los resultados, para esto Vulcan presenta dos opciones disponibles ( “**Archivo**” y “**Operaciones**” ).

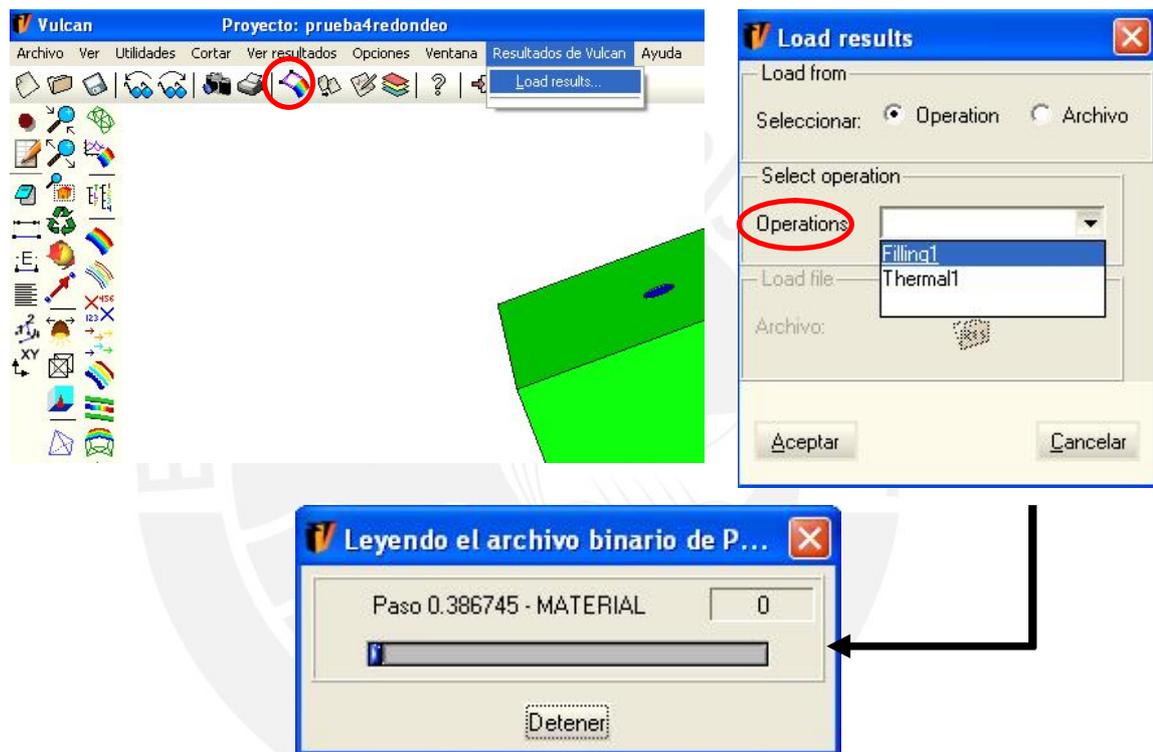


Figura 1.25: Método para cargar archivos desde el Menú Resultados del Vulcan

Es recomendable cargarlos desde “**Operaciones**”, de esta manera el programa localiza automáticamente los archivos en lugar de realizar una búsqueda personalizada. Como se muestra en la figura 1.26, el programa muestra resultados mediante animaciones dependiendo del tipo de operación que se desea analizar. Por defecto Vulcan muestra los resultados más comunes con animaciones tanto para el llenado como para la solidificación. En el primer caso es posible simular el llenado, la distribución de vectores de velocidad y la evolución de la temperatura en el llenado, por otro lado para la etapa de solidificación-enfriamiento se simula la evolución de temperaturas y la evolución de la fracción sólida.

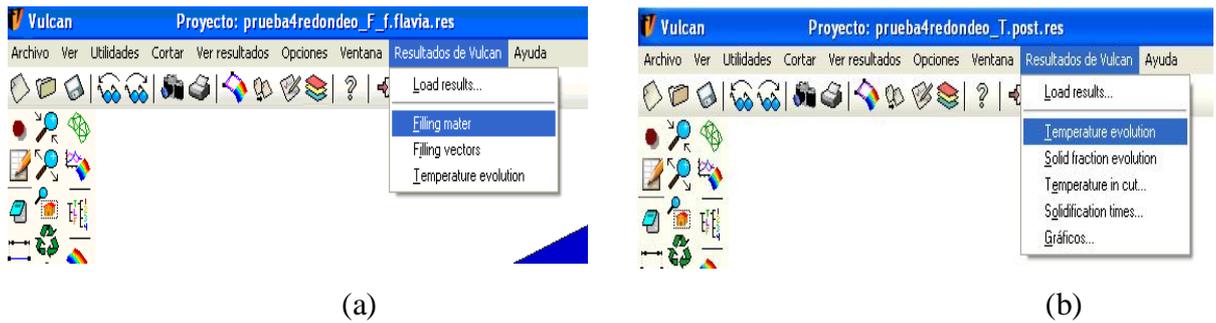


Figura 1.26: Resultados según el tipo de operación a analizar (a) Llenado (b) Solidificación

Como se mencionó anteriormente, la interfaz presenta una gama de opciones para poder realizar la visualización de resultado de una manera práctica y sencilla. A continuación se hará una descripción de las opciones más útiles:

- **Rotar:** Esta opción se puede ubicar en el menú “Ver”, pero se puede localizar con mayor facilidad con el botón derecho del Mouse. Esta opción además de permitir

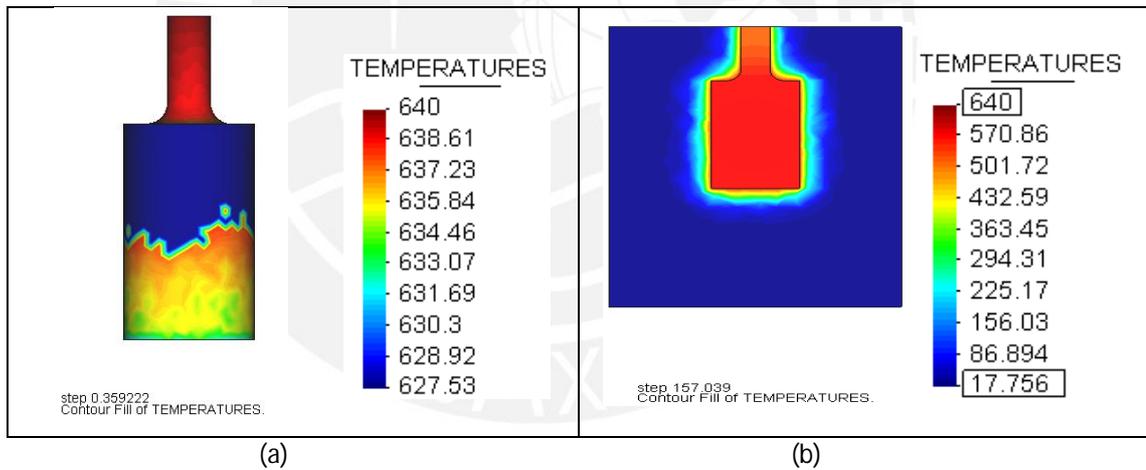


Figura 1.27: Vistas Bidimensionales (a) enfriamiento de la pieza en llenado (b) enfriamiento del conjunto pieza-molde en la solidificación térmica

realizar la rotación libre del sólido, es más útil para la localización y visualización de los planos principales del sólido, de esta manera es posible visualizar la evolución de las variables en 2D, como se muestra en la figura 1.27.

- **Estilo de Visualización:** Esta opción es fácilmente ubicable en la barra de Geometría y Visualización (  ), en la barra estándar (  ) o en el Menú

“Ventana” y es bastante útil para la modificación en la visualización del contorno o bordes de los componentes del proceso. Como por ejemplo: En la figura 1.28, al lado izquierdo se observa el llenado de la pieza con su contorno en forma de malla de superficie( “**body lines**”); por otro lado la forma de presentación del contorno de la pieza de la derecha está compuesta de sólo tres superficies circulares que delimitan la pieza ( “**body bound**” ).

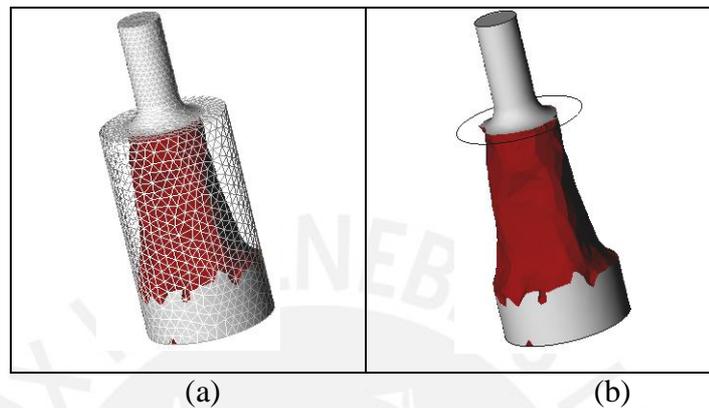


Figura 1.28: Estilos de Visualización (a) body lines (b) body bound

Además es importante notar que es posible realizar el manejo de capas a través de esta opción. Inclusive presenta el mismo icono que la opción Capas en la interfaz del pre - proceso (📁). Por ejemplo como se muestra en la figura 1.29, en la parte izquierda se muestra el llenado a través de vectores de velocidad en una vista seccionada del molde y la pieza, para esto en la ventana de selección y estilo de visualización son desactivadas las capas molde y pieza y se activan las capas pertenecientes a los planos de corte.

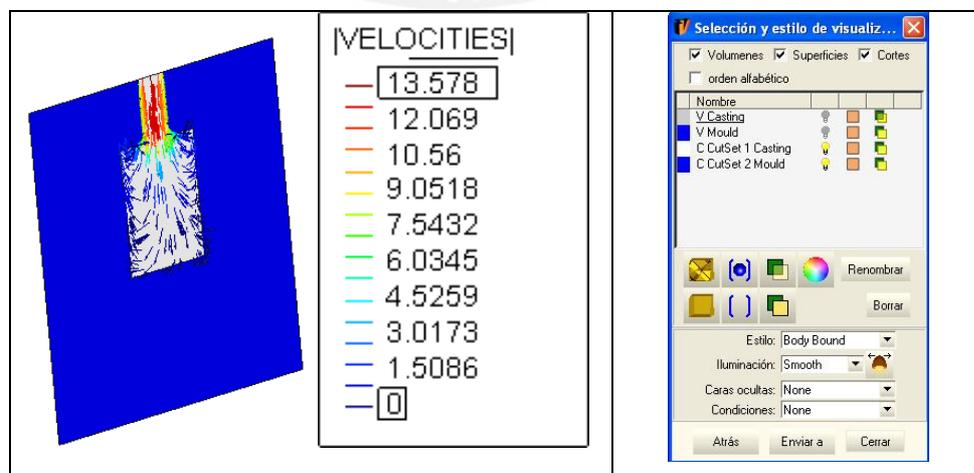


Figura 1.29: Manejo de capas en el Pos-Procesamiento

- **Cortar** (  ): Este icono se localiza en la barra de geometría y visualización, pero si el usuario requiere variedad para realizar las secciones, es recomendable acceder a través del menú “**Cortar**”. Mediante esta opción es posible seccionar las piezas: mediante planos, cortes esféricos, cortes en forma de alambre. Para realizar los cortes, este menú presenta dos alternativas interesantes que a continuación se detallan. La opción “**Plano de corte**”, permite crear un plano que atraviese los componentes para de esta manera visualizar la variación de las variables en este plano. Por otro lado, mediante la opción “**Dividir**” se logra seccionar los componentes y visualizar el mismo proceso pero en 3D, como si se hubiese “mordido” parte de los componentes. Esta mordida, está referida a la apariencia discontinua del contorno de corte y se presenta debido a que la división se realiza a través de los elementos volumétricos de la malla. En la figura 1.30 se realiza el corte de los componentes a través de un plano diagonal y se grafica el uso del menú “**Cortar**”.

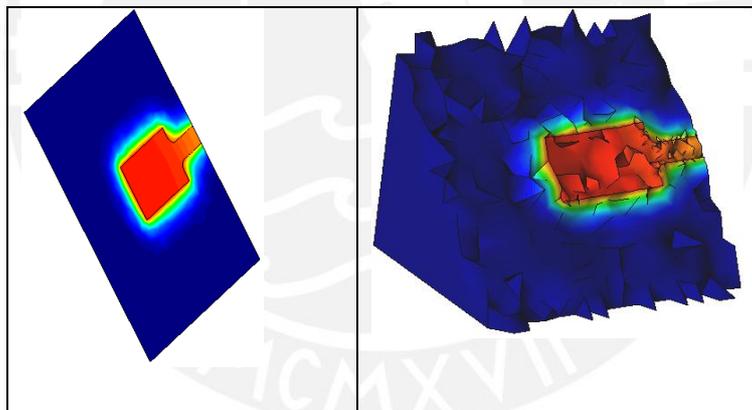


Figura 1.30: Opciones del menú Cortar

- **Gráficos:** Estas opciones forman parte de la zona inferior de la barra de Visualización y Resultados y está conformado por un conjunto de opciones orientadas a mostrar los resultados en formas de gráficos de dos ejes(X e Y) para de esta manera mostrar la evolución de los parámetros. De la gama de opciones que presenta esta barra, la más usada es la evolución de punto (  ), la cual consiste en elegir un punto en la malla del componente y como resultado el software presenta la evolución de la variable seleccionada con respecto al tiempo,

tal y como se observa en la figura 1.31. Para realizar la edición del gráfico se debe desplegar “Gráficos” en el menú “Opciones”, de esta manera es posible cambiar el patrón de línea y el número de divisiones en los ejes, modificar las nomenclaturas de los eje y el título, etc.

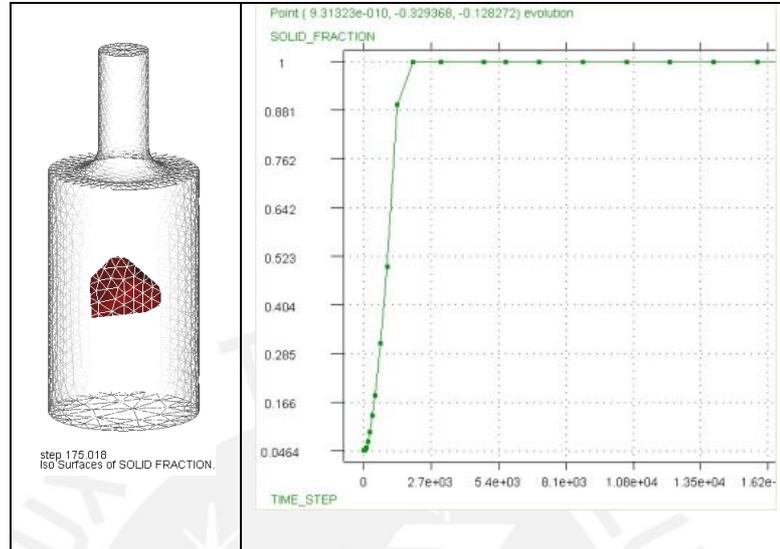


Figura 1.31: Creación de gráficos (Opción Evolución de punto)

- Visualización de Resultados:** Como se mencionó anteriormente y como se muestra en la figura 1.32 , Vulcan tiene la capacidad de generar una mayor variedad de resultados, además de presentar los resultados clasificados por tiempo, esto es posible observar a través del menú “Ver Resultados”. Es importante mencionar que no es posible realizar animaciones de todos estos resultados.



Figura 1.32: Resultados del Vulcan para el Análisis de solidificación Térmica

## CAPÍTULO 2

### EXPERIENCIAS QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN

En este capítulo se elabora una breve descripción de las prácticas de fundición que son desarrolladas en el Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería de Ingeniería Mecánica (SIM-PUCP). Estas prácticas involucran las etapas y componentes del proceso (pieza, caja de moldeo, modelos), los materiales usados para la fabricación de los componentes y las condiciones en las que las prácticas son desarrolladas. Para concluir se elegirá un modelo dentro del conjunto de piezas que son fundidas en el laboratorio y se describirá el ensayo de fundición, finalmente se mostrarán los resultados del ensayo realizado.

#### 2.1 Componentes del proceso

En el laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica se realizan ensayos de fundición a pequeña escala con el objetivo de recrear el proceso a nivel industrial y mostrar a los estudiantes los aspectos y fenómenos importantes del proceso. Para esto las piezas y los componentes de moldeo son de dimensiones pequeñas en su mayoría debido a que son fabricadas con propósitos didácticos.

##### 2.1.1 Modelos

Los modelos de las piezas son fabricados de madera y con dimensiones ligeramente mayores para contrarrestar el fenómeno de la contracción sólida y el maquinado posterior. En la figura 2.1, es posible visualizar los modelos que son utilizados en el laboratorio. Como es posible observar cada modelo posee la forma geométrica de la

pieza y está constituido por dos partes, alineadas por clavijas. Una de las partes es colocada en la Caja superior del molde o Tapa y la otra parte del modelo en el marco inferior de la caja de moldeo. Ambos componentes tienen como plano común la superficie de partición de la caja de moldeo.



Figura 2.1: Modelos de las piezas

Como se visualiza en la figura 2.1, en el laboratorio SIM – PUCP es posible fundir piezas de configuración sencilla como cilindros y paralelepípedos, además de componentes de máquinas y equipos como bocinas, bielas, chumaceras, manguitos, impulsores, etc.

Para construir las cavidades que constituyen el bebedero, los canales de colada y los ataques, también son utilizados modelos de madera. Con respecto a la forma geométrica de estos componentes, para los modelos de bebederos son utilizados formas tronco cónicas, de esta manera la turbulencia y aspiración de aire generado por la reducción de la sección transversal del flujo es controlada. Para mejorar el llenado, una cavidad de vertido es construida manualmente por el fundidor con la ayuda de las herramientas de moldeo, de esta manera se logra un vaciado inicial suave evitando la formación de zonas turbulentas (Ver figura 2.2).



Figura 2.2: Modelos de rebosaderos y bebederos

Para la construcción de los canales de distribución del metal líquido en las cavidades del molde, son utilizados modelos con sección transversal trapecial, debido a que la práctica indica que canales de colada con secciones de este tipo presenta mejores resultados [SANDOVAL, 1989] en cuanto a la distribución del flujo.



Figura 2.3: Modelos de canales de colada y ataques

En el laboratorio, se emplean cajas de machos (de madera) para obtener los machos (de arena). Estos componentes son fabricados mediante el proceso al  $\text{CO}_2$ . Este es un sistema tradicional de endurecimiento por gasificación (inyección de  $\text{CO}_2$ ), el cual emplea arena, silicato de sodio, óxido de hierro y colapsil con el objeto de obtener machos de dimensiones precisas y alta resistencia [CHAPARRO, 2006] para evitar su destrucción por la presión metalostática.



Figura 2.4: Modelo de macho o núcleo

### 2.1.2 Molde

El molde está formado por la cavidad formada en la arena de moldeo una vez retirados los modelos. Dicho molde se encuentra soportado por una caja o bastidor de moldeo. Los bastidores están fabricados de acero y se encuentran divididos en dos mitades unidas por pernos o pines llamados registros. Como se muestra en la figura 2.5, la mayoría de los bastidores del laboratorio presentan refuerzos laterales (ángulos) soldados a los lados, con la finalidad de aumentar la rigidez de los elementos a la acción de la presión del metal líquido.



Figura 2.5: Bastidor de moldeo

El bastidor para los ensayos, es elegido de acuerdo a las dimensiones del modelo, tal que se recomienda que la distancia de la pared interna de dicho bastidor a la superficie más cercana del modelo debe ser aproximadamente 2", de tal manera que la presión metalostática pueda ser soportada por las paredes del bastidor sin que éste se abra y el metal escape de la cavidad por la superficie de partición.

A continuación en la figura 2.6 es posible visualizar las dimensiones (en mm) de los bastidores más usados en el laboratorio SIM – PUCP, dentro de los cuales se resalta el molde utilizado para la elaboración del ensayo de esta tesis:

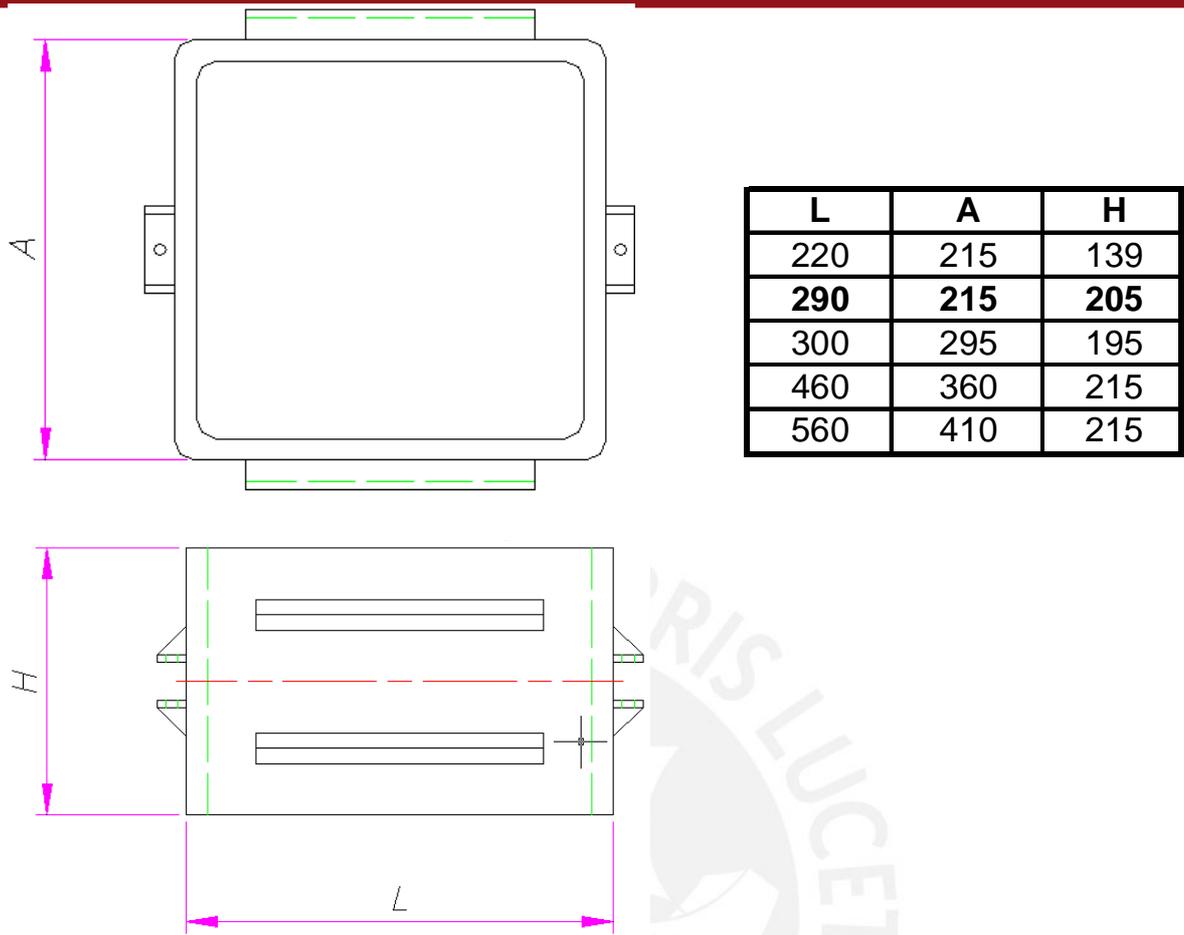


Figura 2.6: Bastidores del laboratorio SIM – PUCP

En cuanto a la arena de moldeo, los fundidores del laboratorio utilizan Arena verde como arena de moldeo. Dicha arena verde es una mezcla que presenta como principal componente a la arena (85 a 95% de la mezcla), la cual se encuentra normalmente constituida de Arena Sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Este componente brinda permeabilidad, y capacidad refractaria. Además, se agrega a la mezcla aproximadamente 4 a 10% de arcilla, específicamente Bentonita. La Bentonita actúa como adhesivo o aglomerante, tal que suministra resistencia y plasticidad a la mezcla. La adición de agua se requiere para activar la arcilla y generalmente se la agrega en pequeños porcentajes (2 a 5%). Los carbones como el grafito pueden constituir hasta un 2 a 10% de la mezcla de arena verde, y son añadidos con el objeto de mejorar el acabado superficial y reducir la ocurrencia de la penetración del metal, además de evitar la adhesión en la superficie modelo – cavidad y se dificulte la extracción del modelo o se destruya la cavidad. Finalmente es necesario apuntar que previamente a la colada son realizados ensayos de

arena para la determinación de la permeabilidad y la resistencia a la compresión de la mezcla de arena verde.

### 2.1.3 Metal de fundición

Para la realización de los ensayos de fundición en el laboratorio se usa Chatarra de Aluminio como metal de moldeo. La mayoría de chatarra de aluminio utilizada en los ensayos es de procedencia desconocida aunque es sabido que un buen porcentaje proviene de componentes electrónicos para computadoras. Por lo tanto si el aluminio puro tiene un punto de fusión de 660°C, y el punto de fusión de la mayoría de aleaciones de aluminio se encuentra entre 600 y 660 °C, la temperatura de colada utilizada en el laboratorio se encuentra entre 680 y 710°C.

## 2.2 Ensayo de fundición realizado en el Laboratorio SIM – PUCP

### 2.2.1 Elementos para el ensayo

- Modelo para la pieza fundida: Cilindro de  $\Phi 35$  x 272mm de longitud
- Material fundido: Chatarra de aluminio
- Dimensiones del modelo de la pieza en mm:

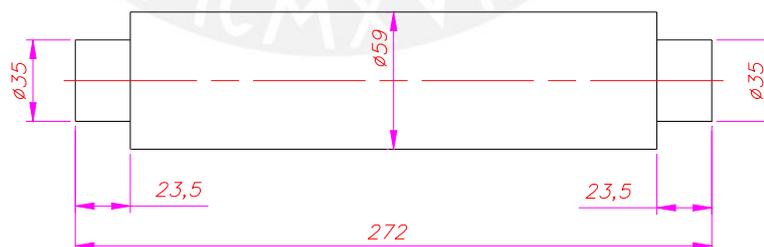


Figura 2.7: Modelo de madera

- Material del Molde: Arena Verde
- Dimensiones del bastidor de moldeo: 290x215x205(Ver figura 6)

- Dimensiones de rebosadero: Se utiliza un rebosadero colocado a un lado de la pieza (lateralmente). Es necesario apuntar que las dimensiones del modelo del rebosadero sobrepasa el plano superior del molde, como se muestra en la figura 2.8.

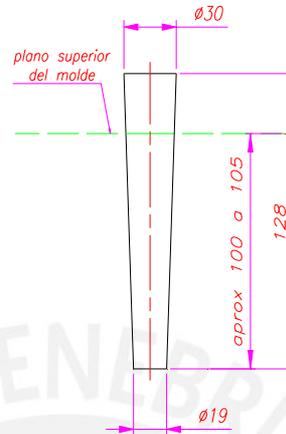


Figura 2.8: Dimensiones de mazarota en mm

- Dimensiones de bebedero: Aproximadamente la misma altura que el rebosadero y con 23 mm de diámetro menor.
- Dimensiones de ataques: Como se mencionó anteriormente los ataques poseen una sección triangular de base 19.5mm y de altura 8mm.

### 2.2.2 Herramientas para el ensayo

- Herramientas de moldeo:
  - Mesa de moldeo
  - Caja porta arena
  - Atacadoras
  - Alisadores
  - Reglas Niveladora.
- Herramientas para colada
  - Horno a gas
  - Tenazas
  - Callana



Figura 2. 9: Herramientas para el ensayo

### 2.2.3 Condiciones para el ensayo

- °T Colada: 680°C
- °T Ambiente: 17°C
- Tiempo de colada: Aproximadamente 15 segundos

### 2.2.4 Procedimiento de ensayo

- 1° Realizar la preparación de la arena. Por tratarse de arena utilizada es necesario añadir agua en pequeñas cantidades para activar sus propiedades.
- 2° Colocar el bastidor inferior sobre la mesa de moldeo.
- 3° Colocar la primera mitad del modelo y empolvarlo con grafito, para facilitar su extracción.
- 4° Verter arena sobre el modelo hasta llenar el bastidor. Durante el proceso apretar y apisonar la arena con ayuda de las atacadoras
- 5° Virar el bastidor inferior y limpiar la superficie visible
- 6° Colocar el bastidor superior, para lo cual utilice como guía los registros
- 7° Colocar la segunda mitad del modelo y empolvarlo con grafito
- 8° Colocar el bastidor y el bebedero
- 9° Repetir el 4° paso
- 10° Levantar el bastidor superior y virarlo
- 11° Con las herramientas retirar el modelo del bastidor inferior

- 12° Hacer lo mismo con el bastidor superior
- 12° Construir los ataques con el alisador en el bastidor inferior
- 13° Construir la cavidad de vertido con el alisador
- 14° Retirar la arena de los bastidores
- 15° Juntar los bastidores
- 16° Retirar el crisol del horno con la ayuda de las tenazas
- 17° Iniciar la colada
- 18° Retirar la pieza del molde
- 19° Limpiar la pieza

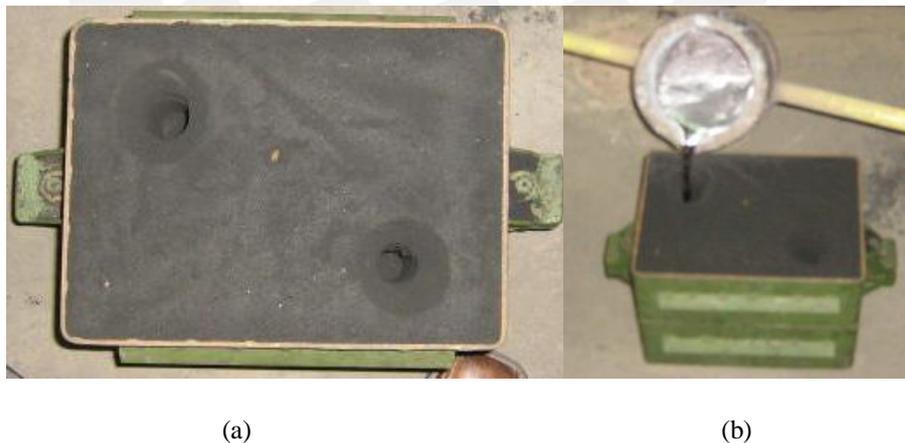


Figura 2.10: Procedimiento para fundición en SIM – PUCP (a) Moldeado (b) Colada

### 2.2.5 Resultados del ensayo

El desmoldeo se inició 5 horas después de la colada. A primera instancia, el defecto mostrado en la figura 2.11 es un rechue en la superficie cilíndrica superior producto

de la contracción líquida y la contracción por solidificación de la pieza. Es decir, dicha superficie cilíndrica superior es la zona que solidificó al final del proceso, y no pudo ser alimentada ni por el rebosadero ni por el bebedero para compensar las contracciones antes mencionadas. Este fenómeno se debió a que las portadas al tener el menor módulo de enfriamiento del conjunto solidifican en menor tiempo que los otros componentes. Como consecuencia se bloquea la alimentación de metal líquido hacia la zona afectada.



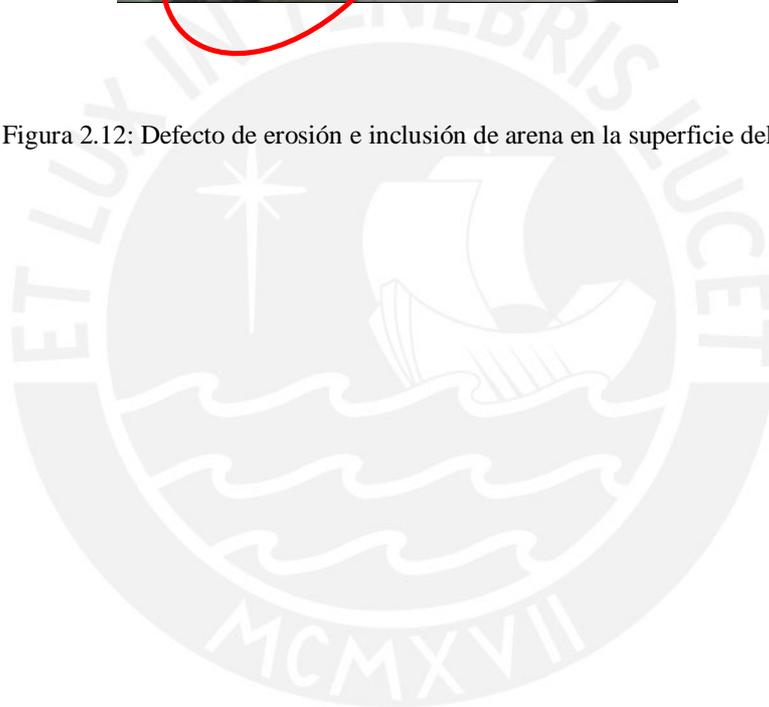
Figura 2.11: Defecto de rechupe en la superficie cilíndrica superior de la pieza

Como se indicó en la página 49, el tiempo de llenado de 15 segundos permite un llenado lento de la cavidad, lo cual garantiza un llenado sin turbulencias, esto contribuye a la fabricación de una pieza libre de defectos de colada. A pesar de lo mencionado en la figura 2.12 se presenta erosión e inclusión de arena sobre la superficie lateral cónica del bebedero. La erosión ha sido generada en el instante del vertido del aluminio líquido por la acción directa del flujo sobre esta superficie de la cavidad y la inclusión puede resultar por el cambio brusco de sección en la zona

mencionada aunada a una posible turbulencia.. Dicha turbulencia contribuye a la mezcla del caldo con la arena desprendida de la zona correspondiente al bebedero/copa de vaciado.



Figura 2.12: Defecto de erosión e inclusión de arena en la superficie del bebedero



## CAPÍTULO 3

### SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FUNDICIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo se desarrollará la simulación de la pieza cuyo procedimiento y resultados se mostraron en el capítulo anterior. Para esto se realizará la descripción detallada del avance de la simulación en sus tres etapas. De tal manera que se aplicarán las opciones de la interfaz del software a la pieza elegida. Al concluir este capítulo se podrá comparar los resultados del método numérico con los resultados del ensayo, además de conocer las variables que rigen la simulación. De esta manera es posible validar la capacidad del software y del método utilizado.

Como primer paso para la modelación. Se debe crear las geometrías correspondientes a los componentes. Para esto se realizó la toma de medidas sobre los modelos de madera y luego con el software CAD SolidWorks 2009 SP2.1 se generó las entidades geométricas de los componentes. En la figura 3.1 es posible observar dicho avance.

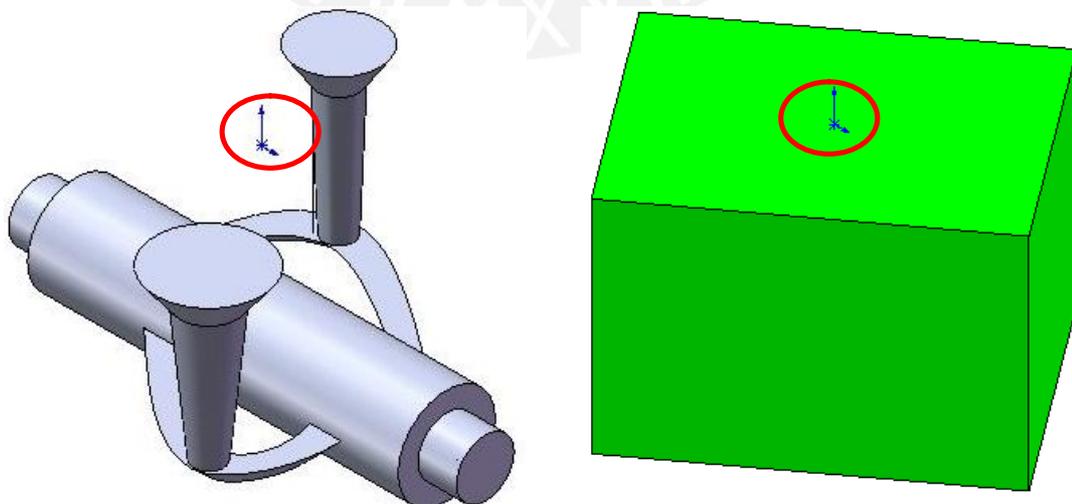


Figura 3.1: Generación de la geometría con SolidWorks

Es necesario apuntar que solo dos sólidos son creados en SolidWorks: Sistema de llenado/ Pieza/ Sistemas de alimentación y Molde. Mientras que la geometría de la pieza debe ser creada exactamente igual al modelo de la pieza real. El molde es creado como un paralelepípedo con las dimensiones exteriores que lo definen (largo-ancho-altura) y sin ningún agujero ni cavidad interna. Además es importante resaltar que la cavidad real del molde posee dos superficies contenidas dentro del plano superior del bastidor de moldeo (superficie circular superior de la cavidad de vertido y la superficie circular superior del rebosadero), pero dicha realidad no es posible simular en el programa Vulcan, es por esto como se visualiza en la figura 3.2, que se considera adecuado reducir la altura del rebosadero en 1 o 2 mm, tal que sus superficies superiores no se encuentren contenidas en el plano antes mencionado.

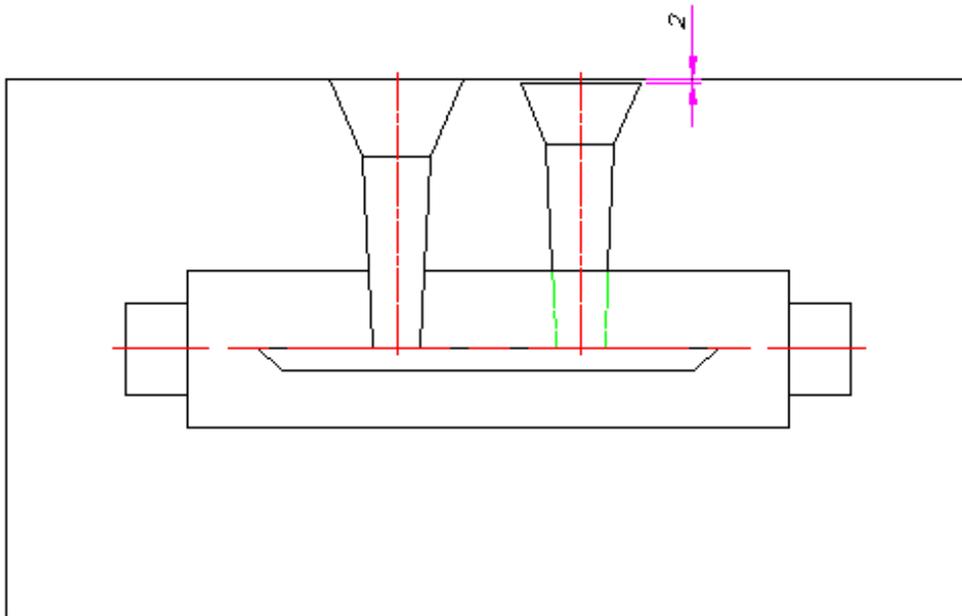


Figura 3.2: Distanciamiento entre rebosadero y plano superior del molde

Finalmente, en esta etapa previa es recomendable crear los componentes con el origen de coordenadas como referencia, de tal manera que al importar las geometrías al Vulcan, los componentes ya se encuentren posicionados correctamente (tal y como se observa en la figura 3.3), con el objeto de evitar la manipulación (traslación, rotación) de las entidades geométricas en la interfaz del programa Vulcan, lo cual resulta mucho más complicado que en el SolidWorks. Para finalizar, los archivos deben ser guardados con formato IGES. Desde este instante hacia adelante, el trabajo es desarrollado completamente en el “Vulcan”.

### 3.1 Pre – procesamiento de datos en Vulcan

#### 3.1.1 Creación del modelo geométrico

En primer lugar, dentro de la interfaz del programa es recomendable, para esta pieza en particular, ingresar al menú Utilidades/Preferencias/Pestaña Intercambio para:

- Cambiar el valor de la tolerancia de importación a un valor alrededor a 0.009: De esta manera al importar los archivos correspondientes a los componentes se evitan los errores de importación. Es necesario apuntar que dicho valor es válido solo para la pieza ensayada. En un caso general es recomendable utilizar el valor por defecto.
- Activar la opción IGES: Create all in ‘layer to use’: Mediante esta opción se realiza un mejor manejo de los componentes durante la importación, ya que el archivo importado será asignado a la capa en uso, y con ello se evita el traslado de entidades de una capa hacia otra.

Como paso siguiente, las capas deben ser creadas.

- Capa *Cast*: Esta capa está referida a la geometría del siguiente conjunto: Sistema de llenado/ Pieza/ Sistemas de alimentación .En esta capa se insertarán dichos componentes.
- Capa *Mould*: Esta capa está referida al molde y es aquí en donde se insertará dicho componente.

Es recomendable importar primero el molde. Para esto se debe observar en la Ventana Capas, a mould como capa en uso. Luego desde el menú Archivos/ Importar/ IGES se importa el molde para el preproceso. Después con la capa Cast como capa en uso se realiza el procedimiento anterior. En la figura 3.3, se observa las geometrías inmediatamente después de la importación. Es necesario comentar que es muy probable que las entidades geométricas no sean creadas correctamente en la

importación debido a que presenta contactos en áreas superficiales cilíndricas. Para corregir los errores en la importación, en primer lugar con la ayuda del menú Utilidades/ Reparar Modelo, el software ubica automáticamente los posibles problemas en la geometría y los corrige.

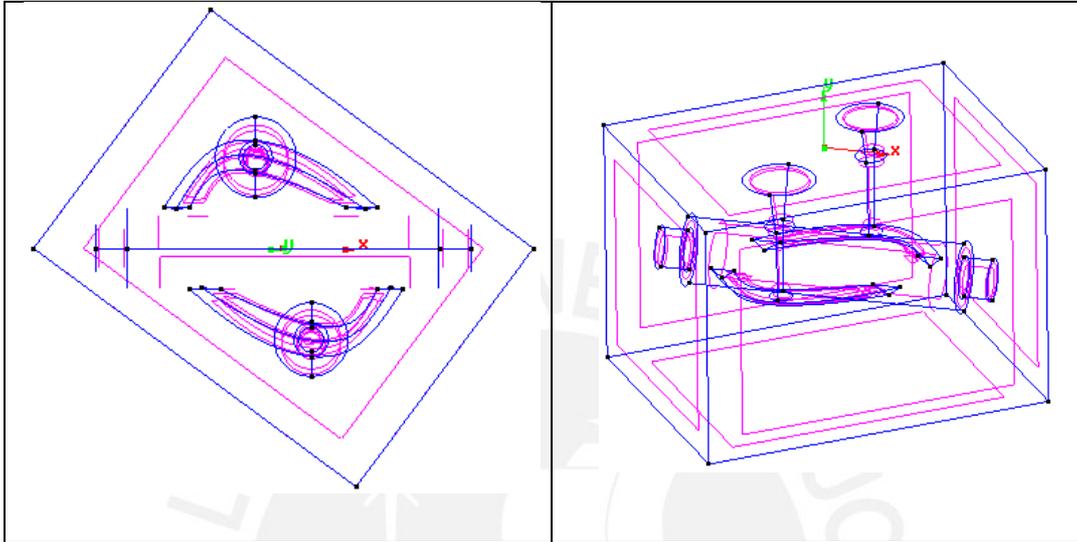


Figura 3.3: Importación de elementos, de izquierda a derecha vista superior e isométrica

Para saber si el uso de la opción automática fue suficiente, con el clic derecho del mouse se debe cambiar la iluminación del modelo (de Normal a Plana). Como se muestra en la Figura 3.4, la geometría no presenta problemas en las superficies. Si el sólido continúa presentando problemas, en el Anexo B se describe el procedimiento de corrección de superficies en la interfaz del Vulcan 8.0.

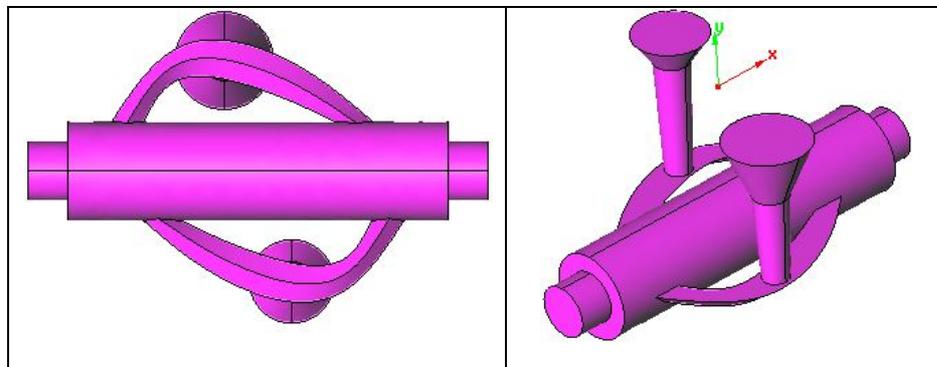


Figura 3.4: Visualización Plana de componentes

Como se explica y visualiza en el Capítulo 1 (Pág.17 y figura 1.9 respectivamente), el software debe diferenciar la superficie de entrada del metal de colada mediante la generación de un agujero en la superficie superior del molde con el menú Geometría/ Edición/ Agujero en superficie NURBS. Para ello, inmediatamente después de activar esta opción se debe señalar la superficie en donde se agregará el agujero (Plano superior del molde) y luego las líneas que definen el agujero (líneas correspondientes a la circunferencia superior de la cavidad de vertido). Dicho procedimiento conlleva a la generación de una superficie circular en la superficie superior del molde, denominado “agujero” tal y como se observa en la figura 3.5.

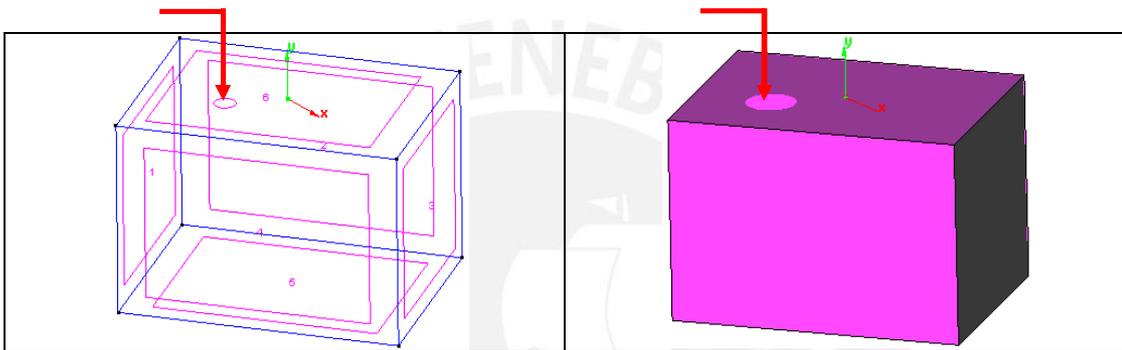


Figura 3.5: Creación de agujero para vertido de metal colada

El paso más importante en la creación de la geometría es la generación del volumen de los componentes, ya que repercute considerablemente en la creación de la malla y por ende en la simulación. Como primer paso, es recomendable crear el volumen de los elementos de la capa CAST, para ello con la iluminación plana se debe desactivar la capa molde y activar la capa Cast como capa en uso. Luego con el icono  (Crear volumen), seleccionar todos los elementos mostrados en la pantalla (Inmediatamente se nota un cambio en el color de la pieza), y para terminar el procedimiento solo basta con seguir la ventana de mensajes. Para generar el volumen del molde, las dos capas deben estar activadas pero con la capa mould como capa en uso y en el modo de visualización normal. Con el mismo icono, seleccionar las superficies del conjunto cast-mould e inmediatamente después cambiar a modo de visualización plana y seleccionar el agujero creado en el paso anterior. Si el procedimiento es correcto, se visualiza como el programa elimina automáticamente la cavidad interna correspondiente a los elementos de la capa Cast y el volumen del molde es creado. Para visualizar dicho volumen solo se debe desactivar la capa Cast. Por la complejidad

que presenta la creación del volumen, en la figura 3.6 se visualiza y explica los pasos más importantes del procedimiento descrito en el párrafo superior

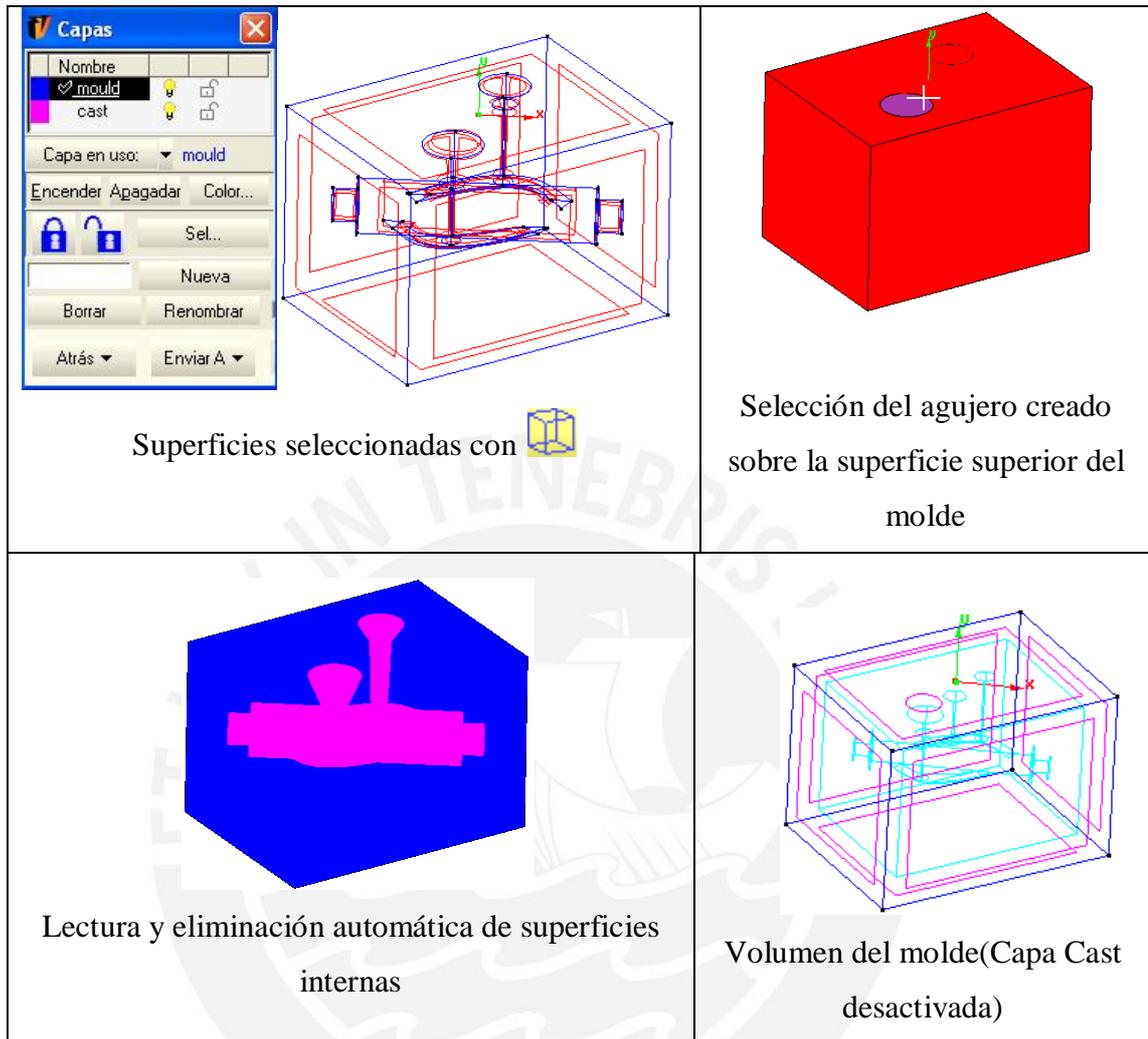


Figura 3.6: Generación del volumen del molde [QUANTECH, 2002]

### 3.1.2 Discretización

Para la creación del enmallado se ha utilizado la opción Error Cordal del menú Malla, debido a la complejidad geométrica de la capa Cast. Por lo tanto, el tamaño de los elementos es calculado automáticamente por el programa, teniendo como referencia las dimensiones de las entidades geométricas. Como se muestra en la figura 3.7, el modelo es discretizado en elementos tetraédricos, los cuales brindan una mayor aproximación en la modelación del material fundido. En este trabajo se ha obtenido una malla compuesta de 63,455 elementos tetraédricos unidos por 11,314 nodos, es decir resulta una malla fina lo cual repercutirá favorablemente en la precisión de la

simulación, pero desfavorablemente en el tiempo de cálculo por el “solver”. Otra opción interesante y bastante aplicada que reduce el tiempo de simulación con precisión aceptable en los resultados es la Asignación de tamaño a las entidades geométricas (Ver Anexo C). Esta opción permite al usuario ingresar manualmente valores diferentes de elementos para diversas zonas de la pieza.

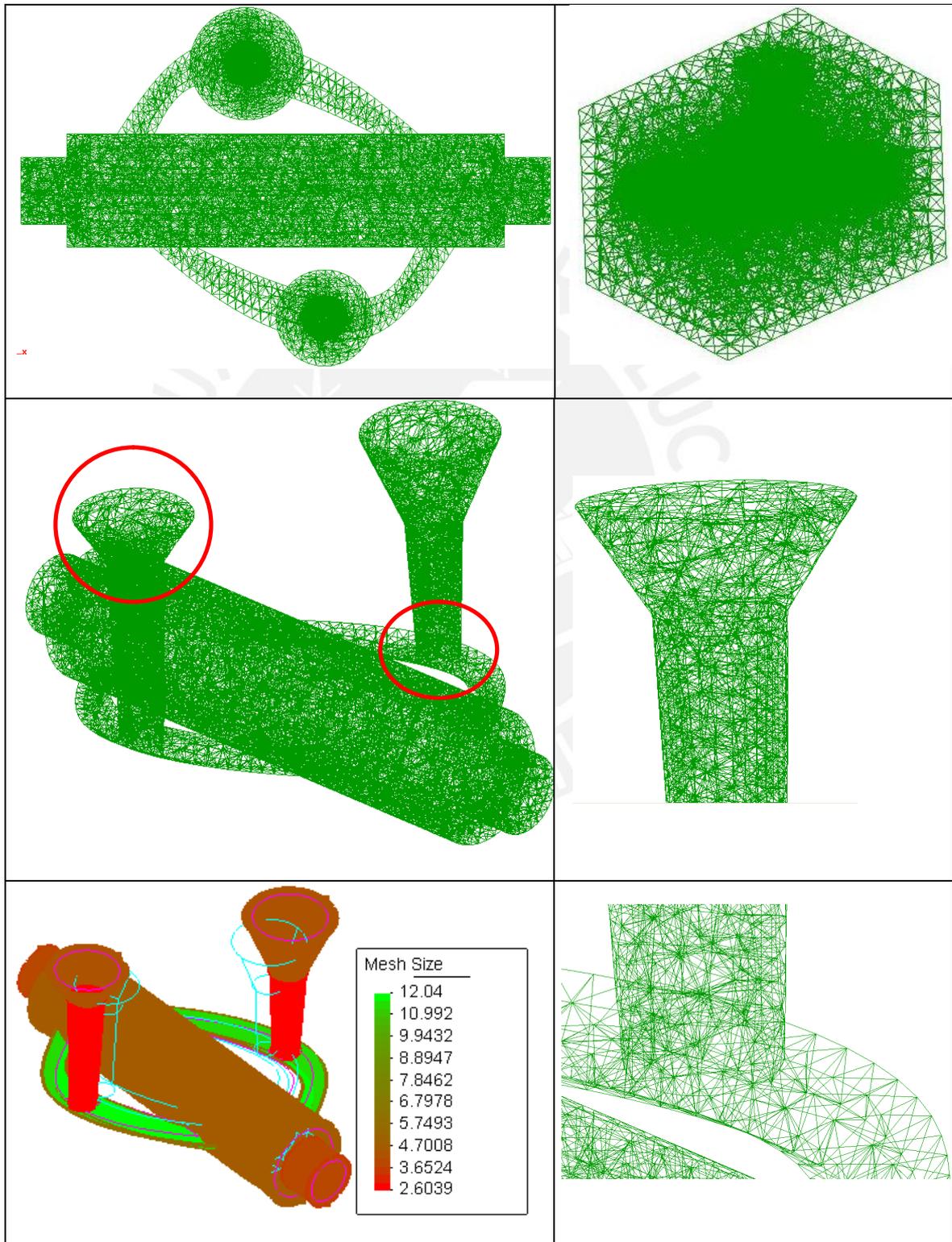


Figura 3.7: Generación de malla

### 3.1.3 Definición de Datos

El siguiente paso es ingresar los valores al programa para definir el problema. Dentro de estos valores están incluidas las condiciones del ensayo realizado en el capítulo 2 (resaltadas en negritas en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3), Si los módulos de definición de datos no aparecen en el menú Taller de trabajo, es necesario actualizar los datos a través de la siguiente ruta: Menú Datos/ Tipo de Problema/ Vulcan/ Actualizar. A continuación se detallan los valores necesarios para definir el proceso virtual:

#### MÓDULO 1: Características del problema

Tabla 3.1: Datos ingresados para el módulo 1, Características del problema

Tipo de proceso	Gravedad
<b>Condiciones generales</b>	Constante de Gravedad: 9.81 m/s <sup>2</sup> Temperatura de Ambiente: 17°C Unidades del modelo: Milímetros Dirección de la gravedad: -Y Dimensión del problema: 3D

#### MÓDULO 2: Componentes de la fundición

Tabla 3.2: Datos ingresados en el módulo 2, Componentes de la fundición

<b>Parte</b>	Capa asignada: Cast <b>Temperatura inicial: 680°C</b> Grupo de Materiales: Aluminio <b>Material: AlSi7Mg</b> (Ver Anexo D)
<b>Molde</b>	Capa asignada: Mould <b>Temperatura inicial: 15°C</b> Grupo de Materiales: Materiales de molde <b>Material: Arena Verde</b> (Ver Anexo E)

**MÓDULO 3: Operaciones**

Tabla 3.3: Datos ingresados para el módulo 3, Operación de llenado

<b>Llenado</b>	<b>Componentes de fundición</b>	Molde y Parte
	<b>Estrategia</b>	<b>By gravity</b>
	<b>Contactos</b>	HTC <sub>conducción</sub> : 2000 W/m <sup>2</sup> °K HTC <sub>convección</sub> : 1000 W/m <sup>2</sup> °K (Ver Anexo F)
	<b>HTC Ambiente</b>	Parte: HTC Aluminio Molde: HTC Arena Verde
	<b>Salida Especial</b>	Frecuencia de Salida: 1%

Tabla 3.4: Datos ingresados para el módulo 3, Operación de Solidificación Térmica

<b>Solidificación Térmica</b>	<b>Componentes de fundición</b>	Molde y Parte
	<b>Estrategia</b>	Finalización por tiempo: 600 segundos
	<b>Contactos</b>	HTC <sub>conducción</sub> : 2000 W/m <sup>2</sup> °K HTC <sub>convección</sub> : 1000 W/m <sup>2</sup> °K
	<b>HTC Ambiente</b>	Parte: HTC Aluminio Molde: HTC Arena Verde
	<b>Salida Especial</b>	Frecuencia de Salida por paso: 1 paso <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> <li>• Módulo de Solidificación</li> <li>• Fracción Sólida</li> <li>• Tiempo de solidificación</li> </ul>

**3.2 Procesamiento de datos en Vulcan**

Como se explicó anteriormente el cálculo es realizado internamente por el “solver” COMET, para lo cual lo único que el usuario debe hacer es activar la precisión deseada y las operaciones que desea calcular. En este caso se simularán las operaciones de llenado y Solidificación Térmica con una precisión baja, lo cual repercute positivamente en el tiempo de cálculo. Finalmente es necesario apuntar que

el cálculo de las operaciones indicadas tomó 1 hora y 40 minutos para el llenado y 3 minutos para la Solidificación. En la figura 3.8 se muestra el avance del “solver” hasta finalizar el cálculo tanto para la operación de llenado como para la Solidificación.

```

Información de salida para 'current-1'
STEP=      1463  TIME =  0.20148E+02
L2_VELOC =  0.902E-01      NUM ITERS =   16
FILLED VOLUME = 0.809850E-03      99.9 %
CPU_TIME =  0.137236E+05

STEP=      1464  TIME =  0.20189E+02
L2_VELOC =  0.992E-01      NUM ITERS =   13
FILLED VOLUME = 0.810035E-03      100.0 %
CPU_TIME =  0.137386E+05

STEP=      1465  TIME =  0.20194E+02
L2_VELOC =  0.836E-01      NUM ITERS =   14
FILLED VOLUME = 0.810267E-03      100.0 %
CPU_TIME =  0.137531E+05

STEP=      1466  TIME =  0.20200E+02
L2_VELOC =  0.857E-01      NUM ITERS =   12

*** NORMAL END OF RUN EXECUTION ***

Información de salida para 'current'
-----
INTERVAL =  1      ISTEP =   40      IITER =   1
CPU-TIME = 302.844  RATIO/TOLER =  22.7

INTERVAL =  1      ISTEP =   40      IITER =   2
CPU-TIME = 304.172  RATIO/TOLER =  0.195
>>>>>> END OF STEP

THERMAL PARTITION      DTIME =  76.779  TTIME =  600.000
-----

INTERVAL =  1      ISTEP =   41      IITER =   1
CPU-TIME = 307.719  RATIO/TOLER =  35.4

INTERVAL =  1      ISTEP =   41      IITER =   2
CPU-TIME = 309.453  RATIO/TOLER =  0.186
>>>>>> END OF STEP

-----
COMET: * * * END OF ANALYSIS * * *
  
```

Figura 3.8: Cálculo del proceso para las operaciones de llenado y Solidificación

### 3.3 Post - procesamiento de datos en Vulcan

En el capítulo 1 se describieron las opciones más útiles de la interfaz GID en la visualización de resultados. Estas opciones serán usadas en adelante como referencia para el análisis de los datos de llenado y solidificación.

### 3.3.1 Análisis del llenado

#### a. Evolución del frente de metal líquido

La evolución del metal líquido generado por el post – procesamiento se visualiza en la figura 3.9. La región coloreada de plomo y guinda representa la superficie del metal en estado líquido fluyendo a través de la cavidad del molde. Dicha cavidad es representada por los contornos de color negro. De los pasos mostrados podemos remarcar varios aspectos:

- Durante el intervalo de 0.02s a 0.61s se produce una ondulación en el material de colada, este fenómeno ocasiona el ingreso de aire al caldo, y puede generar porosidad en las superficies adyacentes. En este caso se puede observar ondulaciones del metal en la parte baja de la superficie cónica del bebedero extendiéndose hacia los ataques.
- Desde el segundo 0.61 se produce un llenado del molde lento, progresivo y sin presencia de fenómenos que generen daños a la cavidad. Pero es necesario mencionar el encuentro entre los flujos que se separan al final del bebedero y cuyos frentes impactan entre el instante de 2.71s y 3.93s (Observar Fig. 3.11). Este colapso podría generar la aparición de gránulos fríos en la pieza si es que la velocidad de los flujos fuese elevada. Este fenómeno es controlado si se da en una zona amplia de la cavidad, de tal manera que no impacte contra las paredes del molde.
- El llenado completo es realizada en el intervalo de 13.22 a 14.13 segundos, el cual resulta una medida un poco inferior comparado a la colada del ensayo, la cual fue realizada entre 15 a 17 segundos. La diferencia se debe a la precisión de la malla y del “solver”. Sin embargo el resultado es bastante aproximado al obtenido del ensayo.

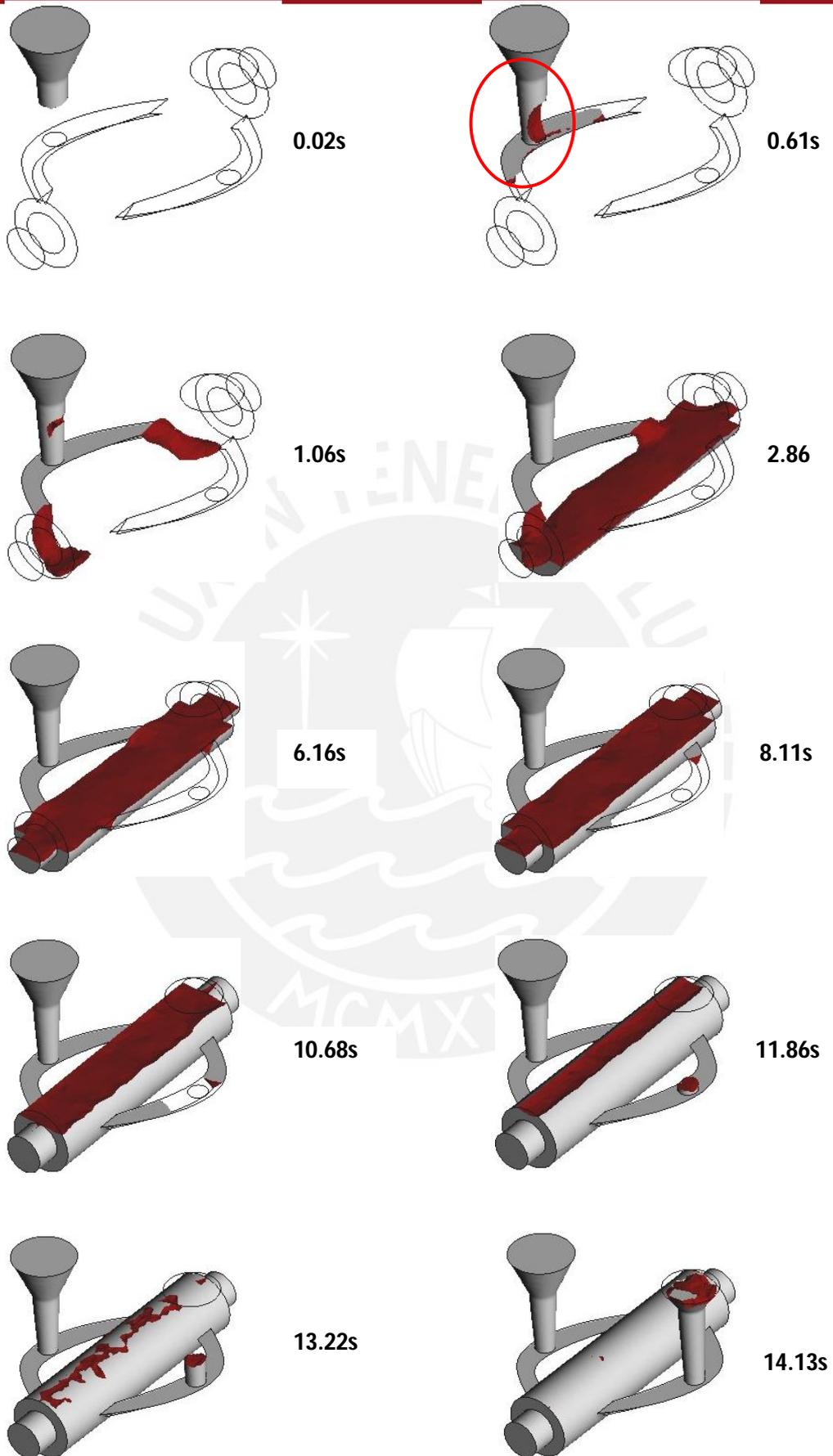


Figura 3.9: Evolución del frente de metal líquido

**b. Distribución de Velocidades:** Un gran complemento para ratificar los resultados del frente de avance, son las simulaciones de las velocidades vectoriales del metal líquido. Mediante estos resultados se pueden localizar con mayor precisión las zonas relativamente turbulentas y obtener los módulos o valores de los vectores en dicha zona. Por ejemplo, en nuestra pieza de estudio se puede subrayar lo siguiente:

- La ondulación referida anteriormente y producida durante el segundo 0.61s (Ver figura 3.10) posee valores de velocidad entre 0.7 a 0.85 m/s. Estos valores corresponden a la turbulencia formada en el cambio de sección del flujo del caldo, el cual pasa del bebedero a los ataques. Como es posible observar, estos valores son las velocidades máximas que se presentan durante el proceso.
- El valor de velocidad que presenta el frente de avance del metal se encuentra entre 0.45 y 0.5 m/s.

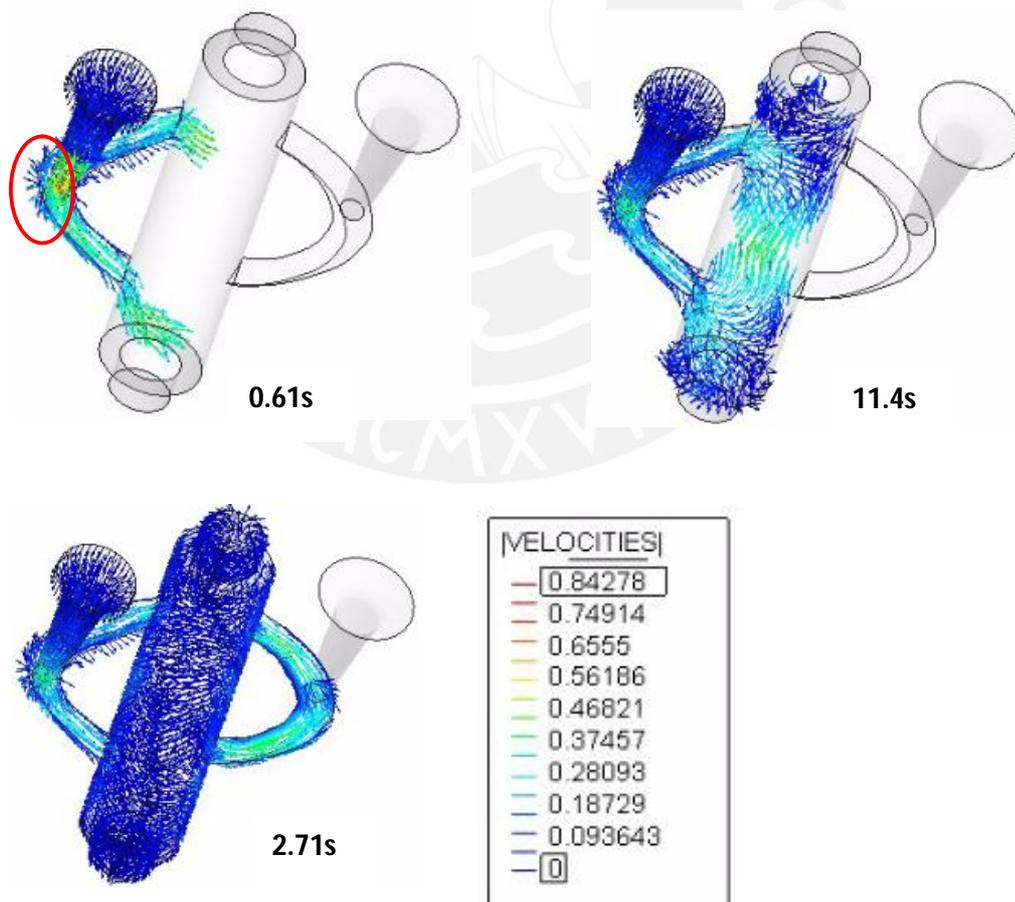


Figura 3.10: Distribución de la velocidad representado por vectores

### c. Distribución de Temperaturas y la Fracción Sólida final

Estas simulaciones son necesarias cuando son realizados ensayos con un tiempo de colada significativo, con el objeto de descartar el defecto del llenado incompleto. Para una visualización mejor se ha procedido a realizar el corte del conjunto diagonalmente tal y como se muestra en la Figura 4.6.

En la figura 3.11, la superficie azul corresponde a la zona no llena de la cavidad, mientras que la superficie coloreada representa la entrada del metal líquido a la cavidad. Dicha gama de colores representa la distribución de la Temperatura en el llenado. Por ejemplo en el tiempo de 14.13 segundos la zona encerrada dentro de la elipse tiene un Temperatura de 573.9°C, y por lo tanto se encuentra en estado pastoso. Todo lo contrario sucede con las zonas de color rojo intenso debido a que se encuentran completamente en estado líquido con una Temperatura de 626.42 °C.

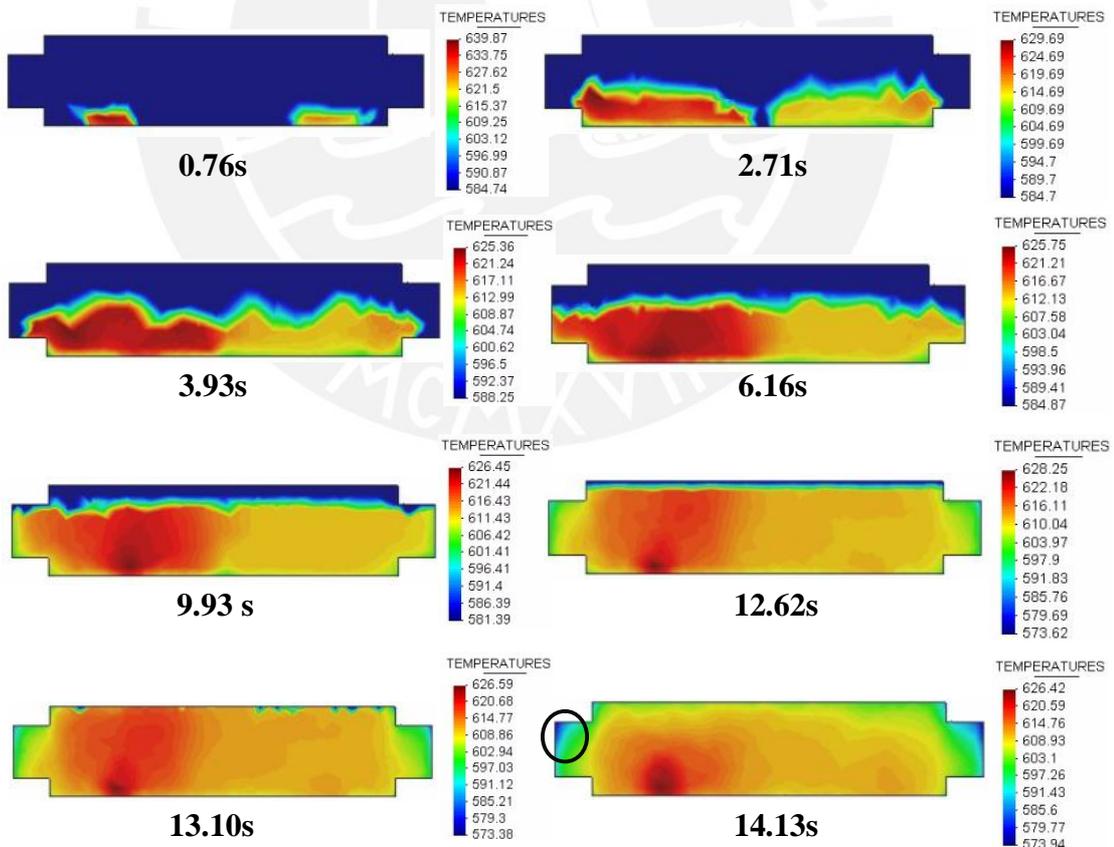


Figura 3.11: Distribución de la temperatura en la sección de la pieza durante el llenado de la pieza

La fracción sólida es un criterio de solidificación de materiales que indica el porcentaje de material sólido en una región determinada. Para ello se asigna el valor de 1 cuando se encuentra completamente sólido y 0 cuando se encuentra completamente líquido. En la figura 3.12 se visualiza los resultados del criterio de la fracción sólida para la pieza en estudio en el instante final. Aquí se resaltan dos situaciones:

- El corte de la pieza presenta exactamente una distribución de colores inversa al instante 14.13s de la figura 3.11, además se visualiza en las esquinas que el valor máximo de fracción sólida es de 0.56. Es en estas zonas (esquinas) donde se inicia la solidificación y se dirige hacia el centro de la pieza.
- Resulta interesante comparar la sección con el sólido, con el objeto de ubicar las regiones en el espacio y a la vez localizar el defecto de rechuepe en el ensayo. Para esto solo debe seguir las elipses de los correspondientes colores.

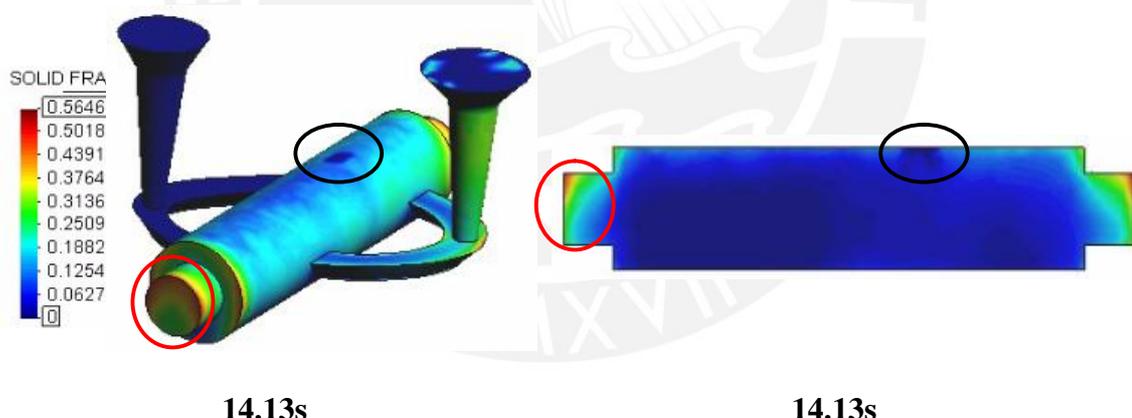


Figura 3.12: Fracción sólida final en el modelo 3D y la sección de la pieza

### 3.3.2 Análisis de la Solidificación Térmica

#### a. Evolución de la Fracción Sólida

Terminado el proceso de llenado del molde, podemos observar del gráfico anterior que aún no se inicia la solidificación de la pieza. Es a partir del segundo 146.56 que el elemento presenta regiones (zonas del eje con 35mm diámetro) con un valor de F.S de

l(Solidificación), a partir de este instante la solidificación se dirige hacia el centro de la pieza, la cual corresponde hacia la zona más caliente del elemento, y concluye en el instante de 440.92 segundos. Además es importante mencionar que los gráficos mostrados presentan una variación en la escala respecto al gráfico anterior. El valor máximo de fracción sólida es 1.

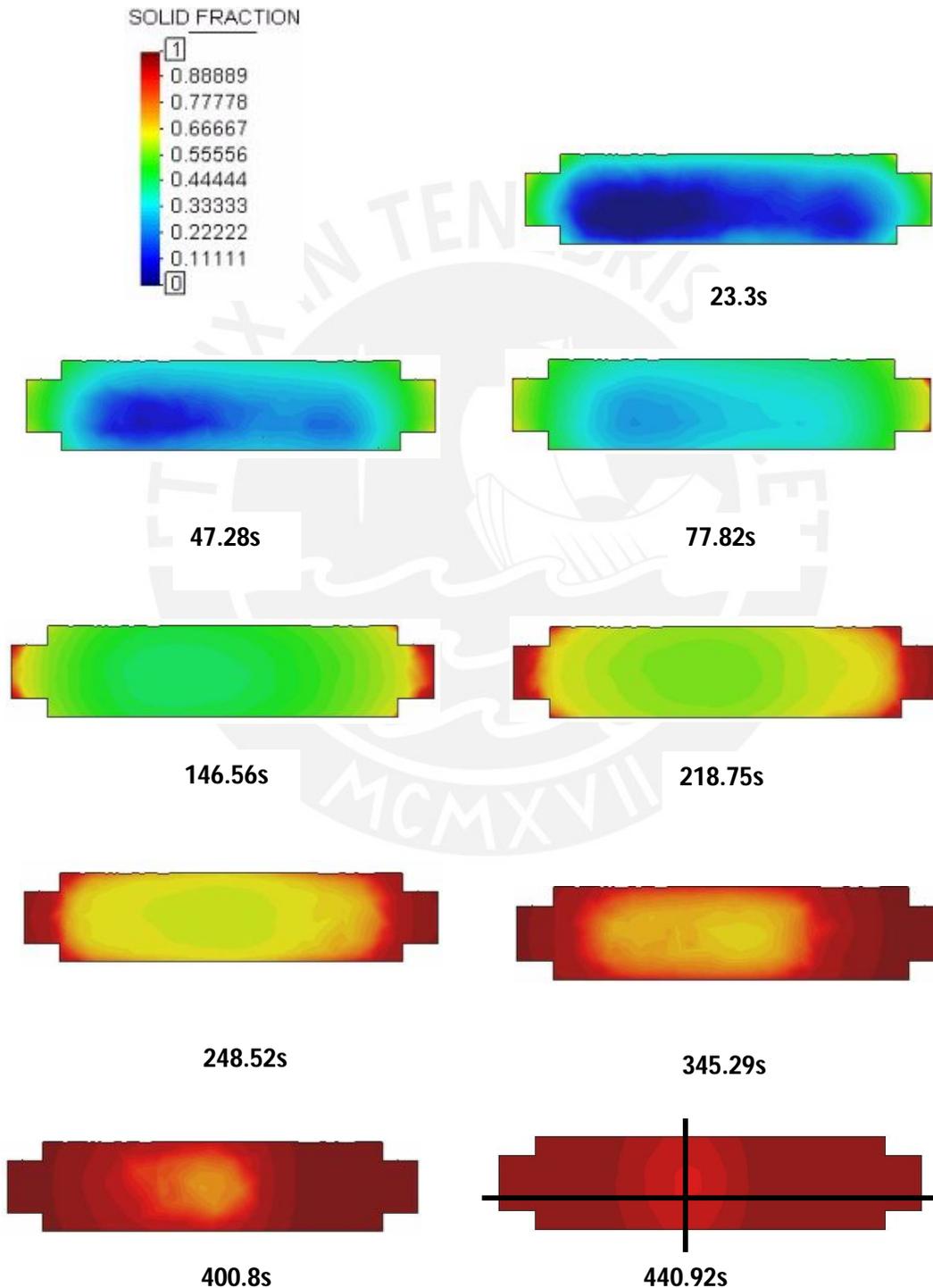


Figura 3.13: Evolución de la fracción sólida en la sección de la pieza

Como complemento en el gráfico 3.14 se observa la evolución de la temperatura correspondiente a tres puntos adyacentes a la última zona en solidificar en la pieza. En primer lugar se recalca que el valor de tiempo en el eje x de la gráfica mostrada, toma como punto cero, el tiempo de 14.3 segundos, el cual resulta ser el instante final de la colada.

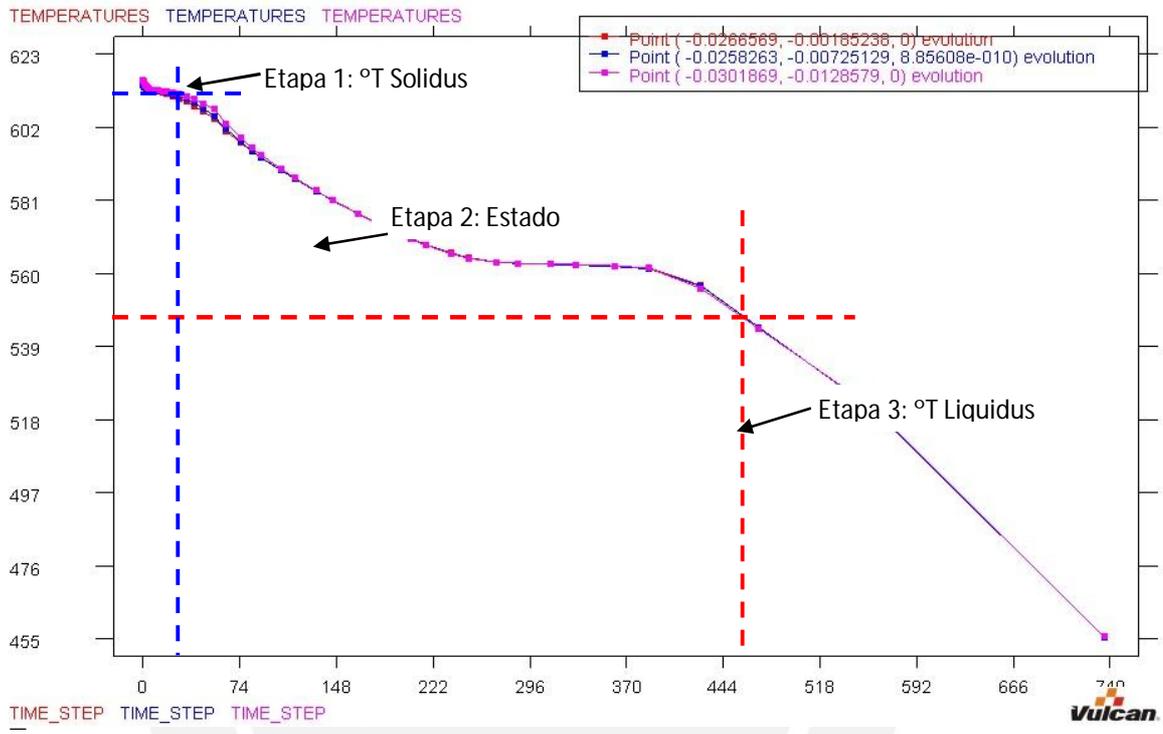


Figura 3.14: Evolución de la Temperatura en la sección de la pieza

En segundo lugar, al observar la curva se distinguen tres etapas separadas por las temperaturas de cambio de fase. En la etapa 1, el sistema empieza a liberar el calor latente de solidificación, compensado así la transferencia de calor evacuado a través de las fronteras del sistema, es por ello que la curva presenta este tramo horizontal. Luego, cuando el calor liberado no compensa el calor transferido el sistema ingresa a la etapa 2, al inicio de esta etapa el material presenta más propiedades de líquido que de sólido, y por ello la transferencia de calor se realiza más por conducción que por convección ( $FS < 0.5$ ). Al finalizar esta etapa el material es más sólido que líquido y por ello sucede completamente lo contrario ( $FS > 0.5$ ) con la transferencia de calor. Esta situación aunada al agotamiento de la fuente de energía liberada (Calor Latente de Fusión) provoca el cambio de pendiente en la curva y el ingreso a la etapa 3. En esta etapa el material es completamente sólido, por lo tanto el calor se transmite por convección. A pesar que el coeficiente de convección es menor que el de conducción,

la curva presenta una pendiente más pronunciada, esto se debe a que el calor latente ha desaparecido, y el calor solo se evacua a través de los límites del sistema.

### 3.3.3 Coeficientes de transferencia de calor

Los coeficientes de transferencia de calor (conducción y convección) juegan un rol definitivo en el análisis del proceso de solidificación del proceso. En el análisis anterior se utilizaron valores por defecto recomendados por el software. Ello no significa que estos valores son validos para todos los análisis. Por lo tanto, es necesario evaluar diferentes valores de coeficientes de conducción/convección para observar su comportamiento y la variación en cuanto a resultados que presentan respecto al análisis original.

A un punto se ha realizado cuatro análisis adicionales divididos en dos grupos:

$HTC_{cond} = 1000 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ; $HTC_{conv} = 700 \text{ W/m}^2\text{°K}$	}	Variación en HTC convección
$HTC_{cond} = 1000 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ; $HTC_{conv} = 400 \text{ W/m}^2\text{°K}$		
$HTC_{cond} = 5000 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ; $HTC_{conv} = 1000 \text{ W/m}^2\text{°K}$	}	Variación en HTC conducción
$HTC_{cond} = 8000 \text{ W/m}^2\text{°K}$ ; $HTC_{conv} = 1000 \text{ W/m}^2\text{°K}$		

Se observa que los valores propuestos para HTC conducción son mayores, esto es debido a que la transferencia de calor por conducción presenta menos resistencia térmica al existir contacto entre las superficies molde – pieza.

En primer lugar se analizará el efecto de la variación del coeficiente de convección, mediante graficas Temperatura vs tiempo.

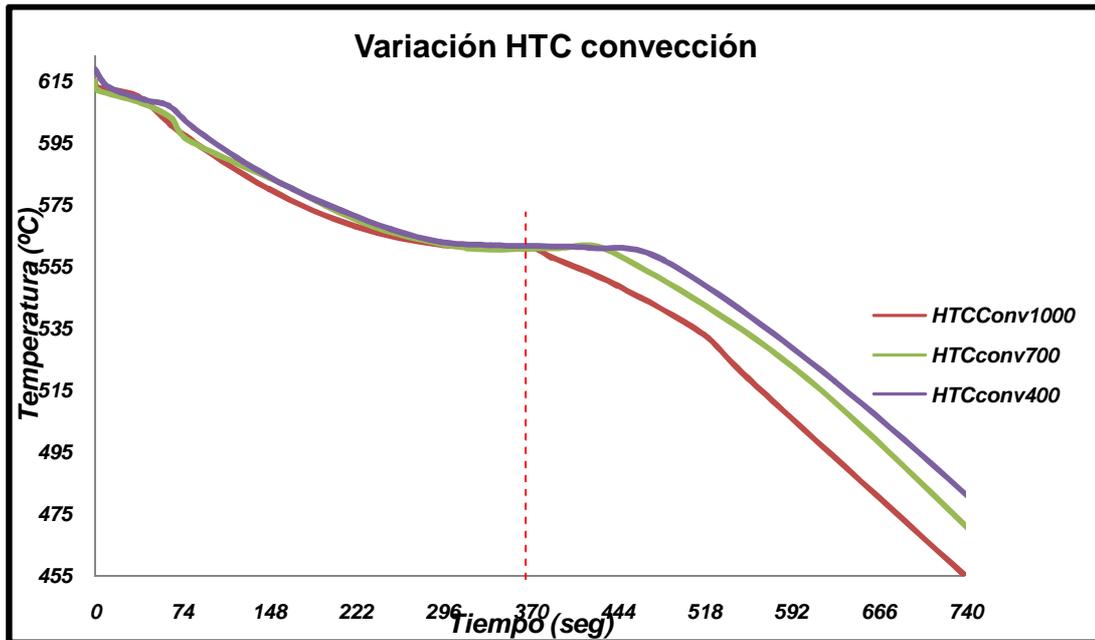


Figura 3.15: Resultados HTC convección variable

En la figura anterior, se observa el efecto que produce la variación del coeficiente de transferencia de calor convectivo en el proceso. Debido a que el coeficiente de transferencia de calor por conducción es el mismo para los tres análisis, las líneas se superponen hasta aproximadamente el instante de 370 segundos. A partir de este instante, debido a la solidificación de la pieza, el coeficiente convectivo empieza a adquirir importancia en los resultados. Como consecuencia, las líneas se separan una distancia similar visualizándose casi paralelas. La línea representada por el coeficiente mayor (HTC 1000) lógicamente solidifica y enfría a una velocidad mayor.

En la figura 3.16, se muestran los resultados de variar el coeficiente conductivo manteniendo constante el convectivo. Como se observa los tiempos de solidificación difieren en gran magnitud para cada línea, esto es debido a que desde la colada el cálculo se realiza con este coeficiente, por lo tanto a mayor valor de este parámetro mayor velocidad de transferencia de calor.

Finalmente, de este análisis se deduce que el coeficiente de transferencia de calor conductivo ejerce mayor influencia en el proceso que el coeficiente convectivo.

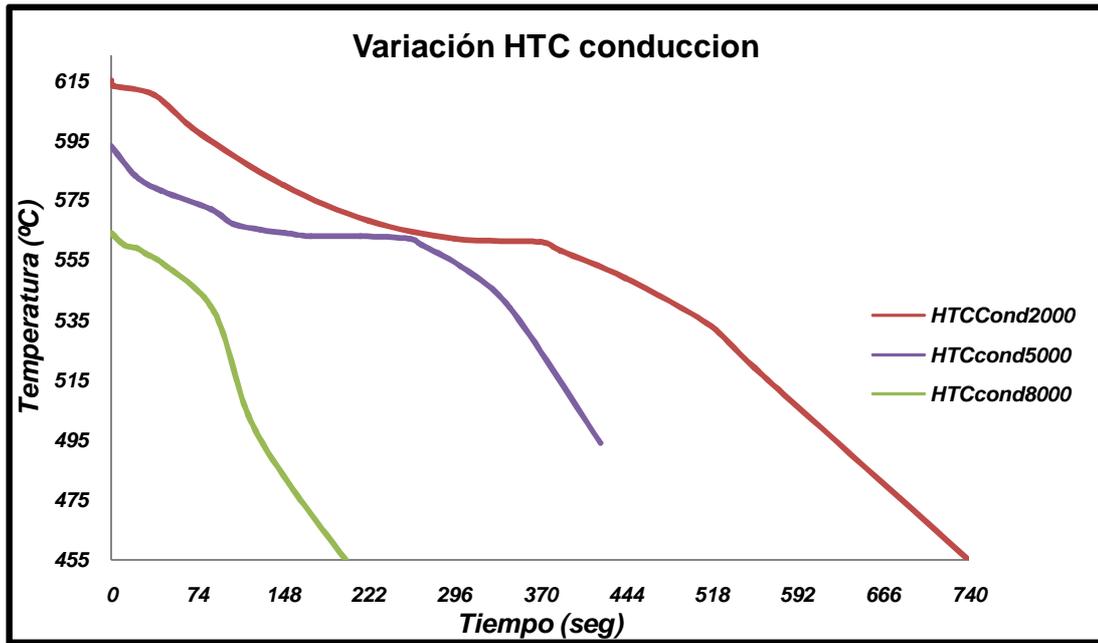
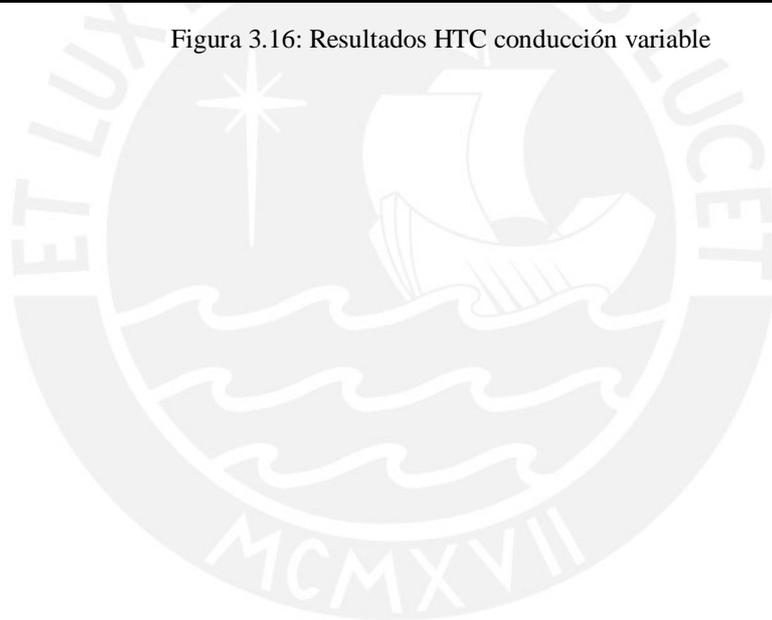


Figura 3.16: Resultados HTC conducción variable



## CAPÍTULO 4

### PROPUESTA PARA INTRODUCIR LA SIMULACIÓN NUMÉRICA EN LOS ENSAYOS DE FUNDICIÓN REALIZADOS EN EL LABORATORIO DE MANUFACTURA SIM - PUCP

El siguiente capítulo tiene como objetivo elaborar una guía de simulación para introducir al alumno de Ingeniería Mecánica en la tecnología de la simulación de los procesos de fundición, con la finalidad de ampliar la visión de los alumnos con respecto a los procedimientos de fabricación empleados por la industria a nivel nacional e internacional en los últimos años. Debido a que la sección cuenta con un taller de fundición adscrito al Laboratorio de Manufactura SIM – PUCP, cuyas características se describen ampliamente en el Capítulo 2, los alumnos deberán complementar el ensayo del elemento con la simulación de la misma en el Vulcan 8.0.

La guía de simulación está dividida en dos partes. Dichas partes se encuentran separadas por la etapa de cálculo. La división se realiza debido a que el tiempo que toma el programa en obtener los resultados para el análisis es considerable (tiempo de cálculo de aproximadamente 2 horas). Este tiempo debe ser aprovechado para la realización de los ensayos.

Por ello, se plantea realizar la simulación de la pieza, acorde a la guía parte I (20 minutos). Luego, realizar el ensayo (3 horas 20 minutos), para finalmente terminar la experiencia con la guía parte II (20 minutos).

#### 4.1 Consideraciones previas a la simulación

Un primer paso consistiría en habilitar el software en las computadoras del Aula de Diseño CAD-CAE, debido a que la herramienta computacional requiere procesadores capaces de ejecutar velozmente los procedimientos de cálculo desarrollados por los solucionadores. A continuación, a manera de recomendación se presenta los requerimientos del software :

**Memoria RAM:** 2GB (Recomendado)

**Procesador:** Intel® Pentium™.

**Sistema Operativo:** Windows XP

**Tarjeta Gráfica:** Open GL certificada

El docente guía debe preparar un avance con anterioridad a la práctica, para ello él debe:

- Elegir el modelo de la pieza.
- Dibujar el modelo tridimensional en Solidworks (cualquier versión).
- Importar la pieza en formato IGES a la interfaz del Vulcan.
- Generar los volúmenes de los elementos (pieza/ molde).
- Guardar este avance y entregarlo a los alumnos.

Es necesario que se realice este avance con el objetivo de simplificar la primera etapa de pre-procesamiento de datos, esta etapa se puede considerar secundaria para el propósito didáctico, de tal manera que los alumnos inicien la práctica con la discretización (enmallado) del modelo. Con ello se busca maximizar tiempo para el cálculo y el análisis de los resultados, debido a que la experiencia total: simulación/ensayo debe durar 4 horas como máximo según lo establecido por la sección. Según lo expuesto anteriormente, el docente guía debe conocer el funcionamiento de ambos programas (Solidworks y Vulcan). Se recomienda que el docente sea un ingeniero especializado en el uso de herramientas CAD-CAE.

El procedimiento de simulación deberá ser guiado y ejecutado por dicho docente y seguido por los alumnos según la guía de simulación propuesta más adelante.

#### **4.2 Guía de simulación para ensayos de Fundición en el Laboratorio SIM PUCP (Parte I)**

En esta primera parte aprenderá a:

- Insertar el modelo de la pieza fundida
- Generar la malla y los datos de enmallado
- Crear un estudio de Fundición por Gravedad
- Asignar los materiales a los componentes
- Asignar las condiciones de contorno
- Crear el análisis de Llenado - Solidificación Térmica
- Ejecutar el estudio

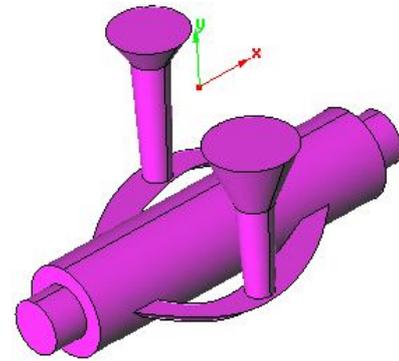


Figura 4.1: Modelo geométrico del eje

**Primero:** Para poder ingresar a la interfaz del Vulcan, ejecutar doble clic sobre el icono 

**Segundo:** Importar el modelo geométrico de la pieza a través de la siguiente ruta: *Menú Archivo /Importar /Insertar Modelo Vulcan* y buscar el archivo en el directorio del programa *Examples/ Simulación eje*.

**Tercero:** Generación de la malla

Establecer los datos del enmallado mediante la ruta: *Menú Malla /No estructurada/ Tamaños por error cordal*, inmediatamente después *Generar malla*

En el *Menú malla/ Generar malla /Aceptar*

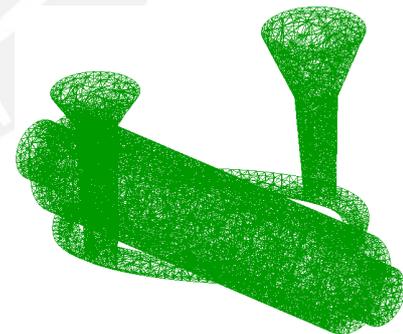


Figura 4.2: Enmallado del eje

**Cuarto:** Definir el tipo de proceso

En el *Menú Taller*, hacer clic en *Características del Problema (Problem Characteristic)* y elegir las opciones como se muestra a continuación:

*Process Type:*

Gravity

*General:**Gravity Constants:* 9.81 m/s<sup>2</sup>*Environment Temperature:* Valor registrado en termómetro*Model Units:*  Milimeter*Gravity direction:* Utilizar el valor dado por defecto pero verificar su validez en el modelo*Problem Dimensions:*  3D*Symmetries:* No ingresar datos**Quinto:** Definir los materiales de los componentes

En el *Menú Taller*, hacer clic en *Foundry Components*, inmediatamente después seleccionar la capa *cast* del recuadro blanco titulado *Capas/Available*, finalmente hacer clic en el icono . (Si el procedimiento es correcto la capa *cast* se moviliza al recuadro titulado con *Capas/Assigned*). Luego ingresar los parámetros de la siguiente manera:

*Temperature:**Initial Temperature (°C):* 680

No seleccionar Use coating

*Material Properties:**Material Group:* Aluminium*Material:*  Database - AlSi7Mg**Sexto:** Definir la operación de Llenado

En el *menú Taller*, hacer clic en *Operations*, inmediatamente hacer clic en el icono



, después seleccionar la operación  *Llenado o Filling*. Luego ingresar los datos de la siguiente manera:

*Foundry Components:*

Enviar las capas *Cast* y *Mould* al recuadro blanco *Selected Foundry components* con el icono ►.

*Estrategia:*

- By gravity
- No activar Tilt pouring
- No activar Run without mould

*Contactos:*

*HTC conducción y HTC convección:* Utilizar los valores dados por defecto 2000 y 1000 W/m<sup>2</sup>°K respectivamente.

*HTC – Environment:*

No realizar modificaciones

*Special Output:*

*Output Frequency(%):* 5

**Sétimo:** Definir la operación Térmica

Repetir el procedimiento realizado para las pestañas *Foundry Components*, *Contactos*, *HTC – Environment*. Cambiar los datos para las pestañas restantes de la siguiente manera:

*Estrategia:*

- No activar Perform – Demolding
- Termination by:  *Time*                      Time Value(s): 600

*Special Output:*

- Result by:*  Paso                      *Output Frequency (steps):* 5
- Temperature
- Solid Fraction
- Solidification Time

**Octavo:** Ejecutar el estudio.

En el *Menú Calcular*, hacer clic en *Calcular* y activar las opciones según como se indica a continuación:

*Calcular:*

*Solver accuracy:*  Baja

*Select Operation:* Desde la operación Filling1 hasta la operación Thermal1.

*General Options:*

Utilizar los valores dados por defecto.

### 4.3 Consideraciones para el ensayo

Se debe tener en cuenta tres parámetros que influyen en la precisión de los resultados y que resultan ser dependientes del modelador/fundidor en el ensayo real. Por lo tanto se debe tener un control especial en el procedimiento de ensayo.

Durante la construcción de la geometría se debe supervisar la correcta colocación de los ataques, mazarotas y bebedero de la pieza. Se recomienda aún más cuidado si las cavidades son realizadas con herramientas de moldeo.

El tiempo de vaciado debe ser controlado con un cronómetro o reloj

La Temperatura de colada debe ser medida con la mayor precisión alrededor de 700°C.

### 4.4 Guía de simulación para ensayos de Fundición en el Laboratorio SIM PUCP (Parte II)

En esta segunda parte aprenderá a:

- Manejar las opciones con el objeto de visualizar los resultados de los análisis seleccionados.

**Noveno:** Habilitar los resultados de los análisis en la interfaz de post – procesamiento a través de la siguiente ruta:

 / *Menú Resultados del Vulcan/ Load Results.../Operation/ Filling1* si se desea visualizar los resultados en la Etapa de Llenado.

 / *Menú Resultados del Vulcan/ Load Results.../Operation/ Thermal1* si se desea visualizar los resultados en la Etapa de Solidificación.

**Decimo:** Visualizar las animaciones de los análisis en la interfaz del Vulcan a través de la siguiente Ruta:

- *Menú Resultados del Vulcan/ Filling Matter*

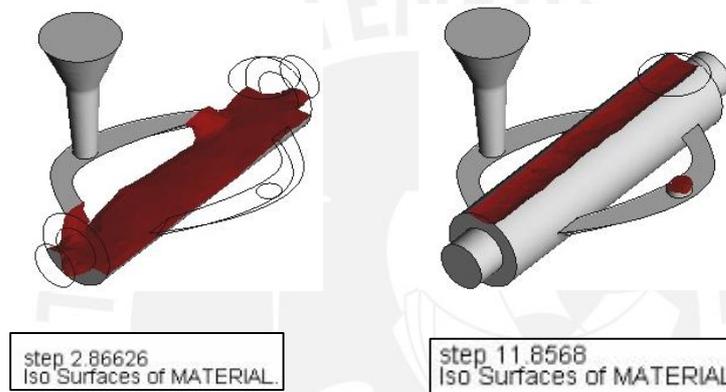


Figura 4.3: Evolución del frente de avance del metal líquido

- *Menú Resultados del Vulcan/ Filling Vectors*

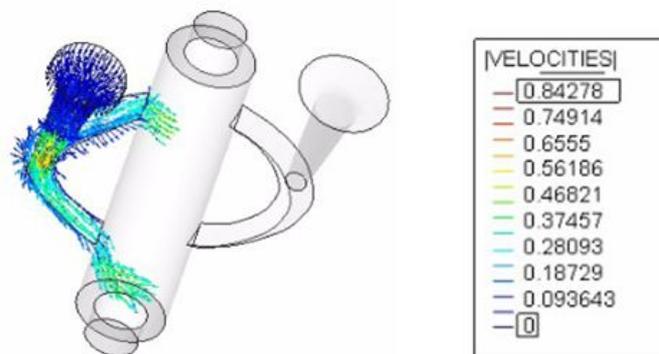


Figura 4.4: Distribución de los vectores velocidad durante el llenado

- *Menú Resultados del Vulcan/ Temperature Evolution*

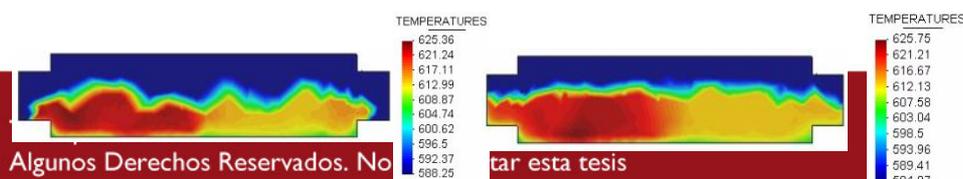


Figura 4.5: Evolución de la Temperatura durante el llenado del molde

El corte transversal mostrado en la figura 4.6, es realizado mediante la siguientes opciones:

**Rotar la pieza:** Clic derecho en la interfaz/*Rotar/Plano XZ*

**Realizar el corte:** *Menu Cortar/ Plano de corte/ 2 puntos/ Generar línea diagonal a la superficie rectangular del molde.*

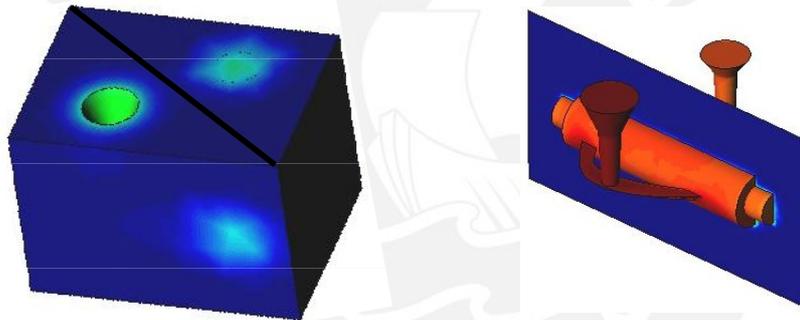
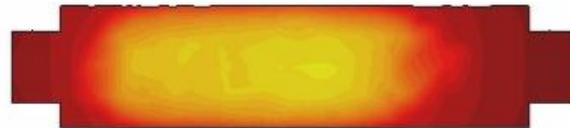


Figura 4.6: Plano transversal de corte

Inmediatamente después se debe hacer clic en el icono  y apagar las *capas VCast, V Mould y C CutSet 2 Mould*, finalmente se debe hacer clic derecho en la interfaz/*Rotar/ Plano XY*.

- *Menú Resultados del Vulcan/ Temperature Evolution Solidification*



step 311.414  
Contour Fill of SOLID FRACTION.

Figura 4.7: Evolución de la Fracción durante la Etapa de Solidificación – Enfriamiento de la pieza

- *Menú Resultados del Vulcan/ Solid Fraction*

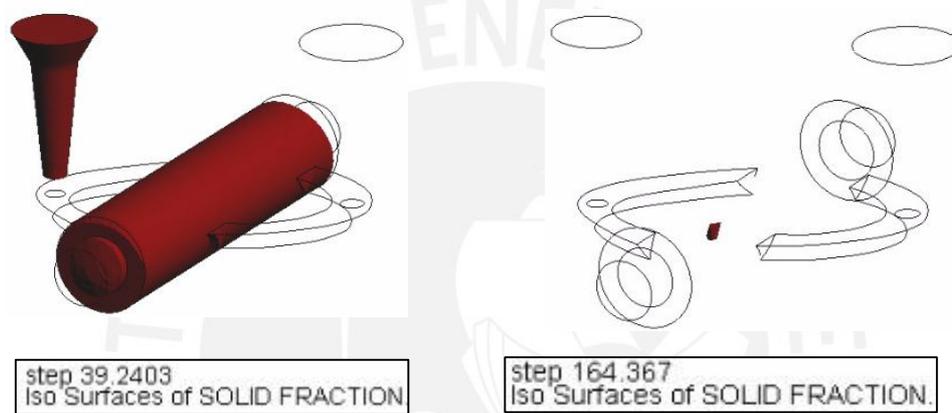


Figura 4.8: Evolución de la Fracción Sólida vista 3D

CONCLUSIONES

La presente tesis introduce la herramienta de simulación en la práctica de Fundición para los cursos del taller del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica, para lo cual era necesario constatar la potencialidad del software Vulcan. Para ello, en primer lugar se realizó el ensayo de una pieza fabricada en el laboratorio de fundición de la sección. Como resultado de esta experiencia la pieza presentó dos defectos notorios, rechupe e inclusión de arena. Constatar estos defectos en la simulación constituyó el objetivo principal del estudio del software comercial Vulcan. Este estudio abarca cada etapa de procesamiento del programa, desde las opciones de ingreso de datos del pre procesamiento hasta los criterios de análisis del post procesamiento. Estos criterios están basados en el estudio de variables tales como temperatura, fracción sólida velocidad y presión y son la clave para la localización de los defectos reales de la pieza.

El rechupe, defecto de solidificación, es determinado con el criterio de la fracción sólida, mediante su evolución con respecto al tiempo permite evaluar la última zona en solidificar. Al comparar ambos resultados, se obtuvo que el rechupe presenta una buena localización en el plano horizontal, pero difiere en la ubicación vertical. Esto se dio por que existieron condiciones que no pudieron ser controladas tanto en el ensayo como en el procedimiento virtual, dentro de las más notorias tenemos la temperatura, el material de colada, la variación del coeficiente de transferencia de calor de conducción y la precisión media utilizada por el Solver. Aún así, el resultado es bastante aceptable, porque permite identificar la posición en la cual debería ir ubicada la mazarota para evitar la aparición de este defecto.

La inclusión de arena se localiza en la zona inferior del bebedero y el cambio de sección entre bebedero y los canales de alimentación. En esta zona los vectores de velocidad presentan un módulo elevado respecto al flujo normal, y es por ello una fuente de defectos de colada de este tipo además de generar aspiración de gases y escoria.

El estudio de la transferencia de calor durante la solidificación, nos muestra el predominio del mecanismo de transferencia por conducción de calor sobre el de convección. Los resultados indican que a medida que aumenta dicho coeficiente el tiempo de enfriamiento es menor. No sucede así con el coeficiente de convección,

cuya variación no tiene mayor influencia en la solidificación de la pieza dentro del molde de arena.

En referencia al software, se debe decir que a pesar de presentar problemas en la generación del pre – procesamiento y una base de datos limitada, Vulcan es una herramienta muy potente y confiable para el análisis de procesos de fundición. Es más, las versiones profesionales además de incluir el paquete del análisis termo mecánico, agrega nuevos procesos como Fundición en molde perdido y Colada a baja y alta presión.

En el Laboratorio de Manufactura, los alumnos de Ingeniería Mecánica realizan prácticas de fundición en un tiempo estimado de 4 horas. Dichas prácticas no abarcan el estudio del proceso de fundición con el uso de tecnologías modernas que actualmente utiliza la industria nacional e internacional. Es por ello que se ha considerado utilizar 40 minutos del programa tradicional para implementar esta herramienta de simulación en las prácticas de fundición. Se considera que el uso interno (implementación para fines académicos) de la herramienta sería un primer paso para la mejora del laboratorio, a medida que se conozca más sobre su manejo se debería considerar ampliar su aplicación para un servicio externo de la universidad en el campo de la manufactura de piezas mediante el proceso de fundición.

Finalmente, realizando un balance académico – técnico - económico, resultará conveniente para la Sección de Ingeniería Mecánica implementar esta herramienta porque:

- Es una herramienta muy útil para el diseño, la cual presenta una buena variedad de opciones para la creación de geometría y enmallado además de una alta confiabilidad en los resultados.
- Disminuye el costo de producción del proceso, al reducir el número de prototipos para los ensayos de prueba.
- Es el procedimiento a seguir por las industrias nacionales e internacionales, por lo cual los alumnos de la Sección de Ingeniería Mecánica como futuros ingenieros deberían estar actualizados con herramientas eficaces de ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL (ASM)  
1998 *ASM Metals handbook: Casting*. Volumen 15. Novena Edición.
- CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA (CIMNE)  
2000 *Manual de usuario GID*. España.
- CHAPARRO FERRUCHO, Sandra Patricia  
2006 *Comparación técnica de la mezcla de arena para el proceso CO<sub>2</sub> y el sistema de arenas autofraguantes*. Universidad Militar de Nueva Granada.
- CORRAL RUIZ, Ángel  
2004 *Tesis: Optimización en el Sistema de Llenado de un molde de partición vertical*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- MINGO, Raúl, Julieta BRIGNONE y Diego LORENZO  
2004 *Simulación Computacional en Tecnología de la Fundición Inyección Aluminio – Gravedad* visitada en Octubre del 2008  
<http://www.inti.gov.ar/mecanica/fundición>.
- PONS I SANS, Jaume  
2004 *Tesis: Estudio de la convección térmica en un proceso de fundición de Aluminio por el método de los elementos finitos*, Universidad Politécnica de Cataluña.
- QUANTECH ATZ  
2002 *Quantech Tutorial: Solidification/Filling process simulation*
- SANDOVAL SALINAS, Rigoberto Raúl  
1989 *Diseño de Risers y Sistemas de alimentación de piezas fundidas*, Concytec. Lima