



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**BENCHMARKING SOBRE EL SOFTWARE  
PARA LA SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS  
DE FUNDICIÓN**

**Autor:**

**Sanz García, Carlos**

**Tutor:**

**San Juan Blanco, Manuel**

**Ingeniería de los Procesos de Fabricación**



*A mis padres, por haberme guiado  
hasta aquí con cariño y sentido  
común.*



## **RESUMEN**

Las simulaciones informáticas son uno de los pilares de la industria actual. El ahorro que supone a una empresa poder anticipar el resultado de sus procesos, conlleva en muchos casos la decisión de invertir en I+D+i con sus productos o simplemente, limitarse a reproducir lo ya existente.

Aplicado al campo de la fundición de metales, existen potentes empresas de creación de software, que ofrecen multitud de módulos capaces de simular los diferentes procesos de fundición existentes.

En este TFG se llevará a cabo un proceso de benchmarking sobre estos programas de simulación, que nos permitirá observar los puntos fuertes, los puntos débiles y las capacidades que nos ofrecen. Además de cómo trabajar con ellos y como sacar el máximo partido a la hora de introducir variables de calidad y cerciorarnos de la veracidad de sus resultados.

Palabras clave: Fundición, Simulación, Software, Benchmarking.

## **ABSTRACT**

Computer simulations are one of the pillars of today's industry. The savings that a company can anticipate the result of its processes, in many cases supposes the decision to invest in R&D with its products or simply, to reproduce what already exists.

Applied to the metal smelting sector, there are powerful software creation companies that offer a multitude of modules capable of simulating the different existing casting processes.

A benchmarking process on these simulation programs that will allow us to observe the strengths, weaknesses and capacities that they offer us. In addition, show us how to work with them and how to make the most of the introduction of quality variables and ensure the accuracy of their results.

Keywords: Smelting, Simulation, Software, Benchmarking.

## Contenido

<b>1. OBJETIVOS/JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FUNDICIÓN. ....	15
2.1.1 Elementos que caracterizan una fundición .....	17
2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	23
2.3 EVOLUCIÓN DEL SOFTWARE APLICADO A LA INGENIERÍA .....	26
2.3.1 Evolución temporal .....	26
2.3.2 Características esenciales del software de simulación actual. ....	29
2.3.3 Ingeniería asistida por ordenador .....	31
2.3.4 Fabricación asistida por ordenador .....	32
2.3.5 Interfaz visual. ....	33
<b>3. MÉTODO DE ANÁLISIS COMPUTACIONAL .....</b>	<b>37</b>
3.1 MÉTODO UTILIZADO EN UN ESTUDIO BÁSICO .....	37
3.2 PUESTA EN SITUACIÓN .....	38
3.3 DESARROLLO.....	40
<b>4. ESTUDIO MATEMÁTICO APLICADO .....</b>	<b>47</b>
4.1 ESTUDIO TEÓRICO .....	47
4.1.1 Introducción .....	47
4.1.2 Modelo matemático de transferencia de calor .....	49
4.2 ESTUDIO SOBRE LOS DIFERENTES ELEMENTOS QUE ORIGINAN PERDIDAS DE CALOR EN LA COLADA. ....	51
4.2.1 Condición inicial .....	51
4.2.2 Molde .....	51
4.2.3 Zona de enfriamiento.....	52
4.2.4 Área de contacto con los rodillos. ....	53
4.2.5 Zona de la radiación y zona del enfriamiento por aire.....	53
4.3 MODELO DE LA TENSIÓN TERMAL, ELÁSTICO Y PLÁSTICO.....	54
4.3.1 Ecuación básica .....	55
4.3.2 Expresión matricial del modelo de tensión para piezas delgadas .....	56
4.4 CONDICIONES DE CONTORNO .....	57
4.4.1 Presión estática de la fundición .....	57
4.5 APLICACIÓN DE LA TEORÍA A UN EJEMPLO CONCRETO .....	58
4.5.1 Estudio de temperaturas sobre el lingote .....	59

<b>5.</b>	<b>APLICACIÓN PRÁCTICA GENÉRICA. COLADA EN MOLDE DE ARENA.</b>	<b>63</b>
5.1	MODELADO DE PROCESOS DE FUNDICIÓN	63
5.2	METODOLOGÍA	67
5.2.1	Flujo de trabajo en las simulaciones por ordenador	67
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
5.3.1	Llenado del molde	68
5.3.2	Solidificación	69
5.3.3	Evolución temperatura tiempo	71
<b>6.</b>	<b>MERCADO ACTUAL. PRINCIPALES SOPORTES</b>	<b>75</b>
6.1	FLOW 3D CAST	75
6.1.1	Información técnica	75
6.1.2	Licencias	78
6.2	MAGMASOFT	78
6.2.1	Información técnica	78
6.2.2	Licencias	82
6.3	PROCAST	83
6.3.1	Información técnica	83
6.3.2	Licencias	87
6.4	CASTDESIGNER	87
6.4.1	Información técnica	87
6.5	NOVA CAST	92
6.5.1	Información técnica	92
6.5.2	Licencias	94
6.6	ANYCASTING	94
6.6.1	Información técnica	94
6.7	ASK CHEMICALS	99
6.7.1	Información técnica	99
6.8	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	103
<b>7.</b>	<b>NORMAS ISO PARA LA ESTANDARIZACIÓN DE SOFTWARE</b>	<b>105</b>
7.1	NORMATIVAS EUROPEAS QUE REGULAN EL SOFTWARE TÉCNICO	105
7.1.1	Propósitos que persigue:	105
7.1.2	El marco para la evaluación de procesos:	106
7.1.3	Elementos principales:	107
7.1.4	Distintas variantes de las normas:	107
7.1.5	Marcos de medición	107
7.1.6	Modelos de referencia de procesos:	108

7.1.7	Modelos de Evaluación de Procesos: .....	108
7.1.8	Modelos de madurez organizacional: .....	108
7.1.9	Actividades actuales: .....	110
<b>8.</b>	<b>VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>111</b>
8.1	DEFECTOS .....	111
8.1.1	Inclusiones de impurezas .....	111
8.1.2	Contracción del material fundido.....	112
8.1.3	Llenado incompleto.....	112
8.1.4	Junta fría.....	113
8.1.5	Gotas frías. ....	113
8.1.6	Rechupes .....	113
8.1.7	Porosidades .....	114
8.1.8	Agrietamiento caliente .....	115
8.2	ENSAYOS.....	116
8.2.1	Ensayo de ultrasonidos.....	116
8.2.2	Ensayos con líquidospenetrantes.....	119
8.2.3	Radiografía industrial. ....	121
8.2.4	Metalografía aplicada a materiales de fundición.....	123
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>125</b>
<b>10.</b>	<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>129</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>131</b>



## 1. Objetivos/Justificación

El objetivo de este trabajo de fin de grado es el estudio de los procesos de fundición, poniendo el foco en los programas informáticos que ayudan al sector industrial de la fundición.

Dentro de la industria, simular los procesos ha sido desde la antigüedad una herramienta eficaz, económica y sobre todo útil para el desempeño de cualquier empresa. Si bien, la esencia del método es la misma, realizar de manera controlada y fácil un proceso que deseamos llevar a cabo, pero con el control de los factores que intervienen y los hechos derivados de la conjunción en el orden deseado de los mismos.

Los métodos para llegar a simular los procesos han ido evolucionando con el tiempo hasta llegar a la introducción de la informática en la ecuación. El salto técnico producido en el siglo XX y continuado en nuestros días, ha supuesto una variación tan grande en apenas 50 años, que muchas de las herramientas usadas hoy en día en cualquier fábrica, taller u oficina, son de tal calidad, que permiten estar en la vanguardia de la industria sin necesidad de realizar una inversión desmesurada. Esto supone un beneficio a la sociedad y a la propia tecnología, ya que la dota de una gran accesibilidad que revierte directamente en su evolución.

Una parte importante de esta evolución se ha llevado a cabo en las simulaciones de elementos finitos por ordenador. Dentro de ella se encuentra el asunto tratado en este trabajo de fin de grado, la simulación de los procesos de fundición.

Los algoritmos que simulan estos procesos derivan de tres ramas de la física, la mecánica de fluidos, la termodinámica y transmisión de calor y la mecánica de medios continuos. Siendo la primera la parte principal, al añadir el estudio de la termodinámica y la transmisión de calor que se produce en los materiales en sus distintos estados de agregación.

Para dar una visión global del estado actual de este sector, este trabajo de fin de grado aporta un estudio del mercado de software. Además, se realizará una puesta en situación y una contextualización histórica que nos ubiquen en el presente de este tipo de herramientas y nos den un orden de magnitud tanto de su capacidad actual, como de su evolución a lo largo de los últimos años.

El proceso de benchmarking llevado a cabo, estudia diferentes programas de simulación, eligiendo varios de los más solicitados en el mercado.

Este estudio tiene como gran atractivo la puesta en valor de las múltiples capacidades de que disponen, además de las diferentes variantes en las opciones y precios de sus licencias.

Se incluirá a modo de ejemplo genérico, los pasos que se siguen para llevar a cabo un proceso de simulación y como se debe actuar para que, tanto los datos que aportemos, como los que nos devuelva el programa, sean fieles a la realidad.

## 2. Introducción

Hoy en día la simulación es una de las herramientas más innovadoras, potentes y de uso relativamente sencillo utilizada en ingeniería, por ejemplo en procesos de producción industriales para realizar un equilibrio en las líneas de producción o en procesos de fabricación, como es un proceso de fundición, lo que atañe a la realización de este trabajo. Pero la simulación también tiene aplicación en infinidad de campos como el militar, logístico o en ámbitos como la economía y las finanzas.

Según la Real Academia de la Lengua (RAE), se entiende por simular la acción de representar algo, fingiendo o imitando lo que no es. Dicho de otra manera, es la representación analítica de sistemas que se apoya en el uso de herramientas matemáticas y computacionales. Lo que pretendemos mediante estas herramientas es:

- Experimentación y predicción: Entender las variables de un proceso y su importancia. Mediante la simulación podemos representar condiciones sin interferir en la planta de producción de una empresa. Podemos hacer que la simulación suceda más lenta o rápida que en la realidad, por lo que en unos minutos podemos evaluar el impacto de todo un día o año.
- Optimizar recursos: Podemos hallar combinaciones o situaciones que supongan un ahorro monetario o en tiempo. De forma contraria no tendríamos impacto en la planta de producción, puesto que no hemos interferido en la misma, luego no ocasionaríamos sobrecostes o paradas de producción.
- Mejorar: Nos permite repetir un proceso cambiando las variables tantas veces como deseemos y así afinar el proceso de estudio.

- Tomar decisiones para el futuro: Ayudados por los datos obtenidos en procesos del presente, podemos crear estándares, librerías y bases de datos para futuras simulaciones.
- Exploración de diferentes alternativas que de otra manera serían inaccesibles.
- Economías: Es un proceso que solo nos supone la inversión inicial en el software, a partir de eso, podremos realizar infinitas simulaciones.
- Facilidad de revisión, modificación y optimización de diseños en tiempo real.

Debemos tener en cuenta que una simulación consta de un sistema, es decir lo que deseamos estudiar, y de un modelo, que serán las expresiones matemáticas y físicas que rigen el funcionamiento del sistema. Podemos hacer una división de los modelos en dos grupos:

- Modelo Físico: Consiste en recrear el sistema, es decir, una maqueta. Este tipo es poco usado en la simulación de sistemas de fabricación debido a la interacción dinámica de los elementos implicados.
- Modelo Matemático: Usados para determinar relaciones cuantitativas de un sistema, es decir se basan en cálculos, algoritmos y fórmulas para predecir el comportamiento de un sistema.

## 2.1 Antecedentes históricos de la fundición.

La importancia tanto tecnológica como comercial que tienen los materiales metálicos es debida a sus amplias características, como son la alta resistencia y rigidez, su tenacidad, su conductividad térmica y eléctrica, su bajo coste y la posibilidad de ser aleados.

Existe una amplia variedad de métodos de conformado de materiales metálicos. Durante la realización de este trabajo fin de grado nos centraremos en el proceso de fundición de metales y sus aleaciones. Aunque bien es cierto, que este método también es utilizado para la fabricación de piezas de plástico.

La fundición es uno de los primeros procesos que utilizó el ser humano para crear abalorios, herramientas, armas, etc.

Para explicarlo de una forma sencilla, podemos decir que consiste en calentar material hasta la fase líquida y verterlo en un molde, habitualmente de arena compacta, en el que se realiza el negativo de la forma que deseamos obtener. Una vez que el metal se enfría, desmoldaremos la pieza quitando la arena del molde y obtendremos la pieza deseada.

La fundición tiene gran versatilidad en lo que la variedad de objetos que se pueden fabricar se refiere, desde un pendiente a grandes piezas para motores de barco. (En la película *“El patriota”*, durante la guerra civil americana, el protagonista funde los soldaditos de plomo de su hijo para hacer perdigones caseros).



Fig. 1 - Llenado de un molde. Colada de acero. [Unimold]

En muchos casos es un proceso costoso, pero en la gran mayoría es la mejor manera, ya sea en arena u otra variedad de fundición, de obtener la pieza deseada.

Alrededor del año 3000 a.C., la Edad de los Metales comienza con las primeras fundiciones de cobre en oriente próximo, zona de de la actual Turquía y Mesopotamia, actuales Irán e Irak.

En el periodo neolítico, durante la edad de piedra, el hombre empieza a explotar los metales como el bronce o el oro, los cuales son trabajados de la manera que hasta entonces se conocía, tallándolos (mismo método utilizado hasta el momento con la piedra).

La evolución de este trabajo llevó a comenzar a utilizar el metal calentándolo previamente y más tarde a una fundición de manera rudimentaria.

Los primeros moldes utilizados solían ser de piedras sencillas de trabajar por no tener una excesiva dureza, como podía ser la esteatita y arcillas que soportaban bien la temperatura de fusión baja de metales como el cobre.

Más tarde comenzó el uso de arenas de más calidad con las que ya se podían utilizar metales como el acero, lo que permitía realizar mejores útiles de caza o labranza.

### 2.1.1 Elementos que caracterizan una fundición

La fundición de metales tiene diferentes propiedades que la caracterizan, como son su composición estructural, aleaciones, temperatura de fusión, tensión superficial y fases de la fusión de un material.

Generalmente se emplean los siguientes procedimientos a la hora de trabajar con la colada de metal fundido:

- **Lingoteras:** Molde metálico o de un material refractario sobre el que se vierte el metal fundido en el horno. En muchas ocasiones es el momento para agregar al metal fundido otros elementos que nos interesen para obtener la aleación deseada.
- **Colada continua:** El material fundido se vierte habitualmente en una cadena de rodillos que va dando forma al material a la par que este va enfriándose. Se utiliza para obtener material continuo con perfiles de distinto tipo como pueden ser flejes metálicos. Este proceso tiene una buena capacidad para asegurar una correcta compactación de la colada durante su enfriamiento, evitando bolsas de aire, huecos intersticiales, etc.

Diagrama de la Colada Continua

Continuous Casting Diagram

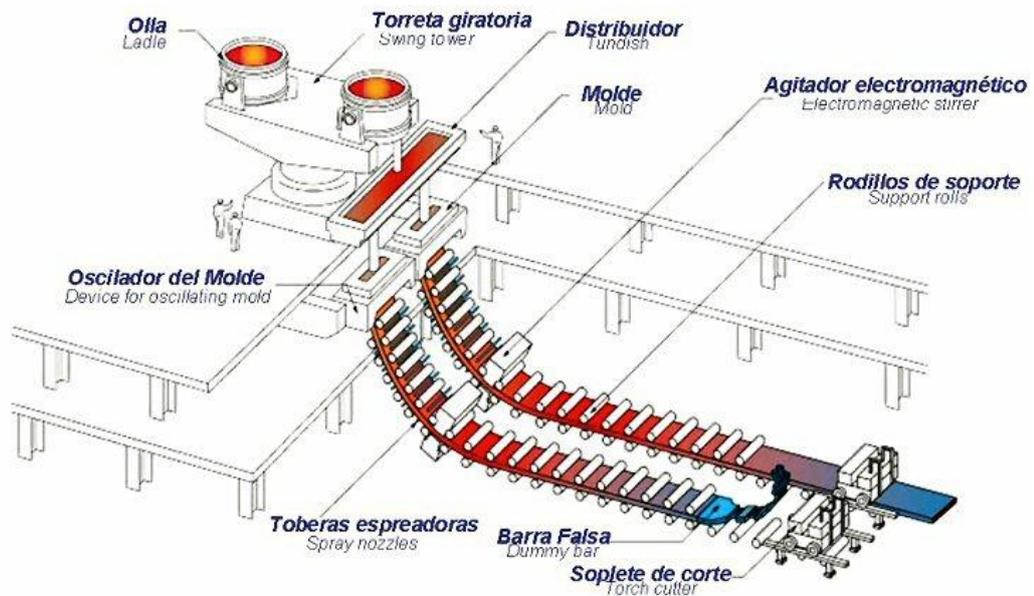


Fig. 2 - Colada continua [Mecmex.com]

- **Moldes:** Hay distintos tipos de moldes y distintas formas de llenarlos. Los moldes se caracterizan por el material del que se componen, habitualmente, de arena o metálicos, y la forma de llenarlos puede ser de manera forzada o no. Por gravedad o por extrusión, inyección, centrífugo... En el molde se plasmará el negativo de la pieza a obtener. Básicamente los moldes pueden ser desechables o no desechables. Se puede conseguir colocando una pieza y compactando arena a su alrededor para luego dejar esa zona hueca, con moldes metálicos (coquilla) sobre los que se mecaniza la cavidad, a la cera perdida (molde de cera que al calentarlo se diluye y deja que el negativo de la pieza ocupe su lugar). También se utilizan gases que crean una atmósfera inerte dentro del molde y distintas temperaturas en la cámara del molde según deseemos que sea la velocidad de enfriamiento.



Fig. 3 - Colada de aluminio en molde

Los pasos para realizar un proceso de fundición en molde son habitualmente los siguientes:

- Vertido
- Desmoldeo
- Limpieza
- Acabado

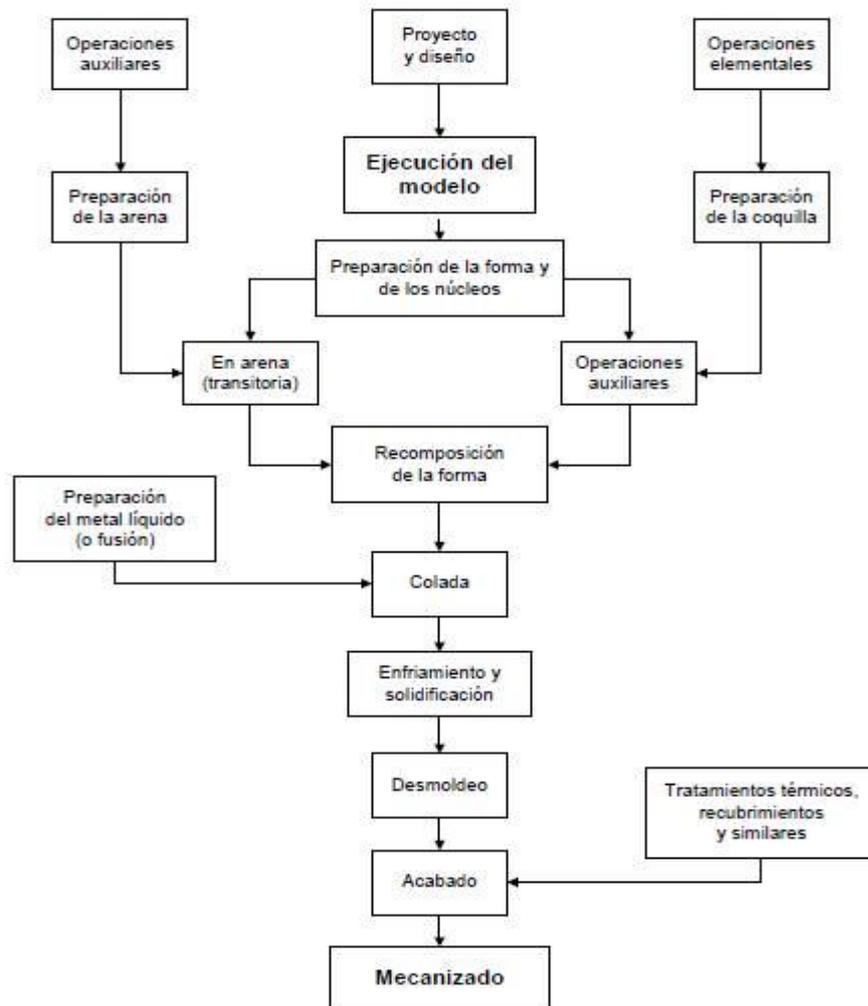


Fig. 4 - Pasos de un proceso de fundición en moldeo

Preparación de un molde de arena: La preparación del molde de arena consiste en mezclar diferentes arenas con materiales que ayuden a que el molde sea estable, tenga una buena resistencia tanto en vacío como con la colada a alta temperatura en su interior y una buena capacidad de desmoldeo. Según el material que vayamos a fundir, tendremos diferentes mezclas de arenas, ya que la temperatura de colada del acero no es la misma que la de otros metales como el aluminio o el estaño.

Un ejemplo de una mezcla habitual de arena para fundición de acero: 90% arena de sílice, 4% silicato de sodio, 3% bentonita, 3% melaza y agua hasta conseguir una humedad adecuada.

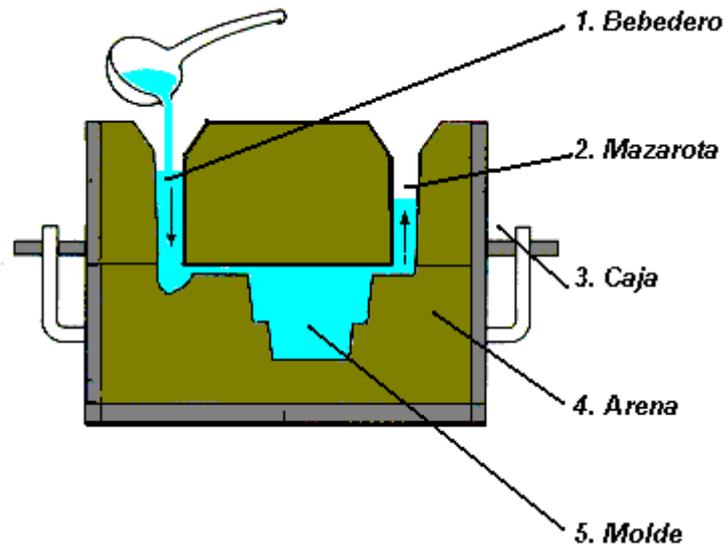


Fig. 5 - Molde de fundición en arena [monografias.com]

También son importantes las mazarotas y los respiraderos, ya que de su correcto dimensionado depende que el molde se llene a la velocidad adecuada, para que no se formen defectos por zonas incompletas y el llenado sea homogéneo. Los respiraderos son muy importantes ya que en la pieza deseada pueden existir zonas de difícil acceso para el material, por lo que se consigue evitar la formación de bolsas de aire. Esto es clave para conseguir una pieza de calidad.

Debido a estos bebederos y mazarotas, la pieza saldrá del molde con apéndices de metal que en los tratamientos de mecanizado posteriores se cortarán y se conseguirá un acabado apto de la pieza.



Fig. 6 - Pieza desmoldeada con bebederos [Undo prototipos]

El vertido del metal fundido se hará con sobrecalentamiento del material, ya que mejora la fluidez y contrarresta la pérdida de temperatura al manipularlo en la cuchara y volcarlo sobre el molde. Es importante conocer bien hasta que temperatura podemos sobrecalentarlo, ya que el acero puede sufrir variación en su microestructura al sobrepasar un determinado rango de temperatura.

Como antes se ha visto, el desmoldeo y el acabado de la pieza son parte del proceso, ya que los bebederos y mazarotas saldrán siendo parte de la misma pieza que el bruto que deseamos obtener.

Tras este proceso, en muchos casos, se realizarán tratamientos térmicos posteriores con el fin de mejorar las capacidades mecánicas de la pieza, su dureza superficial, maleabilidad, etc.

## 2.2 Antecedentes históricos del software de simulación

Los orígenes de la simulación están en la estadística es decir, en los procesos de acumulación de datos. Un proceso del que conozcamos un número suficiente de datos, es un proceso que podemos simular, es decir, afirmar con una certeza estadística variable según el caso, lo que va a suceder si lo repetimos.

Una de las primeras simulaciones comenzó en 1777, se llamó “La aguja de Buffón” que fue un método matemático para buscar el valor del número pi. Más tarde, Laplace retomó la simulación que estudiaba el número de veces que puede cruzar una línea la aguja utilizada en el experimento.

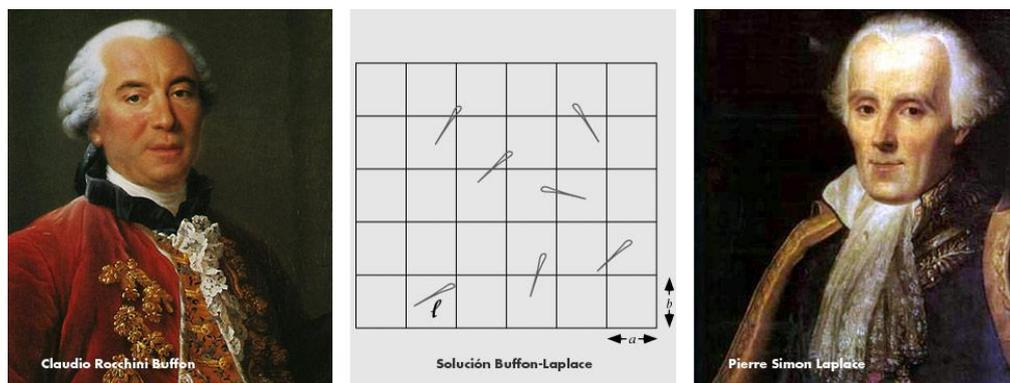


Fig. 7 - Buffon y Laplace [Lander simulations]

Ya sobre las simulaciones de carácter computacional, una de las primeras aplicaciones conocidas fue en el año 1940 por el húngaro Von Neumann, considerado uno de los matemáticos más importantes de la historia moderna y por Stanislaw Ulam que fue un matemático polaco de gran prestigio que participó entre otros en el “Proyecto Manhattan” (proyecto para la creación de la primera bomba atómica). Trabajaron en una simulación sobre el flujo de partículas en la creación de una bomba atómica en relación al “Proyecto Montecarlo”, que intentaba mejorar el flujo de neutrones para conseguir crear la bomba de hidrógeno. [UPV-histinf.blogs.upv.es]

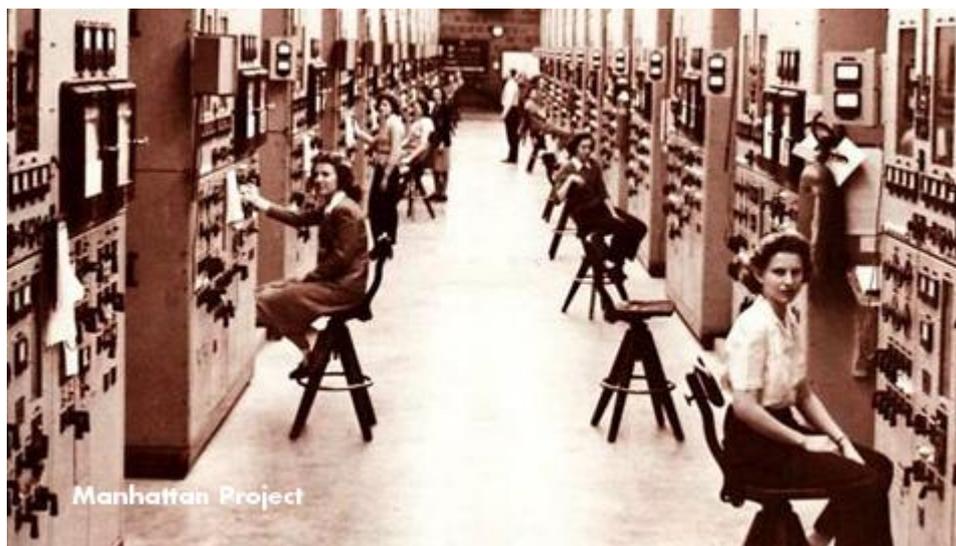


Fig. 8 - Sala de computadores del Proyecto Manhattan

En los años 50 y 60 la simulación era un método muy costoso, el cual solo podían permitirse grandes empresas de sectores potentes, como industrias metalúrgicas o aeroespaciales financiadas por el Estado, en muchos casos con fines bélicos. Durante la Guerra Fría, tras la segunda guerra mundial, el uso de la simulación aumentó para el cálculo de trayectorias de satélites artificiales, misiles, etc.

La resolución de estos problemas requiere de complejos sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales de gran complejidad, para lo que se necesitaba de ordenadores analógicos con complejos elementos electrónicos para aquel momento, que ayudarían a resolver los problemas matemáticos.

Para realizar estas simulaciones era necesario el uso de equipos de gran tamaño, que ocupaban salas enteras y que sin embargo, tenían menos capacidad de computación que cualquier ordenador doméstico actual. Fue ya, como veremos más adelante, a partir de los años 60 cuando se empezó a expandir el método de simulaciones con ordenadores al resto de la industria, debido a la disminución de costes y al aumento de la capacidad.

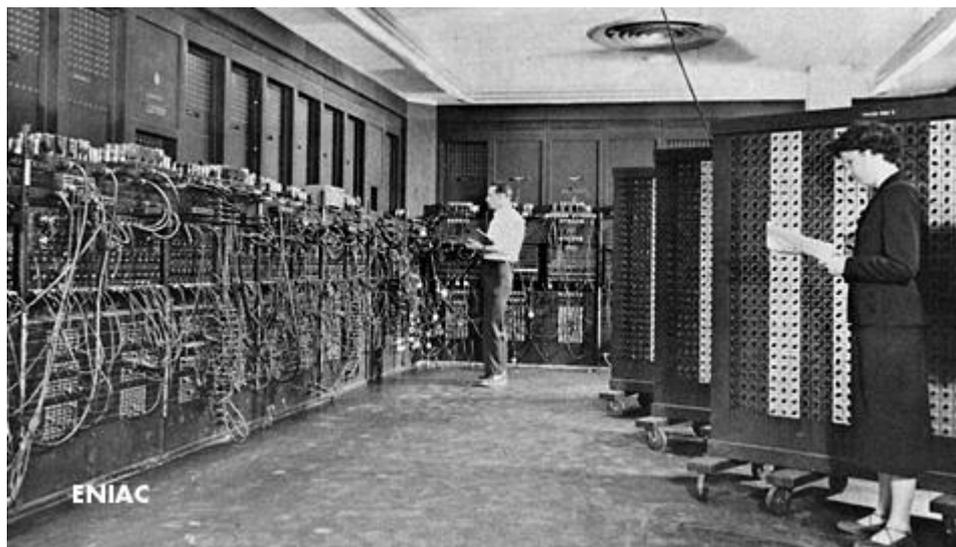


Fig. 9 - Primeros computadores. ENIAC [Calvin-edu]

Entre los primeros usos que se dieron, la predicción del tiempo que se desarrolló por J. G. Charney, R. Fjörtoft y J. von Neumann con el ordenador "ENIAC" (Electronic numerical Integrator and computer) es uno de las más llamativos. [Shurkin, Joel. *Engines of the mind : the evolution of the computer from mainframes to microprocessors*. Nueva York : Norton, 1996.]

Otra llamativa aplicación que surgió fue el de entrenar a los pilotos. Hasta entonces, desde el comienzo de la aviación, los entrenamientos habían sido con artesanales y rudimentarios ingenios que simulaban físicamente el avión. A partir de los años 60, los simuladores con computadores comenzaron a ser de gran precisión y ahorran cientos de horas de vuelo a los pilotos.

Más tarde, a principios de los 80 y 90, con la llegada de los ordenadores personales, surgió el esplendor definitivo de estos sistemas informáticos. Ya desde el año 2000, el software de simulación está extendido al máximo, por lo que las empresas que así lo necesiten pueden trabajar con programas de simulación por un precio asequible a la industria.

Finalmente, en la actualidad, el uso de las simulaciones, llega fuera de la industria. Videojuegos, simuladores virtuales etc. están en cada casa por un precio que hasta hace no demasiados años se consideraría irrisorio.

A modo de conclusión, podemos observar que la ciencia informática es el soporte junto con la matemática y la estadística para el avance y la mejora de los procesos de simulación y con el avance de estos, mejores, más baratas, rápidas y fieles simulaciones podremos conseguir.

## 2.3 Evolución del software aplicado a la ingeniería

### 2.3.1 Evolución temporal

El inicio de la expresión gráfica fueron, los modelos y el dibujo a mano más primitivos, sobre piedra en las cuevas o sobre papel. Esto se remonta a la época de las más antiguas civilizaciones.

Se podría decir que los primeros ingenieros, tal y como lo entendemos hoy en día, aparecen en el momento de la primera revolución industrial en Inglaterra. En ese momento no hubo cambios importantes en los resultados relacionados con la expresión gráfica, los técnicos y el personal de apoyo usaban papel sobre una mesa de dibujo. En ciertas ocasiones se usaban maquetas para ayudar a ilustrar u optimizar un proceso ingenieril. El modo de funcionamiento no evolucionará mucho hasta mediados del siglo XX. Comienza a ser habitual el uso de modelos a escala, además del dibujo a mano, para grandes proyectos con alta complejidad.

El modelo, además del servicio como una herramienta de comunicación con los clientes, es necesario en estos proyectos debido a la complejidad de las plantas y fábricas y de los procesos industriales. Hasta el último tercio del siglo, esas maquetas y modelos son la mejor forma para intentar analizar de antemano las interferencias, capacidades, etc. de los sistemas para prevenir errores a la hora de llevar a cabo el proyecto final. Los primeros ordenadores que aparecen no tienen gran capacidad, por lo que su uso en estudios industriales es bastante escaso, pero es a partir de los 70 cuando empiezan a aumentar sus capacidades y la industria comienza a incluirlos en sus modos de trabajo habituales. A partir de los 80 son esenciales en proyectos complejos, y es ya en la última década del siglo pasado, cuando pasan a formar parte de la vida cotidiana de cualquier empresa de carácter industrial, tanto por su capacidad en los procesos de simulación, como por su capacidad de almacenamiento e indexado de datos. Esto supone un salto exponencial en la industria, que comienza ya a olvidar que era el dibujo a mano y pasa íntegramente, ya en el siglo XXI, a ser todo por ordenador.

Si hablamos de software de simulación, debemos saber que los inicios de estas potentes herramientas comenzaron con cosas lógicamente más sencillas, como el dibujo por ordenador. A principios de los años 40, se comenzó el desarrollo del primer ordenador digital y con él los primeros trabajos, aún muy básicos en el sector de la aeronáutica.

Creado en la década de 1950, el primer ordenador comercial sale al mercado. Probablemente la obra más importante, en lo que saltos en la técnica se refiere. Será de gran utilidad en el tratamiento de curvas polinómicas, superficies y sistemas gráficos por ordenador. En los años 60 y 70 ingenieros como Bezier, Eastman, Fergusson, Boor, Casteljaou, Ross o Sutherland desarrollan en el ámbito de las industrias del motor, tales como Renault, Citroën, Chrysler, Ford y GM; de la industria de la aviación como Boeing; u organizaciones de investigación: como el MIT; una mejora de la técnica del análisis computacional de gran importancia.

Los productos pioneros en este campo salen al mercado entre 1965 y 1970. Por el momento sólo las grandes compañías (General Motors o Renault...) pueden adquirir los medios capaces de soportar un software así. Conforme estos equipos se fueron haciendo más asequibles, sus aplicaciones crecieron. En los años 70 estos programas sólo soportaban el trabajo en dos dimensiones, se utilizaban para la creación de planos mediante un proceso análogo al dibujo clásico. Entonces aparece la primera de las compañías de DAO del mundo, enfocada al dibujo, llamada entonces M&S Computing, y que después cambiaría su nombre a Intergraph. A principios de los 80, los sistemas de diseño asistido por ordenador conllevan el uso de un procesador de 16 bits con un máximo de 512 Kb de memoria y de 20 a 300 Mb de capacidad de almacenamiento de datos y su valor era de aproximadamente 125.000 \$ de la época.

A principios de los 80 se crean las primeras grandes empresas de software de dibujo, diseño y simulaciones por ordenador, como por ejemplo Dassault Systems del grupo empresarial Avions Marcel Dassault. Con programas como Catia o Autocad, empezarán trabajando sobre 2D pero pronto llegarán otros programas potentes y asequibles a pequeñas y medianas empresas. En el 85 se crea Bentley Systems, con su programa estrella, MicroStation. A finales de los 80 funcionan los procesadores Intel 8086 con su coprocesador matemático 8087. Otros programas que salieron al mercado en los siguientes años fueron: Pro/Engineer (PTC), SolidWorks y SolidEdge (UGS). Una de las mejoras importantes fue el uso de los sistemas paramétricos, ya que evitaban la necesidad de realizar correcciones de todo el conjunto para la modificación de una pequeña parte, ya que con simplemente variar el parámetro necesario, el resto se reajustaban de manera automática. A finales de los 90, ya con la llegada del nuevo siglo, los programas pasan a ser, debido a la mejora de los procesadores, mucho más ligeros y con la capacidad de llegar incluso a los ordenadores personales.

### **2.3.2 Características esenciales del software de simulación actual.**

- Creación de modelos en tres dimensiones de manera virtual. Nos ofrecen la capacidad de llevar a cabo gran variedad de simulaciones.
- Ofrecen al usuario la capacidad de crear en segundo plano todo un conjunto de documentación y bases de datos asociadas a la simulación.
- Realizan análisis de capacidades de la simulación y eficiencia de la misma, orientándonos a la mejora.
- Análisis múltiple de defectos, tanto en la concepción de la pieza como en la forma de insertar la colada, respiraderos, mazarotas etc.

- Cálculo de velocidades de enfriamiento, velocidades de entrada del fluido, zonas de endurecimiento y demás parámetros de gran utilidad al usuario.
- Nos da una imagen en 3D del modelo, de la forma en la que entra la colada y de las zonas críticas.
- Nos permite obtener información que podemos reproducir (videos, imágenes) cuantas veces sea necesario para el estudio.
- Incluyen librerías con datos industriales, comerciales etc. Nos permite hacer un uso más rápido.
- Son sistemas que funcionan con parámetros iniciales que nos permiten hacer un estudio de “prueba y error” al ir ajustando nuestros parámetros y lanzar simulaciones múltiples.
- Los últimos programas incluyen su propia gestión de archivos interna, donde se salvaguardan las distintas versiones y permite el trabajo de distintos usuarios sobre un mismo proyecto.
- Incorporan sistemas de compatibilización de archivos, es decir, podemos exportar diseños o parámetros de otros programas distintos y sobre ellos trabajar en el nuestro.

### 2.3.3 Ingeniería asistida por ordenador

En la actualidad, el conjunto de programas que se utilizan en las oficinas de ingeniería, son denominados programas de IAO (ingeniería asistida por ordenador).

Los programas de IAO comprenden todos los programas que ayudan a mejorar el funcionamiento de los desarrollos en ingeniería, desde programas de cálculo como puede ser MathLab, a programas de simulaciones de procesos de fundición como los que se tratan en este TFG. Debemos tener en cuenta que hoy en día muchos de ellos están interconectados, es decir, para simular una pieza de fundición antes se debe dibujar en un programa como Catia, Solid Works o similar. Existen formatos intermedios como por ejemplo .stp o .iges, que hacen las veces de puente entre distintos programas, dependiendo del sector del que se trate serán unos u otros.

Hoy en día existen gran variedad de programas con capacidades transversales, es decir, te permiten hacer varias funciones, como diseñar la pieza y simular por método de elementos finitos su capacidad resistente ante cargas o realizar ensayos, videos, superponer distintos elementos para realizar comparativas, etc.

También es de gran potencia de cálculo la discretización del material a estudiar, para ello se debe llevar a cabo la creación de un mallado adecuado, en el que dependiendo de la cantidad de nodos podemos recibir un retorno de mayor o menor calidad y fidelidad a la realidad. Este mallado, como el que usan programas de cálculo de elementos finitos y también los programas de simulación de fundiciones por ordenador, puede ser de mayor o menor envergadura. La cantidad de nodos, además de afectar a la calidad del resultado, afectará directamente al tiempo de cálculo, ya que la velocidad del procesador está relacionada directamente con ello. En un proceso muy complejo, si deseamos obtener resultados con relativa inmediatez, debemos trabajar con un equipo informático de más potencia, si por el contrario, simplemente queremos una estimación, reduciendo la cantidad de nodos del mallado podremos obtener una estimación de menor calidad.

Es labor del ingeniero evaluar la necesidad de elegir un mallado u otro en función de los resultados que desea obtener y también será labor de este, evaluar la representatividad y la fidelidad con la realidad del resultado obtenido. Un buen ingeniero debe intuir si los resultados que el programa devuelve son acordes a la realidad o por el contrario no reflejan esta en absoluto.

El trabajo sobre estos programas requiere, para sacar su máximo rendimiento, un conocimiento amplio de la materia, en este caso, de los procesos de fundición, ya que de lo contrario no podríamos contrastar la veracidad de la información reportada por el programa.

Como ya hemos hablado antes, uno de los pilares en estos programas de IA0 es la capacidad de parametrización que tienen, es decir, nos permiten prefijar los valores de los distintos elementos a conjugar en la simulación. Esta capacidad de parametrización nos facilita sustancialmente el trabajo, pero es en ese punto donde debemos ser estrictos y muy minuciosos. Una mala parametrización nos devolverá una simulación incorrecta, que solo podremos detectar si tenemos conocimientos amplios de la materia que estamos simulando.

### 2.3.4 Fabricación asistida por ordenador

El enlace entre estos programas de IA0 y la fabricación, podríamos decir que es el último eslabón de la cadena. Simplificando al máximo los pasos del proceso industrial, hablaríamos de diseñar, ensayar y fabricar.

Entre estos dos últimos pasos se encuentra lo que se llama fabricación asistida por ordenador.

Si tratáramos sobre el sector del mecanizado, después del diseño en un programa de DAO (diseño asistido por ordenador), podríamos ensayar la resistencia mecánica con un programa de análisis de elementos finitos, véase “Ansys”, y por último lo introduciríamos en una máquina herramienta con la capacidad de fabricar a partir de estos programas CAM (siglas en inglés de fabricación asistida por ordenador).

En el caso de los procesos de fundición, podemos comparar los datos obtenidos en el proceso real con los que hemos recibido del programa y así modificar los parámetros de nuestro horno o de nuestro sistema de enfriamiento de colada, incluso automatizar este proceso para así optimizar al máximo el mismo.

### **2.3.5 Interfaz visual.**

Uno de los grandes saltos cualitativos que ha dado este tipo de programas, es la inclusión de elementos visuales de gran calidad que representan las simulaciones que se están efectuando.

No solo obtendremos una hoja de datos de gran valor, sino que también nos servirá para mostrar de manera muy intuitiva como se produce el llenado del molde o la salida de la colada (en el caso que tratamos).

Según regulemos la escala, que habitualmente se representa con colores, veremos por pantalla las variaciones que más nos interesen. Una escala bien afinada, nos dará exactamente los puntos que buscamos y los momentos de la simulación en los que se producen los cambios que deseamos controlar.

En la siguiente imagen sacada del programa Flow 3D Cast, podemos ver un ejemplo.

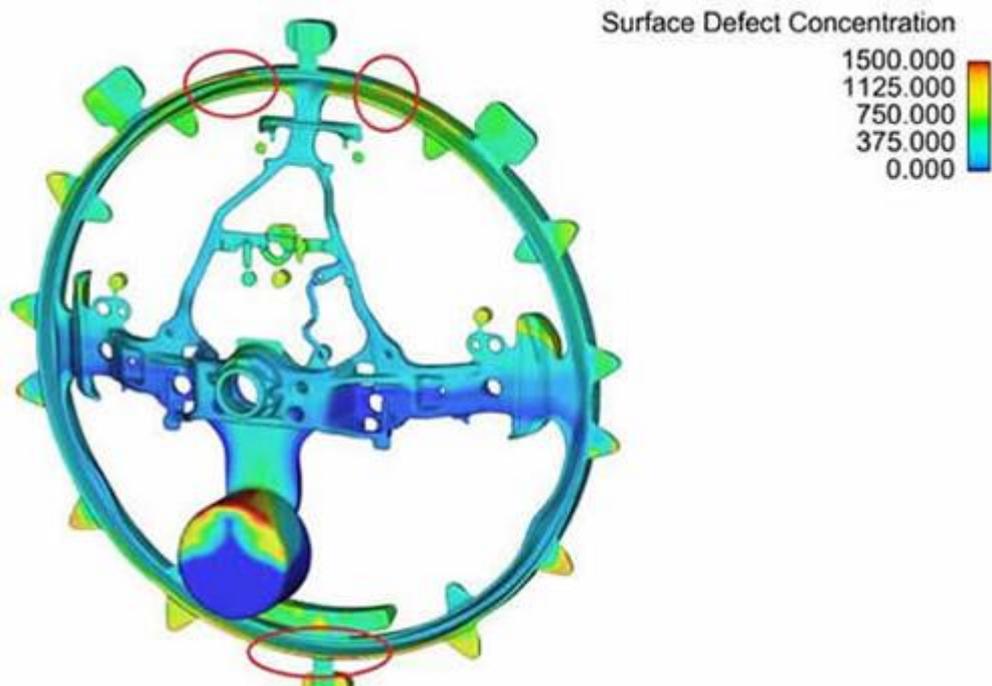


Fig. 10 - Escala de colores para representar valores de estudio [Flow 3D cast]

En la imagen se observa la concentración de defectos con distintos colores. Para entender de manera más intuitiva los datos que nos aporta el programa, habitualmente las escalas irán de azul a rojo (frio-calor) o escalas similares por un concepto cultural (el rojo es calor, precaución o error). En la imagen vemos que en rojo se representa el lugar donde más defectos se acumulan.

En la siguiente imagen, podemos ver otro ejemplo, esta vez sacado del programa Pro Cast. En este ejemplo observamos la escala de temperatura de la colada. Como hemos visto anteriormente, el rojo representa temperaturas altas y el azul bajas. Así, podemos observar como en el bebedero, la temperatura de la colada es mucho mayor que en el interior de la cámara del molde.

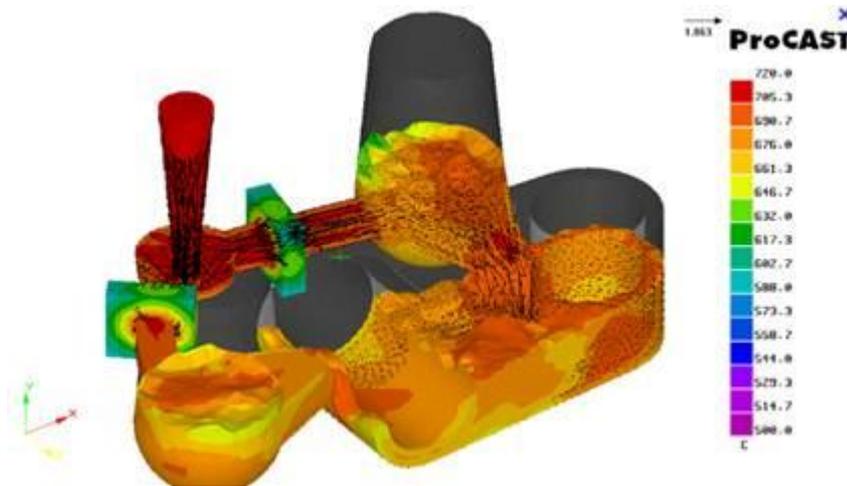


Fig. 11 - Escala de temperaturas por colores [Procast]

Este tipo de análisis visual, no nos mostrará datos exhaustivos, ya que esos datos se obtendrán en tablas numéricas, punto a punto. El análisis visual nos ofrece la capacidad de hacer una rápida verificación de que el procedimiento está dentro de los valores que esperamos obtener. Esta simulación, no nos dará resultados definitivos, pero si nos permitirá descartar resultados que no se ajustan a lo esperado de una manera sencilla y rápida.

Por otra parte, hoy en día en todas las grandes empresas se trabaja con presentaciones grupales, en las que estos elementos visuales son muy potentes de cara a dar una noción del asunto a quien no está al 100% implicado en el proceso concreto.



## 3. Método de análisis computacional

### 3.1 Método utilizado en un estudio básico

Para el análisis del proceso de fabricación de una pieza por el método de colada de fundición, utilizaremos programas de simulación computacional. El método de realización de un volumen de control para el cálculo de este asunto es el más habitual, por ser un método robusto, muy utilizado para modelizar todo tipo de volúmenes en el campo de la ingeniería de fluidos. Este método se puede aplicar para la simulación de solidificación de fundición de metales en el molde de arena y otras aplicaciones.

Es una característica distintiva del método desarrollado, la posibilidad de aplicación de la computación distribuida que proporciona un buen resultado en la velocidad de cálculo, sin embargo exige una mayor capacidad de la memoria RAM del dispositivo utilizado.

Esta computación distribuida consiste en utilizar varios procesadores al mismo tiempo.

Los ordenadores personales contienen en la actualidad una media de entre 2 y 8 núcleos, dependiendo del precio del equipo. Los ordenadores utilizados para simulaciones en laboratorios pueden llegar a tener miles, como es el caso del computador Magerit, de la U. Politécnica de Madrid con sus 3920 núcleos de procesamiento.

## 3.2 Puesta en situación

Los procesos de producción de elementos conformados mediante técnicas de fundición, nos aportarán unas propiedades mecánicas óptimas, con lo que podemos solventar los inconvenientes habituales que se nos plantean en la industria metalúrgica actual.

En este TFG estudiaremos los métodos actuales de simulación, los cuales mejoran la calidad de la producción al conseguir anticiparse, a través de un modelo computacional, al resultado que obtendremos en la realidad. La ejecución de esta tarea está conectada con los sistemas de análisis computacional y simulación de los procesos tecnológicos de la producción de fundición. Un buen simulador nos proporcionará el análisis exacto de las decisiones tecnológicas aplicadas a la formación del metal y de sus cualidades, lo cual nos interesa ya que es el motivo principal del uso de este tipo de programas.

Este tipo de programas permitirá ampliar considerablemente la información necesaria sobre el ciclo de vida de las piezas de fundición ya en la fase de diseño, para realizar las acciones necesarias y así lograr la optimización de la parte de diseño.

El desarrollo de los sistemas CAD / CAE / PLM en ingeniería mecánica está estrechamente relacionado con la simulación matemática y el soporte de información de los procesos de producción. La automatización de las elaboraciones de los diseños debe ser seguida por el análisis continuo en el campo de la calidad, para lo que toda la cadena de producción incluirá las acciones necesarias para recibir detalles de la calidad con los mínimos gastos de recursos posibles, es decir, cuanto más controlado esté el proceso mejor aseguraremos su calidad.

En la actualidad, se presenta una nueva gama de tareas relacionadas con la simulación por computadora de la tecnología de fundición, donde los métodos principales son el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas. Estos métodos están bien probados para la solución de problemas de conductividad térmica no estacionaria y el cálculo de solidificación de fundición en un molde. Por lo tanto, el software moderno está disponible incluso en ordenadores personales potentes, con una configuración ampliada de la potencia de cálculo y la memoria de acceso aleatorio.

Los procesos de fundición son desde el punto de vista teórico la suma de varios procesos. Las características finales obtenidas en la pieza serán debidas a estos:

- El proceso de llenado del molde, lingote, etc. de metal fundido que sigue las leyes de Navier-Stokes.
- El enfriamiento y solidificación del material por transmisión de calor, modelizado por la leyes termodinámicas de Fourier.
- Las tensiones y deformaciones que sufre la pieza en el proceso de enfriamiento y solidificación se rigen por las leyes de conservación de la cantidad de movimiento.

### 3.3 Desarrollo

La opción clásica de la ecuación de conductividad térmica con fuentes internas de calor es la siguiente:

$$Kx \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Kz \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + qv = C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Después de la integración de la ecuación diferencial recibimos una matriz global de registro que es la siguiente:

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (2)$$

Donde [C], [K] - matrices de capacidad térmica y conductividad térmica; {T},  $\{\partial T / \partial t\}$ , {F} - vectores de temperaturas, gradientes de temperatura y carga térmica.

En el caso de la aplicación del método de diferencias finitas, la ecuación (2) después de la integración numérica, conduce al sistema de las ecuaciones algebraicas lineales. Este esquema numérico posee las propiedades de aproximación, convergencia y estabilidad. En la actualidad se aplica muy raramente debido a la baja productividad de los cálculos y la acumulación de errores debido a la inexactitud de la representación de la geometría.

Una característica importante en cualquier simulación de un problema de solidificación, es la cuantificación del calor latente de cristalización que siempre acompaña al proceso de transformación de fase. Este fenómeno puede presentarse como carga térmica adicional o como cambio de la capacidad térmica. Como la tasa de absorción del calor latente de cristalización no es lineal, su cálculo es complejo por lo que aumenta significativamente el tiempo de simulación.

En el caso de aplicación del método de elementos finitos, se utiliza un esquema de cálculo donde la temperatura de cada elemento se presenta en forma de valores en nudos de elementos (función de la distribución de temperatura en el espacio de sistemas de coordenadas axiales x, y, z). Los valores nodales de la temperatura definen inequívocamente la función de cambio de temperatura en el volumen.

El uso de los cálculos paralelos o distribuidos<sup>1</sup> en este caso es posible, pero es complejo para un ciclo de la decisión, ya que todas las matrices globales se utilizan. El desarrollo de algoritmos especiales es necesario para la implementación de los flujos de cálculos distribuidos. Actualmente, tales algoritmos existen. Para este tipo de tratamiento de datos y ejecución de cálculos, son necesarios procesadores de gran capacidad a fin de lograr un aumento significativo en el aumento de la velocidad de cálculo.

Para la realización por ordenador del cálculo de solidificación de metal de fundición en un molde, se desarrolla el procedimiento de cálculo especial donde la ecuación de equilibrio térmico para el elemento de la división de rejilla es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^m k_{i,j}^n (T_i^n - T_j^n) F_{i,j} \Delta\tau = C_i G_i (T_i^n - T_j^n) \quad (3)$$

Donde:

- k - Coeficiente de transferencia de calor entre los elementos i y j.
- M - Cantidad de lados no adiabáticos de un elemento.
- F - Área de contacto entre los elementos i y j.
- C y G - Capacidad térmica específica de material y su peso.
- $\Delta\tau$  - Paso del tiempo.
- N - Índice de tiempo.

---

<sup>1</sup>“Los ordenadores de hoy en día son cada vez más rápidos, y los fabricantes, en vez de hacer un único microprocesador o núcleo más avanzado y con consumos muy elevados, ponen dos, cuatro o más, incluso 80 en algunos ordenadores experimentales”, detallan los investigadores Diego Llanos y Arturo González.

En el contacto de un elemento  $i$  con un elemento  $j$ , el coeficiente de transferencia de calor se determina mediante la fórmula:

$$k_{i,j} = \frac{1}{(L_i / \lambda_i + L_j / \lambda_j)} \quad (4)$$

Donde “L” distancia desde el centro de gravedad de un “i” elemento con el coeficiente de conductividad térmica “ $\lambda$ ” al siguiente elemento en la dirección del movimiento del flujo térmico.

Con el uso de la fórmula (4) es posible la realización del cálculo para el método de control de volumen.

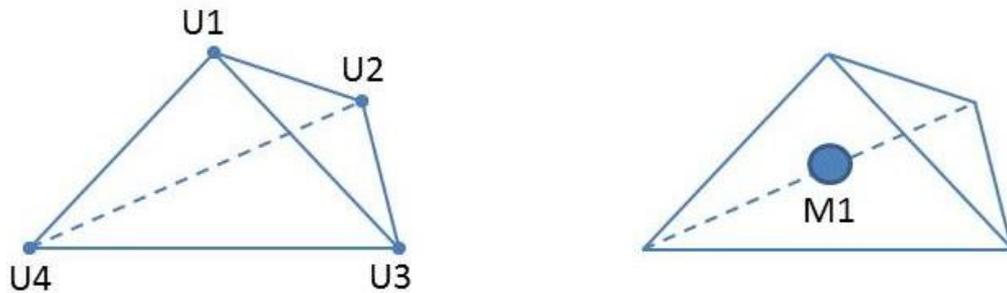


Fig. 12 - (a)-(b)

El algoritmo desarrollado requiere determinar, mediante la fórmula (3) y la fig. (b) en la etapa de generación preliminar de la cuadrícula calculada de elementos finitos, los parámetros adicionales para la simulación. Estos son volúmenes de cada elemento, distancia de los centros de masa, áreas de los lados, condiciones de contorno, condiciones iniciales, etc. Para esta tarea existe un software especial denominado como preprocesador, realizando la preparación de la matriz calculada. Este enfoque, a diferencia de los tradicionales, exige el mayor volumen de memoria RAM (aproximadamente el doble), ya que toda la información necesaria para los cálculos se utiliza de inmediato, sin cálculos intermedios.

La ventaja del esquema de cálculo desarrollado, es la posibilidad de aplicar la computación distribuida y paralela, ya que el método de control de volumen no utiliza toda la matriz calculada constantemente y realiza iteraciones individuales con cada elemento sin una secuencia concreta. Los resultados del cálculo de nudos térmicos para la solidificación completa de la colada, son como los de la imagen que se muestra a continuación. Con la aplicación del método clásico, el cálculo llevaría aproximadamente un 25% más de tiempo de procesamiento de datos que la tarea similar con el uso del método de control de volumen.

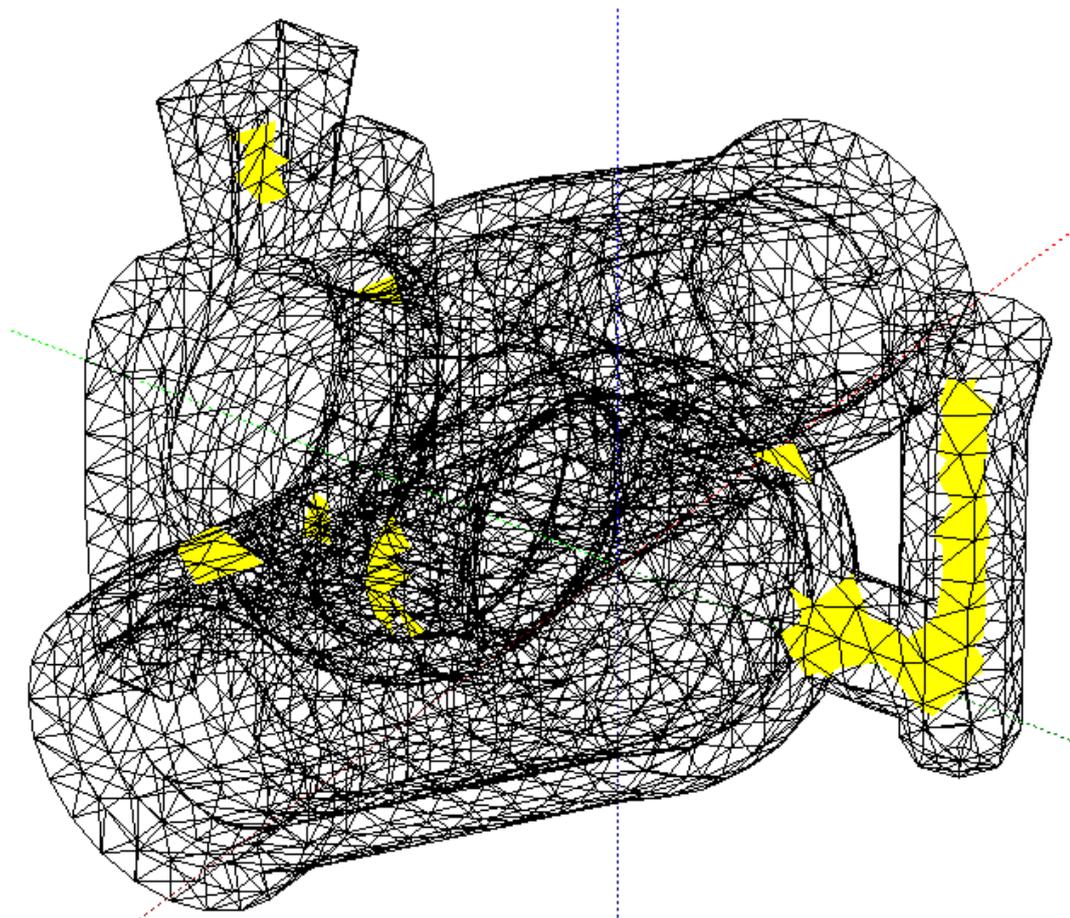


Fig. 13 - Mallado (a)

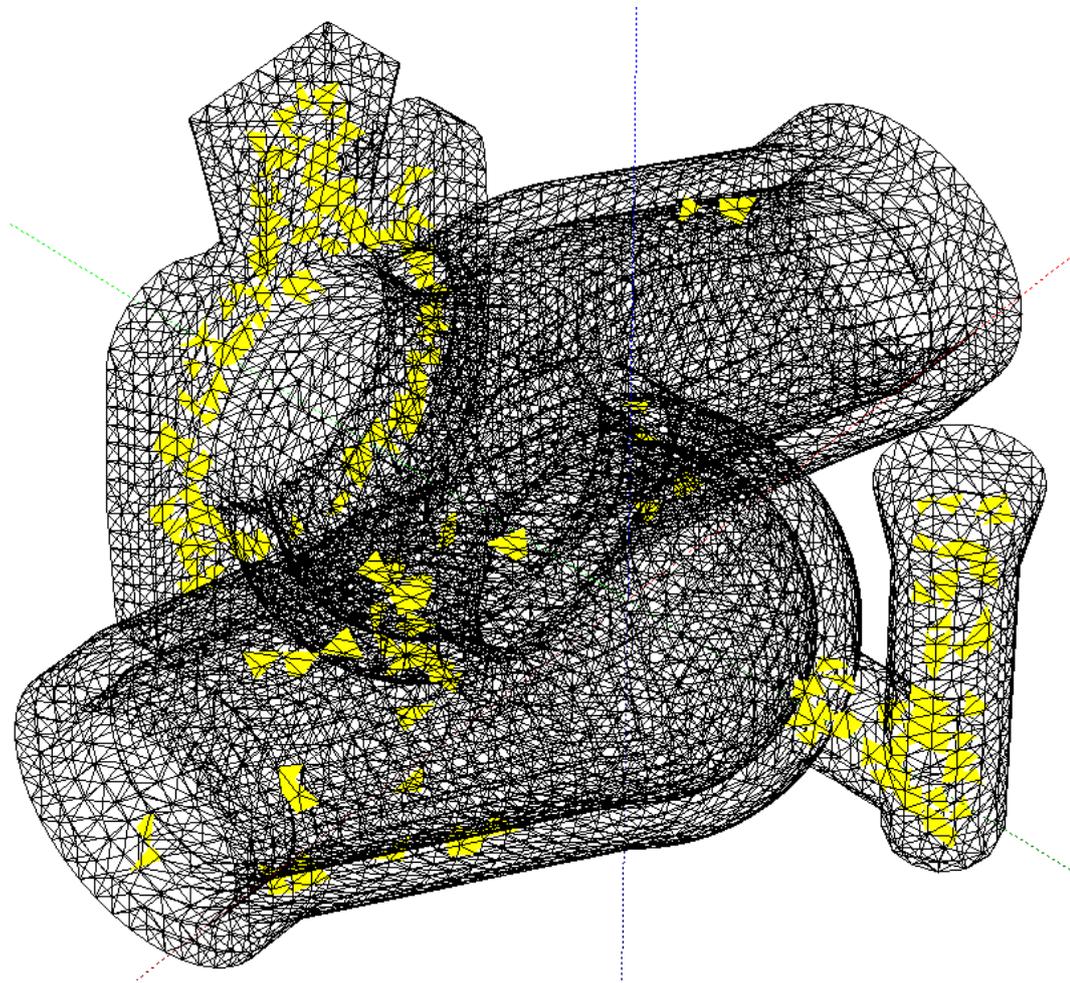


Fig. 14 - Mallado (b)

*Ejemplo de simulación de la solidificación de una pieza de fundición (los nudos térmicos se destacan en color amarillo) a) Si se aplica el método clásico de cálculo de la conductividad térmica; b) Si se aplica el método de volumen de control con el cálculo distribuido.*

En la (b) se presenta el resultado del cálculo utilizando el método de volumen de control y el cálculo paralelo. Para dar una visión general podríamos poner un ejemplo aproximado en el que con un procesador de dos núcleos con una capacidad similar a un Intel Core I-5 (PC doméstico) llevaría aproximadamente una hora. Aquí la cantidad de elementos de la cuadrícula de elementos finitos sería superior al medio millón de celdas.

Dependiendo del tamaño de las celdas y de la cantidad de ellas, obtendremos una mejor resolución o un mejor tiempo de respuesta.

La aplicación práctica del método de cálculos paralelos consiste en la posibilidad de simulación iterativa del proceso. También nos da la oportunidad de usar tecnologías avanzadas incluyendo la optimización topológica del diseño de fundición. En este caso se requiere una repetición múltiple de la simulación de solidificación donde en cada paso de iteración, se lleva a cabo la optimización de la geometría o forma de colada en la función.

Es un proceso largo para el cual se deben desarrollar especialmente los cálculos paralelos que permiten reducir el tiempo de cálculo. La optimización topológica permite ejecutar la redistribución de elementos del sistema de colada o de los volúmenes de la misma.

La adición o eliminación de los elementos pertenecientes a la fundición metálica a un molde, es realizada en función del criterio elegido y se debe hacer en cada paso de cálculo de las iteraciones. [Use of the distributed computing at the castings solidification simulation. E.O. Ol'khovik, A.A. Butsanets. 2015].



## 4. Estudio matemático aplicado

### 4.1 Estudio teórico

#### 4.1.1 Introducción

El proceso de colada continua es un proceso de enfriamiento y solidificación de acero fundido. El método habitual de enfriamiento consiste en rociar agua para disminuir la temperatura. Es un proceso complejo de solidificación interna, debido a la transferencia de calor y al estado de tensión de la colada en el proceso de solidificación.

La densidad de transferencia de calor tiene un impacto significativo en la tasa de solidificación, en la formación del sólido y en el estado de tensión interno.

Bajo el complejo estado de tensión por la presión estática de acero fundido y las tensiones internas de la colada debidas al enfriamiento, se producirá una deformación compleja de la corteza del sólido final. Grietas y defectos de forma, pueden aparecer por la excesiva deformación.

Actualmente, el modelo matemático de solidificación y transferencia de calor ha sido establecido para simular la distribución de temperaturas y el estado de la tensión del lingote delgado. Este elemento tiene establecido un modelo de elementos finitos para analizar la distribución de temperaturas y deformación termo-mecánica del proceso de la solidificación del acero fundido.

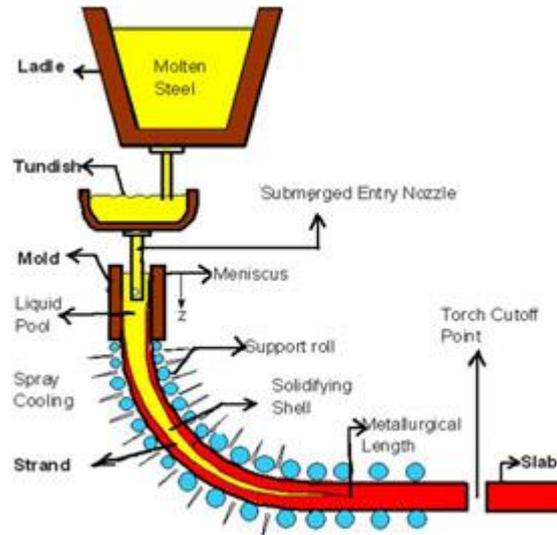


Fig. 15 - Modelo esquemático de la obtención del lingote

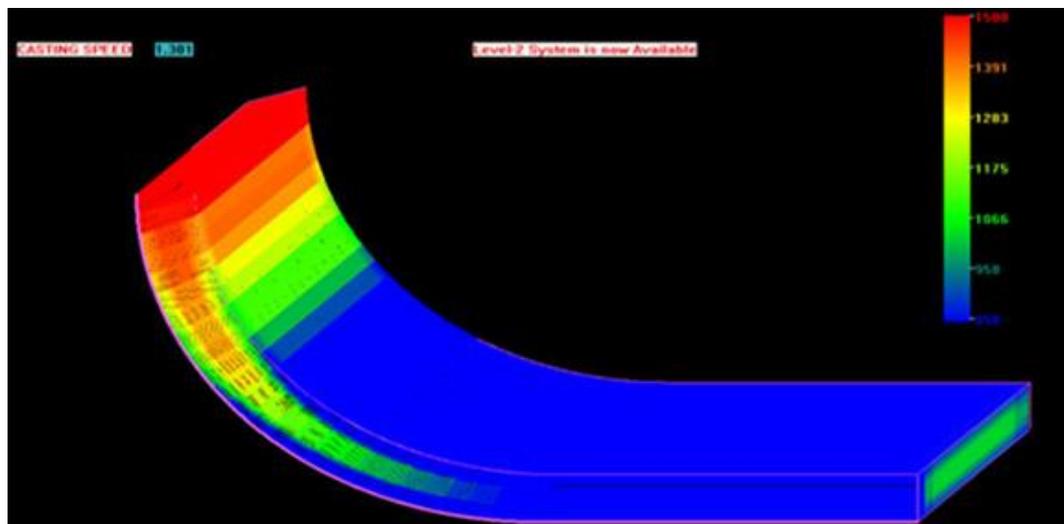


Fig. 16 - Velocidad de enfriamiento

Según el modelo de tensión térmica que conjuga los factores elástico, viscoso y plástico para simular el proceso usado en la dimensión media del corte transversal de la parte estrecha de un lingote, vemos que añadiendo un precalentamiento al molde, podría reducir grietas internas.

La causa principal de la aparición de grietas consiste en que la tensión superficial y la tensión interna de la pieza exceden los valores aceptables, además la aparición de impurezas también influye en el incremento de estas grietas.

#### 4.1.2 Modelo matemático de transferencia de calor

En la fórmula (5),  $t$  representa la temperatura instantánea de la pieza,  $\lambda$  es la conductividad térmica eficaz y  $C$  representa el calor específico equivalente.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_e \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_e \frac{\partial t}{\partial y} \right) = C_e \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (5)$$

El calor específico de la región sólida y de la región líquida, es el mismo que el calor específico inicial. El calor específico de la zona viscosa puede ser ganado por la fórmula (6).

$$C_e = C - \rho \times \Delta H \times \partial f_s / \partial f \quad (6)$$

En la fórmula (6), el  $\rho$  representa la densidad,  $f$  representa la fracción sólida y  $\Delta H$  el calor latente.

El modelo matemático diferencial, se ha establecido despejando la ecuación diferencial, y se ha tenido en cuenta la sección media del lingote para la simetría del modelo de enfriamiento.

Como ejemplo utilizaremos la siguiente pieza. La distancia en el modelo es: 4 mm para la dirección x y 2.5 mm para la dirección y.

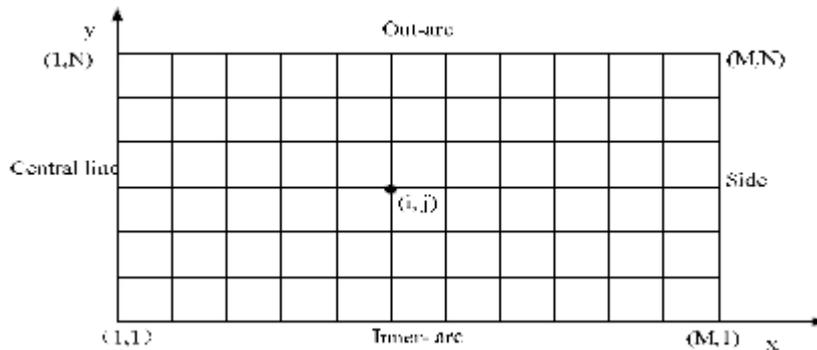


Fig. 17 - Mallado que representa la sección transversal de la pieza

$$A_1 = \rho C_e (\Delta x)^2 \quad A_2 = \rho C_e (\Delta y)^2 \quad (7)$$

De acuerdo con la teoría del balance térmico en la pieza, la temperatura del nodo interior en la sección transversal se puede obtener por la fórmula (8). En la fórmula,  $T_{i,j}$  es la temperatura de un nodo en la sección transversal,  $t^k$  representa la temperatura del nodo y  $t^{k+1}$  es la temperatura del nodo para el siguiente paso.

$$t_{i,j}^{k+1} = t_{i,j}^k + \Delta\tau \frac{\lambda_1 T_1 + \lambda_2 T_2}{A_1} + \Delta\tau \frac{\lambda_3 T_3 + \lambda_4 T_4}{A_2} \quad (8)$$

La temperatura de nodos de la esquina puede ser obtenida por la fórmula (9), y la condición de la ecuación diferencial para el nodo de la esquina es la más estricta entre los nodos en el corte transversal. A fin de hacer la ecuación diferencial convergente, el coeficiente de  $t_{i,j}$  en la fórmula (9) debería ser mayor o igual a cero. La condición de estabilidad para la ecuación se obtiene de la fórmula (10).

$$t_{i,j}^{k+1} = \frac{2\Delta\tau}{\rho C_e} \left( \frac{\lambda_1 t_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{\lambda_4 t_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} + \frac{h_x t_0}{\Delta x} + \frac{h_y t_0}{\Delta y} \right) + \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{\rho C_e} \left( \frac{\lambda_1}{(\Delta x)^2} + \frac{\lambda_4}{(\Delta y)^2} + \frac{h_x}{\Delta x} + \frac{h_y}{\Delta y} \right) \right] t_{i,j}^k \quad (9)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\rho C_e}{2 \left( \frac{\lambda_1}{(\Delta x)^2} + \frac{\lambda_3}{(\Delta y)^2} + \frac{h_x}{\Delta x} + \frac{h_y}{\Delta y} \right)} \quad (10)$$

## 4.2 Estudio sobre los diferentes elementos que originan pérdidas de calor en la colada.

### 4.2.1 Condición inicial

Con condiciones iniciales:  $\tau = 0$ ;  $t(0, 0) = T_c$ .

$T_c$  representa la temperatura de colada y  $\tau$  representa el tiempo de residencia de la sección en el molde.

### 4.2.2 Molde

Para el caso de molde del tipo de arco vertical, el flujo de calor del molde cambia ligeramente con la velocidad de la colada.

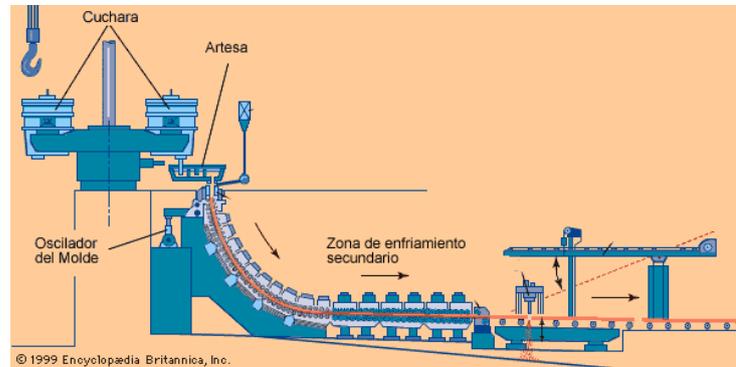


Fig. 18 - Esquema sistemas de enfriamiento [IMH.eus]

$$q = K(A - B\sqrt{\tau}) \quad (11)$$

En la fórmula (11),  $q$  representa el flujo de calor del molde,  $W/m^2$ ,  $A$  es el flujo de calor en el molde,  $B$  es constante  $W/(m^2 s^{0.5})$ ,  $\tau$  representa el tiempo de residencia de la sección en el molde y  $K$  es el coeficiente de corrección del flujo de calor.

### 4.2.3 Zona de enfriamiento.

Tras el paso anterior, obtener lingotes con los moldes, llega el momento de enfriarlo. Para el caso que estamos tratando, enfriaremos rociando agua. El coeficiente de transferencia de calor entre el agua que se rocía y la superficie del lingote puede ser calculado por la fórmula (12).

$$h = n_0 \times T_w^{n_1} \times W^{n_2} \quad (12)$$

En la fórmula,  $h$  representa el coeficiente de transferencia de calor en  $J/(m^2 s ^\circ C)$ ,  $T_w$  es la temperatura de la superficie de la pieza y  $W$  representa la densidad media del flujo de agua en  $L / (s m^2)$ .

#### 4.2.4 Área de contacto con los rodillos

La transferencia de calor en el área de contacto del rodillo y el metal, es una forma de refrigeración secundaria y puede ser obtenida por medio de la siguiente fórmula:

$$q = 11513,7T_w^{0,76}V^{-0,20}(2\alpha)^{-0,16} \quad (13)$$

En esta fórmula (13),  $V$  representa el caudal de la colada en el m/minuto y  $2\alpha$  representa el ángulo de contacto entre el rodillo y el lingote de metal.

#### 4.2.5 Zona de la radiación y zona del enfriamiento por aire

La transferencia de calor en la zona de la radiación y en la zona del enfriamiento por aire puede ser calculada con la siguiente fórmula (14):

$$q = \varepsilon\delta[(T_w + 273)^4 - (T_0 + 273)^4] \quad (14)$$

En la fórmula,  $\varepsilon$  es el coeficiente de absorción de la superficie de la losa,  $\delta$  es la constante de Stefan Boltzmann y  $T_0$  representa la temperatura ambiente.



Fig. 19 - Fleje de fundición [Biblioteca digital]

### 4.3 Modelo de la tensión termal, elástico y plástico

La tensión y la deformación de la pieza delgada en la dirección perpendicular a la colada, mantiene una posición dominante respecto a la tensión en la dirección de la colada. Para lingotes delgados de fundición, utilizaremos un modelo de deformaciones infinitesimales y la premisa de que el material es isotrópico y simétrico. Los incrementos de tensión y de deformación en la fase plástica se han descrito con la ley de flujo de Prandtl, y el rendimiento de la cáscara solidificada se ha descrito con la ley de Von Mises. La cáscara se solidificará de manera isotrópica.

### 4.3.1 Ecuación básica

La sección de dos dimensiones del lingote delgado bajo las condiciones de equilibrio estático es representada por la fórmula (15). La pieza mantiene su integridad y continuidad cuando se deforma y la deformación cumple con la ecuación (16).

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial_j} + F_i = 0; (i, j = x, y) \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial_y \partial_x} \quad (16)$$

Donde  $\tau_{xy}$  es la tensión tangencial,  $\sigma_i$  es la tensión normal,  $F_i$  es la fuerza aplicada,  $\varepsilon_i$  es la deformación normal y  $\gamma_{xy}$  es la deformación tangencial.

Las ecuaciones tensión-deformación de la pieza delgada en la fase de deformación elástica y plástica se han obtenido según las hipótesis. La relación de la deformación y la tensión en la fase elástica obedece a la ley general de Hooke. La expresión para el incremento se muestra en la fórmula (17). La relación entre el esfuerzo y la deformación en la fase plástica puede expresarse mediante la ecuación de Prandtl (18).

$$d\varepsilon_{ij}^e = dS_{ij} / (2G) \quad (17)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{dS_{ij}}{2G} + d\lambda S_{ij} \quad (18)$$

### 4.3.2 Expresión matricial del modelo de tensión para piezas delgadas

La expresión matricial para el modelo de estrés (19) de acuerdo con la teoría del incremento de deformación:

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^p\} + d\{\varepsilon^+\} \quad (19)$$

Etapa elástica:

$$d\{\sigma\} = [D_e](d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon_0^T\}) \quad (20)$$

Etapa plástica:

$$d\{\sigma\} = [D_{ep}](d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon_0^T\}) + d\{\sigma_0^T\} \quad (21)$$

Donde  $d\varepsilon^e$  es el incremento de deformación en la etapa elástica,  $d\varepsilon^p$  es el incremento de deformación en la etapa plástica y  $d\varepsilon^T$  es el incremento de deformación térmica.

Algunas unidades del lingote delgado pueden ser debidas al fenómeno de rendimiento durante el proceso de carga y a una relación constitutiva no lineal. Las unidades se han definido como en la etapa de transición y el método de cálculo de elementos finitos en la fase elástica y plástica para las unidades de rendimiento, acumulará el error. Se utiliza un cálculo del promedio ponderado de la matriz elástico-plástica para calcular las unidades de rendimiento y asegurar la precisión del modelo con la fórmula (22).

$$[D_{ep}] = \rho'[D_e] + (1 - \rho')[D_{ep}] \quad (22)$$

$$D\{\sigma\} = [D_{ep}](d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon_0^T\}) + d\{\sigma_0^T\} \quad (23)$$

Donde  $d\{\varepsilon_0^T\}$  es la deformación térmica inicial,  $d\{\sigma_0^T\}$  es la tensión térmica inicial,  $[D_e]$  es la matriz de deformación elástica,  $[D_p]$  es la matriz de deformación plástica,  $[D_{ep}]$  es la matriz elástico-plástica y  $\rho$  es la densidad.

El incremento de deformación plástica equivalente para la pieza delgada en una etapa elástico-plástica se muestra mediante la fórmula (24).

$$d\bar{\varepsilon}^P = \frac{M^T [D_e] d\{\varepsilon\} - M^T [D_e] d\{\varepsilon_0^T\} - J dt}{H' + M^T [D_e] M} \quad (24)$$

$$M = \left( \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right)$$

$$J = \frac{\partial H}{\partial t}$$

Donde  $H'$  es el coeficiente de endurecimiento,  $H$  es la función de endurecimiento y  $t$  es la temperatura unitaria para la pieza delgada.

## 4.4 Condiciones de contorno

### 4.4.1 Presión estática de la fundición

La presión estática del acero fundido se puede obtener mediante la fórmula (25).

$$P = \rho H'_x \times 10^{-4} \text{Kgf/cm}^2 \quad (25)$$

Donde  $P$  es la presión estática del acero fundido,  $\rho$  es la densidad del acero fundido en  $\text{kg/m}^3$  y  $H'_x$  es la altura vertical.

La presión estática del acero fundido es  $P$  para el interior del lingote delgado antes de solidificar completamente y cero a partir de su solidificación.

## 4.5 Aplicación de la teoría a un ejemplo concreto

La colada es guiada por un rodillo del lingote delgado y la sección elegida es de  $60\text{mm} \times 1200\text{mm}$ . Se usará un rodillo de reducción en un molde de arco vertical, siendo la longitud efectiva del molde de  $0,8$  m. Se ha estudiado la zona de radiación y la zona de enfriamiento de aire y el estado de tensión de la pieza delgada en la colada continua, para obtener la distribución de temperatura y de la tensión, según el modelo matemático. El índice de rotura para la losa delgada se puede obtener por la fórmula (26).

$$R = \frac{\sigma}{\sigma_b} \quad (26)$$

Donde  $R$  es el índice de rotura,  $\sigma$  es la tensión equivalente y  $\sigma_b$  es una resistencia limitada a alta temperatura. Cuando el  $R$  es mayor que  $1$ , pueden aparecer roturas en el lingote.

#### 4.5.1 Estudio de temperaturas sobre el lingote

La distribución de la temperatura de la pieza en la dirección de colada con una velocidad de colada de 3,0 m/min se muestra en la figura posterior donde las cuatro curvas representan la temperatura desde el centro de la pieza hacia fuera. La temperatura de la superficie disminuye rápidamente debido a la alta densidad de enfriamiento y a la alta velocidad de colada en el molde. Se muestran las distintas velocidades de recuperación periódica de la temperatura, debidas a los distintos modos de enfriamiento en la zona de enfriamiento secundario y la superficie del lingote. Es importante que el enfriamiento uniforme en la zona de enfriamiento secundario, impida una gran recuperación periódica de la temperatura.

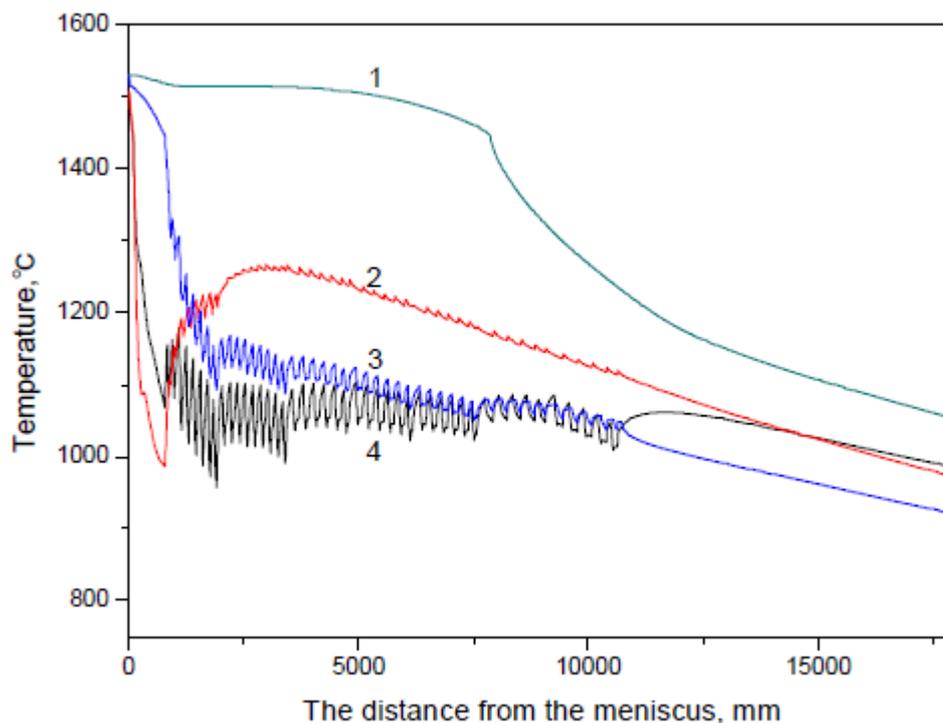


Fig. 20 - Enfriamiento en las distintas zonas. Desde el centro al extremo.

La figura muestra el campo de temperaturas de la sección transversal para un lingote delgado en la zona de pulverización. La pulverización consistirá en rociar agua pulverizada para enfriar el metal. La temperatura más alta de la sección al final de la zona de pulverización, está cerca de la temperatura de sólido y la pieza estaría completamente solidificada.

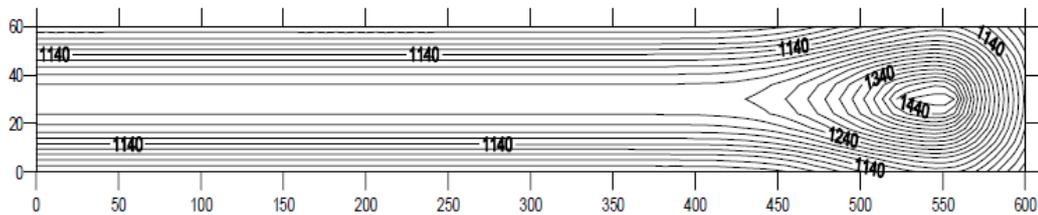


Fig. 21 - Campo de temperatura en la sección transversal.

La figura muestra el campo de tensiones de la sección transversal para una pieza delgada con velocidad de colada de 3,0 m/min. La tensión equivalente de la pieza delgada se aproximaría al valor máximo en las áreas donde se produce el contacto con agua pulverizado, ya que se enfría más rápido.

Debido al enfriamiento con agua en la zona de los rodillos, la pieza puede conducir a una recuperación periódica de la temperatura.

La imagen posterior muestra la distribución del índice de fisuras de la sección transversal de las piezas delgadas. Es posible que el esfuerzo de tracción proveniente de la recuperación de la temperatura conduzca a la grieta en el frente de solidificación. El valor de R está cerca o alcanza el valor límite. La recuperación de la temperatura de la superficie de la pieza, puede causar huecos con alta velocidad de colada y pequeño espesor de la corteza en la fase inicial del enfriamiento secundario.

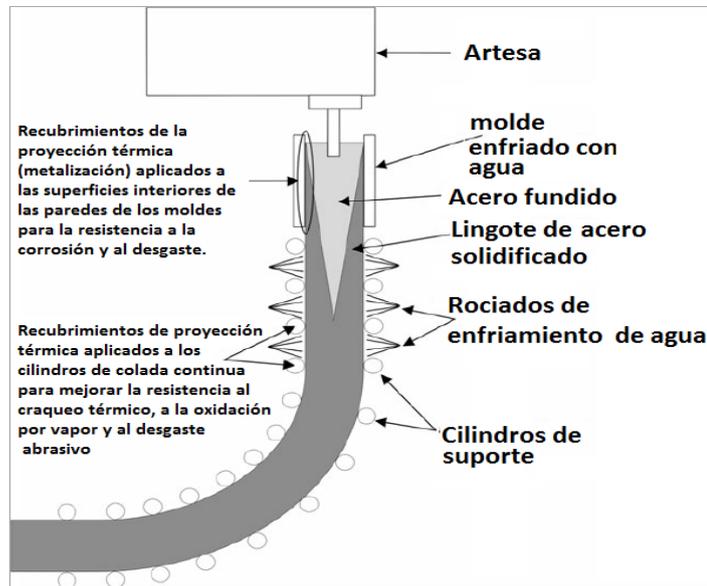


Fig. 22 - Funcionamiento del sistema de enfriamiento con rodillos y pulverización.

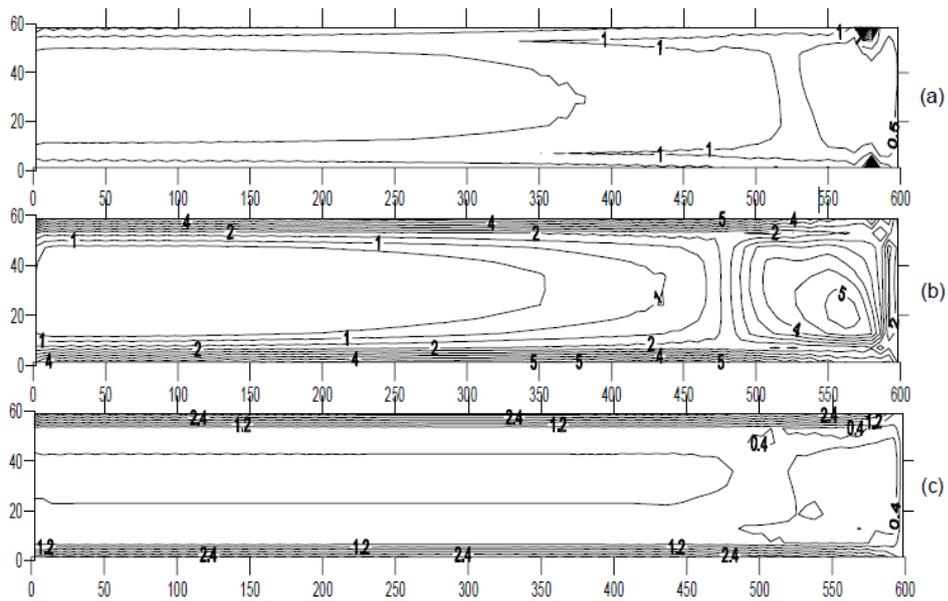


Fig. 23 - Distribución de tensiones para los siguientes casos: a) Zona de enfriamiento con agua pulverizada b) Zona de enfriamiento por aire c) Zona de contacto con los rodillos.

La transferencia de calor y el estado de tensión de la pieza delgada, tienen un impacto significativo en la calidad de la misma en el proceso de solidificación de la colada continua. Se ha establecido un modelo matemático bidimensional de la transferencia de calor y un modelo de tensión térmico-elástico-plástico para las piezas delgadas, con el fin de analizar la distribución de temperaturas de la sección transversal y la distribución de tensión y deformación en la colada continua.

Es importante que el enfriamiento uniforme en la zona de enfriamiento secundario evite una gran recuperación periódica de la temperatura. Es decir, que la temperatura disminuya de forma heterogénea para evitar en lo posible la concentración de tensiones que provocan roturas en la zona exterior de las piezas obtenidas. [Study on mathematical model of temperature and stress for thin slab in continuous casting. College of Materials Science and Engineering.]

## 5. Aplicación práctica genérica.

### Colada en molde de arena.

#### 5.1 Modelado de procesos de fundición

Un ingeniero de diseño de procesos de fabricación, debe estudiar la capacidad de una pieza de fundición y las posibilidades de ajustar según su interés, el proceso de solidificación y enfriamiento mediante el diseño adecuado de las prestaciones tecnológicas.

Este proceso de fundición se puede ampliar, modernizar y mejorar a través de la utilización de las posibilidades ofrecidas por la introducción de métodos numéricos para el cálculo de la solidificación y enfriamiento del metal en un molde. En general, el software de simulación consta de tres partes principales:

- Preprocesamiento: el programa lee la geometría CAD y genera la malla.
- Procesamiento principal: adición de condiciones de contorno y datos de material, cálculos de llenado y temperatura.
- Pos procesamiento: presentación y evaluación.

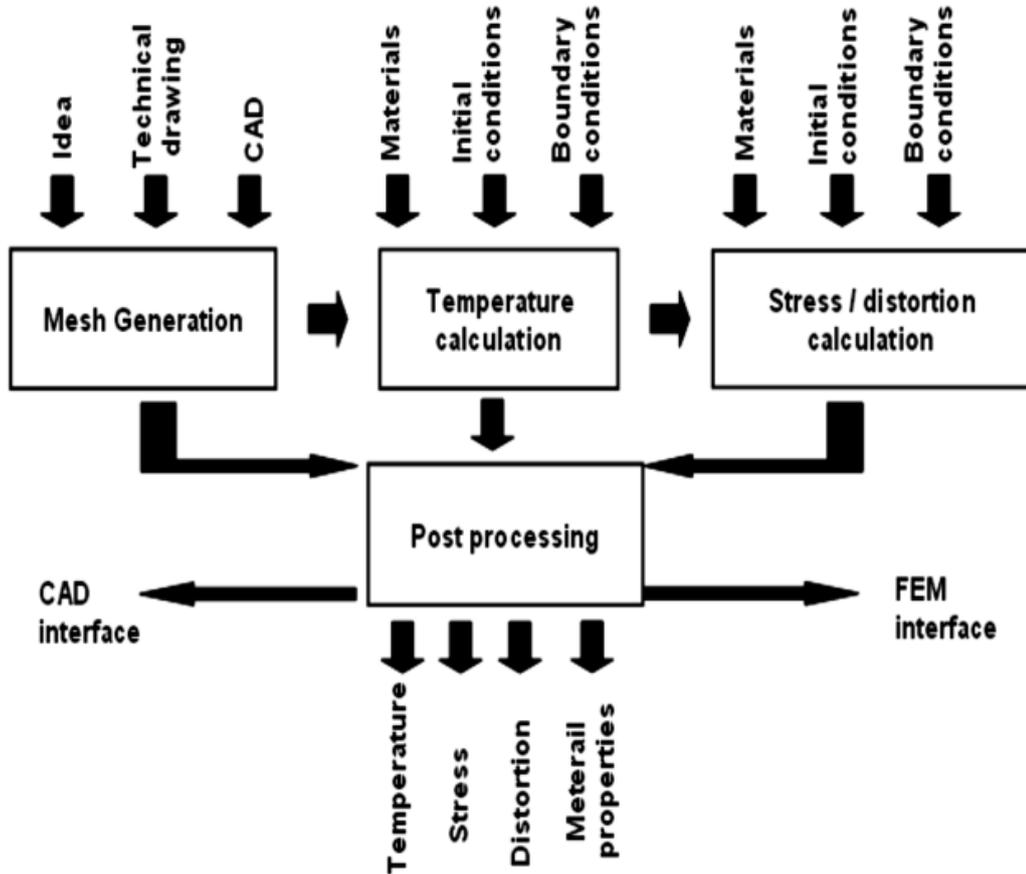


Fig. 24 - Sistema de simulación

La figura muestra el diagrama de flujo en el que se utilizan las herramientas de 3D CAD y de simulación para mejorar el diseño del proceso de colada. La simulación por computadora basada en los procedimientos de diseño descritos anteriormente, se ha implementado con un estudio de un caso que tomaremos a modo de ejemplo genérico. Consideremos una fundición de una pieza, concretamente de una placa de una máquina trituradora, para el presente estudio. Esta pieza se utiliza en la industria del cemento, está fabricada en acero de aleación ISO 1030. Durante la simulación del proceso de colada, se examinan el llenado y la solidificación del molde y se optimiza el proceso de colada en arena.

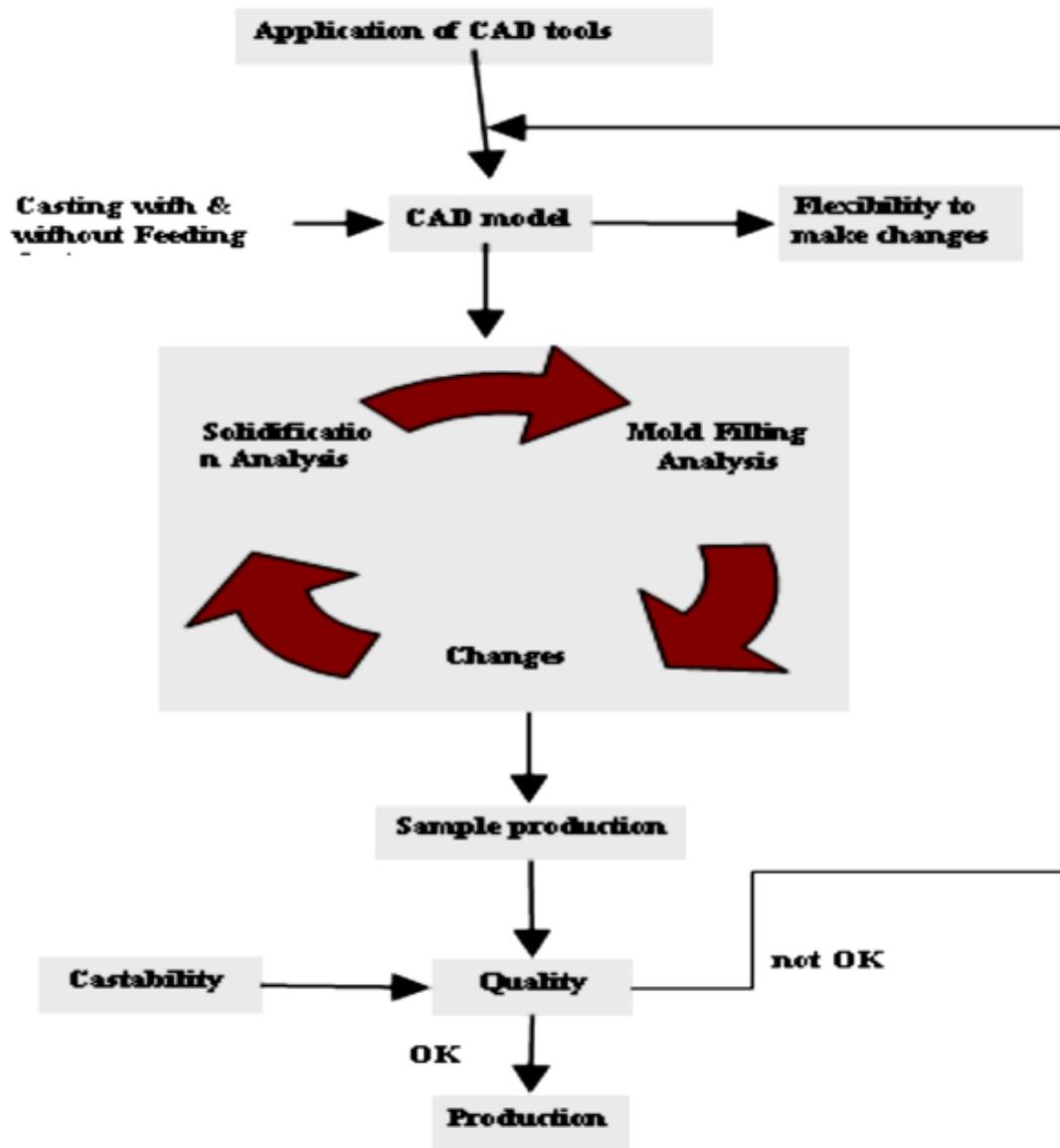


Fig. 25 - Diagrama de flujo para mejorar el diseño del sistema de colada

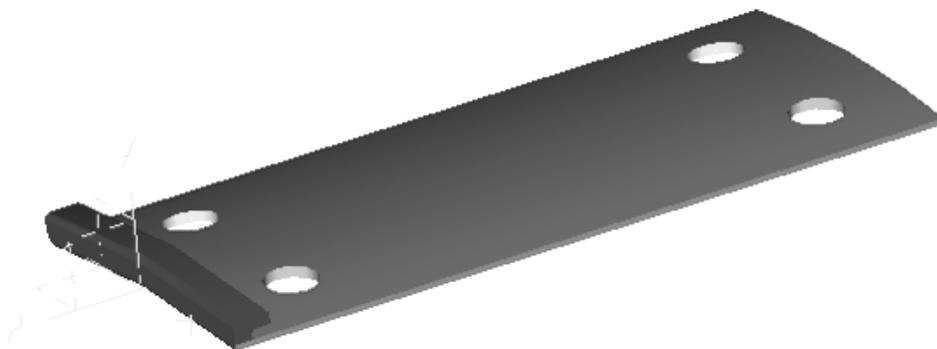


Fig. 26 - Modelo 3D de la placa

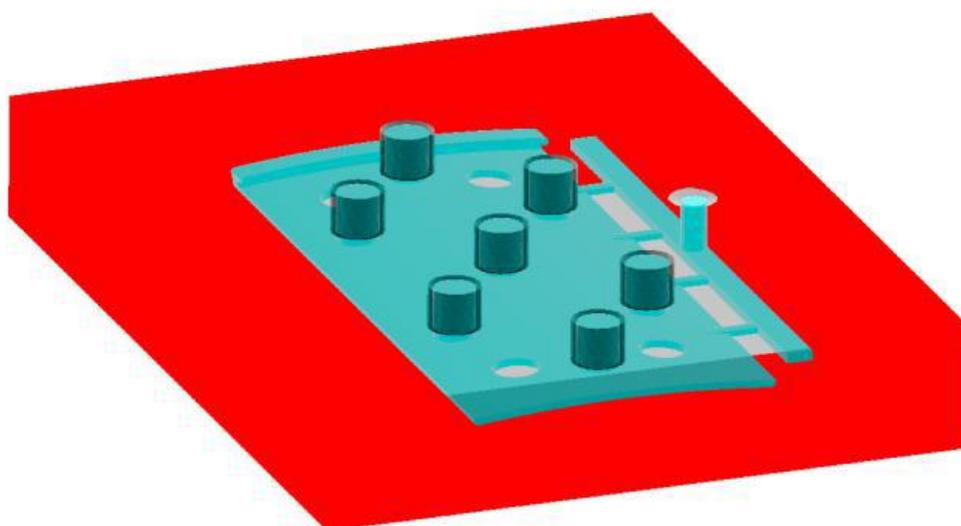


Fig. 27 - Modelo 3D de bloque de arena

## 5.2 Metodología

### 5.2.1 Flujo de trabajo en las simulaciones por ordenador

El objetivo de este trabajo es simular el proceso de solidificación de las fundiciones de arena de una aleación de acero, analizar los resultados para dar algunos aspectos de los procesos de diseño seguidos para la designación de experimentos y optimizar los parámetros de colada para lograr las mejores propiedades de fundición de acero. Los procedimientos se dividieron principalmente en tres etapas de varios pasos.

Se sigue un flujo de operaciones para tratar de examinar los diferentes factores de influencia, tales como la temperatura del metal fundido, el material del molde, la velocidad de entrada, la temperatura de precalentamiento del molde, etc.

En la primera etapa, la observación del flujo es más importante porque toda la construcción del modelo, la designación de los parámetros y la descripción de los procesos, se basan en la observación de experimentos sustanciales. El propósito de esta etapa es reunir más datos para experimentos de simulación, para todas las propiedades del material, las propiedades del molde y las relaciones entre los materiales y el entorno necesarias.

La segunda etapa comprende la simulación con Procast. Esta etapa se lleva a cabo completamente con el software informático de simulación. También podríamos decir que son parte de esta etapa, la determinación de factores de entrada, la resolución de problemas y la obtención de resultados.

Por último, la etapa final consiste en mostrar los resultados de la simulación, construir una base de datos y analizarlos, para luego encontrar una conclusión que mejore la fabricación de fundición en arena de una aleación de acero.

Estos programas de simulación, funcionan con un sistema modular que permite el acoplamiento de varios módulos. Proporcionan una solución completa que cubre una amplia gama de simulaciones. El propósito de esta etapa es generar un modelo de elementos finitos, configurar el cálculo, ejecutar el análisis e interpretar los resultados.

El flujo de trabajo principal se divide en tres partes: pre-procesado, resolución (para ejecutar el análisis) y finalmente salida de datos para interpretar los resultados y cada paso incluye varios sub-pasos.

## 5.3 Análisis de resultados

### 5.3.1 Llenado del molde

Los resultados que se pueden obtener de la simulación, son mucho más útiles y fáciles de entender si los vemos a la par que se realiza físicamente el proceso de fundición que estamos simulando. Se comprueba que en la evolución temporal del sólido las temperaturas van cambiando.

La masa fundida se vierte casi uniformemente en la cavidad del molde hasta que esté completamente lleno. Este es un buen método, porque asegura que la distribución de la temperatura en el molde será igual en todas partes justo después del llenado, de manera que la tasa de solidificación sea bastante homogénea a lo largo de la colada.

Igual velocidad de solidificación implicará una contracción uniforme de la colada, para minimizar defectos tales como cavidades de contracción como resultado de una velocidad de enfriamiento no uniforme. Como se ha visto anteriormente, se debe asegurar que el canal de alimentación y el alimentador se llenan simultáneamente, ya que sus dimensiones y formas son muy similares. Habitualmente hablamos de un llenado exitoso que suele venir como resultado del diseño apropiado del sistema de llenado.

### 5.3.2 Solidificación

La solidificación es el resultado de la transferencia de calor desde la fundición interna al ambiente externo. La transferencia de calor desde el interior de la pieza de fundición se disipa de las siguientes maneras:

- Convección del metal líquido.
- La conducción de metal líquido con el molde.
- La conducción de calor del metal sólido con la atmósfera después del desmoldeo.
- Conducción del calor en el molde de la arena.
- Convección y radiación del metal, tanto líquido como sólido.

El tiempo de solidificación es proporcional a la relación entre el volumen y la superficie (módulo de colada), por lo que se espera una velocidad de solidificación más rápida en una pieza pequeña que en una de gran tamaño.

Dado que hay una larga lista de posibilidades para el diseño de un sistema de mazarotas y bebederos para el proceso de moldear una pieza de fundición en particular, se deben probar y ensayar varios sistemas apoyándonos lógicamente, en el software de fundición elegido.

Si hacemos una simulación en la que el metal fundido se vierte a una temperatura de 1600 °C con un rendimiento del 60%, puede ocurrir que el llenado no sea uniforme y en el final de la colada se puedan producir rechupes o un enfriamiento más lento que en el resto de la colada.

Una posible solución para dichos defectos, puede ser aumentar la temperatura del metal fundido vertido, de manera que el metal fundido alcance la cavidad y luego se solidifique, no al revés. Se realiza una simulación a 2000 °C y se obtiene una colada sin defectos durante los procesos de simulación. Esta sería la forma de realizar las iteraciones.

Con tensiones más elevadas y altos niveles de turbulencia, incluso un defecto pequeño de fundición haría que la pieza fallara bajo carga alta y por lo tanto, es necesaria una comprobación de las tensiones y la turbulencia.

Para conseguir mantener a una temperatura más alta la fundición a la hora de hacer el vertido en el molde, se utilizan materiales exotérmicos añadidos, que ayudarán a que el metal entre con más temperatura y que como hemos visto antes, será mejor de cara a la calidad final de la pieza. El rendimiento de la colada puede mejorar en torno al 20% al realizar el aumento de la temperatura a la hora del llenado.

Como veremos en una tabla posterior, la comparación del sobrecalentamiento antes del vertido y la velocidad del vertido, son claves para la calidad y el rendimiento de la pieza obtenida. Los defectos serán mucho menores ya que las turbulencias y las velocidades de enfriamiento así lo propician.

### 5.3.3 Evolución temperatura-tiempo

Las imágenes que hay a continuación, muestran como ocurre la evolución tiempo-temperatura, es decir, muestra los cambios de temperatura para los puntos temporales de colada. Cuando la última gota de metal líquido se cristaliza en sólido, se considera el proceso de solidificación completado. La simulación y el experimento pueden diferir entre sí, ya que en la simulación es extremadamente complejo controlar la atmósfera que rodea a la colada. Aún así el proceso es válido, pues esa última parte del sólido se quedará en el bebedero principal, de ahí la importancia una vez más, de tener un buen diseño de bebederos, mazarotas y respiraderos en nuestro molde. [Application of Casting Simulation for Sand Casting of a Crusher Plate. P. Prabhakara Rao, G. Chakraverthi, B. Balakrishna. 2011, Vols. International Journal of Thermal Technologies, Vol.1, No.1 (Dec. 2011).]

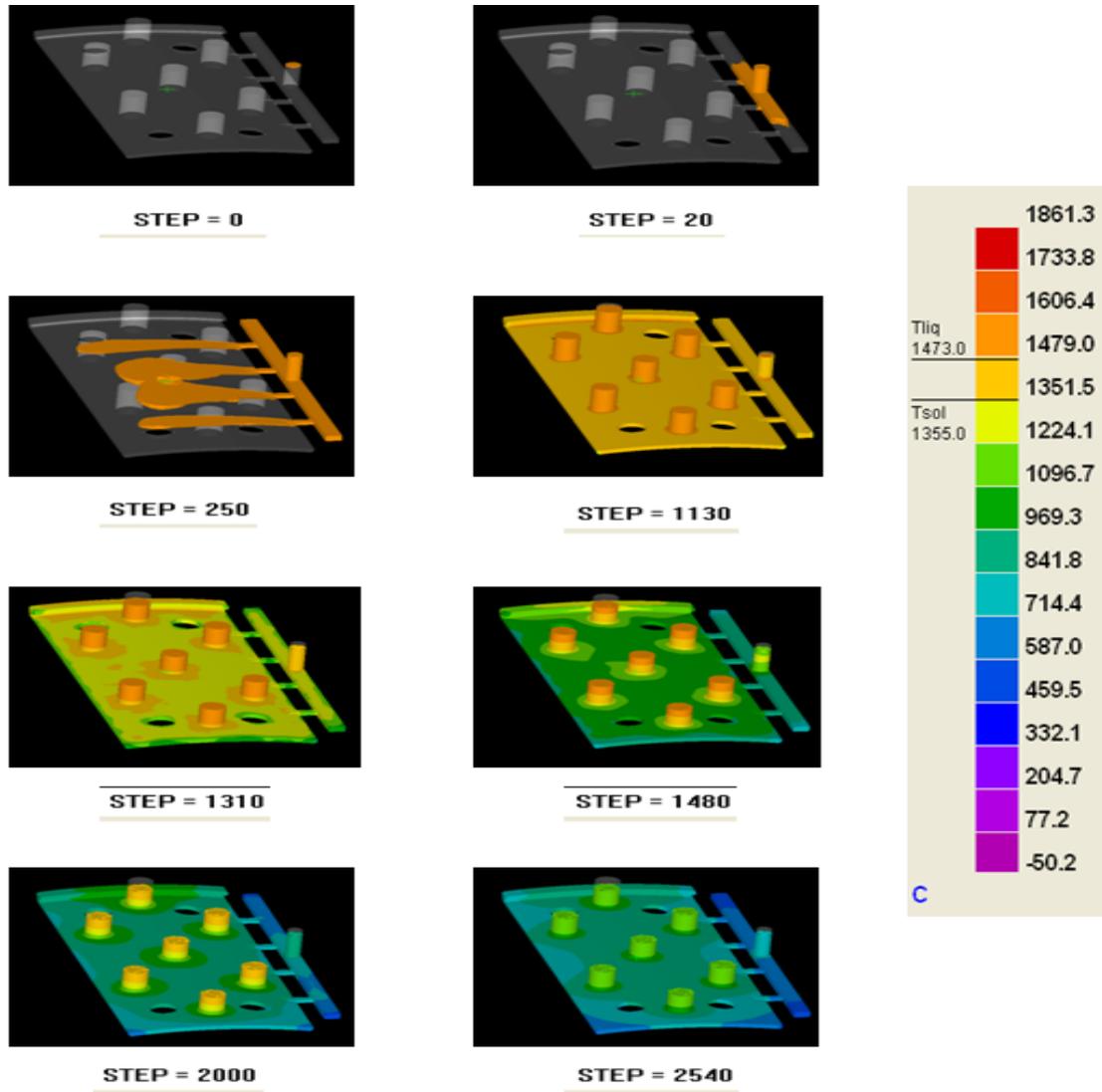


Fig. 28 - Patrón de llenado del molde y variaciones de temperatura del sistema de bebederos y mazarotas en distintas etapas

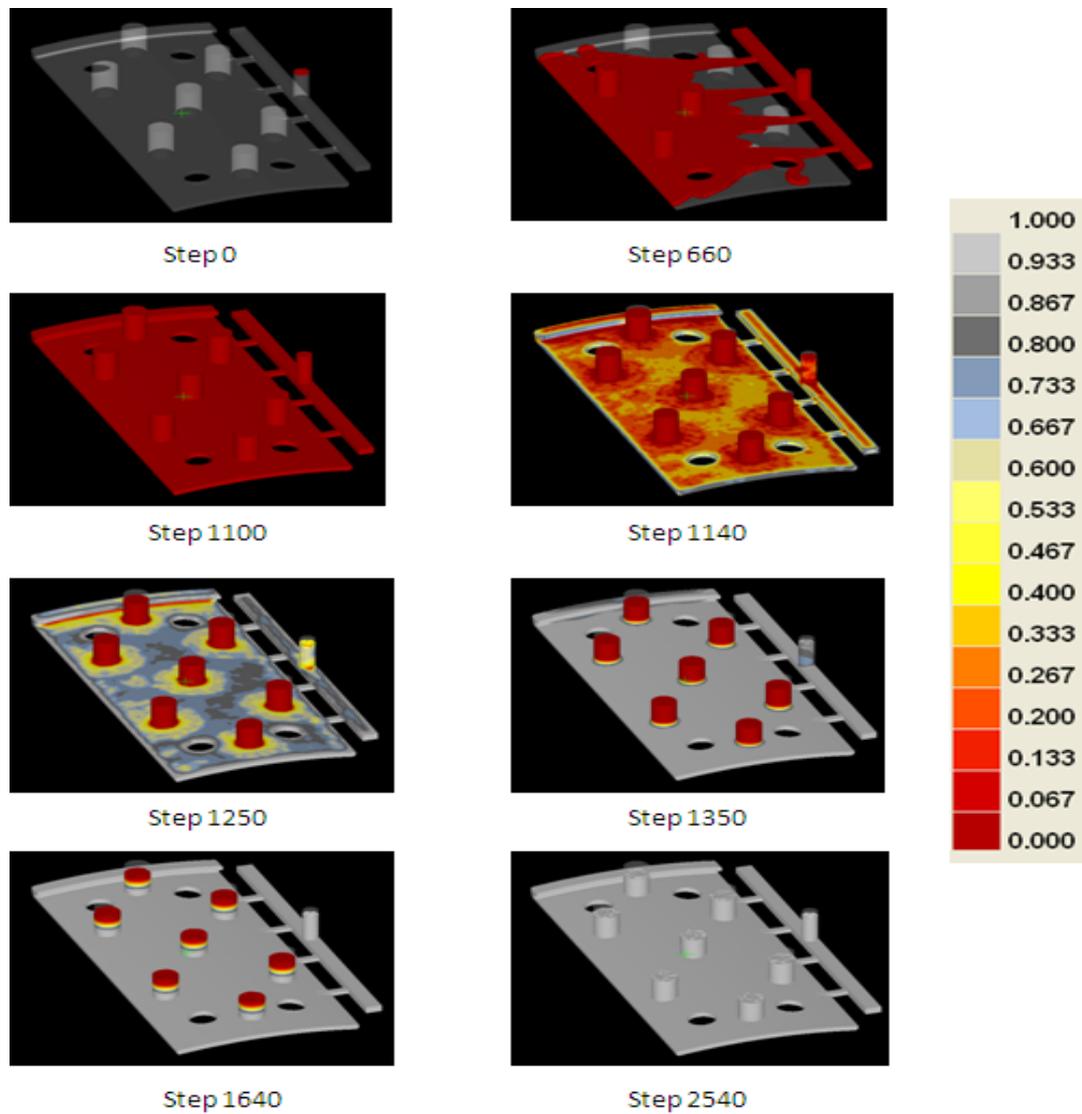


Fig. 29 - Solidificación del sistema de bebederos y mazarotas en varias etapas

Tabla 1 - Comparativa de resultados

Caso	Temperatura de colada (°C)	Material exotérmico	Tipo de arena	Rendimiento	Tiempo de llenado (Seg)
1	1800	NO	Arena sílice	71%	8
2	1600	NO	Arena sílice	60%*	5.9
3	1600	NO	Arena sílice	64%	6.1
4	2000	NO	Arena sílice	67%	6.3
5	2000	SI	Arena sílice	67%	6.3
6	2000	SI	Arena sílice	68%	6.7
7	1600	NO	Arena sílice	78%	8.7
8	1600	SI	Arena sílice	78%	8.7
9	2000	SI	Arena sílice	79%	9.0

\*\*\* Los datos de esta tabla comparativa de resultados han sido obtenidos de: International Journal of Thermal Technologies, Vol.1, No.1 (Dec. 2011)

## 6. Mercado actual. Principales soportes

### 6.1 Flow 3D Cast

#### 6.1.1 Información técnica

Según el propio fabricante del programa, este tiene una gran variedad de procesos para simular y unas capacidades de gran interés para la ingeniería.

Variedad de los procesos de fundición que es capaz de simular:

- Gravedad
- Baja presión
- Espuma perdida
- Cera perdida
- Alta presión HPDC
- Fundición centrífuga
- Vertido por inclinación
- Fundición continua
- Soplado y secado de machos de arena

Para estos procesos antes citados, las capacidades generales que posee son las siguientes:

- Resultados de gran precisión para flujo y solidificación.
- Mallado automático para una parametrización sencilla del modelo de estudio.
- Librería de materiales para metales, moldes, filtros y mazarotas. Este tipo de librerías, nos ofrecen ya prediseñados parámetros estándar de materiales, geometrías, etc.
- Fundición continua con segregación binaria.
- Formación de gas en los machos de arena. Nos permite analizar la aparición de este fenómeno.
- Soplado de machos de arena.
- Secado de humedad de machos de arena.
- Calentamiento por rozamiento viscoso. Estos fenómenos se producen en las paredes del molde y pueden ocasionar que haya pequeños desprendimientos, los cuales aportarán impurezas a la pieza.
- Cálculo de tensiones y deformaciones por efectos térmicos y mecánicos.

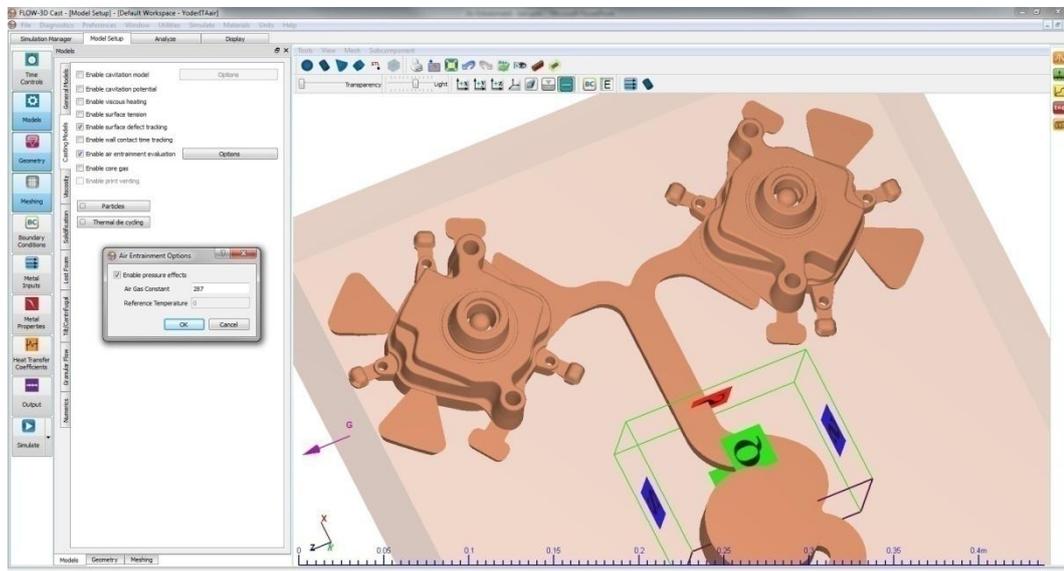


Fig. 30 - Flow 3D Cast Interface. [Flow 3D web site]

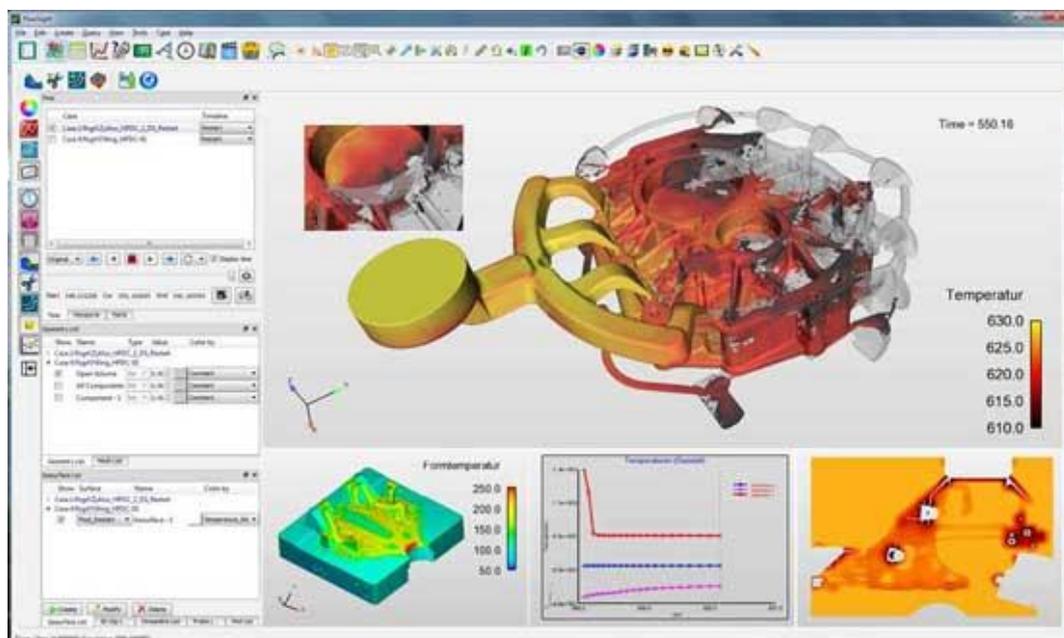


Fig. 31 - Flow 3D Cast Interface. [Flow 3D web site]

## 6.1.2 Licencias

Flow 3D Cast ofrece licencias educativas y licencias industriales-comerciales. La licencia educativa tiene dos paquetes de opciones, uno básico y otro completo, con precios de licencia perpetua de 6.500€ y 8.000€ respectivamente.

También dispone de licencia industrial-comercial con un precio aproximado de 40.000€<sup>2</sup>. La licencia es en red y con 32 núcleos disponibles para conexión. Esto significa que podremos conectar un equipo en cualquier punto de la red interna de nuestra empresa y que este equipo podrá trabajar hasta con 32 núcleos de procesamiento.

## 6.2 Magmasoft

### 6.2.1 Información técnica

Magmasoft es una herramienta de optimización integral para mejorar la calidad de la producción de metales, optimizar las condiciones del proceso y reducir los costes de producción. En consecuencia, se pueden establecer robustos parámetros de proceso y diseños de fundición optimizados, para todos los materiales y procesos de fundición, incluyendo el tratamiento térmico y la metalurgia de la fusión de manera eficiente y exhaustiva al mismo tiempo, utilizando la metodología de diseño virtual de experimentos y optimización autónoma.

---

<sup>2</sup> Información aportada por el departamento comercial de Simulaciones y proyectos SL.

Las simulaciones con Magmasoft se pueden utilizar en un plan de pruebas virtuales automatizado para perseguir simultáneamente diferentes objetivos de calidad y coste.

Un diseño modular de software cubre toda la cadena de procesos de los componentes de fundición. El software se puede aplicar para optimizar la robustez del proceso y la calidad de las piezas, desde el diseño conceptual hasta el diseño del componente final, durante el diseño de las herramientas y el prototipado, hasta el proceso de producción y tratamiento térmico.

Este programa ofrece los siguientes beneficios principales:

- Soporta todos los materiales de fundición y todos los aspectos de la fabricación de fundición, incluyendo la fusión y la metalurgia, el patrón y la elaboración, limpieza y reparación.
- Ofrece un campo virtual de pruebas para la reducción de defectos de metales con altos grados de libertad sin riesgo de producción.
- Establece puntos de operación optimizados por calidad, rendimiento y coste.
- Identifica condiciones de proceso óptimas para ventanas de proceso robustas.
- Permite una toma de decisiones más rápida para establecer un ahorro de tiempo para todas las partes involucradas.
- Potencia la gestión de la calidad generando una comprensión sistemática de cómo la variabilidad del proceso afecta a la calidad.
- Mejora la comunicación y la cooperación con los clientes.
- Ofrece información fiable a los diseñadores para el desarrollo robusto de productos y procesos.

Según nos indica el fabricante, la estructura modular contiene las siguientes funcionalidades para una simulación integral:

- Una interfaz gráfica de usuario común para todos los módulos.
- Una perspectiva de gestión de proyectos para el manejo de proyectos de simulación y optimización.
- Ajuste automático de geometrías para la simulación.
- Mapeo integral de procesos con acceso directo a todos los materiales, pasos del proceso y la configuración de simulación correspondiente.
- Definición de diseños y parámetros virtuales para las ejecuciones de optimización.
- Programas de simulación para el cálculo de las aplicaciones de llenado, solidificación, enfriamiento y colada.
- Evaluación interactiva y automática de resultados: se pueden abrir y editar varias perspectivas al mismo tiempo.
- Perspectiva de resultados para la visualización y evaluación completas de los resultados de la simulación.
- Fácil evaluación cuantitativa del diseño virtual de experimentos o de las ejecuciones de optimización.
- Módulo de base de datos para gestionar datos de procesos termofísicos y otros relevantes necesarios para la simulación.

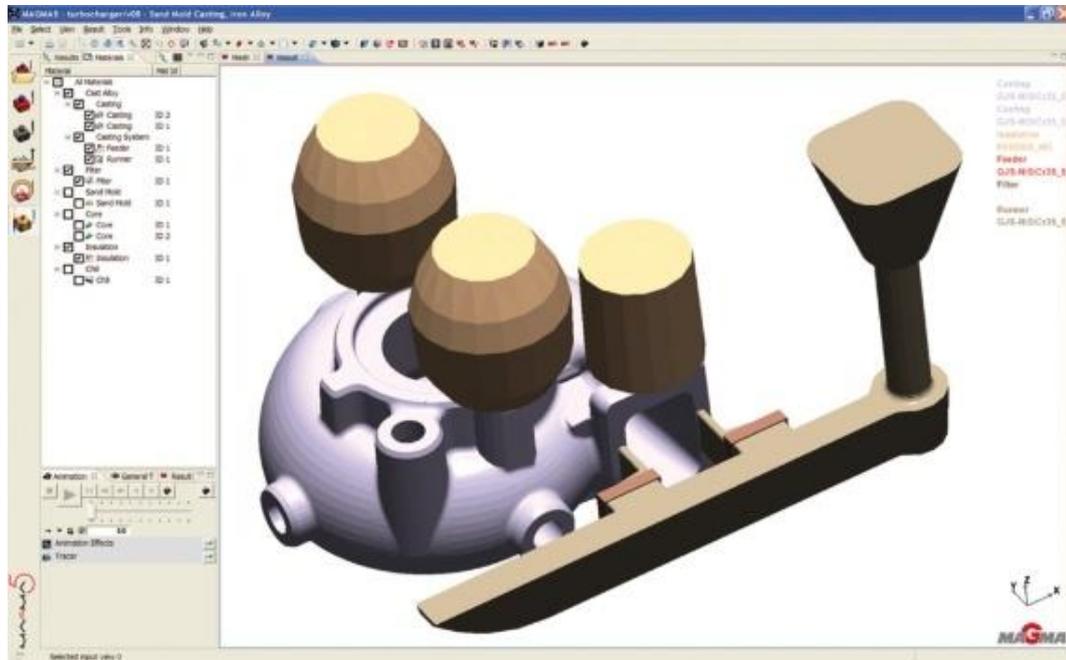


Fig. 32 - Magmasoft interface. [Magmasoft web site]

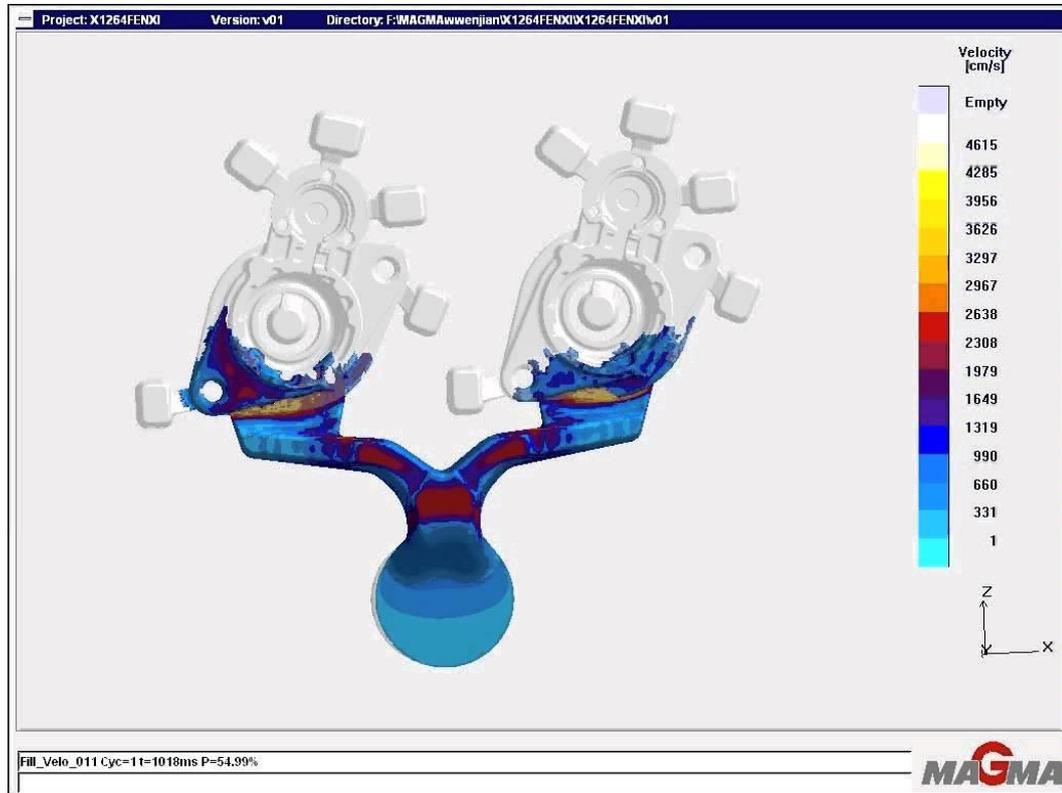


Fig. 33 - Simulación colada [Magmasoft web site]

## 6.2.2 Licencias

Magma no dispone de licencias educativas, solo dispone de licencias industriales-comerciales. Dentro de las licencias comerciales dispone de dos niveles del programa:

- MAGMAexpress: Módulo con operaciones básicas. Colada por gravedad en molde de arena y permanente.
- MAGMASoft: Programa completo con todos los tipos de fundición incluidos. Colada por gravedad en todas sus modalidades, inyección, cera perdida, etc.

El primero es un paquete cerrado con versiones específicas para fundición en arena o para molde permanente y con unas prestaciones establecidas y no ampliables. Tiene un coste aproximado de 50.000 €<sup>3</sup>.

El segundo es la herramienta estándar. Está compuesta por una parte básica que puede ser ampliada mediante módulos específicos para determinados procesos/materiales (inyección, baja presión, investment casting, micromodeling de acero o aluminio...) o funcionalidades adicionales (tratamientos térmicos, cálculo de tensiones y deformaciones residuales, simulación de disparo y curado de machos...). En este caso, la parte básica tiene un coste similar al MAGMAexpress, pero lógicamente los módulos adicionales tienen un coste añadido por cada uno de los módulos.

La licencia puede ser flotante, pero tiene un coste adicional de 6.500 €.

Hay versiones de 1, 2, 4, 8, 16... núcleos. El coste de duplicar el número de núcleos es el 20% del valor del programa.

## **6.3 ProCAST**

### **6.3.1 Información técnica**

El software de simulación de fundición de ESI, ProCAST, es una solución completa que permite la evaluación predictiva de todo el proceso de colada incluyendo defectos de llenado y solidificación, propiedades mecánicas y distorsión de piezas complejas.

---

<sup>3</sup> Información aportada por el departamento comercial de Euro-Equip SL.

Permite una rápida visualización de los cambios de diseño y permite una toma de decisiones correcta en una fase temprana del proceso de fabricación.

ProCAST proporciona una solución completa para la simulación de procesos de colada continua y semi-continua. El software puede simular las condiciones de estado estacionario, así como las etapas inicial y final de los procesos de colada continua.

El módulo inverso permite el cálculo automático de los parámetros del material o del proceso en función de las temperaturas medidas en determinados lugares o tiempos. El enfriamiento primario y secundario puede determinarse mediante modelado inverso.

También ofrece una capacidad única: las funciones de usuario permiten a los usuarios finales más avanzados programar sus requisitos de proceso específicos. Por ejemplo, las funciones de usuario permiten definir las condiciones de contorno como tiempo, temperatura y dependencia del espacio para modelar con precisión cualquier proceso específico de colada.

Métodos de fundición que puede analizar este programa:

- Colada continua
- Colada semi-continua
- Moldeo en arena
- Espuma perdida
- Soplado del núcleo
- Modelado semisólido
- Centrífuga

También incluye las siguientes capacidades:

- Bases de datos termodinámicas.
- Análisis de las tensiones producidas por la fundición.
- Análisis de acumulación de gas y microporosidades.
- Microestructura y tratamiento térmico.
- Análisis de la estructura del grano.

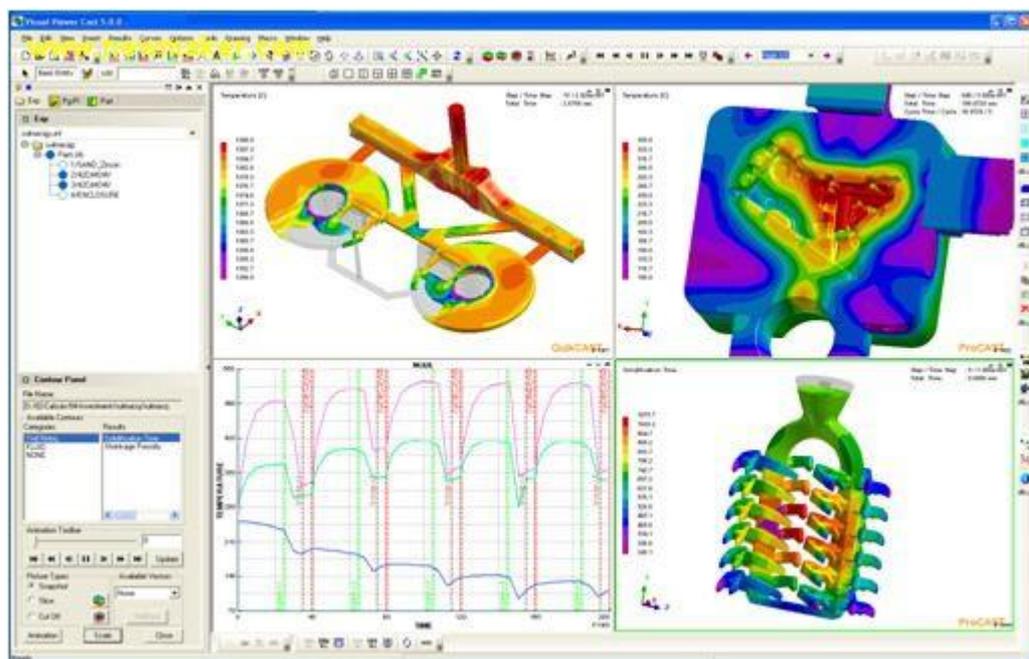


Fig. 34 - Pro Cast interface [Pro cast website]

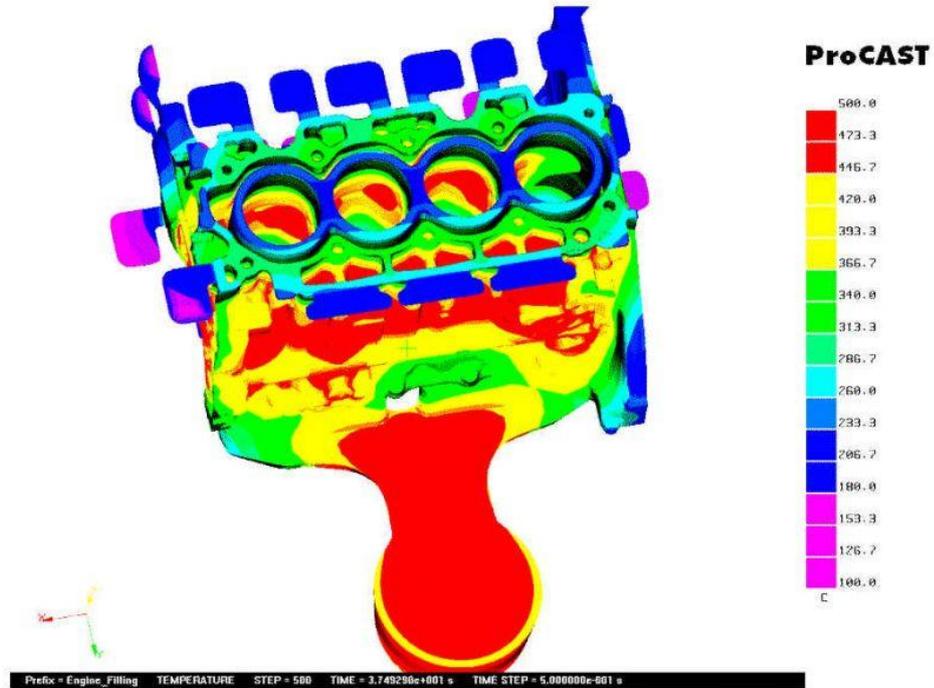


Fig. 35 - Simulación con Pro Cast.[Procast website]

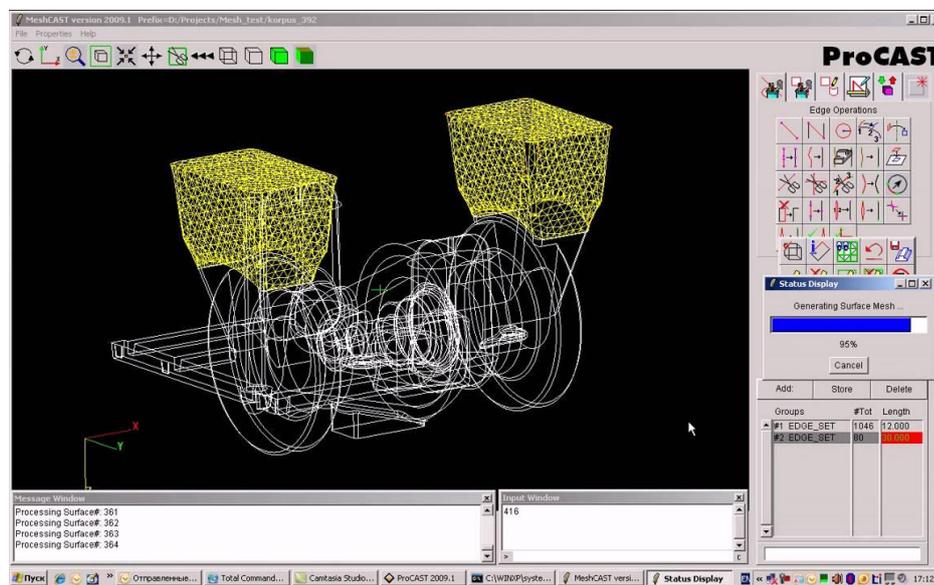


Fig. 36 - Ejemplo de creación de mallado.[Procast website]

### 6.3.2 Licencias

Este programa solo ofrece licencias industriales-comerciales de carácter perpetuo con un coste aproximado de 60.000€<sup>4</sup>. Esta licencia es en red y para 4 núcleos, como antes hemos explicado podemos trabajar con el programa en un ordenador de la red y con un máximo de 4 núcleos en ese equipo.

## 6.4 CastDesigner

### 6.4.1 Información técnica

Cast-Designer es un software diseñado para la fundición, que incluye el diseño y la evaluación de piezas de fundición, el diseño de moldes y la validación y optimización de producción.

Este programa podría ser utilizado para la fundición de alta presión, baja presión, fundición por gravedad de arena, fundición de gravedad para el molde permanente, fundición de inversión y muchos otros.

---

<sup>4</sup> Información aportada por el departamento comercial de Consultores CPM.

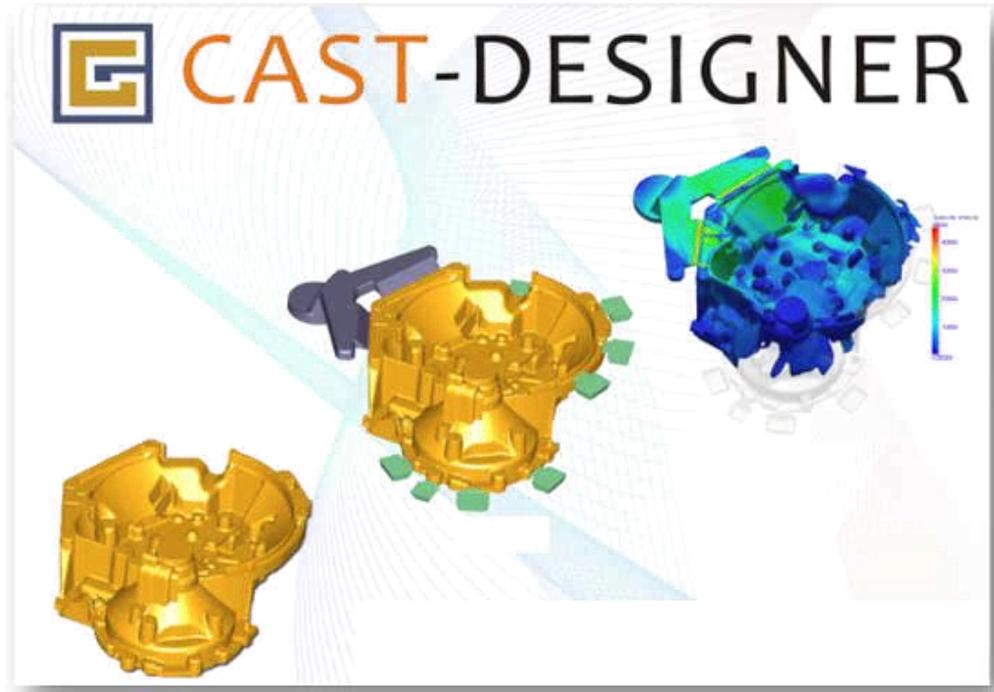


Fig. 37 - Cast designer software [Cast designer website]

Se trata de un programa de casting rápido y una herramienta de análisis basada en el diseño inicial y la tecnología de análisis. El núcleo de la tecnología de diseño y análisis, es permitir a los ingenieros llevar a cabo el análisis de flujo, transferencia de calor y solidificación mediante la combinación de sistemas robustos y tecnología CAE del software que estamos estudiando.

Con esta herramienta, los usuarios pueden optimizar un diseño de fundición detectando las características de la pieza con problemas potenciales de flujo y solidificación, evaluando el sistema de compuertas y las alternativas de diseño de desbordamiento en la etapa de diseño inicial.

Este software incluye distintos módulos separados para las distintas aplicaciones como son:

***Fundición por gravedad:***

Como componente principal del sistema Cast-Designer, Gravity Casting Designer es una herramienta de diseño eficiente y flexible que ayuda a los diseñadores a desarrollar un sistema vertical y de alimentación, un sistema de mazarotas y un sistema de vertido para la fundición por gravedad en poco tiempo.

El ingeniero puede convertir rápidamente la idea de diseño en un modelo 3D para la evaluación del mismo. Cast-Designer permite al usuario administrar y alterar fácilmente los parámetros para diferentes etapas, sea cual sea la fase de diseño del concepto inicial, la etapa de diseño de la realización intermedia o la etapa de diseño final. Es posible crear el sistema de colada completo de una manera rápida y no excesivamente compleja.

Con el CPI (una función del programa), el usuario puede detectar ubicaciones potenciales en las que podrían producirse problemas de llenado y solidificación para el sistema de apertura de puerta y el diseño de desbordamiento. El usuario no necesita ser un experto en simulación para usarlo. El CPI puede ser utilizado por cualquier fabricante de moldes, fabricante de herramientas o diseñador de piezas, para reducir el tiempo de desarrollo del producto.

### ***Calculador del canal de enfriamiento:***

El programa incluye una calculadora de canal de refrigeración, que puede ayudar al usuario a calcular la longitud total del canal de refrigeración con una tasa de producción dada. La utilidad considera muchos factores tales como la masa parcial y la aleación de colada, el tamaño del molde, la velocidad de producción, el diámetro del canal de enfriamiento, la velocidad de flujo del medio y la tasa de transmisión del calor. El resultado final será el diámetro del canal de enfriamiento y la longitud total.

### ***Análisis del sistema de refrigeración en línea:***

Para optimizar el diseño del sistema de refrigeración, los métodos numéricos para la simulación de fundición son relativamente maduros gracias a la gran contribución de los trabajos académicos, a las empresas comerciales de CAE y al desarrollo continuo de hardware informático. Sin embargo, antes de la simulación numérica, el usuario debe tener todos los datos CAD en 3D, como el canal de enfriamiento, geometría del molde, sistema de mazarotas etc. Esto por lo general es difícil en la primera etapa, ya que muchas simulaciones necesitan unas pruebas para revisar su funcionamiento.

Se introduce un método de análisis del sistema de enfriamiento en línea para ayudar al diseñador a comprobar el diseño del sistema de refrigeración en una etapa muy temprana. Este método está totalmente integrado en la interfaz de diseño del sistema de refrigeración.

El análisis del sistema de enfriamiento considerará la característica de la geometría de la pieza, el número de canales de refrigeración y su ubicación, también el efecto por calor. El resultado final puede mostrar la variación de calor entre la pieza de colada y el canal de refrigeración. Como resultado del análisis, el usuario puede ajustar o rediseñar inmediatamente el canal de enfriamiento.

Con el módulo de tensión mecánica, el usuario puede realizar el análisis de tensión y deformación y podríamos analizar los siguientes puntos:

- Distribución de tensiones de fundición y molde.
- Deformación y distorsión de la pieza.
- Formación de huecos entre la colada y el molde.
- Predecir cambios elásticos.
- Rotura en caliente.

Varios modelos de comportamiento de materiales son considerados para el cálculo de tensiones, como el modelo de material rígido, el modelo de material elástico-plástico y el modelo de material elástico-visco-plástico.

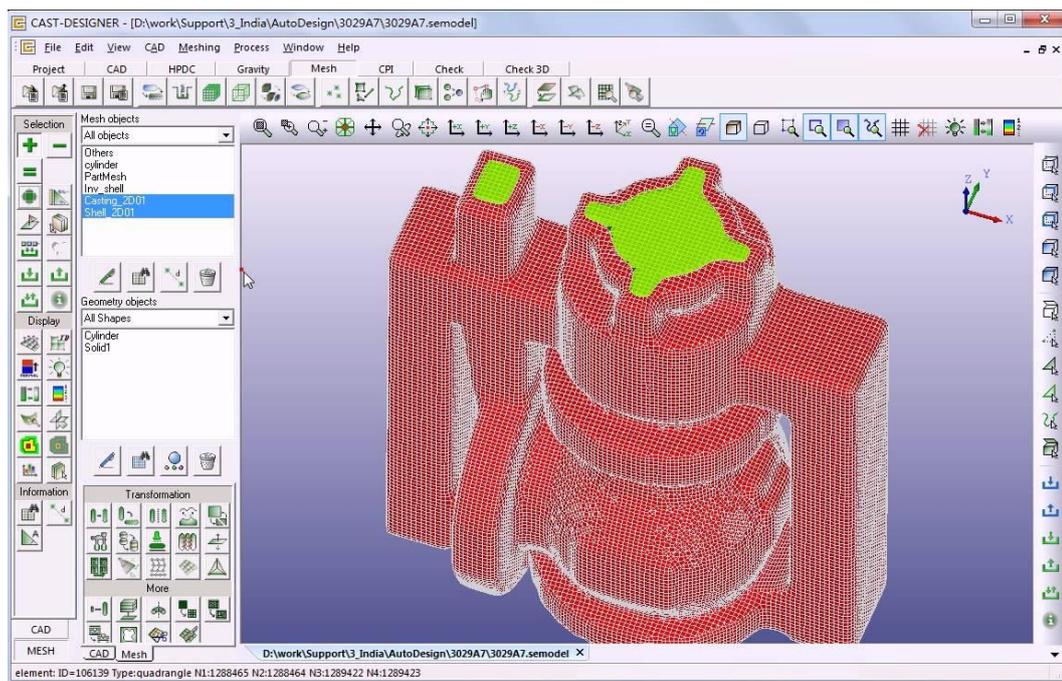


Fig. 38 - Interface de Cast Designer. [Cast designer website]

## 6.5 NovaCast

### 6.5.1 Información técnica

NovaFlow es un software de la empresa NovaCast. Está especializado en la simulación del llenado y la solidificación del molde, dando además una variedad de capacidades y módulos para la simulación. Ofrece soluciones rápidas y precisas y es fácil de aprender a utilizar por su interface intuitivo y ágil.

El ahorro de tiempo que aporta este programa viene del diseño de su malla de cálculo en la simulación y durante el llenado. Cuando las secciones son de paredes gruesas, se utiliza una resolución de malla más grande y para las áreas sensibles, se utiliza una malla más fina. Acortar el tiempo de simulación es crucial para que todas las fundiciones puedan optimizar todos los procesos que se vayan a realizar sobre piezas fundidas.

Este programa nos permite que su producción mejore con el tiempo al permitirnos investigar y ser guiados en cómo aumentar su rendimiento y optimizar su proceso de producción. Esto ayudará también a ahorrar energía, material y finalmente, utilizar menos recursos.

Los programas pueden simular la mayoría de los métodos de fundición comercial, tales como fundición en arena por gravedad, molde permanente, fundición a presión, método de cera perdida, fundición por inyección y fundición centrífuga.

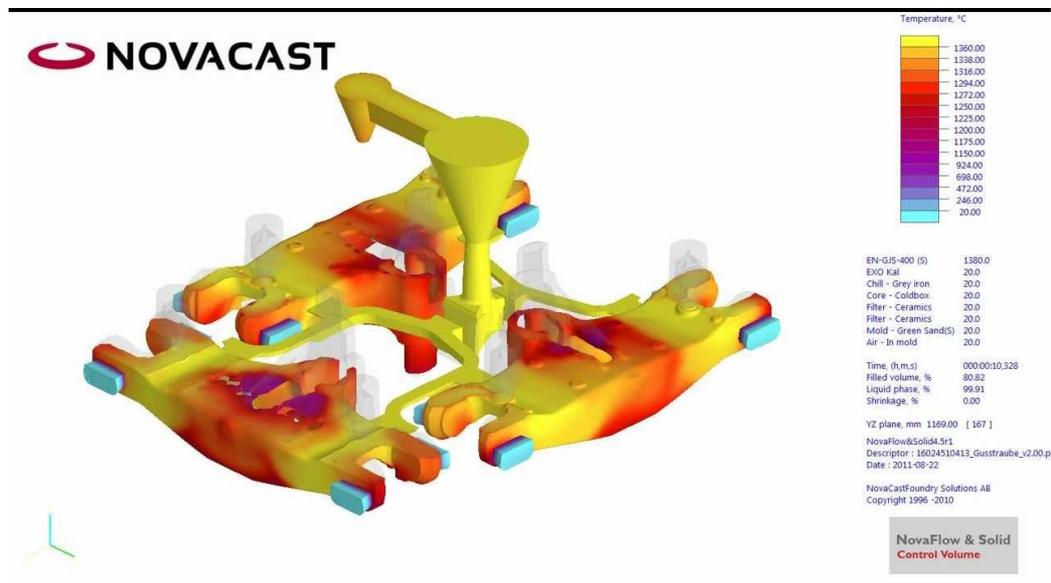


Fig. 39 - Software Novaflow [Nova flow website]

Se pueden procesar distintos materiales, fundición gris y blanca, aleaciones de acero, aleaciones de aluminio, cobre, cinc, aleaciones a base de magnesio y súper aleaciones de cromo y titanio. El sistema puede utilizar todo tipo de materiales de molde y núcleo que son comerciales y también materiales exotérmicos que como ya se ha visto, ayudan a subir la temperatura de la colada para mejorar sus propiedades.

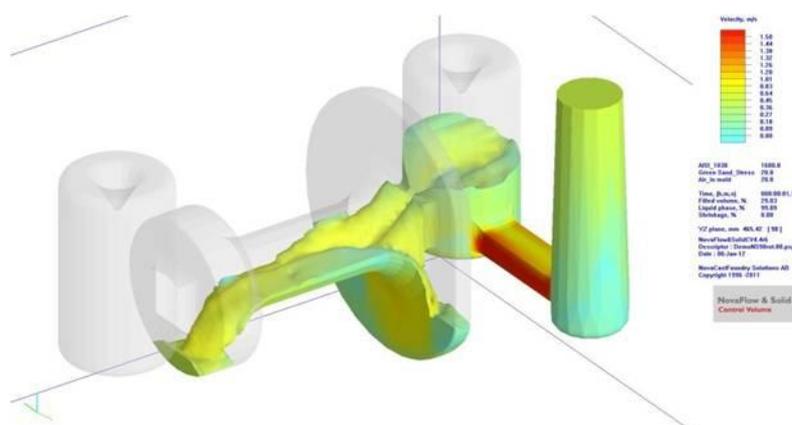


Fig. 40 - Novaflow interface [Nova flow website]

## 6.5.2 Licencias

Novaflow ofrece licencias profesionales para la industria y también ofrece licencias académicas.

## 6.6 AnyCasting

### 6.6.1 Información técnica

Es un software muy potente, de origen sur coreano, enfocado de cara al análisis de fundición, que hace posible predicciones sobre el llenado y solidificación de metales fundidos durante el proceso.



Fig. 41 - Lugares en los que se comercializa este programa [Any Casting website]

Se ha desarrollado durante los últimos diez años. Gracias a su diseño orientado a procesos, los usuarios no expertos en programas de cálculo numérico, pueden analizar sus procesos de moldeo con cierta facilidad. En la actualidad se puede aplicar al análisis de todos los procesos como molde de arena, fundición a alta y baja presión, tipo de fundición basculante, fundición de inyección y similares. Tiene una buena capacidad de predicción de cara a la solución de problemas durante el proceso de manera rápida y precisa. Su construcción consiste en una composición de pantalla y un menú basado en Windows que ayuda al usuario a establecer la condición previa deseada para obtener el resultado que espera.

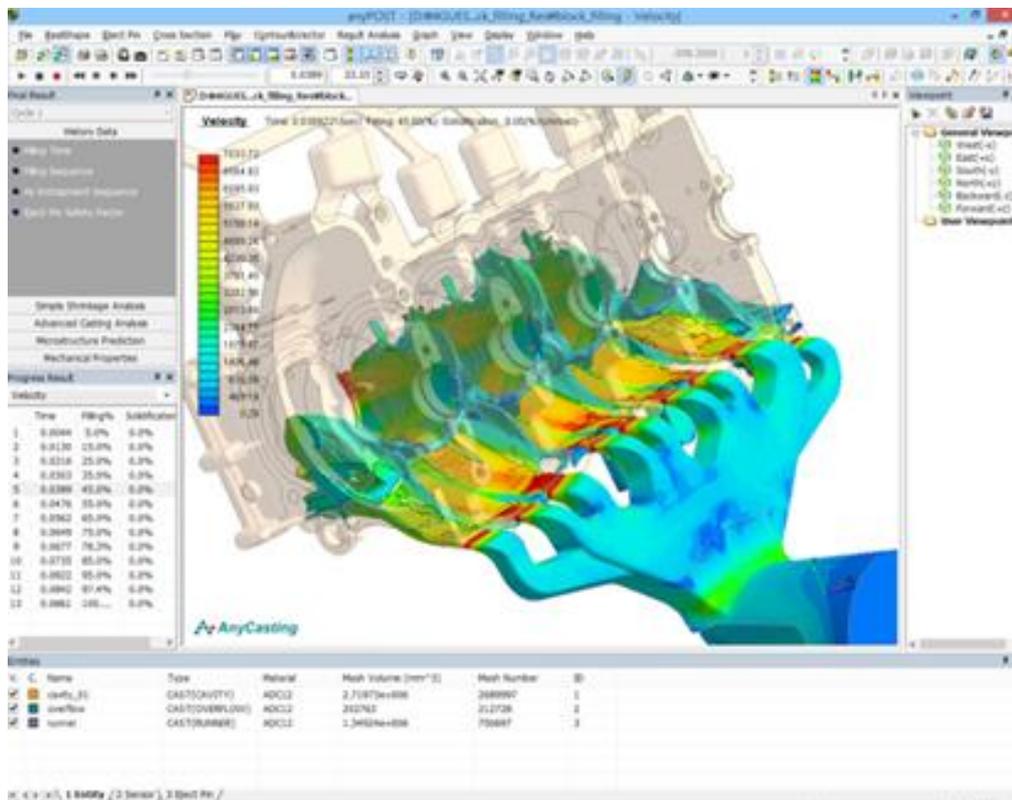


Fig. 42 - Interface AnyCast [Any Casting website]

Este software divide sus capacidades en varios apartados, ordenados por el orden en el que realizamos la simulación.

Se llevará a cabo un pre análisis en el que debemos introducir el diseño gráfico del molde, la pieza, bebederos, mazarotas etc. En esta parte también ofrece la posibilidad de realizar el mallado acorde a nuestras necesidades de definición, exactitud y tiempo de procesamiento. Un post procesamiento, que es un software que lee los resultados que se producen a partir de los datos de la forma y el conjunto de archivos, para mostrar varios resultados en gráficos tridimensionales y poder ser fácilmente analizados de forma rápida y visual.

A la hora de analizar, nos permite ver la contracción del metal por el enfriamiento, proporciona parámetros analíticos definidos por el usuario y otros datos como pueden ser eficiencia de alimentación y los defectos producidos. Para analizar la idoneidad del molde también nos puede servir su capacidad de analizar el área aislada de gas hidrógeno y su volumen, el área en contacto con el aire y aislada o el área que ocupa la superficie oxidada.

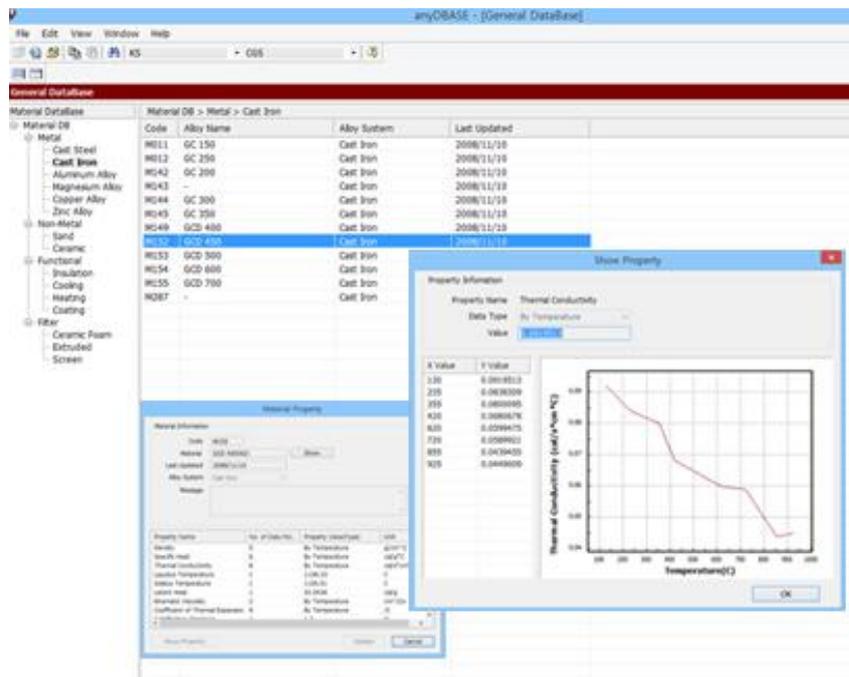


Fig. 43 - Interface de análisis de datos [Any Casting]

Llegados al punto de análisis de datos, es un software que ofrece facilidad para gestionar las propiedades de todos los materiales en los procesos de fundición. Nos saca una base de datos general a modo de datos básicos y una base de datos de usuario para ser realizado según el gusto y las necesidades del técnico.

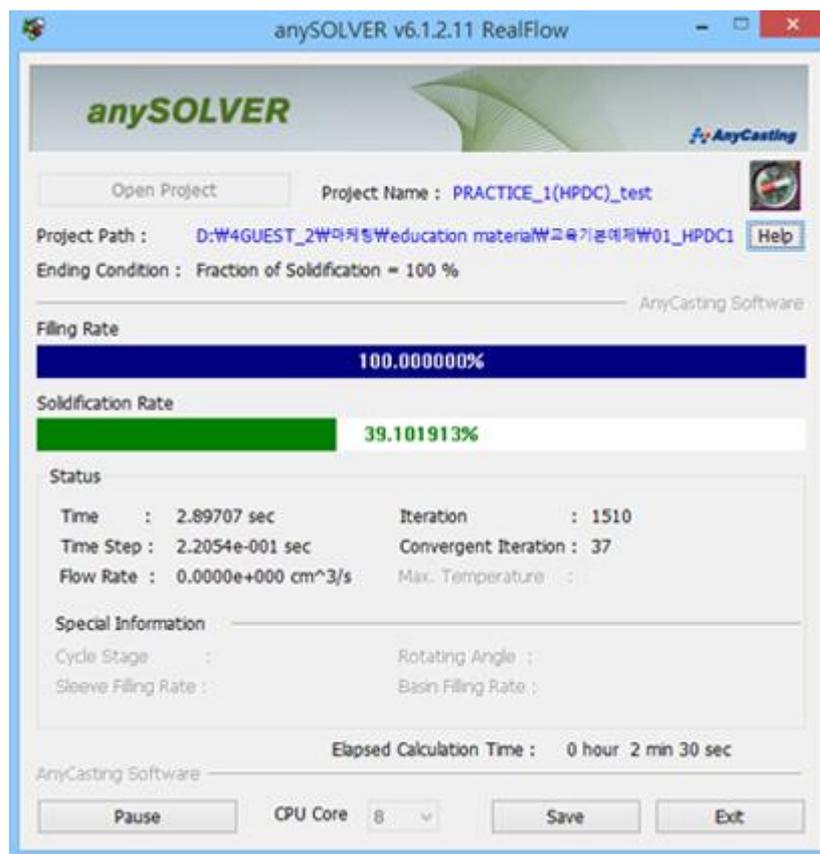


Fig. 44 - Ventana de indicadores de estado de la simulación [Any Casting]

Este programa, contiene un módulo de control que opera en tiempo real, que edita (produce o elimina) la información producida en la fase de simulación solamente con una manipulación sencilla, sin nuevos datos de diseño y sincroniza la información actualizada con los datos previos a la simulación si es necesario.

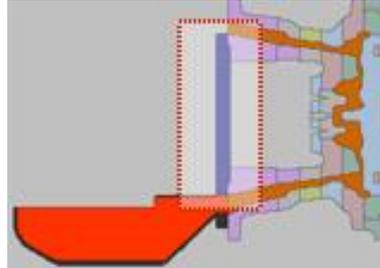


Fig. 45 - Post procesado a)

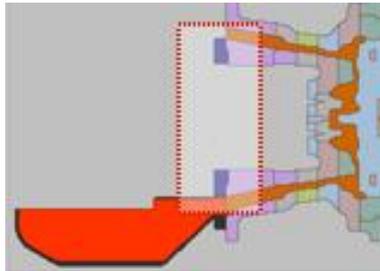


Fig. 46 - Post procesado b)

Nos permite la edición de la información del mallado sin modificar los datos del diseño 3D y proporciona funciones para evitar cualquier fallo que pueda ocurrir al ajustar la red de este. Como vemos en el caso de la figura superior, el caso de post procesado a) se añade información y el b) se suprime.

## 6.7 Ask Chemicals

### 6.7.1 Información técnica

El software que tratamos en este apartado, no es puramente un software de simulación de procesos de fundición, sino un software complementario a estos, que ayuda a la creación de los moldes para optimizar las propiedades de estos.

El software que comercializa Ask Chemicals es el "Arena Flow" y es una herramienta para diseñar y optimizar el rendimiento de las cajas de fabricación de machos por el proceso llamado de "caja fría". En síntesis, consiste en rellenar las cavidades de la caja de machos (molde) con una mezcla de arena y resina, para a continuación hacer pasar un gas (una amina) que desencadena la formación de cadenas de polímeros que aglomeran la arena y por tanto, conforman el macho de arena, que luego se utiliza en el proceso de moldeo para conformar algunas de las partes huecas de las piezas metálicas.

Con Arena Flow se optimiza primero el llenado con la mezcla de arena y resina (compactación uniforme) y después el gaseo con la amina (gaseo homogéneo para reducir el consumo y tiempo de ciclo).

El campo de actuación de esta empresa se centra sobre todo en el sector del automóvil con las siguientes aplicaciones:

- Turbocompresores
- Discos de frenos
- Bloques de motor
- Culatas

También trabajan sobre la prevención de defectos superficiales de fundición como son:

- Picaduras
- Darts o crestas
- Rechupes
- Veteado

El software Arena-Flow utiliza la tecnología de la dinámica de fluidos de partículas computacional (CPFD) y simula el flujo de aire dentro de los utillajes, así como la interacción entre ambos. Esto proporciona una mayor eficiencia en los moldes.

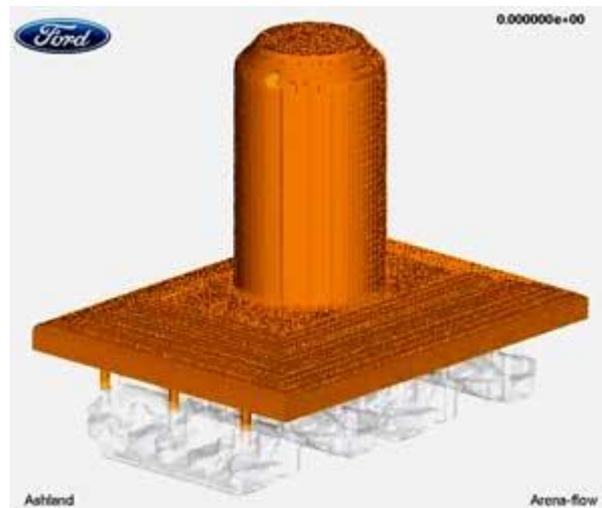


Fig. 47 - Arena Flow [Arena flow website]

### ***Beneficios***

- Mejora la eficiencia de los utillajes al reducir el desgaste de los mismos y los desechos del macho y de la fundición.
- Optimiza los diseños de los moldes incluyendo las mazarotas y el número y la localización de los respiraderos.
- Reduce los gastos en arenas, cofres de madera o metal, etc. optimizando los procesos y la duración de los ciclos.

### ***Simulación de llenado de molde***

- Visualización de la temperatura de distribución.
- Visualización de los flujos, turbulencias y zonas de riesgo.
- Visualización de frentes fríos, grietas en caliente y erosión del molde.
- Visualización de atrapamiento de aire.
- Simulación de solidificación.

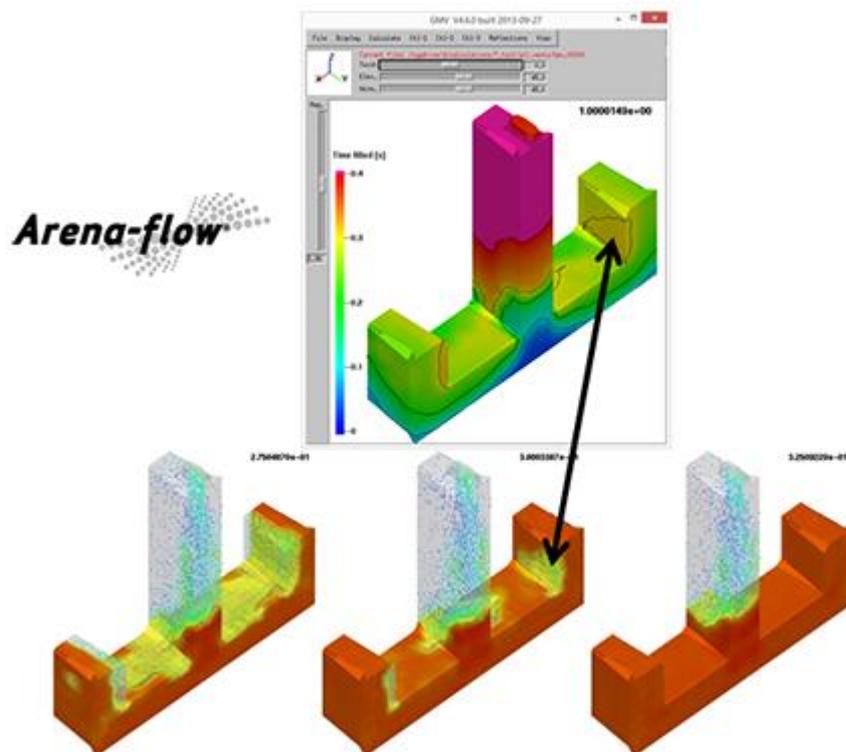


Fig. 48 - Arena Flow simulator [Arena flow website]

## 6.8 Comparación de resultados

	Licencia	Precio	Módulos	Puntos fuertes	Puntos débiles
<b>Any Casting</b>	Licencia Industrial	Desconocido	Módulos de simulación, pos procesado y control. Fundición por gravedad, en arena, en molde permanente inyección, etc	Software potente. Gran capacidad de pos procesado	No implantado en el mercado europeo. Principal mercado asiático.
<b>Pro Cast</b>	Licencia industrial. En red con 4 núcleos Ampliable núcleos y licencia flotante.	60000€ + 6500€ (licencia flotante) + 20% por duplicar núcleos.	Un módulo para la simulación y otro inverso, para desde los parámetros finales rediseñar el proceso.	Licencia de carácter perpetuo	En red con 4 núcleos.
<b>Magmasoft</b>	Licencia flotante, ampliable en número de procesadores usados	50000€ (versión básica)	Magma express (versión básica) Magmasoft (versión completa) Fundición por gravedad, en arena, en molde permanente inyección, etc	Licencia flotante. Posibilidad de añadir el número de núcleos.	No tiene licencia educativa. Precio alto.
<b>Flow 3D Cast</b>	Opción licencia educativa. 32 núcleos en red	40000€ (Industrial) 6500/8000€ (Educativa)	Todas las funciones son servidas en el mismo módulo. Fundición por gravedad, en arena, en molde permanente inyección, etc	Precio Opción de licencia educativa.	Potencia de simulación limitada
<b>Nova Cast</b>	Licencia industrial y licencia educativa.	Desconocido	Todas las funciones son servidas en el mismo módulo. Fundición por gravedad, en arena, en molde permanente inyección, etc	Gran variedad de procesos a simular.	Proceso de post procesado débil.
<b>Cast designer</b>	Licencia de carácter industrial	Desconocido	Fundición por gravedad. Calculador del canal de enfriamiento Análisis del sistema de refrigeración	Variedad de los módulos	Poca variedad de procesos de fundición.



## 7. Normas ISO para la estandarización de software

### 7.1 Normativas europeas que regulan el software técnico

La estandarización de software está regulada por la norma ISO/IEC 33000, que es un conjunto de normativas europeas, desarrollada por ISO, que sustituirá a ISO/IEC 15504 para la evaluación y mejora de la capacidad de los sistemas. Del mismo modo, la ISO/IEC 15504 para la evaluación de empresas de desarrollo software comparte campo con la ISO/IEC 12207, donde actúan ambas.

El objetivo de la serie de Estándares de Evaluación de Procesos ISO / IEC 33000, es proporcionar un enfoque estructurado para la evaluación de procesos.

#### 7.1.1 Propósitos que persigue:

- Determinar la idoneidad de sus propios procesos para un requisito particular o conjunto de requisitos.
- Determinar la idoneidad de los procesos de otra organización para un determinado contrato o conjunto de contratos.

### 7.1.2 El marco para la evaluación de procesos:

Las ventajas de la utilización de estas normativas son muchas:

- Facilita la autoevaluación.
- Proporciona una base para su uso en la mejora de procesos y determinación de capacidades.
- Tiene en cuenta el contexto en el que se aplica el proceso evaluado.
- Produce una calificación del proceso.
- Aborda la capacidad del proceso para lograr su propósito.
- Es apropiado en todos los dominios de aplicación y tamaños de organización.
- Puede proporcionar un punto de referencia objetivo entre las organizaciones.

La evaluación del proceso incluye la determinación de las necesidades de la empresa. Una evaluación (medición) de los procesos utilizados por la organización y el análisis de la posición actual. Los resultados del análisis se utilizarán para impulsar las actividades de mejora de procesos o para determinar la capacidad de los procesos empleados por una organización.

### 7.1.3 Elementos principales:

- 33001→ Conceptos y terminología.
- 33002→ Requisitos para realizar la evaluación del proceso.
- 33003→ Requisitos para marcos de medición de procesos.
- 33004→ Requisitos para los modelos de proceso.

### 7.1.4 Distintas variantes de las normas:

- 33010→ Guía para realizar evaluaciones.
- 33011→ Guía sobre la definición de un proceso de evaluación documentado.
- 33012→ Guía para la mejora de procesos.
- 33013→ Guía para la determinación de la capacidad del proceso.
- 33014→ Guía para la construcción de modelos de referencia de procesos, modelos de evaluación de procesos y modelos de madurez organizacional.

### 7.1.5 Marcos de medición

- 33020→ Marco de medición para la evaluación de la capacidad del proceso y la madurez organizacional.

### 7.1.6 Modelos de referencia de procesos:

- 33040 → Extensión de seguridad.
- 33041 → Ampliación de alta madurez.

### 7.1.7 Modelos de Evaluación de Procesos:

- 33060 → Modelo de evaluación de procesos para procesos de ciclo de vida del software.
- 33061 → Modelo de evaluación de proceso para procesos de ciclo de vida del sistema.
- 33062 → Modelo de evaluación de procesos para procesos de gestión de servicios de TI.
- 33064 → Extensión de seguridad.
- 33065 → Ampliación de alta madurez.

### 7.1.8 Modelos de madurez organizacional:

- 33080 → OMM para ingeniería de software.
- 33081 → Modelo integrado de madurez organizacional para ingeniería de software y sistemas.

La serie ISO / IEC 33000 representa una reorganización y extensión del contenido de la ISO / IEC 15504 "Tecnología de la Información y Evaluación de Procesos" con las siguientes partes:

- Parte 1 → Conceptos y vocabulario.
- Parte 2 → Realización de una evaluación.
- Parte 3 → Orientación sobre la realización de una evaluación.
- Parte 4 → Orientación sobre el uso para la mejora de procesos y la determinación de la capacidad del proceso.
- Parte 5 → Un ejemplo de Software Lifecycle Process Assessment Model.
- Parte 6 → Un modelo de evaluación del proceso del ciclo de vida del sistema.
- Parte 7 → Evaluación de la madurez organizacional.
- Parte 8 → Un modelo de evaluación de procesos para la gestión de servicios de TI.
- Parte 9 → Perfiles de procesos objetivo.
- Parte 10 → Extensiones de seguridad.

### 7.1.9 Actividades actuales:

El trabajo técnico asociado con la conversión de la serie ISO / IEC 15504 en el contenido nuevo / revisado asociado con la serie ISO / IEC 33000, comenzó en 2010, ya que hasta entonces el software no estaba tan extendido y no era habitual tomarlo como datos de rigor para cálculos físicos (estructurales, de cargas, de fundición).

#### ***Fuentes:***

ISO / IEC JTC1 / SC7 / N4991,2011-01-11.

Informe final de la comisión encargada de la revisión de la ISO / CEI 15504.

## 8. Verificación de los resultados.

Tras cualquier proceso de fundición se deben llevar a cabo comprobaciones con la intención de verificar el estado final del material, su acabado, sus defectos o su aspecto superficial.

En la industria, este proceso se llevará a cabo sobre unas muestras elegidas entre un gran número de piezas. Se decidirá estadísticamente el número de piezas a estudiar dependiendo de factores como la criticidad del defecto a estudiar, la frecuencia de aparición, el desconocimiento de datos previos, etc.

Con esta labor, también se verificará si el programa que se haya utilizado para la simulación, ha devuelto al usuario datos correctos, ya que todos los programas del estudio tienen capacidades para darnos a conocer la calidad que vamos a obtener en la pieza que hemos fabricado.

### 8.1 Defectos

#### 8.1.1 Inclusiones de impurezas

Las inclusiones de arena y la escoria son óxidos no metálicos, que aparecen en la radiografía como manchas oscuras irregulares. Estas provienen de porciones desintegradas de paredes de molde, del núcleo o de óxidos (formados en la masa fundida) que no han sido desprendidos antes de la introducción del metal en el molde. El control cuidadoso de la masa fundida, el tiempo de retención adecuado en el cucharón y la prevención de formación de óxidos en la superficie de la masa fundida durante el vertido, minimizarán o evitarán esta fuente de problemas. En un proceso de inspección radiográfica, aparecería como una impureza en el metal sólido.

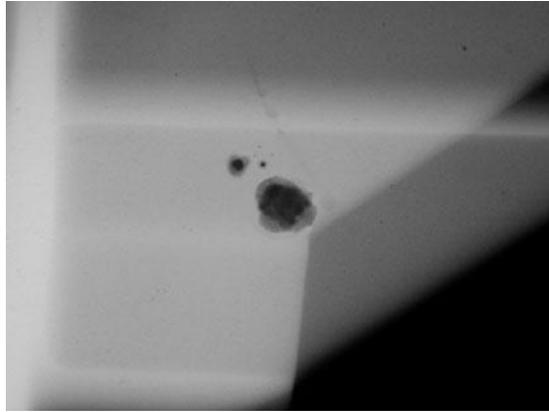


Fig. 49 - Impurezas vistas con ensayo radiográfico [U. Tecnológica de Pereira]

### 8.1.2 Contracción del material fundido.

La contracción del metal fundido, puede producirse cuando el metal se solidifica entre dos corrientes originales de fusión, procedentes de direcciones opuestas para unirse a un frente común. La contracción de la cavidad, usualmente ocurre en un momento en el que la masa fundida ha alcanzado casi la temperatura de solidificación y no hay fuente de líquido suplementario para alimentar esas posibles cavidades.

### 8.1.3 Llenado incompleto.

El defecto de llenado incompleto del molde, aparece en una fundición que se solidifica antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causas típicas son:

- Fluidez insuficiente del metal fundido.
- Muy baja temperatura de llenado.
- Llenado que se realiza muy lentamente.
- Sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

#### 8.1.4 Junta fría.

Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a la solidificación o al enfriamiento prematuro. Sus causas son similares a las del llenado incompleto.

#### 8.1.5 Gotas frías.

Las salpicaduras durante el llenado hacen que se formen gotas de metal que se enfrían muy rápido y quedan atrapadas en la fundición. Un buen diseño del sistema de llenado que evite las salpicaduras puede prevenir este defecto.

#### 8.1.6 Rechupes

Los rechupes son un defecto originado por una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición, debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. El problema se puede resolver frecuentemente con un diseño apropiado de la mazarota. El encogimiento asume diversas formas, pero en todos los casos se produce porque el metal fundido se encoge a medida que se solidifica en todas las porciones de la colada final. Se evita el encogimiento asegurándose de que el volumen de la pieza fundida se alimenta adecuadamente por medio de tubos ascendentes que retiren la parte que sufre la contracción. La retracción en sus diversas formas puede ser reconocida por una serie de características en las radiografías, que es uno de los métodos más usados para su detección.

### 8.1.7 Porosidades

Las porosidades son causadas por el gas acumulado que es atrapado por el metal. Estas discontinuidades son normalmente cavidades redondeadas de pared lisa, de forma esférica, alargada o aplanada. Si el bebedero no es lo suficientemente alto para proporcionar la transferencia de calor necesaria para forzar el gas o el aire fuera del molde, estos quedarán atrapados a medida que el metal fundido comienza a solidificarse. Los defectos también pueden ser causados por arena demasiado fina, demasiado húmeda, o por arena que tiene una permeabilidad baja para que el gas no pueda escapar. Un contenido de humedad demasiado alto en la arena, dificulta el transporte de los volúmenes excesivos de vapor de agua de la colada.

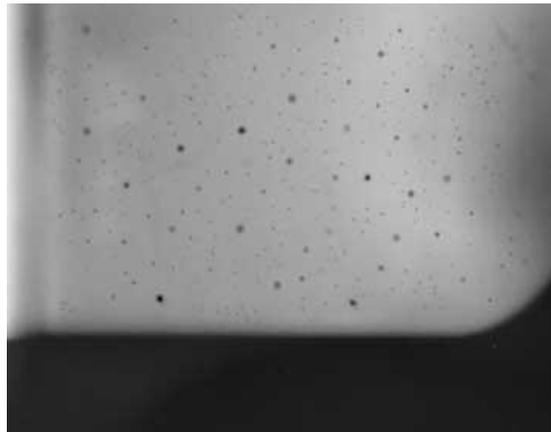


Fig. 50 - Porosidades vistas con ensayo radiográfico [U. Tecnológica de Pereira]

### 8.1.8 Agrietamiento caliente

Este defecto ocurre cuando durante las etapas finales de la solidificación o en las etapas primeras de enfriamiento, el molde restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Se manifiesta como una separación del metal (de aquí el término desgarramiento o agrietamiento) en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente. En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene modificando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación.

Para verificar la veracidad de los datos obtenidos en los programas que simulan las condiciones de fundición, se realizan ensayos tecnológicos sobre los materiales. Los ensayos pueden ser destructivos o no destructivos. El objetivo es ver el estado final del metal, una vez ya ha solidificado.

Los defectos antes vistos se pueden detectar con los siguientes ensayos:

- Ultrasonidos.
- Líquidos penetrantes.
- Radiografía industrial.
- Metalografía.
- Radiografía industrial.

## 8.2 Ensayos

### 8.2.1 Ensayo de ultrasonidos.

El ensayo ultrasónico utiliza ondas de sonido de alta frecuencia (típicamente en el rango entre 0.5 y 15 MHz) para realizar exámenes y realizar mediciones. Además de su amplio uso en aplicaciones de ingeniería (como detección / evaluación de defectos, medidas dimensionales, caracterización de materiales, etc.), los ultrasonidos también se utilizan en el campo médico (como sonografía, ecografía terapéutica, etc.). En general, la prueba ultrasónica se basa en la captura y cuantificación de las ondas reflejadas (impulso-eco) o de las ondas transmitidas (transmisión). Cada uno de los dos tipos se utiliza en ciertas aplicaciones, pero en general los sistemas de eco de impulsos son más útiles, ya que requieren acceso unilateral al objeto que se está inspeccionando.

Un sistema típico de inspección de impulso-eco consta de varias unidades funcionales, como el pulsador / receptor o el transductor y un dispositivo de visualización. Un pulsador / receptor es un dispositivo electrónico que puede producir pulsos eléctricos de alto voltaje. Impulsado por el pulsador, el transductor genera energía ultrasónica de alta frecuencia. La energía sonora se introduce y se propaga a través de los materiales en forma de ondas. Cuando hay una discontinuidad (tal como una grieta) en la trayectoria de la onda, parte de la energía será reflejada detrás de la superficie de esa grieta. La señal de onda reflejada se transforma en una señal eléctrica por el transductor y se muestra en una pantalla. Conociendo la velocidad de las ondas, el tiempo de viaje puede estar directamente relacionado con la distancia recorrida por la señal. A partir de la señal, a veces se puede obtener información sobre la ubicación del reflector, el tamaño, la orientación y otras características.

***Ventajas:***

- Es sensible tanto a las discontinuidades superficiales como a las no superficiales.
- La profundidad de penetración para la detección o medición de defectos es superior a otros métodos no destructivos.
- Sólo se necesita acceso unilateral cuando se utiliza la técnica de eco-pulso.
- Es muy preciso en la determinación de la posición del reflector y en la estimación de su tamaño y forma.
- Proporciona resultados instantáneos.
- Se pueden producir imágenes detalladas con sistemas automatizados.
- No es peligroso para los operadores o personal cercano y no afecta al material que se está probando.
- Tiene otros usos, como la medición del espesor, además de la detección de defectos.
- Su equipo puede ser portátil o altamente automatizado.

***Inconvenientes:***

- La superficie debe ser accesible para transmitir ultrasonidos.

- Se requiere un conocimiento exhaustivo del método para su interpretación.
- Si los materiales son ásperos, de forma irregular, muy pequeños, excepcionalmente finos o no homogéneos, son difíciles de inspeccionar.
- Es difícil inspeccionar el acero fundido y otros materiales de grano grueso debido a la baja transmisión de sonido y al ruido de alta señal.
- Los defectos lineales orientados paralelamente al haz acústico pueden pasar desapercibidos.
- Se requieren normas de referencia tanto para la calibración del equipo como para la caracterización de defectos.
- La prueba ultrasónica se basa en la vibración de los materiales y generalmente se conoce como acústica. Todas las sustancias materiales están compuestas por átomos, que pueden ser forzados a movimientos vibratorios alrededor de sus posiciones de equilibrio.

Existen muchos patrones diferentes de movimiento vibratorio en el nivel atómico, sin embargo, la mayoría son irrelevantes a la acústica y a la prueba ultrasónica. La acústica se centra en partículas que contienen muchos átomos que se mueven en armonía para producir una onda mecánica. Cuando un material no está estresado en tensión o compresión más allá de su límite elástico, sus partículas individuales realizan oscilaciones elásticas. Estas fuerzas de recuperación elásticas entre las partículas, combinadas con la inercia de otras partículas, conducen a los movimientos oscilatorios del medio.

Algunos ejemplos de comportamiento de metales en este ensayo son los siguientes:

- $V_L$ : Velocidad longitudinal de las ondas. (m/s)
- $V_T$ : Velocidad transversal de las ondas. (m/s)

Tabla 2- Parámetros de ondas

<b>Material</b>	<b>Compressional velocity</b> $V_L$ (m/s)	<b>Shear velocity</b> $V_T$ (m/s)
<b>Aluminum</b>	6320	3130
<b>Steel (1020)</b>	5890	3240
<b>Cast iron</b>	4800	2400
<b>Copper</b>	4660	2330
<b>Titanium</b>	6070	3310

### 8.2.2 Ensayos con líquidos penetrantes.

El ensayo penetrante líquido es uno de los métodos más populares de examen no destructivo en la industria. Es económico, versátil y requiere un conocimiento del método de ensayo mínimo, en comparación con otros métodos. Los ensayos con líquido penetrante comprueban si hay defectos materiales en la superficie.

El tinte penetrante es un método de bajo coste y muy versátil. El modo de funcionamiento de este ensayo comprende tres fases: limpiador, penetrante y desarrollador. Primero limpiamos la superficie para evitar errores en el ensayo, después aplicamos el líquido penetrante y por último un fluido que ayuda a remarcar las zonas que deseamos comprobar con la tinta penetrante. Se puede usar en gran variedad de metales y es un ensayo muy barato.



Fig. 51 - 3 productos que se deben aplicar para realizar el ensayo

### ***Ventajas:***

- Alta sensibilidad a pequeñas discontinuidades superficiales.
- Fácil inspección de piezas con formas complejas.
- Inspección rápida y económica de grandes áreas y grandes volúmenes de piezas / materiales.
- Una representación visual de la grieta se indica directamente en la superficie de la pieza.
- Las latas de aerosol hacen que el proceso sea portátil, cómodo y barato.
- Las indicaciones pueden revelar el tamaño relativo, la forma y la profundidad de las grietas.
- Es fácil y no requiere grandes conocimientos para llevarlo a cabo.

***Inconvenientes:***

- Detecta fallas sólo abiertas a la superficie.
- Los materiales con superficies porosas no pueden ser examinados usando este proceso.
- Sólo se pueden inspeccionar superficies limpias y lisas. Se debe eliminar el óxido, la suciedad, la pintura, el aceite y la grasa.
- El examinador debe tener acceso directo a la superficie examinada.
- El acabado superficial y la rugosidad pueden afectar a la sensibilidad del examen. En el caso concreto de la fundición, se puede necesitar realizar un acabado superficial.
- Se requiere manejo apropiado de productos químicos.
- Los vapores pueden ser peligrosos e inflamables sin ventilación adecuada.

### 8.2.3 Radiografía industrial.

La radiografía industrial es un ensayo no destructivo que consiste en atravesar el componente a revisar con un haz de radiación electromagnética ionizante (rayos gamma o rayos X). Esta radiación será más o menos absorbida por las discontinuidades internas de la pieza, llegando a la otra cara de la misma con una intensidad de radiación distinta, lo que nos dará muestra de la localización de dichas discontinuidades.

Las piezas fundidas son una forma de producto que a menudo reciben inspección radiográfica, ya que muchos de los defectos producidos por el proceso de colada son de naturaleza volumétrica y por tanto, son relativamente fáciles de detectar con este método. Estas discontinuidades están relacionadas con las deficiencias del proceso de fundición y nos ayudarán a tomar decisiones sobre la aceptación o rechazo, así como medidas correctivas adecuadas.

La Norma ASTM E155 para radiografías de piezas de fundición, sirve para ayudar a los técnicos encargados de realizar este proceso de obtener radiografías, a evaluar mejor los defectos encontrados en los componentes.

### ***Ventajas***

- Proceso versátil que se puede aplicar a todo tipo de materiales metálicos, tanto ferrosos como no. También se puede aplicar a plásticos, resinas epoxi, etc.
- Nos da una muestra permanente del estado de la pieza estudiada.
- Ofrece una calidad alta en lo que a la detección de defectos se refiere.
- Muestra faltas de continuidad en la estructura y defectos en la unión de zonas internas.

### ***Inconvenientes***

- No es sencilla su aplicación si es una zona de difícil acceso o la geometría es compleja.

- Al contrario que otros métodos que hemos visto antes, necesitamos acceso bilateral, es decir tenemos que poder acceder por ambos lados de la pieza.
- Al ser un proceso que se basa en la radiación, debemos extremar las medidas de protección.

#### 8.2.4 Metalografía aplicada a materiales de fundición.

Para evaluar la microestructura de un metal sometido a alta temperatura, es de gran importancia saber que las transformaciones en la estructura que observamos en la parte exterior de ese metal, pueden llevarnos a conclusiones erróneas, ya que el aspecto exterior y el interior en casos de fundición, depende de un gran número de factores (tiempo, temperatura, estado del molde...). Debido a esto, el ensayo metalográfico es de gran interés.

Para llevar a cabo este ensayo, debemos en primer lugar quitar la cáscara exterior del metal, donde se pueden haber formado óxidos y dejar mediante un proceso de desbaste una superficie plana. Será suficiente con retirar entre 0,10 mm y 0,50 mm. El corte se realizará con una máquina especializada de gran precisión que no provoca abrasión sobre el material.

Una vez tengamos la muestra, se realizará su inclusión metalografía en una resina que nos ayudará a conservar la muestra metálica en óptimas condiciones para su observación y estudio posteriores.

El siguiente paso será proceder a un desbaste más fino de la cara que vamos a estudiar, con papel de lija de carburo de silicio o alúmina, seguido de un desbaste aún más fino y una limpieza con nital que dejará la superficie lista para realizar el ensayo.

Una vez que tenemos la muestra preparada, la colocaremos en el microscopio. La observación por parte del técnico de materiales, nos revelará si la microestructura es la deseada y esto a su vez, nos dará retorno sobre si la velocidad y la temperatura de llenado del molde fueron las correctas y si hay uniformidad o defectos internos en la pieza.

## 9. Conclusiones y líneas futuras

### *Conclusiones*

Una vez realizado el trabajo de fin de grado, se puede comprobar que se han alcanzado los objetivos planteados.

El objetivo principal del trabajo, el benchmarking sobre los distintos software de simulación, se ha realizado aportando para ello una gran cantidad de información obtenida de los distintos programas y de los equipos comerciales que los distribuyen. También se incluye en el trabajo, imágenes de los distintos interfaces, sus capacidades y sus modos de funcionamiento.

Se ha realizado también una puesta en situación desde el punto de vista histórico de la fundición de metales y de los procesos de simulación en general, donde podemos ver cómo los últimos 50 años han supuesto un salto exponencial en las posibilidades de simulación existentes. Este salto experimentado por la técnica, ha puesto al alcance de todo tipo de empresas y usuarios, no solo de las grandes multinacionales, unos avances que como bien hemos explicado, les dotan de capacidad para competir a cualquier nivel en el mercado.

También se ha añadido un estudio matemático para dar a conocer a partir de que modelos se desarrollan los programas de simulación para realizar los cálculos que nos devuelve cualquier simulación de este tipo.

Los datos que nos aportan las simulaciones, no deben ser tomados como verídicos al 100% desde el primer momento, ya que dependen de los datos de entrada, de los cálculos internos que han sido ejecutados, así como de las exigencias con las que esté configurado el programa. Por todo esto, otro de los objetivos cumplidos es la aportación de distintos métodos para la verificación de los resultados obtenidos en los procesos de fundición.

Los métodos pueden ser de distintos tipos y con ellos podremos afinar la calidad de nuestras simulaciones para que, tras este proceso previo, si podamos confiar en los datos recibidos por nuestro software de simulación.

El último objetivo del trabajo era dar un ejemplo sencillo de simulación y sobretodo de cómo actuar con los datos de entrada y los datos observados a la salida.

Todo lo anterior nos hace ver la cantidad de tiempo, dinero y medios que nos ahorra trabajar con software de simulación de fundición, a la hora de llevar a cabo un proceso de fabricación de piezas metálicas en la industria.

### ***Líneas de trabajo futuras***

En lo concerniente a las posibles líneas futuras de trabajo que se han detectado durante este proceso de investigación y benchmarking llevado a cabo, se considera interesante insistir en los aspectos que a continuación se citan.

Uno de los pilares de la simulación con ordenador, es la ***capacidad de cálculo de los procesadores***. Con el ritmo actual de crecimiento, es muy posible que en apenas 10 años se pueda trabajar con un programa de altas prestaciones en cualquier portátil de precio medio, desapareciendo así la necesidad de utilizar procesadores especiales, que nos permitan el uso en red de recursos como son los simuladores y las grandes bases de datos.

En el ámbito de la mecánica de fluidos computacional también se están produciendo importantes evoluciones, por lo que unido a los ***avances del hardware***, confluirán aportando mejoras sustanciales.

El futuro de estos programas deberá mejorar la **velocidad de trabajo y de cálculo** y también deberá mejorar la calidad de los resultados ofrecidos al usuario, haciéndolos más fiables y evitando la necesidad de comprobaciones post fabricación.

Otro punto importante es el aumento de conocimiento en el uso del **análisis de sensibilidad de las variables** para la creación de modelos numéricos. Tener en cuenta la incertidumbre de las variables de entrada y sobretodo, como afecta esto a las de salida, es clave para conseguir un modelo numérico de calidad. A la hora de implementar este modelo en un software de simulación, conocer la sensibilidad hará que ciertos valores de entrada requieran más exactitud al introducirlos y sobretodo, sabremos la incertidumbre de los datos obtenidos tras realizar los cálculos.

La **ampliación de librerías y bases de datos**, ayudará a trabajar con la gran variedad de materiales existentes hoy en día. Se hará más sencilla la selección de parámetros de entrada y la elección de rangos de trabajo, por lo tanto, esto también reportará una importante mejora en la simulación de los procesos de fundición.

Respecto al uso de estos programas, concretamente la simulación de procesos de fundición, pocos distribuidores comercializan licencias enfocadas al ámbito académico. El **uso académico en universidades** y escuelas de formación, es sin duda, caldo de cultivo para crear profesionales más competentes y con mayor variedad de conocimientos.



## 10. Índice de ilustraciones

Fig. 1 - Llenado de un molde. Colada de acero. [Unimold]	16
Fig. 2 - Colada continua [Mecmex.com]	18
Fig. 3 - Colada de aluminio en molde	19
Fig. 4 - Pasos de un proceso de fundición en moldeo	20
Fig. 5 - Molde de fundición en arena [monografias.com]	21
Fig. 6 - Pieza desmoldeada con bebederos [Undo prototipos]	22
Fig. 7 - Buffon y Laplace [Lander simulations]	23
Fig. 8 - Sala de computadores del Proyecto Manhattan	24
Fig. 9 - Primeros computadores. ENIAC [Calvin-edu]	25
Fig. 10 - Escala de colores para representar valores de estudio [Flow 3D cast]	34
Fig. 11 - Escala de temperaturas por colores [Procast]	35
Fig. 12 - (a)-(b)	42
Fig. 13 - Mallado (a)	43
Fig. 14 - Mallado (b)	44
Fig. 15 - Modelo esquemático de la obtención del lingote	48
Fig. 16 - Velocidad de enfriamiento	48
Fig. 17 - Mallado que representa la sección transversal de la pieza	50
Fig. 18 - Esquema sistemas de enfriamiento [IMH.eus]	52
Fig. 19 - Fleje de fundición [Biblioteca digital]	54
Fig. 20 - Enfriamiento en las distintas zonas. Desde el centro al extremo.	59
Fig. 21 - Campo de temperatura en la sección transversal.	60
Fig. 22 - Funcionamiento del sistema de enfriamiento con rodillos y pulverización.	61
Fig. 23 - Distribución de tensiones para los siguientes casos: a) Zona de enfriamiento con agua pulverizada b) Zona de enfriamiento por aire c) Zona de contacto con los rodillos.	61
Fig. 24 - Sistema de simulación	64
Fig. 25 - Diagrama de flujo para mejorar el diseño del sistema de colada	65
Fig. 26 - Modelo 3D de la placa	66
Fig. 27 - Modelo 3D de bloque de arena	66
Fig. 28 - Patrón de llenado del molde y variaciones de temperatura del sistema de bebederos y mazarotas en distintas etapas	72
Fig. 29 - Solidificación del sistema de bebederos y mazarotas en varias etapas	73
Fig. 30 - Flow 3D Cast Interface. [Flow 3D web site]	77
Fig. 31 - Flow 3D Cast Interface. [Flow 3D web site]	77
Fig. 32 - Magmasoft interface. [Magmasoft web site]	81
Fig. 33 - Simulación colada [Magmasoft web site]	82
Fig. 34 - Pro Cast interface [Pro cast website]	85
Fig. 35 - Simulación con Pro Cast.[Procast website]	86
Fig. 36 - Ejemplo de creación de mallado.[Procast website]	86

<i>Fig. 37 - Cast designer software [Cast designer website].....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 38 - Interface de Cast Designer. [Cast designer website] .....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 39 - Software Novaflow [Nova flow website] .....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 40 - Novaflow interface [Nova flow website] .....</i>	<i>93</i>
<i>Fig. 41 - Lugares en los que se comercializa este programa [Any Casting website].....</i>	<i>94</i>
<i>Fig. 42 - Interface AnyCast [Any Casting website].....</i>	<i>95</i>
<i>Fig. 43 - Interface de análisis de datos [Any Casting].....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 44 - Ventana de indicadores de estado de la simulación [Any Casting] .....</i>	<i>97</i>
<i>Fig. 45 - Post procesado a) .....</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 46 - Post procesado b) .....</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 47 - Arena Flow [Arena flow website] .....</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 48 - Arena Flow simulator [Arena flow website] .....</i>	<i>102</i>
<i>Fig. 49 - Impurezas vistas con ensayo radiográfico [U. Tecnológica de Pereira].....</i>	<i>112</i>
<i>Fig. 50 - Porosidades vistas con ensayo radiográfico [U. Tecnológica de Pereira].....</i>	<i>114</i>
<i>Fig. 51 - 3 productos que se deben aplicar para realizar el ensayo.....</i>	<i>120</i>

## 11. Bibliografía

1. *Confrontation of two solidification simulation software to a particular use into foundry industry, Material Science Forum, v455-456, Advanced Materials Forum II: Proceedings of the II International Materials S. Moreira, Jose and Ribeiro, C.A.Silvia (2003).*
2. *Tratado Moderno de Fundición del hierro y del acero. A. Biedermann, L. M. H.(1957).*
3. *Characteristics of defects present in industrial steel castings due to metal-mould reactions, Archives of Metallurgy and Materials 54, 2 (2009). B. Kalandyk, R. Zapała, A. Rakowska,.*
4. *Castings Practice – The 10 rules of castings. Campbell, John (2004).*
5. *Supply Chain Simulation: A System Dynamics Approach for Improving. Campuzano, F., y Mula, J. (2011).*
6. *Verification and validation of simulation models. 1998 Winter Simulation. Kleijnen, J. P. . (1995).*
7. *“Influence of the steel fluid-dynamics”. DeSantis, M. R. Ridolfi and M.*
8. *Guía Tecnológica para el Proyecto de curso en Tecnología de Fundición II. García Caballero, R. , I. A. G. R. (1983).*
9. *Guía Tecnológica de Fundición. García Caballero, R. (1970).*

10. *Simulation for manufacturing system design and operation*. **Negahban, A., y Smith, J. S. (2014)**.

11. *A formalized description of foundry production program*, *Archives of Foundry Engineering, Polish Academy of Sciences. Commission of Foundry Engineering*. **R. Wrona, A. Stawowy, A. Macioł**.

12. *Application of Casting Simulation for Sand Casting of a Crusher Plate*. **Plate, Application of Casting Simulation for Sand Casting of a Crusher**. Dec. 2011.

13. *Use of the distributed computing at the castings solidification simulation* . **E.O. Ol'khovik, A.A. Butsanets**. 2015.

14. *"Computer Modeling of a Large Casting in the Software Pckage procast"*. **A.D. Abdullin**. 2013.

15. *Application of Casting Simulation for Sand Casting of a Crusher Plate*. **P. Prabhakara Rao, G. Chakraverthi, B. Balakrishna**. 2011, Vols. *International Journal of Thermal Technologies*, Vol.1, No.1 (Dec. 2011).

16. **CASUSO, FLORENCIO y MERINO, ANTONIO**. *ALBUM DE DEFECTOS EN LINGOTES Y EN PRODUCTOS FORJADOS Y LAMINADOS*. 1981.

17. **Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro, Juan Carlos del Real Romero**. *Procesos industriales para materiales metálicos*. 2006.

18. **Pérez, C., Ugalde, M., Puertas, I. y Álvarez, L**. *Procesos de conformado por fundición. Moldeo en arena*. s.l. : Universidad pública de Navarra. Pamplona, España., 2005.

19. **Shurkin, Joel**. *Engines of the mind : the evolution of the computer from mainframes to microprocessors*. Nueva York : Norton, 1996.

20. *Tecnología de Fundición II*. Pérez, Leonardo Goyo. s.l. : H. M. R.
21. Xing Jin, Dengfu Chen, Yan Zhao, Mujun Long. *Study on mathematical model of temperature and stress for thin slab in continuous casting*. s.l. : College of Materials Science and Engineering.
22. [histinf.blogs.upv.es/2011/12/22/john-von-neumann/](http://histinf.blogs.upv.es/2011/12/22/john-von-neumann/).
23. *Optimizing casting parameters of ingot based on neural network and genetic algorithm*. Pei Zhang, Zhiqiang Xu, Fengshan Du. s.l. : Mechanical Engineering Department of YanShan University.
24. *Optimization of reactive epoxy casting process*. David Raschka, Bandeep Singh. Pinetops, North Carolina, U S A : Technology Centre ABB.
25. *Metodología de simulación data driven utilizando una arquitectura de 4 capas de simulación por eventos discretos*. Aída Sáez Mása, José P. García-Sabaterb, Joan Morant Llorcac y Julien Maheutd. Universitat Politècnica de València : s.n., 2016.
26. *Recent advances in modelling of metal machining processes*. P.J. Arrazola, et al. Mondragon : Faculty of Engineering, Mondragon University, 2013.
27. *Analysis of the inverse identification of constitutive equations applied in orthogonal cutting process*. J.Pujana, J.Arrazola, et al. Gipuzkoa, Spain : Faculty of Engineering, Mondragon University, 2007.