# APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE SIMULACIÓN EN LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COLADA CENTRÍFUGA VERTICAL PARA LA FABRICACIÓN DE CILINDROS DE LAMINACIÓN.

Leonel Elizondo Treviño<sup>(1)</sup> Beatriz Pejenaute Rodríguez<sup>(1)</sup> Juncal Guerrero Muñoz<sup>(2)</sup> José Luis Suarez Sierra<sup>(2)</sup> Roberto Suárez Sierra<sup>(2)</sup> Juan José del Coz Díaz<sup>(3)</sup>

# **RESUMEN**

Desde que comenzó a ponerse en práctica el método de colada centrífuga vertical para los cilindros de trabajo, se ha intentado explicar tanto la trayectoria seguida por el caldo, como la evolución de las temperaturas del metal dentro del molde en el transcurso del tiempo, pero sin éxito.

Hasta el momento, se han comercializado varios programas informáticos capaces de simular tanto el llenado como el enfriamiento y solidificación dentro del molde, pero siempre en el caso de colada estática, siendo imposible analizar la colada centrífuga. A partir de pruebas de colada centrífuga grabadas en vídeo, así como de ensayos realizados en un modelo a escala con agua, y mediante programas basados tanto en volúmenes finitos como en elementos discretos, ha sido posible la reproducción de la trayectoria del caldo. Esto ha permitido una mejor comprensión de los mecanismos de transferencia del movimiento entre el molde y el caldo. De esta forma, ha sido posible el rediseño de ciertos componentes del molde y de otros elementos del sistema de colada para mejorar dicho mecanismo.

Sin embargo, éste ha sido sólo el primer paso del objetivo final, que es el desarrollo de un nuevo simulador capaz de predecir no sólo la transferencia de movimiento, y por tanto la distribución del caldo dentro del molde, sino también los mecanismos de transferencia de calor y solidificación. Con este nuevo simulador, actualmente es posible reproducir el proceso de colada de cilindros bimetálicos, y decidir los parámetros de colada más adecuados para conseguir una unión óptima entre la capa y el núcleo del cilindro de trabajo.

Palabras clave: Colada centrífuga vertical, simulación numérica, volúmenes finitos, elementos discretos

# 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de cilindros bimetálicos mediante colada centrífuga vertical comienza con el vertido del metal de la capa dentro del moldeo giratorio. Una vez colada la capa, se introduce un termopar en el molde con el fin de conocer la temperatura en el interior y su evolución. De esta forma, se tiene una idea del proceso de enfriamiento y solidificación de la capa. Cuando el termopar marca una señal determinada, se extrae éste y se realiza la colada del caldo del núcleo. La determinación del momento idóneo para la extracción del termopar, junto con la especificación de la temperatura a la que debe estar el caldo del núcleo en el momento de la colada, es una de las claves para lograr una unión óptima entre los dos caldos de los cilindros bimetálicos, y por tanto, para la integridad del mismo durante los esfuerzos a los que éste se ve sometido durante la laminación.

En el caso de las calidades tradicionales de cilindros, tales como temple indefinido y fundiciones altas en Cr, se observa fácilmente en la gráfica registrada por el termopar, la señal de transformación eutéctica dada por un cambio de pendiente. En función de esta señal, se puede decidir el momento de colada del núcleo. Sin embargo, en las calidades nuevas como son los aceros rápidos, semirápidos y aceros altos en Cr, la ausencia de una solidificación eutéctica clara, dificulta enormemente la decisión del momento idóneo para extraer el termopar y colar el núcleo. [8]

<sup>(1)</sup> Fundición Nodular, S.A., C/La Fundición 4, 33420 Lugones, España.

juncal@ast-ingenieria.com / jlsuarez@ast-ingenieria.com / sierra@ast-ingenieria.com

<sup>(3)</sup> Universidad de Oviedo, Edificio Departamental de Viesques Nº7, 33204 Gijón, España delcoz@uniovi.es

<sup>&</sup>lt;u>lelizondo@nodular.com</u> / <u>beatriz@nodular.com</u> <sup>(2)</sup> Advanced Simulation Technologies S.L., Parque Científico y Tecnológico de Gijón, Cabueñes, 33203 Gijón, España.

En estos casos se hace necesario fijar una temperatura exacta para sacar el termopar. Por este motivo, es imprescindible conocer lo más exactamente posible, la relación entre la temperatura a la que se encuentra la capa realmente en cada punto a lo largo de su longitud y la temperatura que marca el termopar. Hay que tener en cuenta además, la geometría del molde ya que la lectura del termopar indica solamente la temperatura registrada en un punto dentro del molde y puede diferir mucho de la real, dependiendo del diámetro y de la longitud del mismo.

Así pues, se crea la necesidad desarrollar una aplicación informática capaz de simular tanto el proceso de llenado como la solidificación posterior dentro del molde.

La simulación numérica del proceso de colada centrífuga vertical es un aspecto que no ha sido resuelto hasta hoy en día debido a las dificultades para reproducir la complejidad física del problema.

A pesar de ello, resulta muy interesante para los fabricantes de cilindros conocer en detalle los procesos físicos que acontecen durante las diferentes fases de llenado y posterior solidificación, puesto que existen variables importantes que deben ser controladas de un modo muy preciso con el fin de obtener una calidad óptima del cilindro. De este modo, se abre una puerta a la innovación y la investigación en este campo, en el que todavía es necesario invertir esfuerzos en la comprensión de los citados fenómenos, por lo que un equipo multidisciplinar de ingenieros ha colaborado intensamente en la consecución del estudio que aquí se expone.

En primer lugar, es preciso indicar que en el proceso dinámico de colada centrífuga se presentan fenómenos complejos altamente no lineales de interacción fluido estructura, así como cambio de fase, intercambio térmico por convección y radiación, turbulencia y rozamiento contra las paredes, etc. aconteciendo todo ello sobre la superficie libre de un líquido cuya viscosidad y condiciones de contorno evolucionan con el tiempo.

De este modo, con el fin de comprender y abordar de un modo eficiente la resolución de este problema se ha optado por el uso de técnicas y métodos de simulación y ensayo que nos han permitido reproducir los fenómenos descritos anteriormente. Dichas técnicas han sido las siguientes:

- Método de diferencias finitas: para el estudio de la velocidad de proyección del acero sobre el molde [1-5].
- Método de los volúmenes finitos: para el análisis del flujo de material en el interior del molde y su interacción con el aire y el molde [6].
- Método de los elementos discretos: para la simulación del flujo de material como partículas, para el estudio de la dinámica del fluido en su superficie libre [7].
- Técnica experimental mediante prototipo a escala, para validar los modelos numéricos construidos y optimizar el proceso industrial.

A continuación, pasaremos a describir cada una de ellas, así como los resultados más significativos.

## 2. SIMULACION MEDIANTE EL PROGRAMA DE DIFERENCIAS FINITAS

Existen en el mercado varios programas comerciales basados tanto en elementos finitos como en diferencias finitas [1-6], capaces de simular el llenado del molde en el caso de colada estática y su posterior enfriamiento y solidificación dentro del molde. Se utilizan estos programas en este estudio para ayudar a resolver el problema de transferencia de calor.

El procedimiento para la simulación con estos programas es el siguiente: primeramente se hace un dibujo en 3D con ayuda del preprocesador del programa. Se dibuja todo el molde con sus distintas partes, así como la pieza final. Una vez realizado el dibujo, se procede al mallado del conjunto molde-pieza. Posteriormente, se introduce la composición química del caldo, así como propiedades físicas de éste y del resto de los materiales. Se procede entonces a pedir al programa que realice los cálculos necesarios para la simulación y finamente se ven los resultados a través del postprocesador del programa. En la Fig.1 se puede ver un ejemplo de un molde estático en el que se observa mediante un código de colores, el porcentaje de solidificación en cada punto, en un momento dado.

Aunque el programa permite la simulación del flujo de llenado, no dispone de opciones para simular un llenado en condiciones de centrifugado del molde, reproduciendo el comportamiento del citado flujo siempre en condiciones estáticas.

En cualquier caso, es posible obtener información válida a los efectos del proceso de colada centrífuga utilizando un entorno basado en el método de las diferencias finitas [1-5], en la parte estática del mismo, es decir, partiendo de la superficie libre del caldo, una vez vertido en el embudo desde la cuchara, pasando por el tubo hasta la buza y desde la salida de los orificios (en forma de chorros) de esta última hasta el punto de contacto con el molde. A partir de este momento la interacción entre molde y chorro genera comportamientos dinámicos del caldo que no son reproducibles en el citado entorno.



Fig.1: Simulación de solidificación en un molde estático. Simulation of solidification in a static mould.

En este sentido y con el objeto de obtener información que pueda suponer un punto de partida para otras opciones de simulación, se ha planteado un modelo de embudo, tubo y buza de salida para un determinado modelo que se utilizará como base de la investigación reproduciendo un flujo de llenado del molde de 200 kg (versión del programa MAGMA 4.2.).



Fig. 2: Diferentes momentos del flujo de llenado . Different moments of the flow during the filling

El cálculo se llevó a cabo mediante el método de diferencias finitas. Las velocidades de salida aparecen entrecortadas por culpa del mallado, el cual se realiza mediante cubos de 19 mm de lado. Con esta discretización algunas zonas aparecen frías cuando el cubo tiene más parte fría que caliente, no obstante, el orden de magnitud sale correctamente.

Mediante este modelo se determinan los intervalos de velocidades de salida, obteniéndose en torno a 3.5 m/s por cada agujero de buza de dimensiones (5x5 mm\*mm).

Como principales resultados se ha estimado la velocidad del chorro en el punto de contacto con el interior del molde, lo que permite tener caracterizado dicho valor para su posterior utilización como condición de contorno en los siguientes entornos de simulación a investigar.

Adicionalmente se pudo comprobar mediante la toma de fotografías reales del proceso industrial, cómo transcurre la dinámica del chorro en los instantes siguientes justo tras producirse el contacto.



Fig. 3: Proceso real de contacto del chorro con la pared del molde. Real contact of the flow with the mold

### 3. SIMULACION MEDIANTE VOLUMENES FINITOS

El método de los volúmenes finitos, o más concretamente, la dinámica de fluidos computacional (CFD), es un campo de la ciencia que estudia las leyes físicas que gobiernan los fluidos bajo distintas condiciones. La trayectoria del fluido se puede describir mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen el balance de masa, de cantidad de movimiento (ecuaciones de Navier-Stokes) y balance de energía, las cuales se conocen desde hace más de cien años y sin embargo no ha sido posible resolverlas analíticamente. En consecuencia, ha surgido el empleo de métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas y poder simular el flujo de fluidos en una computadora.

En nuestro caso, y debido a las especiales características de los fenómenos de convección, entre otros, existen distintos métodos de discretización de las ecuaciones diferenciales de conservación en relaciones algebraicas aproximadas. El método más común, y que implementan algunos códigos CFD [6], recibe el nombre de método de volúmenes finitos. En esta técnica, se parte de una discretización previa del dominio de cálculo en elementos a partir de los cuales se construye la nueva malla de celdas o volúmenes finitos. Sobre cada uno de estos volúmenes se realiza la discretización de la forma integral de las ecuaciones de conservación y su resolución iterativa.

La generación de un modelo tridimensional CAD de la geometría del dominio fluido es el primer paso para la resolución de un problema CFD. Las partes sólidas deben mantener la geometría inicial y las características relevantes para capturar el flujo, pudiéndose pasar por alto detalles que a nivel de fabricación serían esenciales pero desde el punto de vista de los procesos físicos que ocurren se consideran de nula importancia, tales como la rugosidad superficial o los pequeños radios de acuerdo entre las diferentes partes que componen el sistema.

La segunda etapa en la definición del problema es la discretización del dominio fluido en celdillas llamadas elementos o volúmenes finitos de variadas formas. El tamaño del dominio dividido por la resolución requerida determina el número de elementos necesarios para asegurar precisión en los resultados, estando este limitado por la memoria disponible. La densidad de elementos puede variar de unas regiones a otras, debiendo acumular un mayor número en aquellas zonas donde se esperan fuertes variaciones de algún parámetro.

El siguiente paso es la resolución de las ecuaciones que gobiernan el fluido en cada uno de los elementos de la malla generada. Puesto que las ecuaciones son diferenciales, previamente hay que transformarlas en ecuaciones algebraicas, introduciendo errores numéricos de discretización y truncamiento [10-13].

Asociados a la cuantificación de errores se encuentra el concepto de verificación de los cálculos. Se llama verificación de los cálculos a la comprobación de que las ecuaciones están siendo correctamente resueltas. La verificación del modelo, por el contrario, es la comprobación de que el modelo elegido para la simulación del sistema en cuestión, su geometría, propiedades físicas y condiciones de contorno, son suficientemente fieles a la realidad. Para ello conviene servirse de resultados reales con los que contrastar los resultados obtenidos, para unas condiciones determinadas.

Una vez resultas las ecuaciones, se dispone de los valores de las variables que definen el problema en cada uno de los elementos de la malla. Se realizarán a partir de ellas las observaciones necesarias sirviéndose del apoyo gráfico y cuantitativo de la herramienta de post-procesado.

Una vez valoradas las posibilidades del método de los volúmenes finitos para reproducir el comportamiento fluido-dinámico (con y sin cambio de fase) del proceso de colada centrífuga de cilindros, se construye un modelo en el entorno del preprocesador del programa de Volúmenes Finitos, sobre el que se pudo constatar las enormes dificultades computacionales que se originan, fundamentalmente debido a la condición de contorno que supone el no deslizamiento en el punto de contacto del chorro de colada con el molde, lo cual requiere un tamaño de

malla muy reducido (del orden de micras), dado que la condición de no deslizamiento implica que sólo una película de caldo muy fina continúa adherida a la pared tras el contacto, habida cuenta de que esta se encuentra en la velocidad de operación en el entorno de las 500 rpm y el chorro se encuentra en un estado de rotación nulo en el momento del contacto.

A partir de ese instante se produce un equilibrio entre las fuerzas inerciales de rotación del chorro, que aumentan progresivamente en el tiempo por efecto de la viscosidad (difusión de cantidad de movimiento angular) y la acción de la gravedad hasta alcanzar el estado final de equilibrio (paraboloide en la superficie libre). Todo el proceso transitorio supone un problema de flujo tridimensional con presencia de superficie libre y tamaños de capas límite muy reducidas en los instantes iniciales, sin contar con el problema añadido del cambio de fase.

Siendo la tecnología de simulación más potente en el estado actual de la técnica, todas las dificultades apuntadas, aconsejan buscar modelos simplificados que permitan avanzar en el conocimiento del problema. Cuando estos conocimientos del flujo interno del caldo en su evolución en el molde sean contrastados, será el momento de volver a retomar un modelo se simulación mediante el método de los volúmenes finitos que incorpore dicho conocimiento, con el doble objetivo de aprovechar la potencialidad del método reduciendo a su vez el coste de computación que supone abordar el problema con el estado de conocimiento actual sobre el proceso de colada centrífuga de cilindros.



Fig. 4.: Diferentes momentos de la colada reproducidos mediante volúmenes finitos [6]. Different moments of the pouring obtained by finite volumes..

## 4. SIMULACION MEDIANTE ELEMENTOS DISCRETOS

El método de los elementos discretos (**D**iscrete **E**lement **M**ethod en inglés) fue formulado por Cundall en 1971. La finalidad y objetivos del mismo era definir el comportamiento mecánico de un cuerpo o medio a partir de una discretización en un conjunto de elementos los cuales componen la totalidad del medio.

El Método de los Elementos Discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de cuerpos, los cuales interactúan entre si a través de sus puntos de contacto. La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, pudiéndose formar medios con diferentes tamaños de partículas, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analizan y se simulan mediante esta técnica numérica. Principalmente se pueden distinguir las siguientes características básicas que definen a grandes rasgos este método de análisis: - Un conjunto de cuerpos, o elementos discretos, que conforman el sistema complejo de partículas. - Estos elementos distintos, como también se les conoce, se desplazan independientemente unos de otros e interactúan en las zonas de contacto. - Los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí, por lo que, a nivel de cada partícula, se hace uso de la mecánica de cuerpo rígido.

El modelo constitutivo que define el comportamiento global del material se establece en las zonas de contactos entre partículas. Los contactos se componen por los siguientes elementos mecánicos:

<u>Resorte</u>: Los resortes describen el comportamiento elástico del medio en la zona de contacto entre cada partícula. Este comportamiento elástico queda caracterizado por dos resortes, uno en la dirección de contacto normal y otro en la dirección tangencial, con coeficientes de rigidez kn y kt, respectivamente.

Amortiguador: Por su parte los amortiguadores son elementos que toman en cuenta la viscosidad del medio que

se simula. Este comportamiento viscoso queda caracterizado por dos amortiguadores, uno en la dirección de contacto normal y otro en la dirección tangencial, con coeficientes de amortiguación cn y ct, respectivamente. En la formulación pueden emplearse varios modelos de contacto, variando de contacto viscoso a no viscoso, lo que permite aplicar el modelo a un gran número de problemas mecánicos, tanto elásticos como visco-elásticos.



Fig. 5:: Modelo de contacto entre partículas. Contact model between particles

Elemento de fricción: El elemento de fricción describe la interacción debida a las

características superficiales de las partículas. Este comportamiento queda caracterizado por un coeficiente de fricción  $\mu$ .

El proceso de cálculo implica un algoritmo cíclico que requiere la aplicación de la ley de movimiento a cada partícula, la ley de fuerzas en cada contacto, y un control constante de las condiciones de contorno del sistema. En cada paso de tiempo cambia la estructura de los contactos existente entre elementos distintos o entre éstos y las paredes. Esto implica tener un control estricto de los contactos en cada paso de tiempo, además de contar con un algoritmo eficiente que los actualice constantemente durante el transcurso de la simulación. De forma muy simplificada el proceso de cálculo se ilustra en la figura 6.



En cada instante de tiempo, se determinan los diferentes contactos entre partículas y entre partículas y paredes. Por otra parte se determinan las fuerzas aplicadas en cada contacto para, junto con las fuerzas impuestas y de campo, actualizar las fuerzas que actúan sobre cada partícula. Seguidamente, la ley de movimiento se aplica a cada partícula para actualizar la aceleración, velocidad y la posición de éstas, y se aplican las condiciones de borde geométricas, con lo que se obtienen los desplazamientos relativos entre partículas, que son datos necesarios para comenzar el cálculo de las condiciones del sistema en el paso de tiempo siguiente.



#### Modelo de contacto

Es el modelo por defecto que utiliza el programa empleado se denomina Hertz Mindlin (no Slip) y garantiza una adecuada transmisión de fuerzas entre las partículas. A través de la teoría de Hertz se puede expresar como:

$$P_{ij} = \frac{4}{3} E_{ij}^* \sqrt{R_{ij}^*} h_{ij}^{3/2}$$

donde  $E^*ij$  es el módulo de young equivalente,  $R^*ij$  el radio equivalente entre partículas y hij es el solape normal entre el contacto de las partículas.

$$\begin{split} &\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{E}_{ij}^*} = \frac{(\mathbf{1} - \mathbf{v}_i^2)}{\mathbf{E}_i} + \frac{(\mathbf{1} - \mathbf{v}_j^2)}{\mathbf{E}_j} \\ &\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R}_{ij}^*} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R}_i} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R}_j} \\ &\mathbf{h}_{ij} = \mathbf{R}_i + \mathbf{R}_j - \left\| \mathbf{r}_{ij} \right\|_{\text{con}} \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j \end{split}$$

Fuerza de amortiguamiento viene dada por:

$$P_n^{d} = -2\sqrt{\frac{5}{6}\beta\sqrt{S_n m^* v_n^{rel}}}$$

donde  $\mathbf{m}^*$  es la masa equivalente,  $\mathbf{v}_{\mathbf{n}}^{\text{rel}}$  es la componente normal de la

velocidad relativa  $\beta$  y Sn es la rigidez normal que vienen dadas por:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \qquad S_n = 2E_{ij}^* \sqrt{R_{ij}^* h_{ij}}$$

donde e es el coeficiente de restitución.

La fuerza tangencial Pt depende del solape tangencial, hijt, y de la rigidez tangencial, St

$$P^{t} = -S_{t}h_{ij}^{t} \qquad \qquad S_{t} = 8G^{*}\sqrt{R^{*}h_{ij}}$$

La amortiguación viene dada por la fórmula:

$$\mathbf{P}_{t}^{d} = -2\sqrt{\frac{5}{6}\beta\sqrt{S_{t}m^{*}}\mathbf{v}_{t}^{rel}}$$
donde  $\overline{\mathbf{v}_{t}^{rel}}$  es la velocidad tangencial relativa.

La fuerza tangencial viene limitada por la fricción de Coulomb  $\mu_s F_n$  donde  $\mu s$  es el coeficiente de fricción estática.

Para simulaciones en las cuales la fricción por rodadura es importante, se añade un par en las superficies de contacto:  $\tau_{I} = -\mu_{R}F_{n}R_{i}\omega_{i}$ 

El programa implementa otro modelo de contacto, denominado de Cohesión Lineal, que modifica el contacto de Hertz-mindlin añadiendo una fuerza de cohesión. En este caso, el valor de la fuerza toma la forma:  $\mathbf{F} = \mathbf{K} * \mathbf{A}$ 

donde **A** es el área de contacto y **k** es la densidad de energía cuyas unidades vienen dadas por  $Jm^{-3}$ . Esta fuerza es añadida a la tradicional Hertz-mindlin normal force. Por otra parte, en este modelo de contacto no se añade ninguna fuerza tangencial.





Fig. 7:. Diferentes momentos de la colada reproducidos mediante elementos discretos [7]. Diferent steps of the pouring obtained by discrete element simulation.

A partir de todas las consideraciones anteriores, se procede a la construcción de un modelo que incorpore los datos de entrada de flujo ya disponibles con el objeto de avanzar en el conocimiento del proceso de transporte de cantidad de movimiento desde las paredes del molde a las partículas fluidas consideradas como pequeñas esferas, con los oportunos parámetros y modelos de contacto.

La principal ventaja que aporta la idealización de las partículas del caldo como elementos discretos es el tratamiento de las condiciones de contorno que suponen la existencia de una superficie libre. El método encuentra dicha superficie de forma natural habida cuenta de su formulación e hipótesis de partida.

Los distintos resultados obtenidos con distintos tamaños de partículas, distintos modelos de contacto (y parámetros asociados) y distintas condiciones de entrada (número de chorros), ha posibilitado la propuesta y el diseño de distintos elementos adicionales que pueden incidir sobre la dinámica del proceso de colada.

# 5. MODELO EXPERIMENTAL

Con el doble objetivo de poder avanzar en el conocimiento de la evolución del flujo dentro del molde en el proceso de colada centrífuga y poder validar resultados obtenidos por otras vías (analítica o numérica), se plantea la construcción de un modelo a escala 1/3 de la máquina centrifugadora disponible en Fundición Nodular S.A.



Sobre dicho modelo experimental, se han realizado dos tipos de campañas de ensayos:

- Ensayos sobre la efectividad de distintos elementos empleados para modificar tanto la salida del caldo, como la trayectoria seguida por el mismo hasta alcanzar el régimen estacionario.
- Ensayos sobre el mecanismo de transporte de cantidad de movimiento desde las paredes del molde, hacia el fluido, durante el proceso transitorio de llenado hasta alcanzar la forma de paraboloide que prescribe la solución estática del problema.

# 6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

A la vista de todos los resultados alcanzados con las tentativas desarrolladas en distintos entornos de simulación, modelos experimentales asociados y toma de datos en planta, se ha constatado una doble dificultad, fruto por un lado de la complejidad inherente al propio proceso en estudio y por otro la asociada a la complejidad operativa que supone abordar el problema con entornos de simulación de propósito general.

El desarrollo de una herramienta de simulación de propósito específico, orientada a reproducir el problema de la simulación del proceso de colada centrífuga de cilindros, que incorpore simplificaciones específicas para este problema, sobre todo las derivadas del hecho de que se conoce analíticamente la forma de la superficie libre una vez transcurrido el tiempo transitorio de aceleración del caldo, supone un enorme avance para dar respuesta a problemas industriales de producción [9].

Las principales hipótesis de partida (buscando reproducir la dinámica del proceso de colada centrífuga de forma simplificada, pero suficiente a los efectos del problema industrial) son las siguientes:

- Axilsimetría geométrica.: se considera un dominio fluido con simetría cilíndrica en la que las únicas variables son la posición radial y cilíndrica de cada partícula.
- Consideración del problema como esencialmente cinemático: la determinación del campo de velocidades en cada instante y en cada punto permite obtener el resto de variables del sistema.
- Equilibrio termodinámico (hipótesis general del medio continuo): se establece en base a choques entre moléculas, de tal forma que el tamaño de una región o partícula de fluido (o celda en la discretización) sea suficientemente pequeña para que macroscópicamente se pueda considerar como puntual, pero mucho mayor que el recorrido de las moléculas hasta su interacción o choque, de tal forma que se puedan considerar estados de equilibrio locales.

El algoritmo de trabajo del simulador en investigación es el siguiente:

Inicializar variables y modelo, según condiciones particulares:

- Actualizar tiempo de simulación.
- Actualizar la geometría del sistema por consideraciones cinemáticas.
- Realizar la transferencia de calor (conducción + convección + radiación).
- Realizar la transferencia de masa (estado líquido a estado sólido) en función de la temperatura.
- Generar resultados.

Se debe generar también una rutina que gestione la entrada de partículas en el sistema.

Actualmente se encuentra en ejecución la construcción de distintos modelos simplificados que caractericen los mecanismos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía, en base a las soluciones analíticas disponibles en el régimen permanente y en distintos estudios recogidos en la bibliografía de referencia, junto con el análisis dimensional e inspeccional de las ecuaciones de gobierno y los ensayos sobre modelos experimentales de laboratorio.

Se encuentran también en desarrollo procedimientos para realizar el cambio de escala en los parámetros esenciales del proceso (tiempo de duración del fenómeno transitorio y perfiles de velocidades), desde el laboratorio a la planta, como parte esencial de la investigación industrial en desarrollo, para poder estimar empíricamente aquellos parámetros o mecanismos que tanto desde el punto de vista analítico como numérico, resultan inabordables en el estado actual de conocimientos sobre la tecnología del proceso de colada centrífuga de cilindros de laminación.

Este cambio de escala puede realizarse mediante la aplicación de ecuaciones empíricas. Para obtener estas, se parte del conocimiento de los criterios de semejanza obtenidos mediante el análisis dimensional  $\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, ...)$  y se establece la suposición de que la expresión que relaciona el módulo independiente  $\pi_1$ , con los demás es una función potencial del tipo:

$$\Pi_1 = C \times \Pi_2^a \times \Pi_3^b \times \Pi_4^c \dots$$

De este modo, una experimentación adecuadamente planificada permite obtener el valor del coeficiente C (factor de forma), muy relacionado con la geometría del sistema, y de los exponentes a, b, c, etc., que suelen ser prácticamente independientes de ésta.

Así, mediante la utilización del modelo experimental construido (semejante geométricamente al modelo industrial, es decir, la máquina centrifugadora real), es posible aplicar la ecuación potencial en las dos escalas y efectuar el cociente, lo que hace desaparecer el factor de forma C, que tendrá el mismo valor para el modelo experimental y el modelo industrial:

$$\frac{(\Pi_1)_P}{(\Pi_1)_M} = \left[\frac{(\Pi_2)_P}{(\Pi_2)_M}\right]^a \times \left[\frac{(\Pi_3)_P}{(\Pi_3)_M}\right]^b \times \left[\frac{(\Pi_4)_P}{(\Pi_4)_M}\right]^c$$

Ello supone que, conocidos los valores de los módulos independientes en ambas escalas, y mediante una experimentación muy reducida, que permita conocer el módulo dependiente en el modelo experimental, se pueda estimar el mismo en el modelo industrial. Con ello y a partir de este último valor, se puede conocer el valor del parámetro de proceso buscado, en el caso que nos ocupa el tiempo de duración del período transitorio (o un tiempo característico del sistema) o cualquier otro parámetro hidrodinámico de interés.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el uso académico e investigador de los programas de simulación ANSYS-CFX, EDEM y MAGMA. También quieren poner de relieve el apoyo del Área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo para la realización del ensayo experimental y el soporte computacional.

## Bibliografía

[1] MAGMASOFT Version 4.2 . MAGMAiron Module. Microstructural Modelling in Cast Iron. Manual & Tutorial. MAGMA GmbH, 2000.

[2] MAGMASOFT Version 4.2 . MAGMAiron Module. Microstructural Modelling in Cast Iron. MAGMA GmbH, 2000.

[3] MAGMAsteel. Simulation of Steel Casting. MAGMA GmbH, 2000.

[4] MAGMAquenching. Cast Cooling by Quenching. Manual. MAGMA GmbH, 2000.

[5] MAGMASOFT. Simulation of aluminum gravity casting. MAGMA GmbH, 2000

[6] SAS IP, Inc. ANSYS - CFX program documentation, 2009.

[7] EDEM 2.3 User guide. DEM Solutions Inc, Rev 2C, 2010

[8] Defectos presentados por las nuevas generaciones de cilindros (HSS, MHSS, semi-HSS) y su relación con la dinámica de fluidos en colada centrifugada vertical. J. Llano, J.L. González, J. C. Werquin, B. Pejenaute. 45° Seminario de Laminación, ABM 2008.

[9] Modeling the vertical spincasting of large bimetallic rolling mill rolls. I. Studer, S. Detrembleur, B.J. Dewals,
 M. Pirotton y A.M. Habraken. 7<sup>th</sup> EUROMECH Solid Mechanics Conference. Lisboa, Portugal, 2009.

[10] R.J. LeVeque, Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems, Cambridge University Press, New York (2002)

[11] H. Versteeg and M. Malalasekra, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Prentice Hall, New York (2007).

[12] J.D. Anderson, Computational Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Company, New York (1995).

[13] G.K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, New York (2007).