

Evolución de modelos numéricos CFD del molde de colada continua orientados al estudio del origen de fisuras en planchones de acero

Evolution of CFD numerical models of the continuous casting mold aimed to the study of the origin of cracks in steel slabs

Doctorando/a:

Javier SOLA

<https://orcid.org/0009-0003-7867-8575>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Argentina

jsola@frsn.utn.edu.ar

Director/a:

Edgardo BENAVIDEZ

Codirector/a:

Elena BRANDALEZE

Resumen

Las fisuras superficiales e internas (transversales, longitudinales) del planchón de acero SAE 1010 se originan mayoritariamente dentro del molde de colada continua, como consecuencia de la combinación de factores tales como: gradientes térmicos, crecimiento no uniforme de la cáscara solidificada, fricción con el polvo colador y las tensiones mecánicas asociadas a la oscilación del molde. Predecir las zonas y condiciones de operación con mayor riesgo de fisuración requiere, como paso previo, conocer con precisión el campo de flujo, la distribución de temperaturas y el perfil de solidificación dentro del molde. En este trabajo se presenta la evolución de una serie de modelos numéricos desarrollados en ANSYS Fluent para la colada continua de planchones de acero SAE 1010, concebidos como una construcción progresiva hacia un modelo termo-fluidodinámico-estructural capaz de estimar el riesgo de fisuración. Se partió de un modelo bidimensional validado con datos de planta y se avanzó hacia modelos tridimensionales que incorporan la interacción bifásica acero-polvo colador, la oscilación del molde, la extracción de calor en las paredes y la solidificación con conicidad, cada uno aportando variables relevantes para el análisis de fisuración. Se describen asimismo las líneas de trabajo futuras, orientadas a la incorporación de propiedades físicas, variables con la temperatura, y al acoplamiento con un modelo estructural para el cálculo directo de tensiones.

Palabras claves: Colada continua; molde; CFD; solidificación; tensiones térmicas.

Abstract

Surface and internal cracks in slabs (transverse and longitudinal) originate primarily within the continuous casting mold as a result of the combination of thermal gradients, non-uniform growth of the solidified shell, friction with the casting powder, and mechanical stresses associated with mold oscillation. Predicting the areas and operating conditions with the highest risk of cracking requires, as a preliminary step, a precise understanding of the flow field, temperature distribution, and solidification profile within the mold. This paper presents the evolution of a series of numerical models developed in ANSYS Fluent for the continuous casting of SAE 1010 steel slabs, conceived as a progressive step toward a thermofluid dynamic-structural model capable of estimating cracking risk. The study began with a two-dimensional model validated with plant data

and progressed to three-dimensional models incorporating the two-phase interaction between steel and casting powder, mold oscillation, heat extraction from the walls, and solidification with taper, each contributing relevant variables for crack analysis. Future lines of research, focusing on incorporating temperature-dependent physical properties and coupling them with a structural model for direct stress calculation are also described.

Keywords: Continuous casting; mold; CFD; solidification; thermal stresses.

Introducción

La colada continua es el proceso mediante el cual el acero líquido proveniente de la acería es vertido desde la cuchara para ser transformado en un semiproducto sólido (planchón, palanquilla) de sección constante. El molde de cobre refrigerado constituye la primera y más crítica etapa de este proceso, ya que allí se forma la cáscara solidificada que debe contener al acero líquido remanente durante todo el trayecto de la máquina. Es también dentro del molde, y en la región inmediatamente posterior a la salida, donde se originan la gran mayoría de los defectos de fisuración del planchón (Thomas, 2018).

Los tipos de fisuras más frecuentes en planchones de acero SAE 1010 son: (a) Transversales, asociadas a las marcas de oscilación en la superficie; (b) Longitudinales, vinculadas a enfriamiento no uniforme o a un espesor de cáscara insuficiente; (c) De esquina, relacionadas con el enfriamiento acelerado en la conicidad del molde; (d) Internas, originadas por tensiones térmicas durante la solidificación cuando la resistencia mecánica del acero aún es escasa. La formación de estas fisuras es consecuencia directa de la interacción entre el campo de flujo del acero líquido, la distribución de temperaturas, el crecimiento de la cáscara solidificada y las tensiones mecánicas y térmicas que ésta debe soportar mientras aún posee escasa resistencia mecánica (Camisani-Calzolari et al., 2003).

Debido a la imposibilidad de observar directamente estos fenómenos durante la operación industrial, la simulación numérica mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como herramienta central para el estudio. Sin embargo, la representación simultánea de todos los fenómenos (flujo turbulento, multifase, transferencia de calor, solidificación y patrón de oscilación) resulta computacionalmente costosa. La estrategia de construcción incremental permite incorporar progresivamente cada fenómeno a partir de modelos más simples y ya validados, hasta disponer de las variables necesarias (perfil de temperaturas, espesor de cáscara, condiciones de contorno térmicas y mecánicas) para calcular las tensiones y estimar cuantitativamente el riesgo de fisuración (Li et al., 2019).

Desarrollo

El desarrollo de los modelos numéricos se realizó de manera secuencial: cada nueva versión incorporó un fenómeno físico adicional respecto de la anterior, manteniendo (de acuerdo a las posibilidades) la validación lograda en las etapas previas. Cada incorporación fue seleccionada de acuerdo a la relevancia directa como mecanismo generador de fisuras: la distribución de flujo y temperatura (Modelos I y II), la interacción con el polvo colador que regula la lubricación y la fricción cáscara-molde (Modelo III), la oscilación mecánica que define la profundidad de las marcas de oscilación (Modelo IV), la extracción de calor en las paredes que determina la uniformidad del enfriamiento (Modelo V) y el crecimiento de la cáscara junto con la conicidad del molde (Modelo VI). La Tabla 1, resume las principales características de cada modelo y el vínculo con el estudio de fisuración. En paralelo, las propiedades termofísicas del acero SAE 1010 y del polvo colador se caracterizaron mediante modelos experimentales y bases de datos termodinámicas (FactSage) (Bale, 2016), lo que permitió disponer de valores representativos para las simulaciones bifásicas y de solidificación.

En la simulación del sistema de acero-polvo colador, se utiliza el modelo *Volume of Fluid* (VOF) basado en resultados informados en (Cwudziński, 2016). Se utiliza una condición fuerte del tratamiento de interfaz, lo cual se refiere a una técnica utilizada para resolver problemas que involucren la interacción de dos o más fases o fluidos en una simulación. El tratamiento fuerte implica que se aplican ecuaciones de conservación y modelos físicos separados a cada fase o fluido en la simulación, teniendo en cuenta las propiedades y comportamientos específicos de cada una.

Para la turbulencia se utilizó el modelo K- Ω SST, se resuelven dos ecuaciones de transporte de turbulencia: a) la ecuación de energía cinética turbulenta (K) y b) la ecuación de disipación específica de la turbulencia (Ω).

Modelo	Características principales y vínculo con la fisuración
Modelo I	Modelo 2D, validado con datos de planta. Base para estimar el flujo dentro del molde.
Modelo II	Extensión a 3D aprovechando las simetrías geométricas del molde. Permite identificar asimetrías de flujo (mono-roll/doble-roll) vinculadas a fisuras longitudinales y de esquina.
Modelo III	Incorporación del modelo bifásico acero-polvo colador (VOF). La lubricación y fricción cáscara-molde son un mecanismo directo de fisuración longitudinal.
Modelo IV	Oscilación de las paredes del molde. Vincula el patrón de oscilación con la profundidad de las marcas de oscilación, origen de fisuras transversales.
Modelo V	Modelo de energía con extracción de calor promediada en las paredes. Aporta el flujo de calor, clave para estimar gradientes térmicos.
Modelo VI	Modelo 3D con conicidad del molde, malla mejorada y solidificación acoplada. Entrega el espesor de cáscara y el campo térmico, insumo para el cálculo de tensiones.

Tabla 1: Evolución de los modelos numéricos del molde y su vínculo con el estudio de fisuración.

El dominio del modelo y sus límites se muestran en la Fig. 1 (modelo I) y Fig.2 (modelo VI). Se elige una sección vertical bidimensional paralela a la cara ancha que pasa por el centro del molde de colada continua, la cual consta de la mitad de la boquilla de colada (buza). El acero se vierte desde una superficie de entrada al dominio del molde a través de la boquilla de colada (buza) cuya abertura está sumergida 0,1 m por debajo de la superficie libre o menisco.

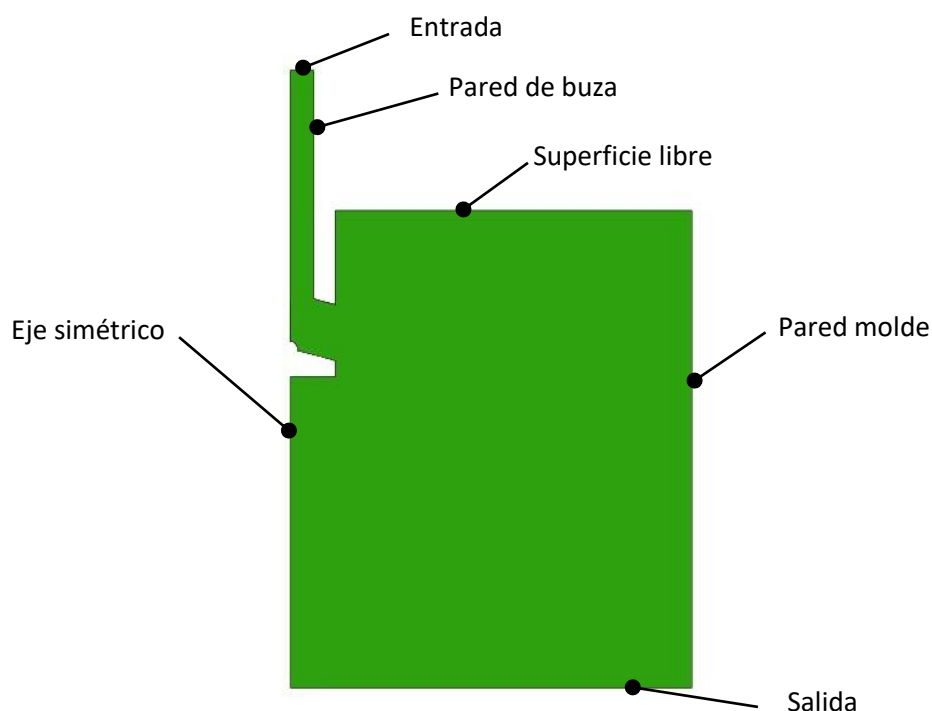


Figura 1: Dominio y condiciones de contorno Modelo I.

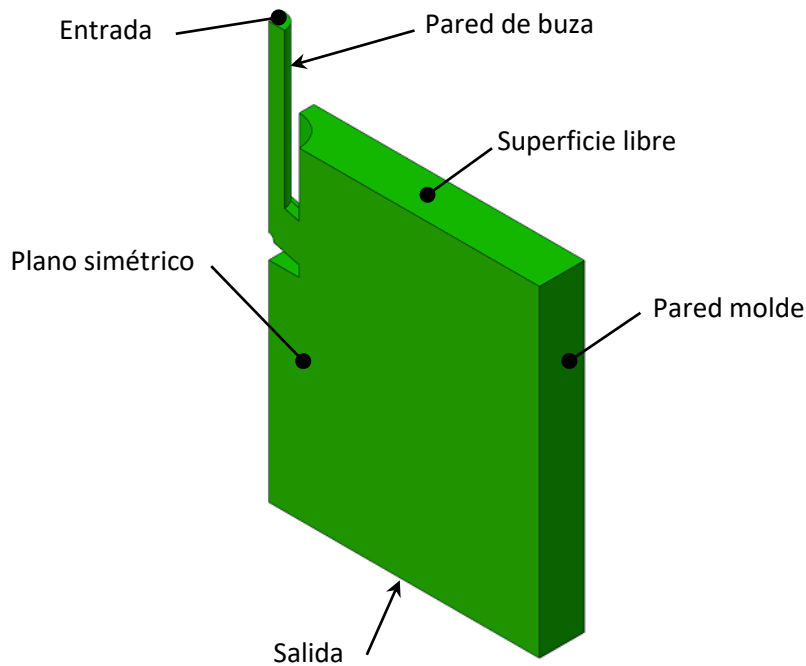


Figura 2: Dominio y condiciones de contorno Modelo VI.

Resultados

Se presentan los principales resultados numéricos obtenidos con los modelos desarrollados, analizados en función de la implicancia sobre el origen de fisuras en la cáscara solidificada.

- Patrones de flujo y temperatura – Vínculo con fisuras longitudinales y de esquina: La Fig. 3 muestra el campo de velocidades y la distribución de temperatura obtenida con el modelo 3D (Modelo VI) para el acero SAE 1010 dentro del molde. Se observa claramente el patrón de flujo generado por el chorro saliente de la boquilla sumergida, el chorro impacta sobre las caras estrechas del molde y se divide en dos ramas, una ascendente hacia el menisco y otra descendente. La distribución térmica asociada evidencia zonas de menor temperatura en las esquinas del molde, donde el enfriamiento combinado de dos paredes genera los gradientes más severos. Estos gradientes térmicos constituyen un factor determinante en la formación de fisuras longitudinales de esquina, ya que implican una mayor concentración de tensiones en esas regiones (Thomas, 2002).

- Perfil de solidificación y espesor de cáscara – vínculo con fisuras internas: La Fig. 4 presenta la iso-temperatura de solidus obtenida con el Modelo VI, que delimita el frente de solidificación dentro del dominio. Esta representación permite determinar directamente el espesor de cáscara solidificada a la salida del molde, dato crítico para evaluar la integridad estructural del planchón en el momento en que abandona el soporte del molde. Se observa que el espesor de cáscara no es uniforme a lo largo del perímetro del planchón: el mínimo espesor se localiza en las esquinas, zona de mayor riesgo de ruptura de cáscara e iniciación de fisuras internas por tensiones térmicas. La iso-superficie de solidus confirma además que la zona de acero líquido en el centro del planchón es significativa a la salida del molde, lo que subraya la importancia del enfriamiento secundario posterior y la necesidad de que la cáscara alcance el espesor mínimo suficiente para soportar la presión ferrostática sin fisurarse (Li et al., 2019).

Estos resultados constituyen el conjunto de variables físicas de entrada que alimentará al modelo estructural (Modelo VII, ANSYS Mechanical): el campo de temperaturas en la cáscara, el espesor por zona y las condiciones de contorno de presión ferrostática y fricción con el molde. Con estos datos será posible calcular el campo de tensiones y deformaciones en la cáscara solidificada e identificar cuantitativamente las condiciones de proceso que maximizan el riesgo de fisuración.

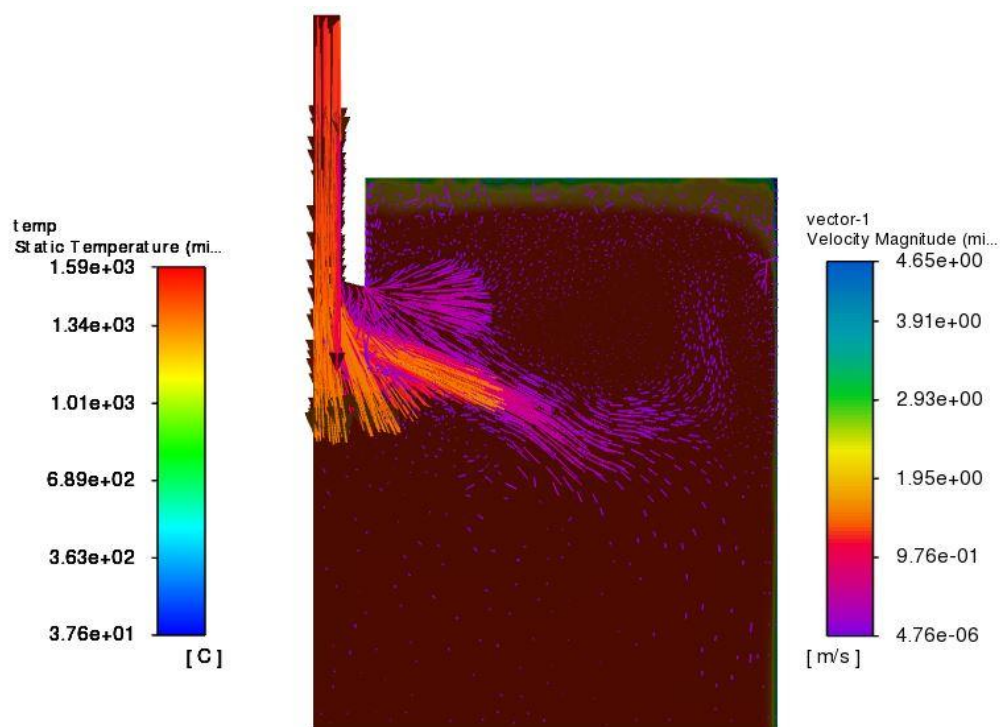


Figura 3: Campo de velocidades y distribución de temperatura.

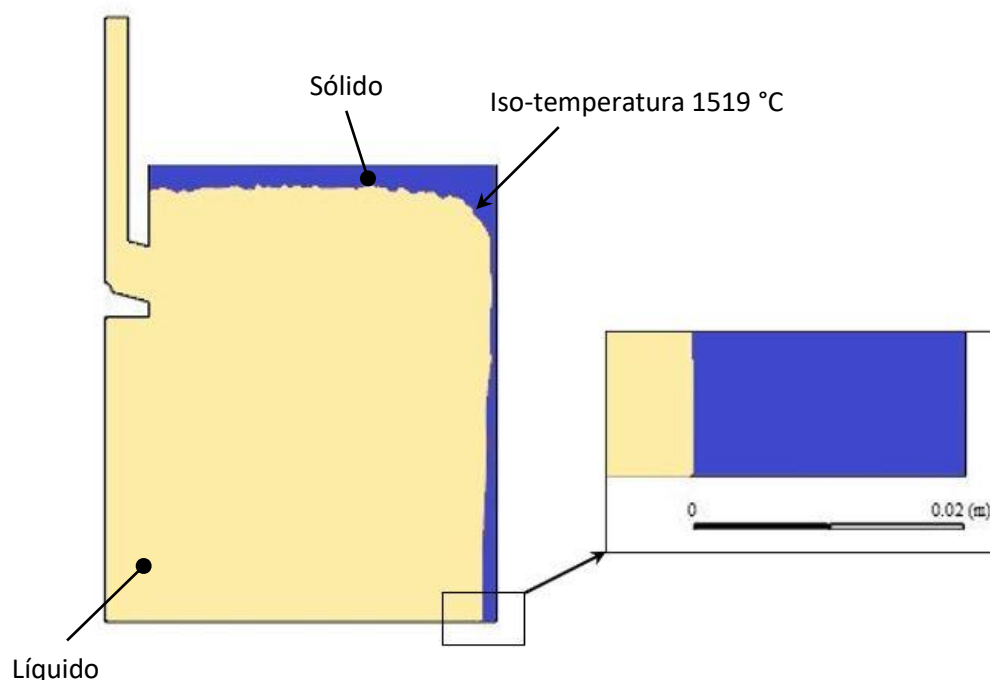


Figura 4: Iso-temperatura de solidus – espesor a la salida del molde.

Conclusiones

La estrategia de desarrollo incremental adoptada permitió abordar de manera controlada la complejidad del molde de colada continua, validando en cada etapa los fenómenos incorporados antes de avanzar hacia representaciones más completas. Cada modelo de la secuencia I-VI contribuyó variables físicas específicas y directamente vinculadas con el origen de las fisuras en el planchón, la distribución de flujo (Modelos I-II), la lubricación y fricción con el polvo colador (Modelo III), las marcas de oscilación como concentradores de tensión (Modelo IV), la distribución de temperatura (Modelo V), el espesor de cáscara y el campo térmico dentro del sólido (Modelo VI).

Los resultados del Modelo VI demuestran que los gradientes térmicos más severos se localizan en las esquinas del planchón, indicando la zona de mayor riesgo de fisuración. Estos hallazgos son consistentes con la bibliografía especializada (Thomas, 2002; Camisani-Calzolari et al., 2003) y proveen la base numérica para el paso siguiente.

Como trabajos futuros inmediatos se plantean: (a) incorporar propiedades físicas variables con la temperatura para representar con mayor fidelidad los gradientes térmicos en la cáscara; (b) ajustar la extracción de calor de manera independiente para cada pared del molde, superando la hipótesis de valor promedio; (c) desarrollar el Modelo VII, que acoplará el modelo fluidodinámico con ANSYS Mechanical para el cálculo directo de tensiones y deformaciones en la cáscara solidificada, habilitando la predicción cuantitativa del riesgo de fisuración en función de las condiciones de operación.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Claude para su uso en la redacción y estructuración del presente trabajo a partir de las notas y resultados del autor. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

- Thomas, B. G. (2002). Modeling of the continuous casting of steel — past, present, and future. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33(6), 795–812. <https://doi.org/10.1007/s11663-002-0063-9>
- Camisani-Calzolari, F. R., Craig, I. K., & Pistorius, P. C. (2003). A review on causes of surface defects in continuous casting. *IFAC Proceedings Volumes*, 36, 113–121. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37613-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37613-9)
- Thomas, B. G. (2018). Review on modeling and simulation of continuous casting. *Steel Research International*, 89, 1700312. <https://doi.org/10.1002/srin.201700312>
- Li, X., Li, B., Liu, Z., Niu, R., Liu, Y., & Zhao, C. (2019). Large eddy simulation of multi-phase flow and slag entrapment in a continuous casting mold. *Metals*, 9(1), 7. <https://doi.org/10.3390/met9010007>
- Bale, C. W., Bélisle, É., Chartrand, P., Decterov, S. A., Eriksson, G. E., Gheribi, A. E., Hack, K., Jung, I.-H., Kang, Y.-B., Melançon, J., Pelton, A. D., Petersen, S., Robelin, C., Sangster, J., Spencer, P. J., & Van Ende, M.-A. (2016). FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016. *Calphad*, 54, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.05.002>
- Cwudziński, A., Jowska, J., & Przegrzałek, P. (2016). Interaction of liquid steel with mould flux in continuous casting bloom mould — numerical simulations and industrial experiences. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61, 2013–2020. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0327>