



# ESTUDIO DE SOLIDIFICACIÓN CON FRONTERA LIBRE MEDIANTE FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL (CFD)



Catalano Juan Cruz- Trivisonno Nicolás - Pairetti César - Venier César  
Escuela de Ingeniería Mecánica - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR  
Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CIMEC (UNL - CONICET)

## Resumen

En los procesos de solidificación de un metal para fabricación de piezas de fundición, la temperatura y la velocidad de avance de la interfase son aspectos de vital importancia. El presente trabajo tiene como motivación principal el estudio de la evolución temporal de las variables involucradas en un proceso de solidificación, tales como la velocidad de avance de la interfase y el tiempo total insumido en el proceso. Se utilizan herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por medio del software OpenFOAM que tiene la capacidad de resolver este tipo de problemas obteniendo una buena definición de la interfase sólido-líquido gracias a que el solver utiliza el método de Volumen de Fluido (VOF), además permite representar varios fenómenos físicos tales como la convección natural del fluido, entre otros. Para implementarlo, se realiza una validación bidimensional basada en datos experimentales. A continuación se resuelve un problema similar al anterior con un abordaje 3D para luego extenderlo a geometrías más complejas con la intención de reproducir un escenario real de fundición industrial, como el de una colada en una lingotera. El estudio permitió ajustar los parámetros del modelo físico logrando una adecuada representación de un proceso de solidificación por medio de un código computacional robusto capaz de estudiar la evolución de los campos de interés en el interior de la pieza, que no son posibles hallar experimentalmente.

## Motivación

El conformado de piezas mediante la técnica de fundición es muy antigua, y hasta el día de hoy, se encuentra apoyada fuertemente sobre evidencia empírica. Desde el diseño del molde a la determinación de todas las variables de colada se asignan por experiencia propia del mismo fundidor. En el presente trabajo se busca dar soporte a este sector por medio de técnicas CFD, brindando una herramienta para simular la colada y así evaluar el efecto de cada variable de colada, con el objetivo de disminuir el porcentaje de piezas con fallas.

## Hipótesis

Dado que el problema en estudio tiene un carácter multifásico, tendremos hipótesis diferenciadas para cada fase.

Para la **fase fluida**:

- **Propiedades termodinámicas constantes**, tales como la conductividad térmica ( $\kappa$ ), el coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ) y el calor específico ( $c_p$ ).
- **Fluido Newtoniano**, esta hipótesis establece que la viscosidad permanece constante
- **Bajos números de Mach**, esto quiere decir que la densidad ( $\rho$ ) será independiente de los cambios de la presión y la velocidad.
- **Régimen laminar**, el número de Reynolds permanecerá bajo por lo tanto no se contemplarán turbulencias.
- **Aproximación de Boussinesq**, cuando hablamos de convección natural entendemos que esta sucede por una variación de la densidad en una zona del dominio, esta aproximación nos brinda dicha variación poniendo a la densidad como una función lineal de la temperatura, tal como lo indica la ecuación Ec. (1).

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (1)$$

Para la **fase sólida**:

- **Homogeneidad e isotropía**, se establece que esta fase posee las mismas propiedades en cualquiera de sus direcciones y que su composición química no varía.
- Ambas fases son consideradas **puras**, es decir se desprecia la presencia de impurezas.

## Marco teórico

Con el fin de poder validar más adelante el modelo se optó por el **galio**, debido a que es un material con bajo punto de fusión y esto permite realizar experimentos a temperatura ambiente por lo que nos encontramos con bibliografía suficiente [1].

Las ecuaciones principales con las que se **modeliza** el fenómeno físico dentro de la zona fluida son las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, Ec.(2), Ec.(3), Ec.(4). Con anexos de términos fuente para que estas contemplen ciertos fenómenos físicos, tales como la convección natural del fluido.[3]

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}\vec{u} = -\nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \frac{\rho}{\rho_0} \vec{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_p T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla (c_p T) = \nabla \cdot \left( \frac{\kappa}{\rho} \nabla T \right) + S_h \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{u}_l) = \dot{m}_{ls} \quad (5)$$

$$\alpha_s = 1 - \alpha_l \quad (6)$$

Durante el proceso de solidificación ocurre un intercambio de materia de la fase fluida a la fase sólida. En el solver esta transferencia de masa se representa por medio del **modelo de Lee** [4] [2]. Ec. (7)

Este mismo establece un balance de masa entre las 2 fases, donde los términos fuente determinarán la tasa de cambio de fase y por consiguiente la evolución  $\alpha_s$ .

Durante la solidificación,  $T < T_{fusión}$  y  $C < 0$ :

$$\dot{m}_{ls} = -C \rho_l \alpha_l \frac{(T_l - T_{fusión})}{T_{fusión}} \quad (7)$$

## Referencias

1. Gau, C., & Viskanta, R. (1986). Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall.
2. Lundkvist, J. (2019). CFD Simulation of Fluid Flow During Laser Metal Wire Deposition using OpenFOAM: 3D printing.
3. Lucas, D. P. Implementation in OpenFOAM of a Melting/Solidification Process with the Enthalpy Method.
4. Lee, W. H. (1980). Pressure iteration scheme for two-phase flow modeling. IN "MULTIPHASE TRANSPORT: FUNDAMENTALS, REACTOR SAFETY, APPLICATIONS", 407-432.
5. OpenFOAM ESI: <https://www.openfoam.com/>

## Validación

La metodología abordada para poder constatar los resultados obtenidos por el solver, fue comparar algunos datos de interés (principalmente el tiempo de solidificación y el avance de la interfase) contra datos experimentales.

Se ajustaron los parámetros del modelo para así obtener una simulación bidimensional (2D) representativa del experimento que se realizó. Como se puede observar en la figura 1 hay una buena predicción de parte del modelo sobre los datos experimentales. Si bien encontramos una discrepancia en la morfología de la interfase (figura 2), vemos que la posiciones de estas son similares. La diferencia de la morfología se debe a que el modelo concibe a la fase sólida como un medio continuo por ende no afecta a la simulación el crecimiento cristalino característico de los diferentes materiales. Además la condición de isotropía difiere de la realidad ya que por ejemplo la conductividad térmica ( $\kappa$ ) del galio varía para distintas direcciones.

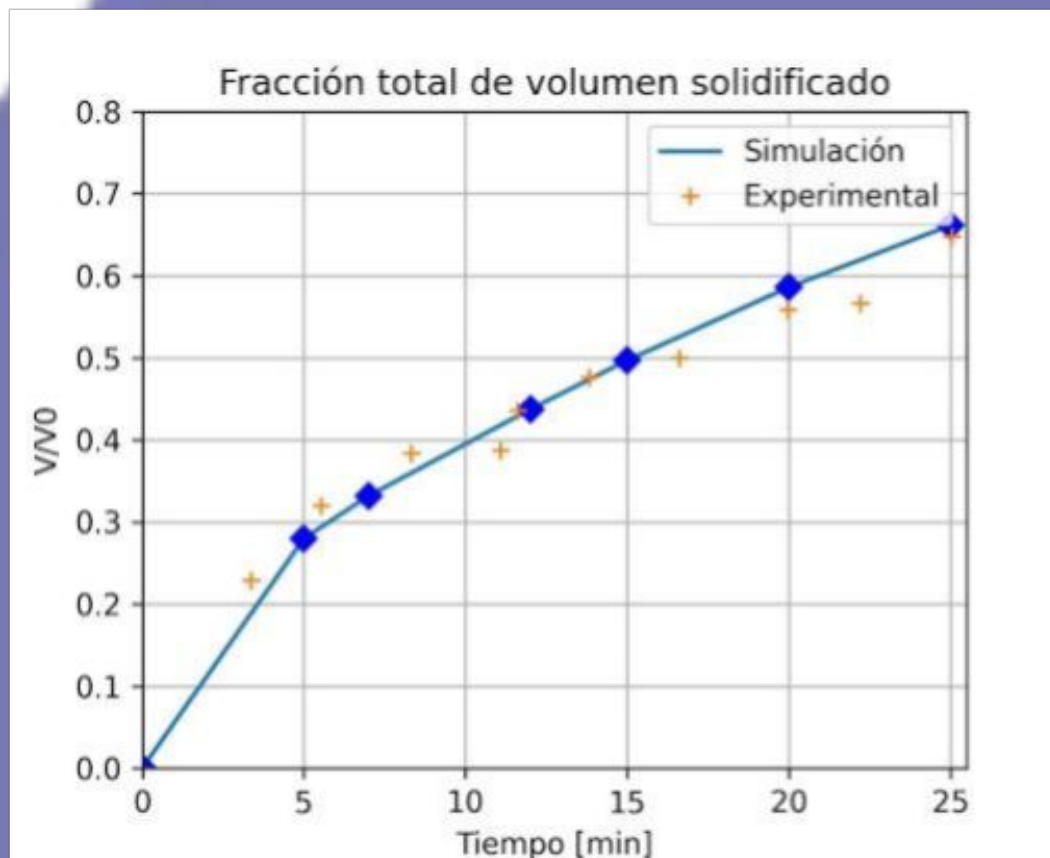


Figura 1: Comparación del crecimiento de la fracción de volumen solidificado en función del tiempo

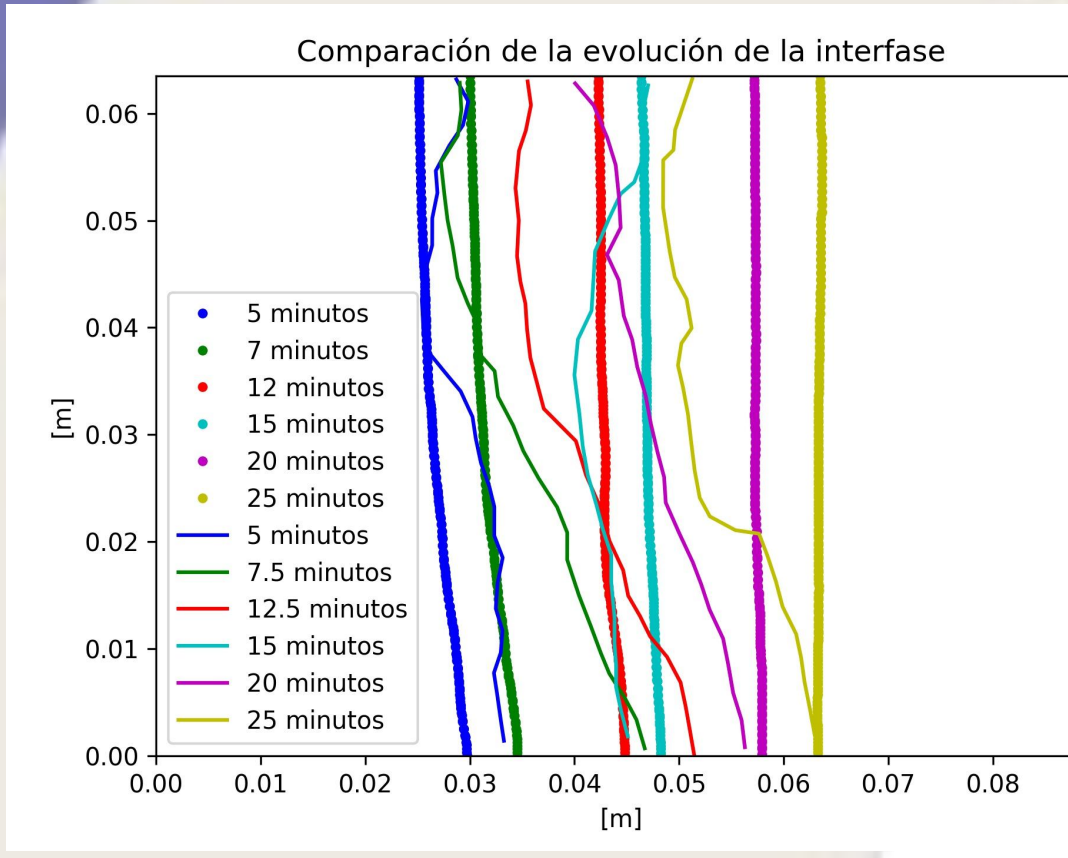


Figura 2: Evolución temporal de la interfase, en línea de punto se muestra la obtenida por la simulación, mientras que en línea continua la experimental

## Resultados y discusión

Para abordar un problema con carácter más real, con el solver ya calibrado, se realizó el análisis de una colada en una lingotera. Lo primero a destacar de la figura 3 es el avance sobre 2 direcciones del plano, esto se debe a que nos encontramos en una simulación tridimensional (3D), en donde se establecieron condiciones tipo **Dirichlet** para todas las caras excepto para la cara de entrada

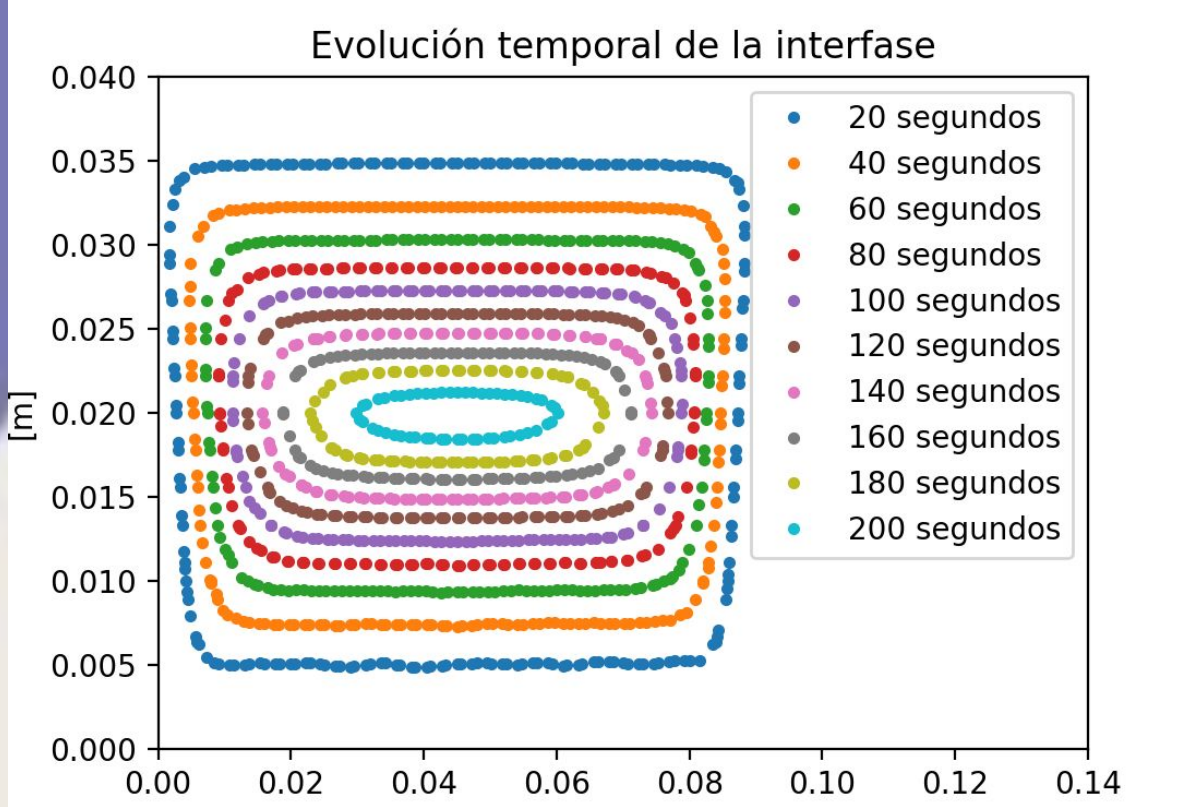


Figura 3: Evolución temporal de la interfase sobre un plano medio de la lingotera

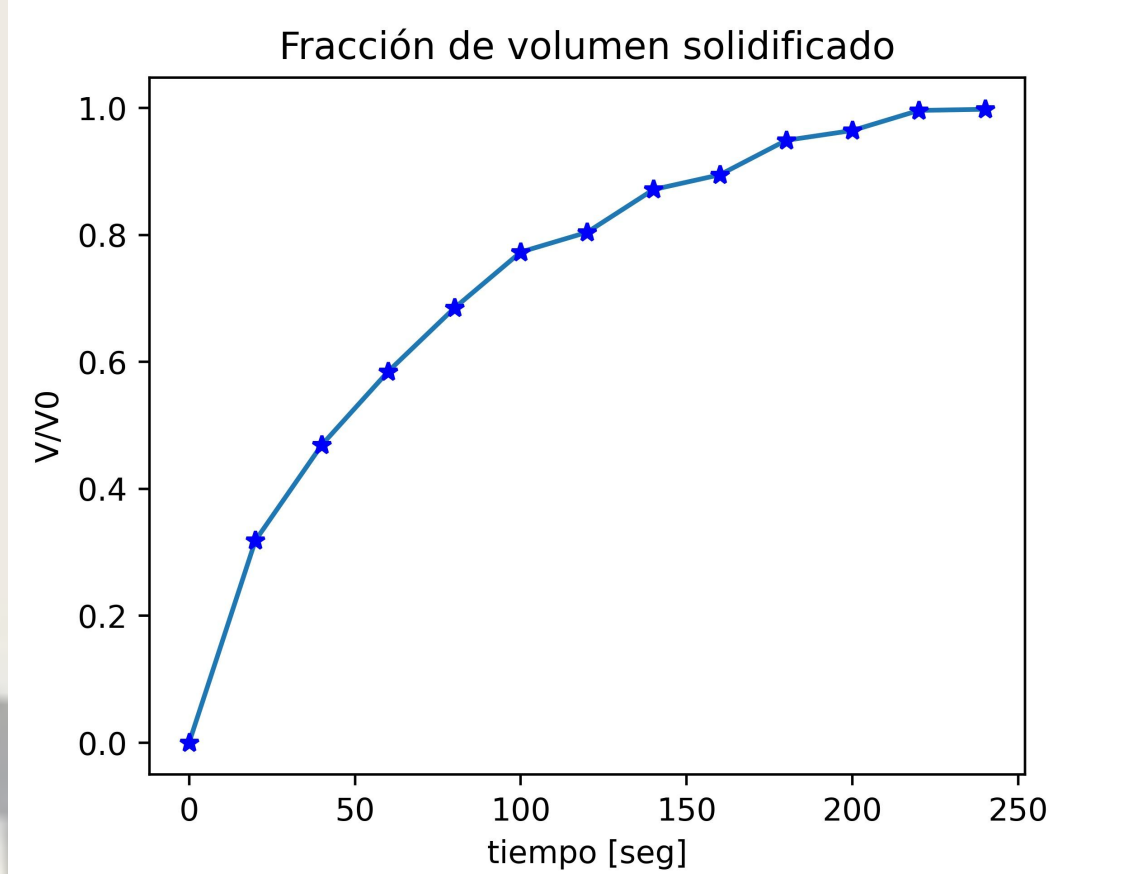


Figura 4: Evolución temporal del crecimiento de la fracción de volumen solidificado

En la figura 6 se buscó visualizar el fenómeno de la convección natural. podemos observar que el fluido que ingresa a mayor temperatura sube debido a que posee una menor densidad por la aproximación de Boussinesq pero a medida que se acerca más a la pared superior va disminuyendo su temperatura pero aumentando su densidad con lo cual tiende a caer, dando lugar así a la formación de los vórtices observados mediante las líneas de corriente.

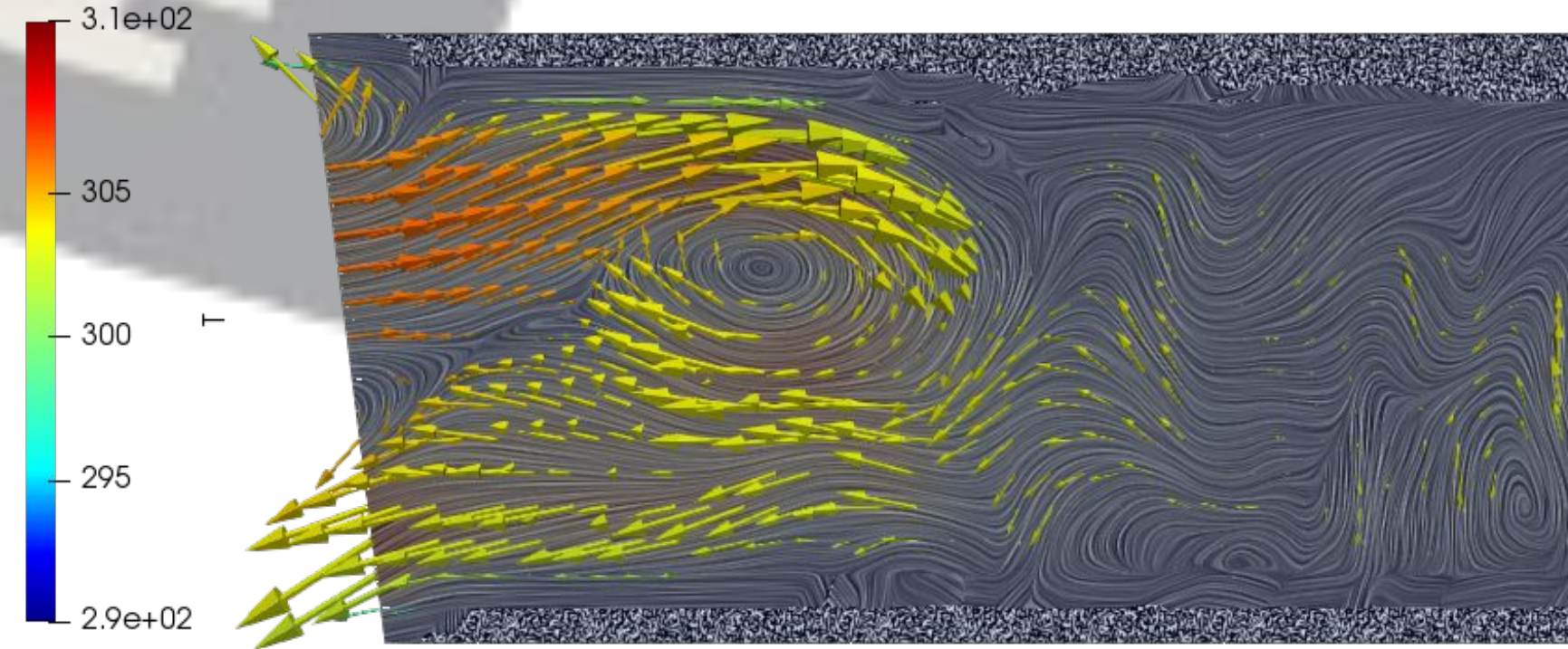


Figura 6: Líneas de corrientes, vectores de velocidad junto al campo de temperatura, en la zona cercana a la entrada y salida de fluido para un tiempo de 15 segundos

## Conclusión

Se empleó un modelo de CFD de código libre para la simulación de cambio de fase en un problema con convección natural. En primera instancia se validó el solver contrastando un caso bidimensional contra datos experimentales, obteniendo un buen acuerdo. La siguiente etapa consistió en definir un problema de interés tecnológico para demostrar la robustez y el alcance de las técnicas CFD al utilizarse en este campo de aplicaciones. Este poster muestra la primer etapa de un trabajo que está en progreso, ya que estas herramientas de código libre presentan cierta complejidad y conlleva un arduo trabajo para aprovechar el máximo potencial. A futuro se pretende ir modificando la simulaciones para representar un escenario de colada real. Algunos ejemplos de nuevos estudios que se podrían realizar son, análisis de llenado del molde, formación de rechupes, desplazamiento de las impurezas durante la solidificación, entre otros.