

## REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMO FLUIDODINÁMICO DEL ACERO LÍQUIDO EN UN MOLDE DE COLADA CONTINUA

REVIEW OF THE THERMOFLUID DYNAMIC BEHAVIOR OF THE LIQUID  
STEEL IN A CONTINUOUS CASTING MOLD

EDITH RAMOS CARDONA<sup>1</sup>

ISMAEL CALDERÓN RAMOS<sup>2</sup>

ROMUALDO SERVÍN  
CASTAÑEDA<sup>2</sup>

JORGE CARLOS RÍOS  
HURTADO<sup>3</sup>

### RESUMEN

Actualmente la producción de acero a nivel mundial se realiza mediante el proceso de colada continua, y es el molde el elemento más importante dentro de este proceso debido a que en su interior se llevan a cabo fenómenos de transporte de energía, masa y la solidificación del acero; dichos fenómenos impactan en productividad y en la calidad del producto final. La metodología de esta investigación consistió en revisar el estado del arte de los fenómenos más importantes que interactúan en el proceso: modelado de flujo fluido, obstrucción de la boquilla sumergida (SEN), flujo de fluidos dentro del SEN, turbulencia dentro del molde y perturbaciones en la superficie libre que afecta la interfaz acero/escoria y originan el atrapamiento de ésta. Este fenómeno influye directamente en los defectos superficiales e internos del producto final. Como resultado de esta revisión se encontró que el flujo del acero líquido dentro del molde puede controlarse a través de parámetros de diseño de la SEN y condiciones de operación del proceso. Este hecho es de gran importancia ya que, logrando un buen diseño es posible alimentar el acero líquido en el molde de forma adecuada, para conseguir un correcto inicio de capa solidificada y, posteriormente, su crecimiento con un espesor suficientemente grande (10-15 mm) para soportar las fuerzas ferrostática del acero líquido remanente en el centro cuando la tira sale del molde. Para observar y entender los fenómenos que suceden dentro del molde, todas las investigaciones existentes utilizan las variables del proceso, experimentación física y simulación numérica.

1 Centro de Estudios e  
Investigaciones  
Interdisciplinarias Unidad  
Sureste, Uadec

2 Facultad de Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica, Unidad  
Norte, UAdeC

3 Facultad de Metalurgia,  
Unidad Norte, UAdeC.

Correspondencia  
ramosedith@uadec.edu.mx  
<https://orcid.org/0009-0003-4310-5144>

**Palabras clave:** molde colada continua, SEN, modelación física y simulación matemática.

Fecha de recepción  
15 de noviembre de 2024.

Fecha de aceptación  
29 de abril de 2025.

## ABSTRACT

*Currently, steel production worldwide is carried out through the continuous casting process; and the mold is the most important element within this process, because inside it phenomena of energy transport, mass and solidification of the steel are carried out; and these phenomena impact productivity and the quality of the final product. The methodology of this research consisted of reviewing the state of the art of the most important phenomena that interact in the process such as: fluid flow modeling, Submerged Nozzle Obstruction (SEN), fluid Flow within the SEN, Turbulence within the mold and disturbances in the free surface that affect the steel/slag interface and cause slag entrapment. The latter phenomenon directly influences the surface and internal defects of the final product. As a result of this review, it was found that the flow of liquid steel within the mold can be controlled through SEN design parameters and process operating conditions. This fact gives great importance to the SEN; since, achieving a good design, it is possible to feed the liquid steel into the mold properly, to achieve a correct start of solidified layer and subsequently its growth with a thickness large enough (10-15 mm) to withstand the ferrostatic forces of the liquid steel remaining in the center when the strip leaves the mold. To observe and understand the phenomena that occur within the mold, all existing research uses process variables, physical experimentation and numerical simulation.*

**Keywords:** continuous casting mold, SEN, physical modeling and mathematical simulation.

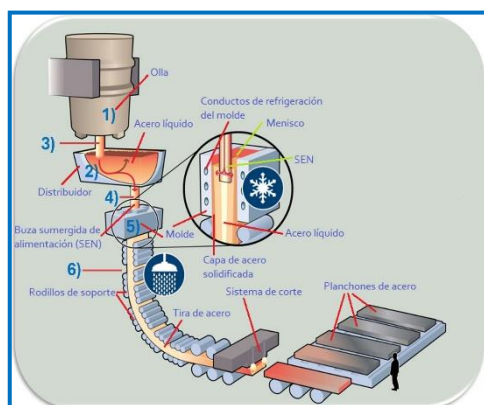


CienciAcierta

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso final dentro del departamento de acería en la industria siderúrgica es la colada continua. Dicho proceso consta de seis elementos principales: la olla con capacidad de entre 80 y 120 toneladas (1), con acero líquido a temperatura por encima de los 1340° C y con la composición química del acero ajustada; se coloca encima del distribuidor(2); posteriormente personal operativo coloca un conducto refractario llamado *ladle shroud* (3); el cual, sirve para alimentar el acero líquido de la olla hacia el distribuidor, que tiene solo una salida a la cual se le acopla un dispositivo refractario llamado SEN, por sus siglas en inglés *Submerged Entry Nozzle* (4). Dicho dispositivo sirve para alimentar de acero líquido al molde de planchón (5). Este molde es de una aleación especial de cobre (para mayor conductividad térmica) y en él se inicia la primera capa solidificada y su posterior crecimiento hasta su salida hacia el (6) enfriamiento secundario. Es decir, a la salida del molde la tira es recibida por una serie de rodillos que rocían agua para aumentar la extracción de calor y acelerar el crecimiento de la piel solidificada hasta su totalidad. Después del enfriamiento secundario pasa al siguiente proceso llamado laminación.

La Figura 1, ilustra cada una de las partes principales que componen el proceso de colada continua.



**Figura 1.** Principales partes del proceso de colada continua (Calderón, 2015).

El proceso de colada continua (PCC) es un método que permite transformar el acero líquido a sólido de manera continua y eficiente y su objetivo principal es extraer el calor del acero líquido en un tiempo corto (González Rendón & Rangel Hernández, 2021). Uno de los elementos más importante dentro del PCC es el molde, ya que aquí es donde se lleva a cabo la solidificación del



acero y los fenómenos que influyen en su proceso tienen gran impacto en la productividad y la calidad del producto final. Muchos de los fenómenos que se presentan suelen ser atribuidos al deficiente control del flujo de acero líquido en el molde (Romo Castañeda, 2011).

El PCC implica una complejidad metalúrgica, la cual conlleva a grandes desafíos para entender, evaluar y optimizar. Todavía quedan muchos retos por superar en este campo de investigación (Javurek y col., 2022). Por lo tanto, este trabajo se enfoca en la revisión de las investigaciones que tratan del comportamiento del flujo de acero líquido en el molde. Ya que este afecta negativamente la transferencia de calor homogénea y por consecuencia a la correcta formación microestructural y la calidad interna y superficial del producto final.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con la finalidad de conocer los avances actuales sobre esta línea de investigación. Este escrito recopila las principales aportaciones realizadas hasta la fecha, y para facilitar la lectura se analizó discutió por subtemas que abordan los fenómenos principales por separado desde distintos puntos de interés.

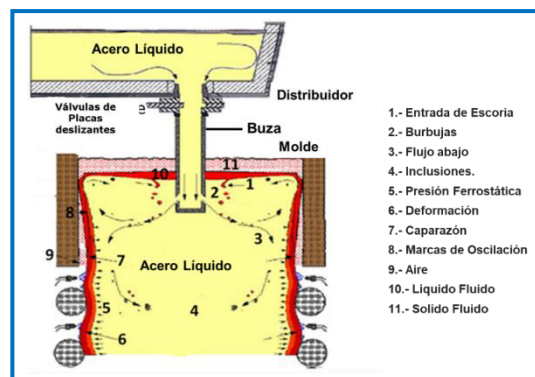
## 3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

### 3.1 MODELADO DE FLUJO DE FLUIDOS

Las investigaciones que se realizan del flujo de acero líquido en el molde están muy relacionadas con boquillas SEN. Su diseño permite la entrada del acero líquido de manera controlada en el molde, ayudando a prevenir problemas como la oxidación del acero líquido y la turbulencia generada al interior del molde por los puertos de descarga, (Figura 2).



Estas reducen la agitación y mejora la calidad del producto final. Se han llevado a cabo utilizando modelos tridimensionales con CFD (modelo de dinámica de fluidos computacionales) (González-Solórzano y col., 2020; Yuan y col., 2005).



**Figura 2.** Fenómenos de flujo de fluido en la región del molde de una fundición de losa de acero. Reproducido con permiso (Romo Castañeda, 2011), TMS.

El carácter especial indica la significancia estadística. \*Chi-cuadrada de Pear-son valor, 3.935, valor significativo,  $p < 0.05$ , \*\*Prueba Exacta de Fisher 1.163, valor no significativo,  $p > 0.05$ , \*\*\*Chi-cuadrada de Pearson valor, 15.400, valor significativo,  $p < 0.05$

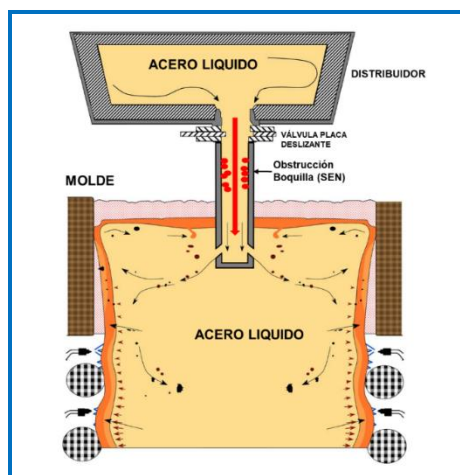
Con ayuda de los modelos de turbulencia  $k-\epsilon$  y modelo de simulación de grandes remolinos (LES) se recrean los efectos antes mencionados con una gran resolución y buena concordancia comparando las mediciones en planta. Cuando el proceso incluye la inyección de gas argón para prevenir el taponamiento de la SEN introduce complejidades adicionales y, para hacer frente a este reto, el modelo numérico se vuelve más robusto por la necesidad de utilizar modelos multifásicos, como VOF (método de volumen de fluido) y euleriano-euleriano para simular la interacción entre las diferentes fases.

### 3.2. OBSTRUCCIÓN DE BOQUILLA (PCC)

El fenómeno de obstrucción del SEN en el flujo de acero líquido durante la colada continua se refiere a la acumulación de material que interfiere con el flujo normal del acero líquido a través de la SEN (Figura 3). Esta obstrucción puede tener consecuencias significativas para la calidad del acero producido y para la eficiencia en el proceso (Chatterjee, 2013). Debido a que se modifica la geometría interna de la SEN, el flujo de acero líquido dentro del molde es afectado y es impredecible el



comportamiento que este desbalance provoca. Sin lugar a duda el aumento del nivel de turbulencia, la incorrecta transferencia de calor, las perturbaciones en la superficie libre y el crecimiento de la piel solidificada son afectadas de manera negativa (Chatterjee, 2013). Algunos diseños de SEN con geometría interna compleja y tienden a ser más susceptibles al taponamiento (Thomas 2001).



**Figura 3.** Obstrucción en Boquilla SEN en molde de acero líquido de colada continua.

La obstrucción de las boquillas ha sido investigada utilizando modelos numéricos para simular el fenómeno de incrustación de la inclusión. Una de las investigaciones (González-Solórzano y col., 2020; Gutiérrez y col., 2018; Mizobe y col., 2018) consistió en analizar el fenómeno de obstrucción en la SEN, donde diseñaron un perfil óptimo de los orificios de la boquilla superior de la artesa (TD) como para la boquilla de entrada sumergida (SEN) para disminuir la turbulencia con alta energía cinética que se genera en el flujo acero líquido.

Para lograr esto se realizó un análisis de flujo utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) así como modelos de agua, donde se revisa la influencia de la energía que genera la turbulencia en la SEN, provocando las inclusiones, también se comparó la relación entre la energía cinética turbulenta calculada y rendimiento considerando la velocidad del flujo (Mizobe y col., 2018). También existen estudios del comportamiento en el flujo del acero líquido como la velocidad y la presión combinado con un método modelado de partículas (DPM) que trata las partículas como entidades discretas que se mueven a través de un fluido, calculando sus trayectorias y fuerzas que actúan sobre ellas. La obstrucción también puede ser causada con inclusiones de alúminia donde se concluye que, al llegar a la pared de la SEN, se depositan de manera no uniforme, con tamaños mayores suelen presentar baja deposición de inclusiones a



diferencia de los menores donde no mostro cambio significativo (Gutiérrez y col., 2020). Para el estudio de flujo las cámaras o deflectores reducen la obstrucción en las paredes internas de SEN, redirigiendo el flujo de acero líquido promoviendo un movimiento más uniforme, favoreciendo la uniformidad de la velocidad del flujo y la energía cinética turbulenta, y promoviendo un flujo más estable en los puertos de descarga de la SEN (Xuan y Chen, 2021). La reoxidación también puede causar obstrucción por inclusiones ya que, durante el proceso de colada continua, el acero líquido puede entrar en contacto con el oxígeno del aire, lo que puede llevar a la formación de óxidos y otras inclusiones no metálicas se acumulan en las paredes internas del SEN, provocando obstrucciones que alteran el flujo del acero (Meléndez y col., 2010). han realizado otros estudios donde el modelado de la distribución de presión dentro del SEN es crucial para entender el comportamiento del flujo de acero líquido durante el proceso de colada continua ya que la presión dentro se ve influenciada por factores, en los que se incluye la velocidad del flujo, la geometría de la SEN y las propiedades del acero líquido e identificando puntos críticos donde puede haber riesgos de obstrucción o inclusiones. En estos estudios se utiliza CFD para predecir estas distribuciones de presión. Donde se encontró que la presión se puede bajar disminuyendo la profundidad de la TD, así como los diámetros del orificio interior de la SEN, o aumentando el caudal del gas argón, lo que hace que el control de flujo de acero líquido se abra más, lo que disminuye la caída de presión local (González Rendón & Rangel Hernández, 2021; Meléndez et al., 2010)

### 3.3 FLUJO DE FLUIDOS DENTRO DE LA SEN

La turbulencia es un fenómeno crítico dentro del molde ya que puede llevar al arrastre de escoria e inclusiones no metálicas lo que afecta a las propiedades mecánicas del acero líquido (Calderón-Ramos y col., 2019; Gutiérrez y col., 2020). Este patrón de flujo es muy influenciado por la geometría de la SEN y los puertos del SEN, ya el tamaño del puerto debe ser cuidadosamente considerado ya que por los puertos grandes pueden compensar los efectos de obstrucción por alúmina, también



pueden generar flujos de recirculación y turbulencia. La profundidad de inmersión de la SEN generalmente reduce la turbulencia en el menisco, sin embargo, la profundidad óptima puede variar dependiendo del diseño de la SEN y otros parámetros del proceso (Cho y col., 2019). El control de flujo de argón ya que se inyecta en el SEN previene obstrucciones y controla el flujo de acero líquido al molde, optimizando el caudal del argón y su posición mejora la estabilidad del flujo (Calderón-Ramos y col., 2019; Cho y col., 2019)

Los estudios que se han realizado sobre el flujo de fluido en la boquilla y el molde de acero de colada continua se han llevado a cabo CFD y han sido objeto de revisiones anteriores (Calderón-Ramos y col., 2019; Calderón-Ramos y Morales, 2015; Garoosi y Hooman, 2022; González-Solórzano y col., 2020). Las variables que produce el flujo de acero líquido dentro de la boquilla SEN, se han calculado resolviendo ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes para lograr un equilibrio de masa. La turbulencia, se modela resolviendo ecuaciones diferenciales de energía cinética, tasa de disipación de turbulencia y diagramas de flujo promediando el tiempo (Calderón-Ramos y col., 2019; Calderón-Ramos y Morales, 2015). Otros estudios que se han realizado respecto a la turbulencia son técnicas como la velocimetría por imagen de partículas (PIV) para caracterizar la turbulencia en el flujo. Esto permitió identificar los picos de velocidad y la intensidad de la turbulencia, proporcionando datos cuantitativos que pueden guiar el diseño de la SEN (Calderón-Ramos y col., 2019; Mizobe y col., 2018)

### 3.4 TURBULENCIA EN SUPERFICIE LIBRE

La turbulencia dentro del molde de colada continua es un fenómeno que influye en la calidad y en la eficiencia del proceso del acero. Esta es generada por varios factores como; la entrada del acero líquido a alta velocidad, el diseño de la boquilla SEN y la geometría del molde. Estas condiciones pueden provocar fluctuaciones en la velocidad y la presión del flujo afectando directamente a la operación (Calderón-Ramos y Morales, 2015). La turbulencia en exceso puede llevar a la introducción de inclusiones de escoria u oxígeno en el acero, lo que puede afectar negativamente sus propiedades mecánicas, de igual manera los flujos



turbulentos pueden causar erosión en las paredes del molde, reduciendo su vida útil y aumentando los costos de mantenimiento (Javurek y col., 2022). Algunas investigaciones se han enfocado en el diseño de la SEN y se ha comprobado que han ayudado a bajar la turbulencia, mediante la realización de estudios de análisis matemáticos, pruebas físicas para comparar el diseño original de la SEN con un diseño mejorados (Calderón-Ramos y col., 2019; Calderón-Ramos y Morales, 2015), se emplean modelos de agua a escala real, técnicas de velocímetro por imágenes de partículas (PIV), inyecciones de trazadores y sensores ultrasónicos para estudiar los patrones de flujo del acero líquido (Calderón-Ramos y col., 2019; Cho y col., 2019). Las pruebas muestran un patrón de flujo de acero líquido y simétrico, mejorando el control del acero líquido en el molde y reduciendo las oscilaciones y la formación de vórtices. Los vórtices es otro factor que genera turbulencia ya al formar remolinos por el movimiento, pueden influir en la estabilidad del nivel de flujo en la superficie del molde. La geometría de la SEN y la configuración de las entradas del molde generan vórtices, ya que arrastran inclusiones no metálicas o burbujas de gas hacia el centro o la superficie del acero líquido, lo que lleva a la formación de defectos internos o superficiales, así como fluctuaciones en el nivel del baño de acero líquido (Javurek y col., 2022; Morales y col., 2013; Real-Ramírez y col., 2021).

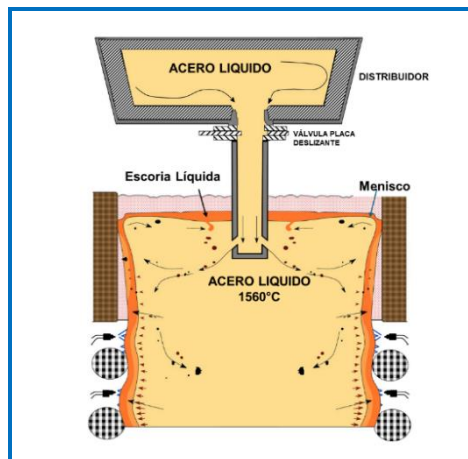
### 3.5 INTERFAZ ACERO/ESCORIA

Un aspecto crítico en el flujo de acero líquido en el molde es el perfil de la interfaz entre el acero líquido y las capas de escoria en la superficie superior del molde. Esta interfaz es clave para el proceso de enfriamiento y la eliminación de impurezas no metálicas. La escoria forma una capa en la superficie del acero líquido que actúa como un aislante térmico, protegiendo el acero del enfriamiento rápido y de la oxidación del baño metálico. Ésta se infiltra en el espacio que existe entre las paredes del molde y el baño metálico (Figura 4) cumpliendo la función de lubricante y en conjunto con la oscilación del molde evitar atascos y mejora el acabado superficial del semi producto. Además, la capa de escoria ayuda al atrapamiento de las inclusiones no metálicas



que provienen del distribuidor para evitar que se puedan incorporar al acero solidificado (Hibbeler y Thomas, 2013).

El atrapamiento de escoria ocurre por un efecto de desprendimiento, que se genera en la esquina superior del molde a lo cual llamamos menisco, debido a que la velocidad del flujo de acero que proviene de la cara estrecha del molde es mucho mayor que la que tiene la escoria, como se puede ver en la (Figura 4).



**Figura 4.** Acero líquido y las capas de escoria en la superficie superior del molde (Yang et al., 2019)

La forma del perfil de la interfaz entre la escoria y el acero, las fluctuaciones de nivel y el arrastre de escoria se pueden modelar con métodos de superficie libre, como la cuadrícula móvil, VOF u otros métodos de seguimiento de la interfaz (Li y col., 2021). La composición de la escoria y las reacciones en la interfaz influyen en la limpieza del acero líquido, la formación de defectos superficiales y las propiedades del producto final (Hibbeler y Thomas, 2013; Yang y col., 2019).

### 3.6 ATRAPAMIENTO DE ESCORIA

Las vibraciones mecánicas del molde generan ondas en la superficie del acero líquido, afectando el menisco (primera capa de solidificación) (González Rondón y Rangel Hernandez, 2021). Esto provoca que la solidificación no sea uniforme y se formen ganchos que actúan como trampas para la escoria, quedando atrapadas entre el gancho y la pared del molde. Esta escoria atrapada de inclusiones no metálicas debilita el material provocando grietas y; genera defectos superficiales (González Rendón & Rangel Hernández, 2021). El atrapamiento de escoria es una de las principales fuentes de inclusiones en el producto final y esto perjudica la limpieza del acero líquido en el molde de colada continua. Los mecanismos que



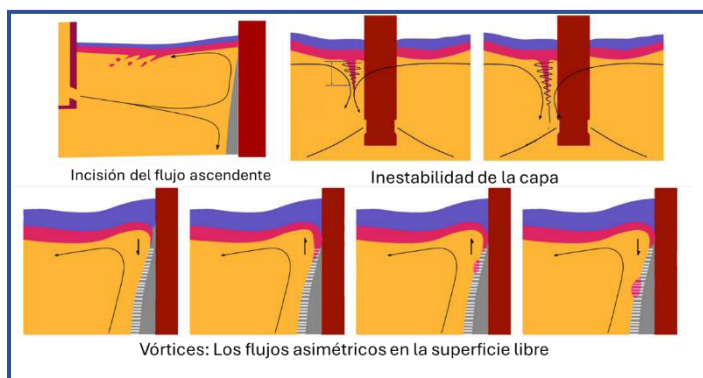
los provocan son: fluctuaciones en el nivel de la superficie en el molde, enfriamiento del menisco, vórtices e inestabilidad de la interfaz (Hibbeler Lance C. & Thomas Brian G, 2013).

Los mecanismos de atrapamiento de escoria reportados son: inestabilidad de la capa, vórtices e incisión de flujo ascendente. Los cuales tienen las siguientes particularidades:

**Inestabilidad de la capa:** el atrapamiento de escoria dentro del flujo líquido de acero es provocada por la inestabilidad de la interfase metal/escoria debido a los movimientos que se generan entre el baño metálico y la escoria fundida. Estas están ubicadas en las depresiones de la superficie libre, donde la velocidad alcanzada genera magnitudes a medio camino entre la pared angosta del molde y la pared (Morales y col., 2013).

**Vórtices:** los flujos asimétricos en la superficie libre, causan un choque entre dichos flujos generando así los flujos remolino (vortex), estos atrapan la escoria y la arrastran al interior del líquido metálico, generando inclusiones no metálicas dentro del producto final (Morales y col., 2013).

**Incisión del flujo ascendente:** Dentro del flujo se generan corrientes ascendentes a lo largo de las paredes angostas del molde y estas dan como resultado la generación de un patrón de flujo de doble recirculación (DRF) de alta velocidad. Este fenómeno tiene el comportamiento de atrapar escoria por efecto de corte y arrastre. La Figura 5, muestra un esquema de los tres mecanismos.



**Figura 5.**  
Principales  
mecanismos de  
atrapamiento de  
escoria.  
Reproducido con  
permiso  
(Calderón, 2015).

Se han estudiado los atrapamientos de escoria con métodos avanzados como modelos computacionales para simular el flujo de acero líquido y escoria en el molde, pudiendo observar la formación y el movimiento de la escoria (Thomas y Liu, 2023). También se examinan las inclusiones de escoria en el acero solidificado mediante técnicas de microscopía y análisis químico para determinar su origen y características. Se emplean técnicas como la radiografía y la tomografía computarizada para observar el flujo de acero líquido y escoria en el molde durante la colada continua en tiempo real. Así como simulaciones matemáticas utilizando ecuaciones que describen el comportamiento del acero líquido y la escoria en el molde, incluyendo factores como la tensión superficial, la viscosidad y la densidad (Calderón-Ramos et al., 2019; Yang et al., 2019; Yuan et al., 2005).

### 3.7 PRINCIPALES DEFECTOS EN COLADA CONTINUA

Un defecto en el PCC se refiere a cualquier irregularidad o imperfección que surge durante la solidificación y el enfriamiento del acero líquido, lo que resulta en una desviación de las propiedades o dimensiones deseadas del producto final (Brimacombe y Sorimachi, 1997). Existen muchas reseñas que hablan del origen de los defectos y estrategias que utilizan y pueden impactar en la reducción de estos. Los principales defectos que se pueden encontrar en el proceso de colada continua son: grietas transversales, afectan la calidad superficial, así como la rotura del material, las causas principales son el roce entre la piel solidificada del acero y la pared del molde, ya que se genera resistencia del acero líquido a altas temperaturas y provoca la formación de grietas, así como la oscilación del molde y el enfriamiento no uniforme donde se pueden generar tensiones térmicas que propicien la aparición de grietas (Brimacombe y Sorimachi, 1997; Clyne y col., 1982). También las inclusiones no metálicas en el acero líquido actúan como puntos de concentración de tensiones, favoreciendo la nucleación de grietas. Diferentes estudios han concluido que un buen sistema de lubricación en el molde reduce la fricción y las tensiones asociadas. Esto se puede lograr mediante el uso de polvos fundentes de alta calidad y un control adecuado en su aplicación. Así como ajustar la frecuencia, amplitud de



la oscilación del molde y control en el enfriamiento de para reducir las tensiones térmicas y flujo de agua (Brimacombe y Sorimachi, 1997; Meng y Thomas, 2003). Dentro de los defectos que se presentan podemos mencionar grietas longitudinales, generadas por condiciones en el molde, como altas temperaturas que provoca tensiones térmicas, tensiones generadas durante el enderezamiento y la extracción, enfriamiento no uniforme, la composición química del acero por ciertos elementos de aleación, así como inclusiones no metálicas con puntos de concentración de tensiones (Meng y Thomas, 2003). Algunas investigaciones han concluido, que el diseño y ajuste en el molde garantiza el enfriamiento uniforme, reduce el enfriamiento en las zonas de rociado superiores, controla la oscilación del molde, así como la composición química del acero y minimización de inclusiones.

Los defectos de porosidad se refieren a la presencia de vacío o burbujas de gas argón atrapados en el metal solidificado, causados por absorción de gases del ambiente, reacciones químicas y turbulencias en el flujo del acero líquido (Clyne y col., 1982; Meng y Thomas, 2003). Otro defecto es el de segregación, se produce cuando existe una distribución no uniforme de los elementos químicos en el material solidificado; existen dos tipos segregación: macro y micro, causados por la alimentación de la contracción por solidificación, los gradientes térmicos y solubles en el líquido, la fuerza impulsada por la flotabilidad, la velocidad de colada y el movimiento de granos equiaxiales debido a la nucleación heterogénea, entre otras. Para la prevención de estos defectos se han llevado a cabo estudios que utilizan simulaciones matemáticas y consideran variables tales como composición química del acero, temperatura, velocidad de colada, geometría del molde y condiciones de enfriamiento. También se han apoyado en la simulación numérica como la dinámica de fluidos computacional (CFD), que se utiliza para analizar el flujo del metal líquido en el molde, la solidificación y la formación de defectos. Esto permite optimizar el diseño y los parámetros del proceso para minimizar la aparición de defectos (Brimacombe y Sorimachi, 1997; González-Solórzano y col., 2020; Morales y col., 2013).



Con la finalidad de resaltar la importancia de estudiar, entender y aplicar el conocimiento se mostrarán métricas de defectos comunes en colada continua proveniente de una importante empresa del norte del país (Figuras 6-8).



**Figura 6.** Defectos superficiales e internos en el proceso de colada continua.



**Figura 7.** Defectos Superficiales de impacto en una acerera.



**Figura 8.** Defectos Interno de impacto en una acerera.



Resolver los defectos superficiales e Internos en el proceso de colada continua trae consigo una serie de beneficios significativos que impactan la calidad del producto, la eficiencia del proceso y los costos de producción. Aproximadamente estos defectos provocan una pérdida sustancial para las organizaciones de 40 dólares por tonelada (gas natural, oxígeno, materiales de mantenimiento y materiales de operación principalmente). Esto representa una pérdida mensual promedio de 2 millones 598 mil 422 y anual de 31 millones 181 mil 064.

## 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo realiza una revisión bibliográfica sobre los fenómenos más importantes que tienen lugar en el proceso de colada continua. Siendo el flujo de fluidos el fenómeno que domina al resto; es decir, el flujo del acero líquido dentro del molde y a través de la SEN promoverá, disminuirá o eliminará los fenómenos de obstrucción de la SEN, el nivel de turbulencia dentro del molde, las perturbaciones en la superficie libre que origina el atrapamiento de escoria y/o burbujas de gas argón y el gradiente térmico en las distintas zonas de extracción de calor en el molde que son el origen de la formación de grietas longitudinales, transversales y de estrella. Para lograr observar y entender los fenómenos que suceden dentro del molde, es necesario involucrar las variables del proceso, experimentación física y simulación numérica. El moldeado físico se utiliza para recrear el fenómeno y gracias a que es a nivel laboratorio, nos es posible obtener información cualitativa y cuantitativa, Mientras que la simulación numérica nos brinda la oportunidad de visualizar y medir variables que no es posible obtener de manera directa en la modelación física (campos de velocidad, gradientes térmicos, cambios de densidad, zonas de turbulencia, entre otras). Por último, las mediciones en planta son el patrón para validar los resultados de la simulación numérica y los



valores medidos en la experimentación física. En el presente caso, este grupo de investigación tiene los tres elementos antes mencionados para visualizar, experimentar y validar el desempeño de un par de SEN. Esto con la finalidad de controlar el flujo de fluidos dentro del molde; pues, este fenómeno rige a los demás.

## REFERENCIAS

- Brimacombe, J. K., & Sorimachi, K. (1997). Crack Formation in the Continuous Casting of Steel. *Metallurgical Transactions B*, 8B: 498–500.
- Calderón-Ramos, I., & Morales, R. D. (2015). The Role of Submerged Entry Nozzle Port Shape on Fluid Flow Turbulence in a Slab Mold. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 46(3): 1314–1325. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0333-y>
- Calderón-Ramos, I., Morales, R. D., Servín-Castañeda, R., Pérez-Alvarado, A., García-Hernández, S., De Jesús Barreto, J., & Arreola-Villa, S. A. (2019). Modeling study of turbulent flow in a continuous casting slab mold comparing three ports SEN designs. *ISIJ International*, 59: 76–85. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-504>
- Chatterjee, D. (2013). CFD Model Study of a New Four-Port Submerged Entry Nozzle for Decreasing the Turbulence in Slab Casting Mold. *ISRN Metallurgy*, 2013: 1–6. <https://doi.org/10.1155/2013/981597>
- Cho, S. M., Thomas, B. G., & Kim, S. H. (2019). Effect of Nozzle Port Angle on Transient Flow and Surface Slag Behavior During Continuous Steel-Slab Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 50(1): 52–76. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1439-9>
- Clyne, T. W., Wolf, M., & Kurz, W. (1982). The Effect of Melt Composition on Solidification Cracking of Steel, with Particular Reference to Continuous Casting. *Metallurgical Transactions B*, 13 B: 263-264.



- Garoosi, F., & Hooman, K. (2022). Numerical simulation of multiphase flows using an enhanced Volume-of-Fluid (VOF) method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 215: 106956. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2021.106956>
- González Rendón, Yordy., & Rangel Hernández, J. E. (2021). Comportamiento termo fluidodinámico del acero en un molde de colada continua. *TecnoLógicas*, 24 (51): e1856. <https://doi.org/10.22430/22565337.1856>
- González-Solórzano, M. G., Morales, R. D., Gutiérrez, E., Guarneros, J., & Chattopadhyay, K. (2020). Analysis of Fluid Flow of Liquid Steel through Clogged Nozzles: Thermodynamic Analysis and Flow Simulations. *Steel Research International*, 91(11): 6–8. <https://doi.org/10.1002/srin.202000049>
- Gutiérrez, E., De Jesús Barreto, J., García Hernandez, S., Morales, R., & González Solorzano, M. G. (2020). Decrease of nozzle clogging through fluid flow control. *Metals*, 10(11): 1–19. <https://doi.org/10.3390/met10111420>
- Gutiérrez, H. A., Cardiel, G. B., & García, R. E. (2018). Simulación matemática para la optimización del patrón de flujo entregado por una buza para el molde de colada continua de planchón delgado. *Revista Materia*, 23(2): 2–3. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0447>.
- Hibbeler Lance C., & Thomas Brian G. (2013). Mold Slag Entrainment Mechanisms in Continuous Casting Molds. *Iron and Steel Technology*, 10: 121-136. [https://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/2013%20papers/8.14\\_%20Hibbeler%20Mold%20Slag%20Entrainment%20Oct13%20pp121-136.pdf](https://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/2013%20papers/8.14_%20Hibbeler%20Mold%20Slag%20Entrainment%20Oct13%20pp121-136.pdf)
- Javurek, M., Brummayer, M., & Wincor, R. (2022). Turbulent flow measurements in continuous steel casting mold water model. *Materials Today: Proceedings*, 62: 2581–2586. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.605>
- Li, X., Li, B., Liu, Z., Wang, D., Qu, T., Hu, S., Wang, C., & Gao, R. (2021). Evaluation of Slag Entrapment in Continuous Casting Mold Based on the LES-VOF-DPM Coupled Model. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 52(5): 3246–3264. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02253-z>
- Melendez, A. J., Carlson, K. D., & Beckermann, C. (2010). Modelling of reoxidation inclusion formation in steel sand casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 23(5): 278–288. <https://doi.org/10.1179/136404610X12693537269976>



- Meng, Y. A., & Thomas, B. G. (2003). Modeling Transient Slag-Layer Phenomena in the Shell/mold Gap in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, 34B: 708–725.
- Mizobe, A., Kurisu, J., & Ueki, M. (2018). Computer analysis of molten steel flow and application to design of nozzles for continuous casting system. *Application and Theory of Computer Technology*, 2(4): 36. <https://doi.org/10.22496/atct.v2i4.115>
- Morales, R. D., Dávila-Maldonado, O., Calderón, I., & Morales-Higa, K. (2013). Physical and mathematical models of vortex flows during the last stages of steel draining operations from a ladle. *ISIJ International*, 53(5): 782–791. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.782>
- Real-Ramírez, C. A., Carvajal-Mariscal, I., Miranda-Tello, J. R., González-Trejo, J., Gabbasov, R., Sánchez-Silva, F., & Cervantes-de-la-Torre, F. (2021). Visualization and measurement of turbulent flow inside a Submerged Entry Nozzle and off the ports. *Revista Mexicana de Física*, 67(4): 1-10. <https://doi.org/10.31349/REVMEXFIS.67.040601>
- Romo Castañeda, J. (2011), “Estudio de la formación de especies mineralógicas en el molde de colada continua de planchón delgado de acero”, (Tesis de maestría), Instituto politécnico nacional. Ciudad de México.
- Thomas, B.G., y Zhang, L. (2001). Modelado matemático de los procesos de fabricación de hierro y acero. Modelado matemático del flujo de fluidos en la colada continua. *ISIJ International*, 41(10): 1181–1193. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
- Xuan, M., & Chen, M. (2021). Optimal design of the submerged entry nozzle for thin slab continuous casting molds. *Metals*, 11(8): 2. <https://doi.org/10.3390/met11081223>
- Yang, H., Vanka, S. P., & Thomas, B. G. (2019). Mathematical modeling of multiphase flow in steel continuous casting. *ISIJ International*, 59(6): 956–972. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-743>
- Yuan, Q., Zhao, B., Vanka, S. P., & Thomas, B. G. (2005). Study of computational issues in simulation of transient flow in continuous casting. *Steel Research International*, 76(1): 33–43. <https://doi.org/10.1002/srin.200505970>

