

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ÁREA DEL TRAZADOR EN TRES DISTRIBUIDORES CON INTERIOR PARALELEPIPÉDICO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TRACER AREA IN THREE TUNDISHES WITH REGULAR PARALLELEPIPED GEOMETRY USING IMAGE PROCESSING

CERRITOS ARRIAGA, Ma. de Lourdes ¹

RODRÍGUEZ ÁVILA, Jafeth ¹

MORALES DÁVILA, Rodolfo C. ²

GÓMEZ CASAS, Josué ¹

OLVERA ROMERO, Gerardo Daniel ¹

RESUMEN

La colada continua requiere un control preciso del flujo en el distribuidor para homogenizar el acero líquido y favorecer la flotación de inclusiones. Este comportamiento se evalúa mediante las curvas de distribución de tiempos de residencia (RTD) y el mínimo tiempo de residencia (MRT), los cuales permiten identificar los regímenes y trayectorias del flujo. En este estudio se propone un método experimental alternativo basado en la inyección de trazadores de color y el procesamiento de video, con el objetivo de analizar la evolución del área del trazador durante el MRT y su relación con la separación de impurezas. Se empleó un modelo físico en acrílico a escala 1:3, diseñado bajo el criterio de similitud de Froude, con un caudal de 13 L/min y registro a treinta cuadros por segundo. Adicionalmente, se compararon tres inhibidores de turbulencia con geometría paralelepípedica regular y diferentes proporciones internas. Asimismo, se realizaron ensayos con polvo de densidad relativa menor que la del agua para representar inclusiones no metálicas y validar las tendencias observadas. En cuanto a los resultados, se pudo ver un avance inicial semejante del trazador en los tres casos y diferencias significativas en la etapa final. El inhibidor C7 presentó el mejor desempeño, con un MRT de 52 s y 1.65 g de polvo arrastrado, seguido de C6 con 56 s y 2.76 g, mientras que C3 fue el menos eficiente con 55 s y 3.2 g. El análisis de aceleración demostró que los inhibidores actúan como amortiguadores hidráulicos que reducen las fluctuaciones y estabilizan el flujo.

Palabras clave: procesamiento de imágenes; colada continua; inhibidor de turbulencia.

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.
2. Escuela Superior de Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

Correspondencia
jafethrodriguez@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-8873-5882>
Fecha de recepción
21 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
20 de abril de 2026.

ABSTRACT

Continuous casting requires precise flow control within the tundish to homogenize the molten steel and promote the flotation of inclusions. This behavior is evaluated through residence time distribution (RTD) curves and minimum residence time (MRT), which allow identifying the flow regimes and trajectories. This study proposes an alternative experimental method based on dye tracer (tracer) injection and video processing, aimed at analyzing the evolution of the tracer area during the MRT and its relationship with impurity separation. A physical acrylic model at a 1:3 scale was used, designed under the Froude similarity criterion, with a flow rate of 13 L/min and recorded at 30 frames per second. Additionally, three turbulence inhibitors with regular parallelepiped geometry and different internal proportions were compared. Tests with powder of relative density lower than that of water were also carried out to represent non-metallic inclusions and validate the observed trends. The tracer exhibited a similar initial propagation in all cases and significant differences at the final stage. Inhibitor C7 exhibited the best performance, with an MRT of 52 s and 1.65 g of powder carried over, followed by C6 with 56 s and 2.76 g, while C3 was the least efficient, with 55 s and 3.2 g. The acceleration analysis demonstrated that the inhibitors act as hydraulic dampers, reducing fluctuations and stabilizing the flow.

Keywords: image processing; continuous casting; turbulence inhibitor.

INTRODUCCIÓN

El acero es un material esencial en la industria moderna por su uso en construcciones, maquinaria e infraestructura. Para obtener las propiedades mecánicas deseadas es necesario controlar las inclusiones no metálicas como óxidos, sulfuros y partículas refractarias que afectan la resistencia, la ductilidad y la durabilidad del material. Estas impurezas generan rechazos, reprocesos y mayores costos en la producción (Ding y col., 2023; Fang y col., 2020; Sheng y Yue, 2020; Yi y col., 2023). En el proceso de colada continua, después de la refinación secundaria, el metal fundido se conduce al distribuidor, cuya función es estabilizar el flujo, mantener una temperatura y composición uniformes y retener las inclusiones antes del vaciado al molde. Aunque las



partículas menos densas tienden a flotar, la turbulencia y las zonas de recirculación pueden arrastrarlas hacia la salida y comprometer la limpieza del acero (Ding y col., 2023; Sahai, 2016; Sahai y Emi, 2007). La Figura 1 muestra las etapas principales del proceso de colada continua.

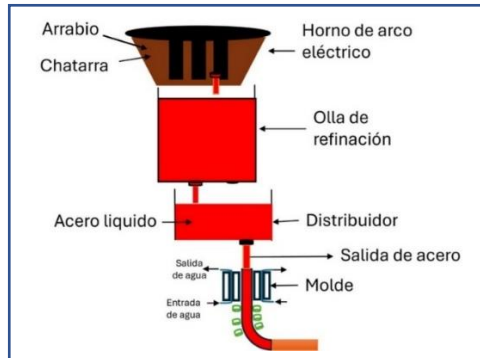


Figura 1. Etapas principales del proceso de colada continua.

Para analizar la dinámica del flujo en el distribuidor se emplea la distribución de tiempos de residencia (RTD), que consiste en introducir un trazador y medir su concentración a la salida para obtener una curva normalizada de área unitaria. Esta permite identificar flujos tipo pistón, de mezcla o zonas muertas (Aguilar-Rodríguez y col., 2018; Chattopadhyay y col., 2010). Un flujo tipo pistón predominante y un menor volumen muerto favorecen la eliminación de inclusiones (Wang y col., 2022). La Figura 2 muestra un experimento típico de RTD.

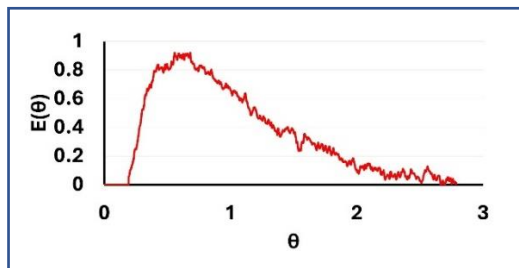


Figura 2. Experimento típico de la curva RTD.

El mínimo tiempo de residencia (MRT) corresponde al intervalo entre la inyección del trazador y su primera detección en la salida, lo que revela trayectorias directas del flujo, aunque no describe por completo su comportamiento (Tie y col., 2022). El método clásico no permite visualizar la distribución espacial del trazador, por lo que se ha incorporado el análisis de video para obtener la evolución del área, el centroide y la dirección de avance del trazador (Singh y col., 2023).



En este estudio se comparan tres geometrías paralelepípedicas de inhibidores de turbulencia con distintas dimensiones. Además, se realizaron ensayos con polvo de baja densidad para simular inclusiones no metálicas y validar los patrones observados. La combinación del análisis visual y experimental evidencia cómo las proporciones internas del inhibidor afectan la circulación y el balance energético del flujo, aportando criterios para optimizar la homogeneidad del acero y favorecer la flotación de inclusiones. Este enfoque experimental, basado en técnicas no invasivas de análisis visual, representa una herramienta de alto potencial para la evaluación y optimización del desempeño hidráulico del tundish en condiciones cercanas a la operación industrial, contribuyendo al mejoramiento de la limpieza del acero durante la colada continua (Aguilar-Rodríguez y col., 2018; Chang y col., 2023; Chattopadhyay y col., 2010; Ding y col., 2023; Sahai y Emi, 2007; Wang y col., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema hidráulico experimental se diseñó para reproducir el flujo en un distribuidor industrial de colada continua mediante un modelo físico a escala reducida. El montaje incluyó un depósito de 1000 litros a 5 metros de altura alimentado por una bomba centrífuga de 1 HP. El caudal se controló con un flujómetro y se fijó en 13 L/min conforme al criterio de Froude, garantizando la similitud dinámica con el prototipo real (Mazumdar y Guthrie, 1999). Se utilizó trazador vegetal a 78 g/L como trazador, inyectado en la parte superior de la boquilla de entrada. Las pruebas se grabaron con una cámara HD a treinta cuadros por segundo y los videos se analizaron para obtener variables cinemáticas. El modelo del distribuidor se fabricó en acrílico

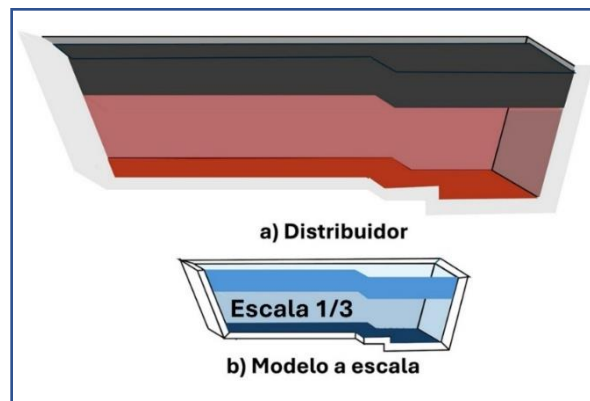


Figura 3. Distribuidor con a) acero líquido en planta y b) modelo a escala 1:3.

transparente a una escala 1:3, manteniendo la similitud de Froude. En la Figura 3 se compara el distribuidor industrial con el modelo experimental. La similitud se basó en la viscosidad cinemática, ya que el agua a 20 °C presenta $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y el acero líquido a 1600 °C, $0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, lo que permitió reproducir adecuadamente la resistencia al movimiento del fluido. Se estudiaron tres configuraciones experimentales, C3, C6 y C7, con geometría paralelepípedica regular, para evaluar el efecto de las dimensiones internas del inhibidor sobre el flujo y la eficiencia de separación de inclusiones. La Figura 4 muestra las formas experimentales analizadas.

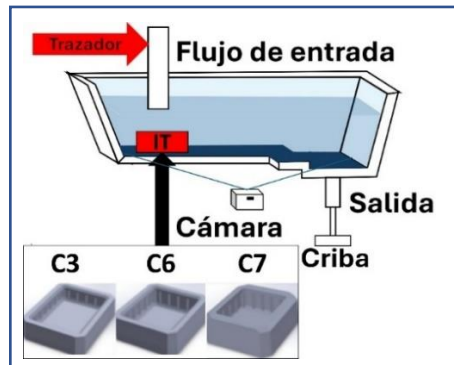


Figura 4. Forma experimental de los casos C3, C6 y C7.

Se realizaron dos ensayos. En el primero se inyectó un trazador líquido para analizar la cinemática del flujo y la dispersión del trazador dentro del distribuidor. En el segundo se usó polvo sólido con densidad relativa de $\rho = 0.98$, menor que la del agua, para simular inclusiones no metálicas que tienden a flotar y quedar atrapadas en la escoria del proceso real. El polvo se diluyó en alcohol y se inyectó por la misma boquilla del trazador. En la salida se colocó una malla metálica de $5000 \mu\text{m}$ que retuvo las partículas. El material recuperado se secó y pesó para determinar la masa que logró salir del sistema, lo que permitió evaluar la eficiencia de cada inhibidor en la flotación de inclusiones, considerando que la fracción retenida equivale a las partículas que en el proceso real ascenderían a la capa de escoria (Quan y col., 2023).

Las áreas cubiertas por el trazador se obtuvieron mediante procesamiento digital de imágenes, empleando algoritmos de segmentación de color y análisis morfológico para identificar y cuantificar la región ocupada por el trazador en cada cuadro del video. Este procedimiento permitió determinar la evolución temporal del área, su expansión y la dirección del flujo, así como calcular la velocidad, la aceleración del área y el mínimo tiempo de residencia en los tres casos analizados. Este método permitió cuantificar la evolución del

trazador, su expansión y la dirección del flujo, además de calcular la velocidad, la aceleración del área y el mínimo tiempo de residencia en los tres casos analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para los inhibidores de turbulencia con geometría regular de paralelepípedo C3, C6 y C7, en diferentes intervalos de tiempo: 1, 2, 3, 5, 7 y 10 segundos después de la inyección del trazador. En esta secuencia se aprecia cómo evoluciona la mancha del trazador durante los primeros 10 segundos, donde se identifican contrastes y pequeñas diferencias en el área cubierta por el trazador entre las distintas configuraciones.

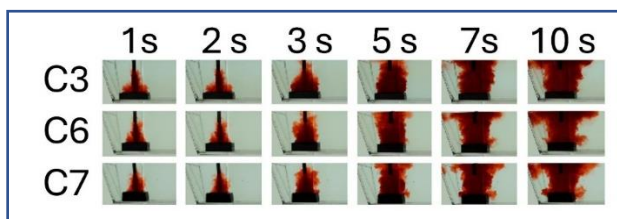


Figura 5. Imágenes experimentales de los primeros 10 s de inhibidores de paralelepípedo regular C3, C6 y C7.

En la Figura 6, cada tono de color corresponde a un segundo de avance del trazador, acumulando un total de 50 s. Conforme transcurre el tiempo, el ritmo de desplazamiento del trazador disminuye y en la zona roja se observa su comportamiento próximo a la salida. En la zona media entre los 20 y los 40 s, de los tres casos, el trazador tiende a avanzar de arriba hacia abajo y hacia la derecha, con un movimiento lento en la parte inferior. La evolución espacial de esta propagación se aprecia con mayor claridad en la Figura 7, donde se muestra el área proyectada del trazador a lo largo del experimento.

Las diferencias entre los inhibidores con forma paralelepipedica se presentan principalmente al final del experimento. En C3, con un MRT de 55 s, el trazador avanza hacia la parte inferior y muestra mayor arrastre de inclusiones. En C6, con 56 s, el flujo es más lento en la zona media pero más horizontal en la parte baja, lo que favorece el transporte de impurezas.



En C7, con 52 s, el flujo es más uniforme y lento, con menor presencia de trazador, lo que indica un arrastre reducido. En la Figura 8 se observa que, aunque el avance inicial del trazador es semejante en los tres casos, con el tiempo se desarrollan diferencias claras en su propagación. El caso C3 presenta una mayor expansión del trazador, mientras que C7 muestra el comportamiento más contenido, lo que se asocia con un menor arrastre de partículas y una mayor eficiencia en la flotación de inclusiones.

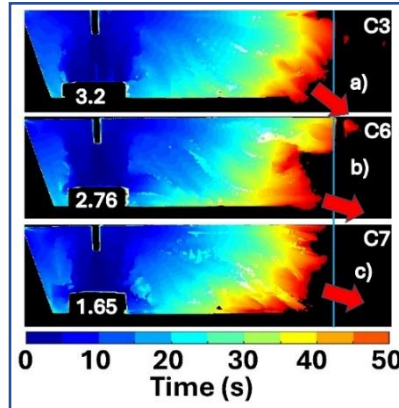


Figura 6. Posición del trazador cada segundo de los casos C3, C6 y C7.

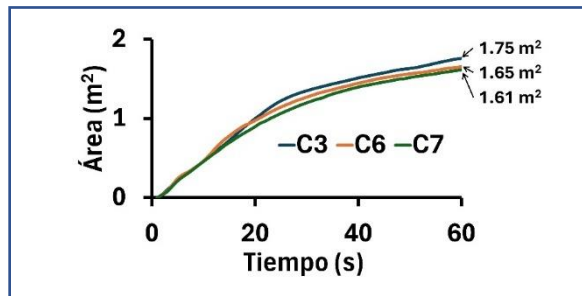


Figura 7. Área del trazador proyectada.

Los resultados indican que un mayor avance del trazador se asocia con un mayor arrastre de partículas y una menor eficiencia en la flotación de inclusiones. El caso C3 permite una salida más rápida de impurezas y un menor tiempo de permanencia en el distribuidor. La comparación se realizó entre inhibidores con la misma forma paralelepípedica, ya que la geometría

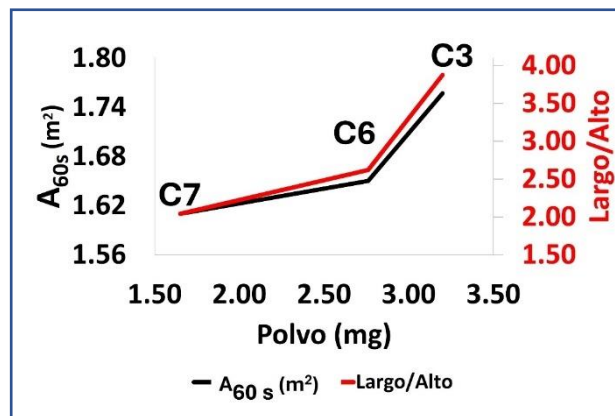


Figura 8. Relación Largo/Alto del inhibidor, área del trazador y masa de polvo colectada de los casos C3, C6 y C7.

influye en el flujo y en la retención de inclusiones. La relación geométrica largo/alto del inhibidor influye directamente en el patrón de circulación del fluido. Las configuraciones más alargadas favorecen trayectorias más directas y mayores velocidades medias, mientras que diseños más compactos inducen un flujo más lento y uniforme, lo que incrementa el tiempo disponible para la flotación de inclusiones. En la Figura 8 se observa que una relación largo a alto mayor corresponde a una mayor área recorrida por el trazador, lo que implica mayor velocidad media y menor eficiencia en la flotación, y lo contrario cuando la relación es menor.

La Figura 9 muestra la evolución de la tasa de crecimiento del área del trazador, evidenciando un régimen inicial altamente fluctuante durante los primeros 20 segundos, seguido por una disminución progresiva de la velocidad hasta aproximarse a un estado más estable. Entre los tres casos, C6 presenta las mayores oscilaciones iniciales, C3 muestra un comportamiento intermedio y C7 exhibe la variación más moderada, lo que sugiere diferencias en la disipación de energía inducida por la geometría del inhibidor.

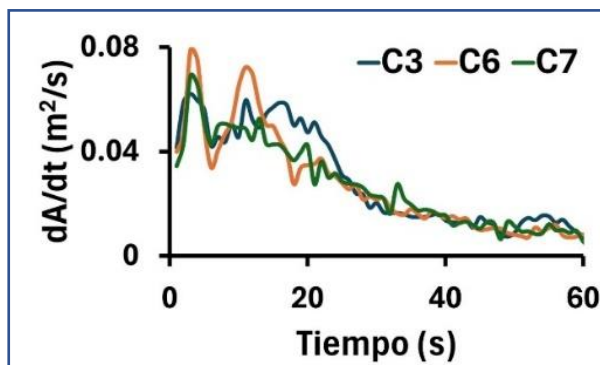


Figura 9. Rapidez del avance del trazador.

La aceleración del área, presentada en la Figura 10, confirma este comportamiento. C6 muestra las oscilaciones más pronunciadas entre empuje y frenado, reflejando una dinámica más inestable del flujo. C3 presenta variaciones moderadas, mientras que C7 mantiene picos definidos, pero con menor amplitud relativa, lo que indica un régimen más controlado.

En todos los casos se observa una tendencia neta hacia el frenado, asociada con la disipación progresiva de energía cinética dentro del distribuidor.



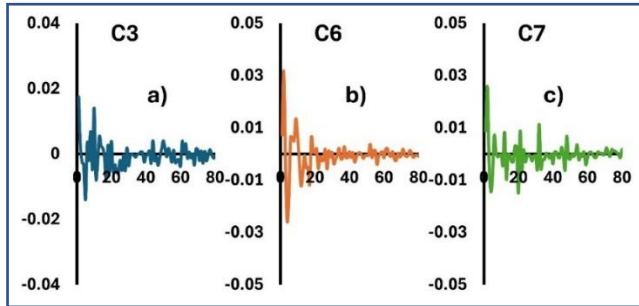


Figura 10. Aceleración de los casos a) C3, b) C6 y c) C7.

Las pérdidas de energía en el proceso se originan principalmente por la disipación viscosa y la turbulencia interna dentro del distribuidor. Los cambios de dirección y las variaciones de velocidad generan vórtices y microfluctuaciones que transforman parte de la energía cinética en calor y fricción contra las paredes, reduciendo progresivamente la energía disponible para mantener el movimiento y favoreciendo la estabilización del flujo. En los casos con inhibidores de turbulencia, esta disipación es más notoria, ya que los dispositivos inducen zonas de recirculación controlada que incrementan la pérdida de carga y limitan las velocidades extremas, promoviendo un régimen más uniforme.

El análisis del porcentaje de empuje y frenado permite observar que el distribuidor sin inhibidor presenta las aceleraciones más elevadas debido a un empuje inicial intenso seguido de un frenado pronunciado. En contraste, la incorporación de inhibidores reduce la magnitud de estas variaciones al disminuir la velocidad del flujo y moderar las fluctuaciones dinámicas. En un intervalo de 100 segundos, la suma de aceleraciones positivas representa el empuje total y la de las negativas el frenado total; la diferencia entre ambas define la resultante neta, que tiende hacia el frenado y confirma la disipación progresiva de energía. Como se muestra en la Figura 11, las configuraciones con menor disipación energética presentan un comportamiento hidráulico más estable, lo que se asocia con una mayor eficiencia en la flotación de inclusiones, tendencia que se sintetiza cuantitativamente en la Tabla 1.

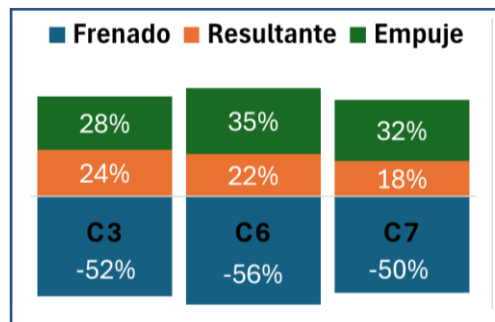


Figura 11. Porcentaje de empuje y frenado de la masa de fluido a 100 s.

Tabla 1. Resultados experimentales de los casos C3, C6 y C7.

Inhibidor	Polvo (g)	Área a 100 s (m ²)	Largo/Alto	% Frenado resultante	MRT (s)
C3	3.2	1.44	3.87	24	55
C6	2.76	1.38	2.62	22	56
C7	1.65	1.32	2.04	18	52

El análisis visual con trazador permitió observar detalles del movimiento del fluido durante el MRT que no pueden apreciarse con los métodos tradicionales de RTD. Se comprobó que un mismo valor de MRT puede asociarse con diferentes patrones de flujo, ya que cada inhibidor genera una distribución interna particular. En las etapas iniciales el avance del trazador fue semejante en los tres casos, aunque al final se presentaron diferencias en la dirección y estabilidad del flujo. El inhibidor C7 mostró el mejor desempeño en la flotación de inclusiones, seguido de C6, mientras que C3 presentó mayor arrastre de partículas hacia la parte inferior.

Las pruebas con polvo confirmaron que la forma y las dimensiones del inhibidor influyen directamente en la flotación y el arrastre de impurezas, factores determinantes para la limpieza del acero antes del vaciado.

El análisis de aceleración permitió distinguir los periodos de empuje y frenado del fluido, que reflejan la energía cinética interna y el efecto amortiguador de los inhibidores. La disminución de las aceleraciones evidencia una mayor disipación de energía por turbulencia y fricción, junto con una mejor estabilidad del flujo, como se aprecia en las Figuras 9, 10 y 11.

REFERENCIAS

Aguilar-Rodríguez, C.E., Ramos-Banderas, J.A., Torres-Alonso, E., Solorio-Díaz, G. & Hernández-Bocanegra, C.A. (2018). Flow characterization and inclusions removal in a slab tundish equipped with bottom argon gas feeding. *Metallurgist*, 61: 1055–1066. DOI: 10.1007/s11015-018-0607-0.

- Chang, L., Lu, L., Zhou, B. & Zhou, C. (2023). Dwell fatigue crack growth behavior of CP-Ti TA2 welded joint at 25 °C and 200 °C. *Metals*, 13: 553. DOI: 10.3390/met13030553.
- Chattopadhyay, K., Isac, M. & Guthrie, R.I.L. (2010). Physical and mathematical modelling of steelmaking tundish operations: A review of the last decade (1999–2009). *ISIJ International*, 50: 331–348. DOI: 10.2355/isijinternational.50.331.
- Ding, C., Lei, H., Zhang, H., Xu, M., Zhao, Y. & Li, Q. (2023). New insight into relationship between casting speed and inclusion removal in the tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, 23: 5400-5412. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.146.
- Fang, Q., Zhang, H., Luo, R., Liu, C., Wang, Y. & Ni, H. (2020). Optimization of flow, heat transfer and inclusion removal behaviors in an odd multistrand bloom casting tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, 9: 347-363. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.064.
- Mazumdar, D. & Guthrie, R.I.L. (1999). Physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. *ISIJ International*, 39: 524–547. DOI: 10.2355/isijinternational.39.524.
- Quan, Q., Zhang, Z.X., Qu, T.P., Li, X.L., Tian, J. & Wang, D.Y. (2023). Physical and numerical investigation on fluid flow and inclusion removal behavior in a single-strand tundish. *Journal of Iron and Steel Research International*, 30: 1182–1198. DOI: 10.1007/s42243-022-00884-3.
- Sahai, Y. (2016). Tundish technology for casting clean steel: A review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47: 2095–2126. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3.
- Sahai, Y. & Emi, T. (2007). *Tundish technology for clean steel production*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Sheng, D.Y. & Yue, Q. (2020). Modeling of fluid flow and residence-time distribution in a five-strand tundish. *Metals*, 10: 1084. DOI: 10.3390/met10081084.
- Singh, P.K., Kumar, S. & Jain, P.K. (2023). Surface integrity of cryogenically finished additively manufactured and conventional Ti-6Al-4V alloy. *Metals*, 13: 693. DOI: 10.3390/met13040693.
- Tie, Z., Tang, H., Wang, K., Miao, H., Cai, S., Xian, F. & Zhang, J. (2022). Effect of flow field optimization of an asymmetric multi-strand tundish on the quality consistency of cracking con-rod steel. *Materials*, 15: 3698. DOI: 10.3390/ma15103698.
- Wang, Z., Yang, Z., Wang, X., Yue, Q., Xia, Z. & Xiao, H. (2022). Residence time distribution (RTD) applications in continuous casting tundish: A review and new perspectives. *Metals*, 12: 1366. DOI: 10.3390/met12081366.

Yi, B., Zhang, G., Jiang, Q., Zhang, P., Feng, Z. & Tian, N. (2023). The removal of inclusions with different diameters in tundish by channel induction heating: A numerical simulation study. *Materials*, 16: 5254. DOI: 10.3390/ma16155254.