

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068



Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo

Detección de zonas inactivas en una olla metalúrgica

Deteccion of inactive zones in a metallurgical ladle

Gerardo Aguilar-Ávila, Gildardo Solorio Díaz, Alicia Aguilar-Corona*

Para citar este artículo: Gerardo Aguilar-Ávila, Gildardo Solorio Díaz, Alicia Aguilar-Corona, 2022. Detección de zonas inactivas en una olla metalúrgica. Ciencia Nicolaita no. 84, 81-87. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi84.585>

Historial del artículo:



Recibido: 5 de noviembre de 2021

Aceptado: 19 de febrero de 2022

Publicado en línea: mayo de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: alicia.aguilar@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Detección de zonas inactivas en una olla metalúrgica

Deteccion of inactive zones in a metallurgical ladle

Gerardo Aguilar-Ávila, Gildardo Solorio Díaz, Alicia Aguilar-Corona*

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58030, México.

Resumen

La agitación del acero fundido en la olla metalúrgica durante el proceso de refinado secundario es importante ya que asegura la correcta homogeneización de la composición química y térmica del producto. En este trabajo, la simulación física de la agitación de una olla metalúrgica utilizando un modelo de agua es realizada. Se utilizan dos técnicas de análisis de fluidos para determinar las zonas inactivas o menos agitadas en la olla; la técnica de colorimetría y la técnica de velocimetría de imágenes por partículas (PIV - Particle Image Velocimetry). La primera permite un análisis global del movimiento del líquido en la olla y la segunda determina de forma local el campo de velocidades dentro de la olla. A partir de esta información se pueden proponer configuraciones de inyectores de aire que promuevan un mejor mezclado y disminuyan las zonas de baja agitación.

Palabras clave: olla metalúrgica, agitación, PIV, colorimetría, simulación física, acero.

Abstract

The stirring of molten steel during the secondary refining step of metallurgical processes is important because it ensures the correct homogenization of the chemical and thermal composition. In this work, a water model of the gas - stirred ladle is studied, using the porous plug configuration used in the industrial prototype. Two fluid analysis techniques are used to determine the inactive or less agitated zones; the colorimetry technique and the particle imaging velocimetry technique (PIV). The former allows a global analysis of the movement of the liquid in the ladle, and the latter analyzes the air injection plane and the center of the ladle. The identification of the inactive zones will allow for the design of different porous plug configurations that enhance mixing and preclude the appearance of zones of low agitation.

Keywords: metallurgical ladle, stirring, PIV, colorimetry, physics simulation, steel.

1. Introducción

El acero es actualmente uno de los materiales más usados en diversos campos de la ingeniería en todo el mundo y muchas industrias como la automotriz, de la construcción, la militar e incluso la alimentaria, dependen de los productos de este material. Y es debido a las exigencias del mercado actual y a la competitividad que la calidad de los productos de acero ha ido en aumento con el pasar del tiempo, llegando a desarrollarse métodos más eficientes para su fabricación.

La producción del acero (ver Figura 1) comienza con la fundición de chatarra, fundente y ferroaleaciones en un horno básico o de arco eléctrico. Posteriormente, el acero líquido es transportado a la olla metalúrgica, donde se ajusta y homogeneiza la composición química y térmica del producto final. Enseguida, el acero es vaciado a un distribuidor que lo reparte hacia los moldes. Finalmente, este producto es sometido a un proceso de enfriamiento para ser cortado y almacenado.

Este estudio está enfocado en la olla metalúrgica, la cual tiene un papel muy importante ya que la calidad del acero obtenido depende de esta etapa. La olla contiene el producto de la fundición del horno y es en este recipiente donde se uniformiza la composición del acero líquido por medio de la agitación, usando argón para este fin. El argón es inyectado por el fondo de la olla, durante su ascenso son desarrollados fenómenos térmicos y turbulentos que repercuten directamente en la calidad del producto. Un proceso de agitación ineficiente puede conducir a defectos como un alto número de inclusiones o la infiltración de escoria dentro del baño metálico, los cuales son responsables del mal desempeño del material. El estudio de este fenómeno en planta es difícil por las altas temperaturas y los gastos de operación involucrados, por ello la modelación física ha sido una herramienta muy

útil en la ingeniería ya que permite reproducir y entender los fenómenos que se llevan a cabo en los procesos de manera eficiente, realista y sobre todo a un bajo costo. Debido a los avances tecnológicos en los campos de la modelación, los estudios de los procesos en ingeniería alrededor del mundo se han incrementado en los últimos años en un afán de obtener productos de mejor calidad.

En particular, la modelación de los procesos metalúrgicos de la olla ha ayudado a la comprensión del comportamiento dinámico del acero en las operaciones de refinación, por lo que estudios como los de Conejo *et al.*, 2013, Terrazas y Conejo 2015, González *et al.*, 2018 han adoptado esta metodología de trabajo usando ollas a diferentes escalas. Calderón *et al.* (2019) determinan que la calidad del mezclado del acero está relacionada directamente con la energía de agitación producida por el gas argón en la olla. Estudios como los de Conejo *et al.* (2016) y Maldonado *et al.* (2011) han concluido que los arreglos con un tapón excéntrico lo más cercano a la pared ofrece el mejor mezclado. Esto podría deberse a una menor pérdida de energía debido a la menor resistencia que presenta el volumen de fluido al momento del ascenso de la pluma de gas y a que el recorrido del gas se da a través de toda la olla. Otra variable que es de suma importancia para el proceso y que tiene un gran efecto sobre el mezclado en la olla es el flujo de gas argón (Liu *et al.*, 2019, Gómez *et al.* 2018, Terrazas y Conejo 2015). En la industria, esta variable es seleccionada en base al tipo de operación que se desea realizar, por ejemplo, para la agitación y procesos como la desulfuración se agita intensamente, mientras que para la homogenización térmica o la flotación de inclusiones se usan flujos de argón más bajos.

En este trabajo se determinan las zonas de baja agitación en un modelo de olla metalúrgica, la cual está diseñada a partir de una olla actualmente en fun-

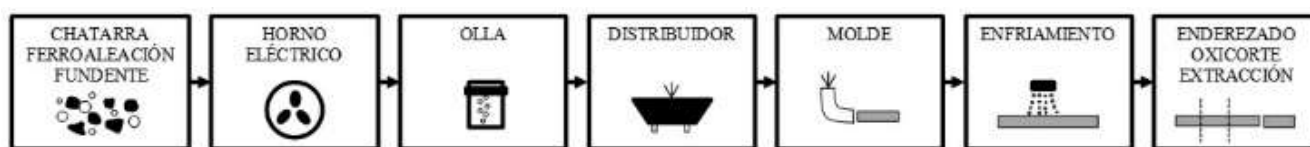


Figura 1. Diagrama del proceso de fabricación del acero.

cionamiento de una empresa siderúrgica de 135 toneladas. La agitación es producida por la inyección de aire por una tobera colocada en el fondo de la olla y cercana a la pared. Este arreglo es uno de los más utilizados en la producción de acero y por ello ha sido elegido para este estudio. La técnica de colorimetría es utilizada para determinar las zonas de más baja agitación en el recipiente en general y la técnica de velocimetría de partículas por imágenes nos permite determinar el campo de velocidades en un plano que en este caso corresponde al plano de inyección del aire.

TABLA 1
Propiedades físicas de los fluidos. Tomado de Calderón-Ramos *et al.* (2013).

	ρ (kgm ⁻³)	μ (kg s ⁻¹ m ⁻¹)	ν (m ² s ⁻¹)
Agua 20°C	998	0.00089	8.90×10^{-7}
Acero 1600°C	7010	0.0062	8.86×10^{-7}
Aire 20°C	1.225	1.825×10^{-5}	1.51×10^{-5}
Argón 20°C	1.6	2.1×10^{-5}	1.31×10^{-5}

2. Metodología

Para poder utilizar el agua y aire como fluidos de trabajo en lugar de acero y argón para la simulación física se requiere que el fluido dentro del reactor satisfaga, para este caso en específico, los criterios de similitud geométrica y similitud dinámica (González, 2008). La similitud geométrica se cumple cuando entre el modelo real y el prototipo existe una relación constante entre todas las longitudes del sistema. La similitud dinámica corresponde a la similitud de fuerzas. Dos sistemas presentan similitud dinámica cuando las magnitudes de las fuerzas en puntos y tiempos correspondientes en cada sistema se encuentran en relación fija. Estas fuerzas incluyen energías concentradas, distribuidas y momentos. Si las razones de combinaciones de estas fuerzas son idénticas para los dos sistemas, se dice que son dinámicamente similares respecto a las fuerzas involucradas. Las fuerzas inerciales y las de flotación son las que gobiernan el

comportamiento del flujo en la olla metalúrgica. El número adimensional que relaciona estas dos fuerzas es el número de Froude modificado. Este número está representado por $Fr_m = \rho_g u^2 / (\rho_l - \rho_g) g L$, donde ρ corresponde a la densidad del gas (g) y del líquido (l) y u es la velocidad del fluido. Las propiedades físicas de los fluidos involucrados se encuentran en la Tabla 1, donde μ es viscosidad dinámica y ν viscosidad cinemática. La viscosidad cinemática es similar entre los valores de agua—acero y aire—argón. El número de Froude con respecto al modelo y prototipo varían en menos de un 1% a un flujo volumétrico de 4.9 l/min.

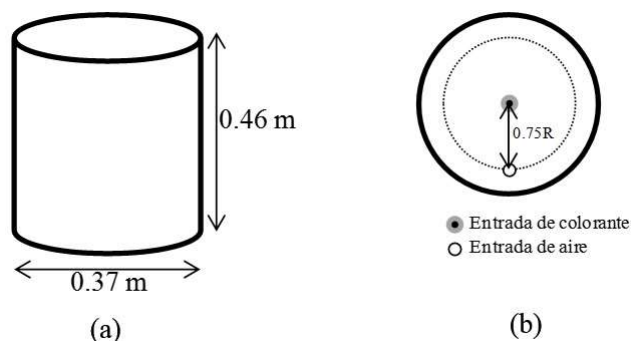


Figura 2. Esquema de la olla utilizada a) vista lateral y b) vista superior.

En la Figura 2 se muestra el diagrama del equipo experimental. Este consiste de una olla de acrílico cuyas dimensiones son de 0.37 m de diámetro y 0.46 m de altura. En el centro de la base de la olla se inyecta el colorante y la inyección del aire se realiza cerca de la pared a una distancia de 0.14 m a partir del centro de la base (equivalente a 0.75 veces el radio, R).

Para determinar la fluido-dinámica en la olla se realizan pruebas de colorimetría. Estas pruebas consisten en llenar la olla con agua e introducir el aire a una presión constante hasta asegurar un patrón de flujo estable. Una vez llegado a este estado, una mezcla a base de colorante vegetal rojo con una concentración de 35 g/l se inyecta por el centro de la base de la olla. Posteriormente, el colorante se dispersa por el contenedor. Series de imágenes son obtenidas para determinar la actividad del flujo en la olla. Esta técnica permite determinar las zonas de baja agitación en el volumen total de la olla.

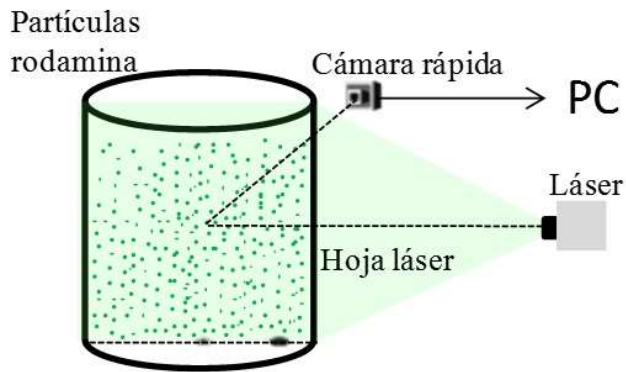


Figura 3. Técnica de velocimetría por imágenes de partículas.

La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) es mostrada en la Figura 3. Esta es una técnica no intrusiva que permite determinar la velocidad instantánea del fluido, de forma indirecta, por medio de partículas de rodamina que son agregadas a la olla. La característica principal de estas partículas es tener un número muy pequeño de Stokes, lo cual asegura que reproduzcan el movimiento del fluido. Un láser

ilumina en forma vertical el plano que pasa por el centro de la olla y por el punto de inyección de aire. Este plano es elegido debido a que es en donde el aire transfiere la mayor cantidad de movimiento al líquido y por lo tanto se produce la mayor agitación de la olla. La iluminación del láser provoca que las partículas dispersen la luz, siendo esta captada por una cámara de alta velocidad a diferentes tiempos. De esta forma se determina la posición de las partículas con respecto al tiempo y subsecuentemente la velocidad del líquido en la olla.

3. Resultados

En la Figura 4 se muestra la evolución del colorante desde dos vistas: frontal y lateral. En la vista frontal la entrada del colorante está alineada con la entrada del aire, mientras que en la vista lateral la entrada del colorante y del aire están en el centro y a la derecha de la imagen respectivamente. En la vista frontal, al inicio se observa el ascenso del colorante por la parte cen-

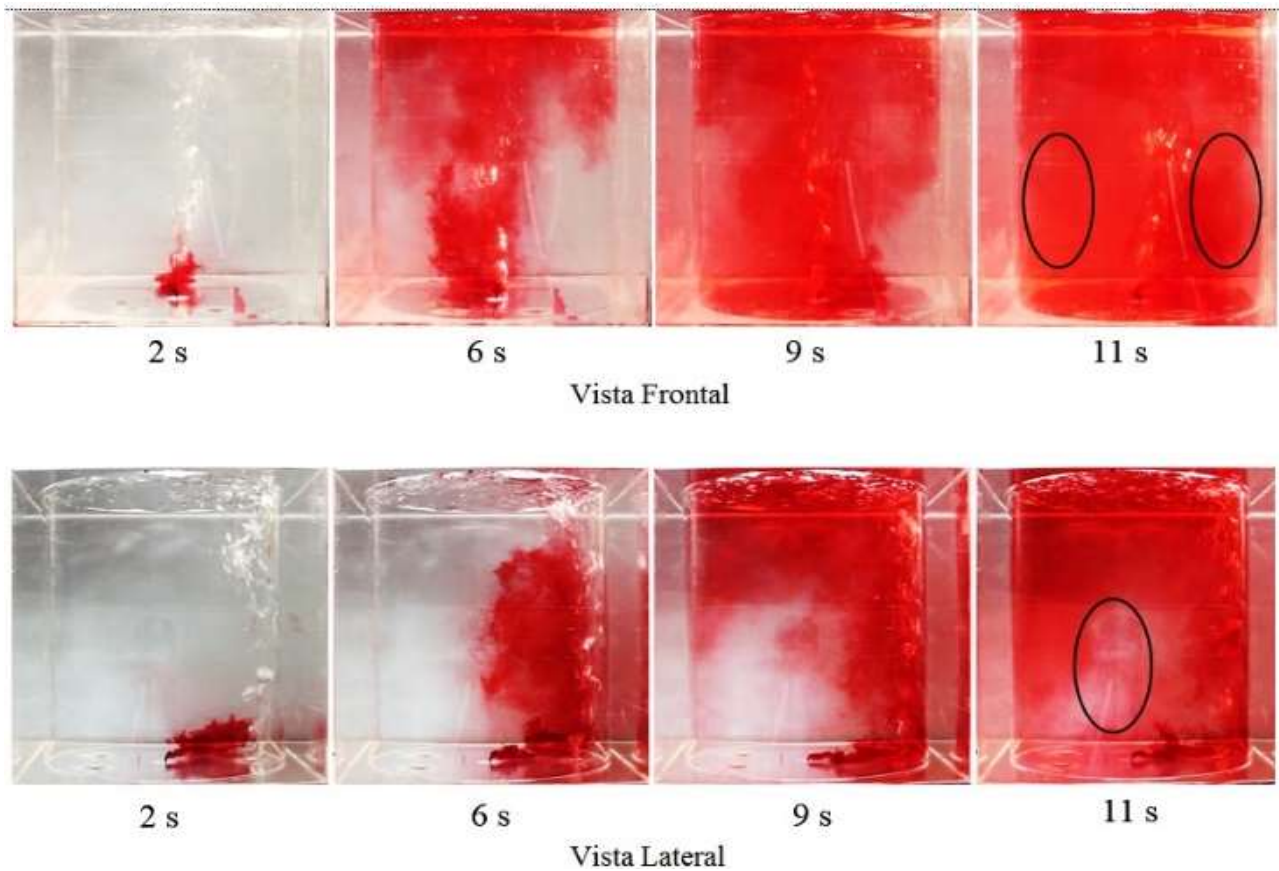


Figura 4. Vista frontal y lateral del trazador de flujo a diferentes tiempos. Las zonas ovaladas representan las zonas de menor actividad observada.

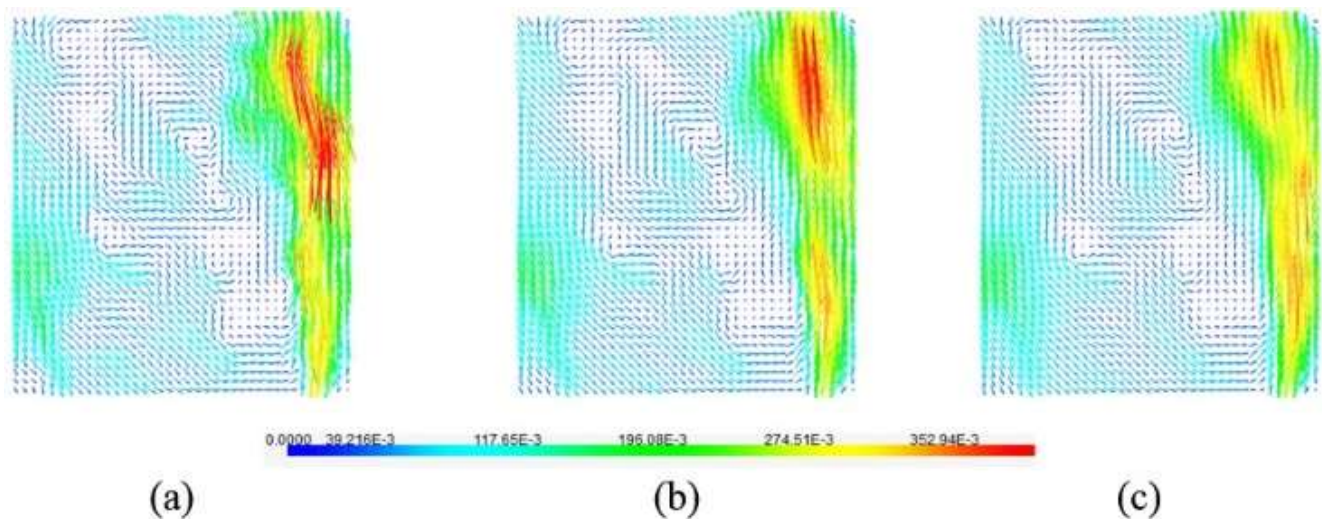


Figura 5. Campo de velocidades promediado (ms^{-1}) a) 0.4 s, b) 0.8 s y c) 1.3 s.

tral de la olla. Una vez que la corriente llega a la superficie, el flujo se divide en dos vertientes diametralmente opuestas dejando menor actividad en la zona marcada en la figura. Finalmente, a los 11 segundos la totalidad de la olla ya ha sido cubierta por el colorante rojo. Concerniente a la vista lateral, tomando los mismos tiempos que la vista frontal, se observa que al inicio el colorante reptaba hacia el flujo de aire. El colorante es arrastrado hacia la superficie por la agitación provocada por el flujo del aire. El flujo del colorante es llevado por un movimiento envolvente que lo transporta a la pared diametralmente opuesta. En este caso se observa que la zona marcada corresponde una

zona de baja actividad, la cual a los 11 segundos aún no ha sido cubierta por el colorante como sucedió en la vista frontal.

El campo de velocidades fue determinado utilizando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. El campo de velocidades promediadas a diferentes tiempos se muestra en la Figura 5. Las más altas magnitudes de las velocidades del líquido, para todos los casos, se encuentran alrededor de la entrada del flujo del aire, al llegar a la superficie la corriente del líquido con mayor velocidad abre la superficie, efecto indeseable en la producción del acero ya que provoca la oxidación de éste. Con el fin de simular la capa de

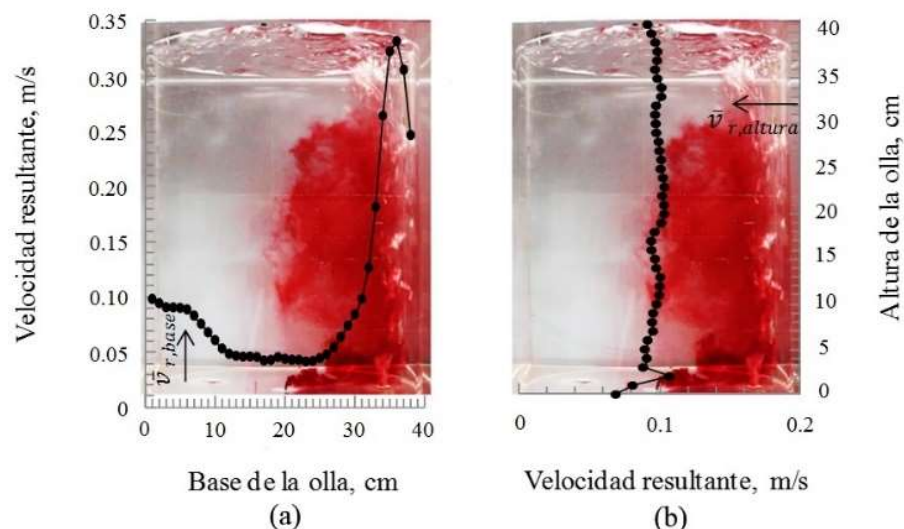


Figura 6. Promedio de las velocidades resultantes a) $\bar{v}_{r,base}$ con respecto base de la olla, b) $\bar{v}_{r,altura}$ con respecto a la altura de la olla.



escoria en este trabajo, se coloca una capa de aceite de 2 cm de espesor. El flujo que no choca con la superficie se desvía promoviendo la agitación de la olla. Las velocidades más bajas son localizadas en la parte central de la olla. En la Figura 6 se muestra la gráfica del promedio de las velocidades resultantes con respecto a la base de la olla $\bar{v}_{r,base}$ y con respecto a la altura $\bar{v}_{r,altura}$.

Para el caso de $\bar{v}_{r,base}$ se tiene que las velocidades de mayor magnitud se encuentran en las líneas de entrada del flujo de aire. La zona que se encuentra en el centro de la olla es la que presenta la zona de inactividad más grande. Con respecto a $\bar{v}_{r,altura}$ se observa un comportamiento muy similar a lo largo de la olla. Esto parte del hecho que en esta dirección la velocidad es positiva a la derecha y negativa a la izquierda, lo que produce este efecto.

4. Conclusiones

En este trabajo el caso de estudio es una olla metalúrgica de 135 toneladas. Se manufactura un modelo de acrílico a escala a 1:7 y se establecen las similitudes geométricas y dinámicas a cumplir. Se determina que son las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación quienes controlan el proceso. Se verifica que la viscosidad cinemática del agua-aire y acero – argón son del mismo orden de magnitud lo que permite utilizar el agua y el aire en el modelaje físico. Técnicas de colorimetría y de velocimetría de imágenes por partículas son utilizadas para determinar las zonas de menor actividad con respecto a la agitación. Estas zonas se encuentran en el centro de la olla. A partir de esta información se pueden formular diseños de toberas o tapones que mejoren la agitación en esta zona para obtener acero de mayor calidad.

Agradecimientos

Los autores GAA, GSD y AAC agradecen el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH.

Referencias bibliográficas

- Calderón-Hurtado, F. A., Morales Dávila, R., Chattopadhyay, K., & García-Hernández, S. 2019. "Fluid Flow Turbulence in the Proximities of the Metal-Slag Interface in Ladle Stirring Operations". *Metals*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/met9020192>
- Calderón-Ramos, I., de Jesús Barreto, J., & García-Hernández, S. (2013). "Physical and Mathematical Modelling of Liquid Steel Fluidynamics in a Billet Caster". *ISIJ international*, 53 (5). <https://bit.ly/3qPZmbz>
- Conejo, A. N., Kitamura, S., Maruoka, N., & Kim, S. J. (2013). "Effects of top layer, nozzle arrangement, and gas flow rate on mixing time in agitated ladles by bottom gas injection". *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(4). <https://bit.ly/3uZN8yD>
- Gómez, A. S., Conejo, A. N., & Zenit, R. 2018. "Effect of separation angle and nozzle radial position on mixing time in ladles with two nozzles". *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11 (1). <https://bit.ly/3NBuwNR>
- Renato González Bernal. 2008. Modelación Física de la Agitación del Acero Líquido Dentro del Horno Olla. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica.
- González-Bernal, R., Solorio-Díaz, G., Ramos-Banderas, A., Torres-Alonso, E., Hernández-Bocanegra, C. A., & Zenit, R. 2018. "Effect of the Fluid-Dynamic Structure on the Mixing Time of a Ladle Furnace". *Steel research international*, 89 (2), 1700281. <https://doi.org/10.1002/srin.201700281>
- Liu, Y., Bai, H., Liu, H., Ersson, M., Jönsson, P. G., & Gan, Y. 2019. "Physical and Numerical Modelling on the Mixing Condition in a 50 t Ladle". *Metals*, 9 (11). <https://doi.org/10.3390/met9111136>
- Maldonado-Parra, F. D., Ramírez-Argáez, M. A., Conejo, A. N., & González, C. 2011. "Effect of both radial position and number of porous plugs on chemical and thermal mixing in an industrial ladle involving two phase flow". *ISIJ international*, 51 (7). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1110>
- Terrazas, M. S. C., & Conejo, A. N. 2015. "Effect of nozzle diameter on mixing time during bottom-gas injection in metallurgical ladles". *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46 (2). <https://bit.ly/3LrD0Fb>