

1.- Título:

“Análisis estadístico del efecto de la posición angular de los tapones, el espesor de escoria, el flujo de gas y la simetría de los flujos sobre el tiempo de mezclado y área de ojo mediante modelado físico”

1a.- Tutores responsables: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez y M. en I. Luis Enrique Jardón Pérez.

2.- Introducción:

En el año 2016 la producción mundial de acero fue de 1, 603, 988 miles de toneladas, de las cuales 19, 002 fueron producidas en territorio mexicano (cerca de dos terceras partes de la capacidad de producción local), ocupando con esto el 13o lugar en producción mundial y siendo el segundo mayor productor de Norteamérica aportando un 17.12% de la producción de la región, solo por debajo de Estados Unidos [1, 2]. La demanda de acero en México se ha incrementado en un 161.6% del año 2007 al año 2018, llegando a ocupar el noveno lugar en la demanda anual de acero en el año 2018 con 27.6 millones de toneladas [2], cantidad muy superior a la producción local de acero. En México la industria siderurgia representa un 2.0% del PIB (6.9% del PIB industrial), generando aproximadamente 672 mil empleos de manera directa e indirecta. La producción de acero es además la industria que consume mayor cantidad de gas natural y ocupa el 3er lugar en consumo de energía eléctrica [1]. Con los datos mencionados nos damos cuenta de la enorme importancia que tiene la industria siderúrgica para el país.

Actualmente existen dos rutas principales para la producción de acero, la ruta integrada y la no integrada, en la primera se parte de mineral con valores ferrosos que se procesa en altos hornos o en hornos de reducción directa, obteniendo de esta manera hierro primario que puede ser arrabio (procesado en los Altos Hornos) o hierro esponja (procesado en reactores de Reducción Directa), posteriormente este hierro primario, si se trata de hierro esponja, pasa a un proceso de aceración en hornos de arco eléctrico (EAF) o bien, si se trata de arrabio, se acera en hornos básicos de oxígeno (BOF) para obtener acero. En el caso de la ruta no integrada se parte directamente de chatarra de acero que se funde en hornos de arco eléctrico. A pesar de que en ambas rutas se obtiene acero líquido, en este punto la calidad del mismo es deficiente, por lo que no es posible pasar al proceso de colada continua si se desea cumplir con los requerimientos actuales de calidad, por lo que en su lugar, se realiza a un proceso de refinación secundaria [3].

De los procesos de refinación secundaria el más frecuentemente utilizado es el horno de olla [3], ya que cumple con todos los objetivos principales de la refinación secundaria del acero, y su uso es tan extendido que muchas veces se denomina como metalurgia de la olla a la refinación secundaria. El horno de olla es un reactor en el que interactúan muchas fases, el acero líquido que se desea procesar, una capa de escoria superficial (óxidos fundidos), un gas inerte (típicamente argón) que se inyecta desde el fondo del reactor, y las inclusiones no metálicas que tiene el acero fundido. Sin embargo, desde una perspectiva de agitación del baño o de flujo de fluidos, son tres fases las que son importantes (acero, escoria y burbujas de gas). La capa de escoria sirve para proteger al acero de la oxidación al aislar el mismo del medio ambiente, además de que hay intercambio de especies químicas entre las fases acero – escoria lo que permite la desulfuración y atrapa las inclusiones del acero permitiendo su remoción. El gas por otra parte tiene la principal función de incrementar la agitación dentro del reactor, con lo cual los fenómenos de transporte se ven acelerados dentro del mismo, y por ende acelerando todas las operaciones metalúrgicas practicadas en la olla y aumentando la productividad de la planta.

Ante la creciente demanda de acero (no solo en cantidad, sino en calidad), en los últimos años se ha incrementado el interés industrial y académico en la metalurgia de la olla, buscando comprender la dinámica de fluidos, así como los fenómenos de transporte de especies químicas y de energía que ocurren dentro del

reactor, esto con el fin de incrementar la calidad final del acero, optimizar el consumo de insumos y disminuir los tiempos de procesamiento para cumplir con las exigencias del consumidor actual.

Dos de los principales objetivos de la investigación de horno de ollas son el tiempo de mezclado y la apertura del ojo en la escoria protectora, el tiempo de mezclado se ha utilizado a lo largo de los años como un criterio para la eficiencia de procesos por lotes (como es el caso del horno olla), por otra parte la apertura del ojo de escoria nos indica que tan protegido se encuentra el metal del ambiente, es por este motivo que frecuentemente se realizan análisis de proceso para obtener correlaciones de tiempo de mezclado y área de ojo evaluando el efecto de diversas variables en el mismo.

Dentro de los trabajos más recientes enfocados en estudiar el área de ojo en modelos físicos de ollas de aceración se encuentra el de Peranandhathan y Mazumdar en el año 2010 [4], en el cual obtienen una correlación para el área de ojo utilizando un modelo físico de agua con inyección de argón y evaluando distintos líquidos para simular la fase líquida superior, en su correlación se contempla el efecto del número de Froude, la relación de densidades de los dos líquidos en el modelo y el número de Reynolds. Otro trabajo reciente es el de Krishnapisharody y Irons (2015) [5], en el cual se utilizan datos experimentales de diversos autores para evaluar dos correlaciones de área de ojo, una para capas de escoria gruesas y otra para capas delgadas, considerando en ambas correlaciones el efecto de la altura del baño, la diferencia entre densidades de ambas fases líquidas, el flujo de gas y el espesor de la capa de escoria, obteniendo además un flujo de gas crítico, bajo del cual no se genera ojo en la capa de escoria.

En el caso del tiempo de mezclado se han realizado muchos trabajos experimentales para estudiar el mismo, muchos de los cuales se enfocan en obtener correlaciones para el mismo evaluando distintas variables, como mencionan Mazumdar y Guthrie en su revisión de la literatura del año 1995 [6] o Mazumdar y Evans en la revisión publicada en el año 2004 [7], pero en caso todos los estudios en que se evalúa el tiempo de mezclado en modelos físicos de horno olla se utilizan las técnicas intrusivas de pH-metría o conductimetría, tal es el caso de los trabajos de Amaro et al [8] (pH-metría) y Patil et al [9] (conductimetría). En el caso de Patil et al [9] (2010) se evalúa el efecto del flujo de gas, la altura del baño, el radio del reactor, el espesor de escoria, la densidad de las fases líquidas y la viscosidad cinemática de la escoria en el tiempo de mezclado, obteniéndose una correlación del tiempo de mezclado. Amaro et al [8] por su parte obtienen también una correlación de tiempo de mezclado en el año 2014, pero esta vez considerando el efecto del número de toberas, la energía de agitación, la posición radial de las toberas y el espesor de la capa de escoria.

Respecto al uso de la técnica PLIF no se ha reportado su uso para medir tiempo de mezclado en modelos físicos ollas agitadas por gas, aunque su uso en otros sistemas sí se ha reportado, siendo el más común los reactores agitados mediante rotores, tal como reporta Ascanio [10] en la revisión de técnicas experimentales en reactores agitados publicada en el año 2015, donde además se discuten algunas ventajas y desventajas de la técnica sobre otras opciones para medir tiempo de mezclado, siendo las ventajas más importantes el ser no intrusiva y permitir obtener contornos de concentración instantáneos durante el experimento.

3.- Hipótesis:

- En una olla de aceración agitada mediante dos tapones porosos el ángulo entre ambas posiciones de inyección tiene un efecto importante en la fluidinámica del sistema, siendo beneficioso para el proceso el colocarlas en un ángulo menor a 180° (entre una y otra) al eliminar zonas con baja turbulencia dentro del sistema, viéndose reflejado este cambio en el tiempo de mezclado y el área expuesta del ojo.

- El espesor de la capa de escoria y la inyección de flujos asimétricos modifican de manera importante la dinámica de fluidos del proceso de refinación secundaria del acero, siendo los flujos más asimétricos en ambos tapones los mejores en cuanto a disminuir los tiempos de mezclado.

4.- Objetivo(s):

- Evaluar el efecto de la posición angular de las toberas, el flujo de gas, la simetría de los flujos de aire y el espesor de aceite en un modelo físico de horno olla (agua/aire/aceite) con dos toberas sobre el tiempo de mezclado y el área de ojo, mediante un diseño factorial 2^k .
- Medir el tiempo de mezclado y el área de ojo mediante técnicas no intrusivas, PLIF y análisis de imágenes respectivamente.
- Obtener contornos de concentración instantáneos que ayuden a entender los mecanismos mediante los cuales se transportan especies químicas dentro del horno olla.

5.- Metas:

- Utilizando un diseño factorial 2^k y modelado físico, evaluar el efecto de las variables flujo de gas, posición angular de las toberas, simetría del flujo de gas y espesor de escoria sobre el tiempo de mezclado y el área de ojo expuesta en un horno olla.
- Realizar un análisis estadístico del diseño 2^k para obtener un modelo de regresión lineal que prediga el tiempo de mezclado y el área de ojo expuesta considerando el efecto de las variables principales estudiadas y sus interacciones.
- Escritura de un reporte final (80% de la tesis de licenciatura).

6.- Metodología:

El estudiante realizará las siguientes actividades para cumplir con los objetivos y metas del proyecto:

- Revisión de la literatura, enfocándose en estudios de modelado físico de horno olla donde se midan tiempos de mezclado y áreas de ojo expuestas.
- Capacitación en el uso del equipo PLIF, incluyendo las bases teóricas y la operación del equipo.
- Diseño de una matriz experimental 2^k , eligiendo los niveles y experimentos necesarios para evaluar las variables descritas en los objetivos del trabajo. Esta selección se basará en la revisión de la literatura previamente descrita y en conjunto con los tutores.
- Experimentación, realizar los experimentos planteados en la matriz experimental, en estos experimentos se obtendrán tanto las mediciones de tiempo de mezclado con PLIF como las áreas de ojo expuestas mediante análisis de imágenes en un modelo físico. Para realizar los experimentos se prepara previamente el modelo físico (para poder realizar mediciones de las técnicas ópticas) y se calcula el escalamiento mediante los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.
- Procesamiento de resultados, se realizará un análisis estadístico para obtener información de la significancia de las variables y su efecto sobre el tiempo de mezclado y área de ojo expuesta.
- Análisis de resultados, al obtener resultados de la experimentación se analizarán en conjunto de los tutores con el fin de evaluar el efecto de las variables exploradas, tanto cualitativamente como cuantitativamente, enfocándose sobre todo en el efecto sobre la fluidinámica del sistema.
- Escritura del reporte, se escribirá el reporte a lo largo de las 16 semanas del semestre con el objetivo último de tener una base suficiente para la escritura de la tesis de licenciatura.

7.- Infraestructura:

El grupo de trabajo cuenta con equipos de cómputo e impresoras suficientes. Además de dos modelos físicos de horno de olla escalados 1/6 y 1/17, así como el equipo necesario para implementar la técnica PLIF y realizar mediciones de apertura de ojo en escoria mediante análisis de imágenes.

8.- Cronograma de actividades:

En el siguiente cronograma se presentan de forma resumida las actividades a realizar y los tiempos estimados para las mismas.

No.	Actividad	Semana															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Revisión de la literatura	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x
2	Capacitación en el uso del equipo PLIF			x	x	x											
3	Diseño de una matriz experimental					x	x										
4	Experimentación						x	x	x	x			x	x			
5	Procesamiento de resultados									x	x		x	x	x		
6	Análisis de resultados											x	x	x	x	x	
7	Escritura del reporte				x				x				x			x	x

9.- Cometarios adicionales:

Este trabajo se enmarca en el proyecto de doctorado del alumno M. en I. Luis Enrique Jardón Pérez.

10.- Referencias:

- 1.- CANACERO. Acero en cifras. 2017 [citado 22/05/2018]; dirección web: <http://www.canacero.org.mx>.
- 2.-Worldsteel association. About steel. 2018 [citado 22/05/2018]; dirección web: <https://www.worldsteel.org>.
- 3.-Ghosh, A., Secondary steelmaking: principles and applications. 2000: CRC Press.
- 4.-Peranandhanthan, M. and D. Mazumdar, Modeling of slag eye area in argon stirred ladles. ISIJ international, 2010. 50(11): p. 1622-1631.
- 5.-Krishnapisharody, K. and G.A. Irons, A model for slag eyes in steel refining ladles covered with thick slag. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015. 46(1): p. 191-198.
- 6.-Mazumdar, D. and R.I.L. Guthrie, The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems. ISIJ international, 1995. 35(1): p. 1-20.
- 7.-Mazumdar, D. and J.W. Evans, Macroscopic models for gas stirred ladles. ISIJ international, 2004. 44(3): p. 447-461.
- 8.-AmaroVilleda, A.M., M.A. Ramirez Argaez, and A.N. Conejo, Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling. ISIJ international, 2014. 54(1): p. 1-8.
- 9.-Patil, S.P., et al., Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles. ISIJ International, 2010. 50(8): p. 1117-1124.
- 10.-Ascanio, G., Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015. 23(7): p. 1065-1076.