



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Química

“Efecto del flujo de gas, posición de inyección
y número de inyectores sobre la cinética
de remoción de inclusiones en ollas de
acero agitadas con gas mediante
modelado físico”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
P R E S E N T A :
HUMBERTO MARTÍNEZ ÁLVAREZ





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

PRESIDENTE: Profesor: Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco
VOCAL: Profesor: Carlos González Rivera
SECRETARIO: Profesor: Marco Aurelio Ramírez Argáez
1er SUPLENTE: Profesor: Juan Solórzano López
2do SUPLENTE: Profesor: Adrián Manuel Amaro Villeda

Sitio donde se desarrolló el tema:

Edificio D

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Facultad de Química

Asesor del tema:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

Supervisor técnico:

M. en I. Adrián Manuel Amaro Villeda

Sustentante:

Humberto Martínez Álvarez

Agradecimientos

A mi madre y padre por su confianza, sabiduría y amor incondicional demostrado en todo momento. Los admiro.

A Georgina por llegar a mi vida para compartir nuestra felicidad por el resto de nuestros días. Te amo.

A mis hermanas por todo su cariño y apoyo brindado. Las quiero.

A toda mi familia muégano por que cada uno me ha dejado huella y enseñanzas. Los respeto.

A Chino y Haarón por su esfuerzo y ayuda en la experimentación.

A todos mis amigos por los momentos inolvidables que hemos pasado juntos.

Al Dr. Marco Aurelio por sus ideas, tiempo y orientación en la realización de la tesis.

Al M. en I. Adrián Amaro por su toda su creatividad y entrega en el proyecto.

Al Dr. Carlos González y el Ing. Candido Atlatenco por sus comentarios y revisión del trabajo escrito.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A partir de un cierto punto ya no hay vuelta atrás.

Hay que llegar a ese punto.

Franz Kafka

Índice General

Capítulo 1. Marco teórico	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Rutas en la producción de acero	3
1.3. Aspectos económicos de la producción de acero en México	6
1.4. Planteamiento y justificación del problema	9
1.5. Hipótesis	12
1.6. Objetivos	13
1.7. Revisión bibliográfica	13
Capítulo 2. Experimentación	19
2.1. Criterios de similitud.	19
2.2. Instalación del modelo físico	23
2.3. Protocolo experimental	27

Capítulo 3. Resultados y discusión	32
3.1. Observaciones experimentales	32
3.2. Efecto del flujo de gas	34
3.3. Efecto de la posición del inyector	40
3.4. Efecto del número de inyectores	44
3.5. Evaluación cuantitativa de la cinética de remoción de inclusiones	50
Capítulo 4. Conclusiones	55
Referencias	57

Capítulo 1:

Marco teórico

En este capítulo se presentan las rutas de procesamiento del acero y la evolución de los procesos de aceración. Además, se muestra la situación económica actual de la producción del acero, señalando la posición e influencia de México en la industria siderúrgica mundial. Se hace una descripción del proceso de refinación secundaria del acero en el horno olla y los objetivos que buscan alcanzarse en esta operación; también se justifica y se plantea el caso de estudio de la eliminación de inclusiones mediante modelación física y se señalan la hipótesis y el objetivo del trabajo realizado. Finalmente se da una revisión bibliográfica de trabajos relacionados al estudio de la remoción de inclusiones mediante modelado físico.

1.1. Antecedentes

El acero tiene una variedad muy grande de aleaciones que llevan su nombre, por lo que no es fácil dar una definición precisa y concisa al material, pero básicamente se puede definir al acero como una aleación de hierro que contiene desde una cantidad muy pequeña de carbono disuelto, 0.005 % en aceros de ultra bajo carbono, hasta un máximo de 2.11 % en aceros para herramientas de alto carbono, además,

puede poseer distintos elementos de adición añadidos para propósitos determinados. Por sus diversos tipos de aleaciones es posible darle múltiples aplicaciones en diferentes industrias y sectores como la construcción, automotriz, transporte, aeroespacial, médica y energética, por mencionar algunas. El acero es uno de los materiales más complejos y ampliamente utilizados debido a diversos factores como la enorme abundancia del hierro en la corteza de la tierra, la alta temperatura de fusión del hierro (1534 °C), un amplia gama de propiedades mecánicas, como los son un moderado límite de elasticidad (200-300 MPa), excelente ductilidad a más de 1400 MPa de esfuerzo de fluencia y resistencia a la fractura de hasta 100 MPa m^{1/2}, así como la variedad de microestructuras producidas por las transformaciones de fase en estado sólido variando la rapidez de enfriamiento desde la fase austenítica [1].

La historia del acero comienza con la sustitución y los avances en la fabricación de aleaciones de hierro. Hasta principios de 1800 el acero era difícil de fabricar y costoso ya que se realizaba mediante el proceso de cementación, que consistía en empaçar barras de hierro forjado con carbono pulverizado, capa sobre capa, dentro de un depósito de piedra el cuál era calentado por varios días para obtener el llamado acero blister. Benjamín Hunstman, posteriormente, descubrió que el acero blister al ser fundido en crisoles de arcilla y emplear un fundente especial, podía eliminar partículas de escoria obteniendo un acero más refinado conocido como acero de crisol. No obstante, la producción en masa de acero fue posible hasta 1856 con el proceso Bessemer, conocido así por su inventor, el metalurgista Sir Henry Bessemer, el cuál implementó un convertidor cargado de arrabio fundido al que se le inyectaba aire comprimido. A finales de 1860 aparece el horno de reverbero Siemens, en el cual se añadía hierro forjado al arrabio fundido hasta que el contenido de carbono se reducía por dilución y oxidación, reutilizando los gases de escape para precalentar el aire y los gases antes de la combustión. A finales de 1860 aparece el horno de reverbero

Siemens, en el cual se añadía hierro forjado al arrabio fundido hasta que el contenido de carbono se reducía por dilución y oxidación, reutilizando los gases de escape para precalentar el aire y los gases antes de la combustión. En 1900 el convertidor ácido Bessemer fue reemplazado por el horno Siemens, que a su vez fue sustituido a mediados de 1960 por el proceso básico del convertidor Thomas que evolucionó en el actual convertidor básico de oxígeno (BOF por sus siglas en inglés) y por el también actual horno de arco eléctrico [2].

1.2. Rutas en la producción de acero

Actualmente, como se muestra en la Figura 1.1, se tienen dos rutas en el proceso de fabricación del acero: rutas integradas y la ruta no integrada. Una de las dos rutas integradas que existen actualmente para fabricar acero, parte de mineral virgen que aporta la mayor cantidad de hierro. Este mineral se extrae, se concentra y se sinteriza para fabricar pellets que pueden procesarse en un reactor llamado Alto Horno. En este reactor descienden los pellets desde la parte superior, siendo calentados y reducidos por gases reductores como monóxido de carbono (CO), que viajan a contracorriente generados por la oxidación del coque con oxígeno del aire caliente que se inyecta por toberas localizadas en la parte inferior. Los óxidos de hierro (FeO , Fe_2O_3) se reducen por el CO para producir arrabio [3]. El arrabio fundido proveniente del Alto Horno se transforma en acero líquido en el BOF donde se inyecta oxígeno a una velocidad supersónica a través de una lanza enfriada con agua por la parte superior del baño para realizar la decarburación y la eliminación del fósforo del arrabio, así como el ajuste de la temperatura del acero para las operaciones posteriores. El acero producido en el BOF aún contiene muchas

impurezas por lo que se debe refinar en el reactor llamado Horno Olla haciendo diferentes tratamientos como ajustes de composición, desgasificación, agitación y recalentamiento antes de pasarlo a la colada continua a través de un distribuidor hacia un molde de cobre enfriado con agua provocando la solidificación continua de planchones, palanquillas, tochos u otros productos que se extraen mediante una serie de rodillos guía. Estos sólidos son llevados finalmente a un proceso de deformación (laminación) para obtener los productos terminados tales como: varillas, alambón, láminas, perfiles, rieles, etc. [4].

La ruta no integrada por su parte, comienza con la fusión de chatarra de hierro en el horno de arco eléctrico. Tradicionalmente la chatarra es utilizada como la única materia prima, pero el uso de hierro esponja (DRI por sus siglas en inglés, el cual proviene de otra ruta integrada donde el pellet se reduce en reactores de Reducción Directa), o incluso arrabio pueden cargarse al horno eléctrico durante el proceso de aceración. En el horno eléctrico se aplica calor al baño de acero a través de una descarga eléctrica aplicada por electrodos de grafito, llamado arco eléctrico. Una vez producido el acero, la ruta no integrada continúa de la misma manera con una refinación secundaria en el horno olla, seguido por los procesos de colada continua y de deformación [5] ya descritos.

La aceración a través del BOF aporta el 60% de la producción mundial total de acero, mientras que el proceso de horno eléctrico de arco aporta el resto de la producción de acero y ha logrado incrementarse en ciertos países por las diversas ventajas asociadas al proceso como la alta calidad del acero producido y la alta disponibilidad de chatarra [6].

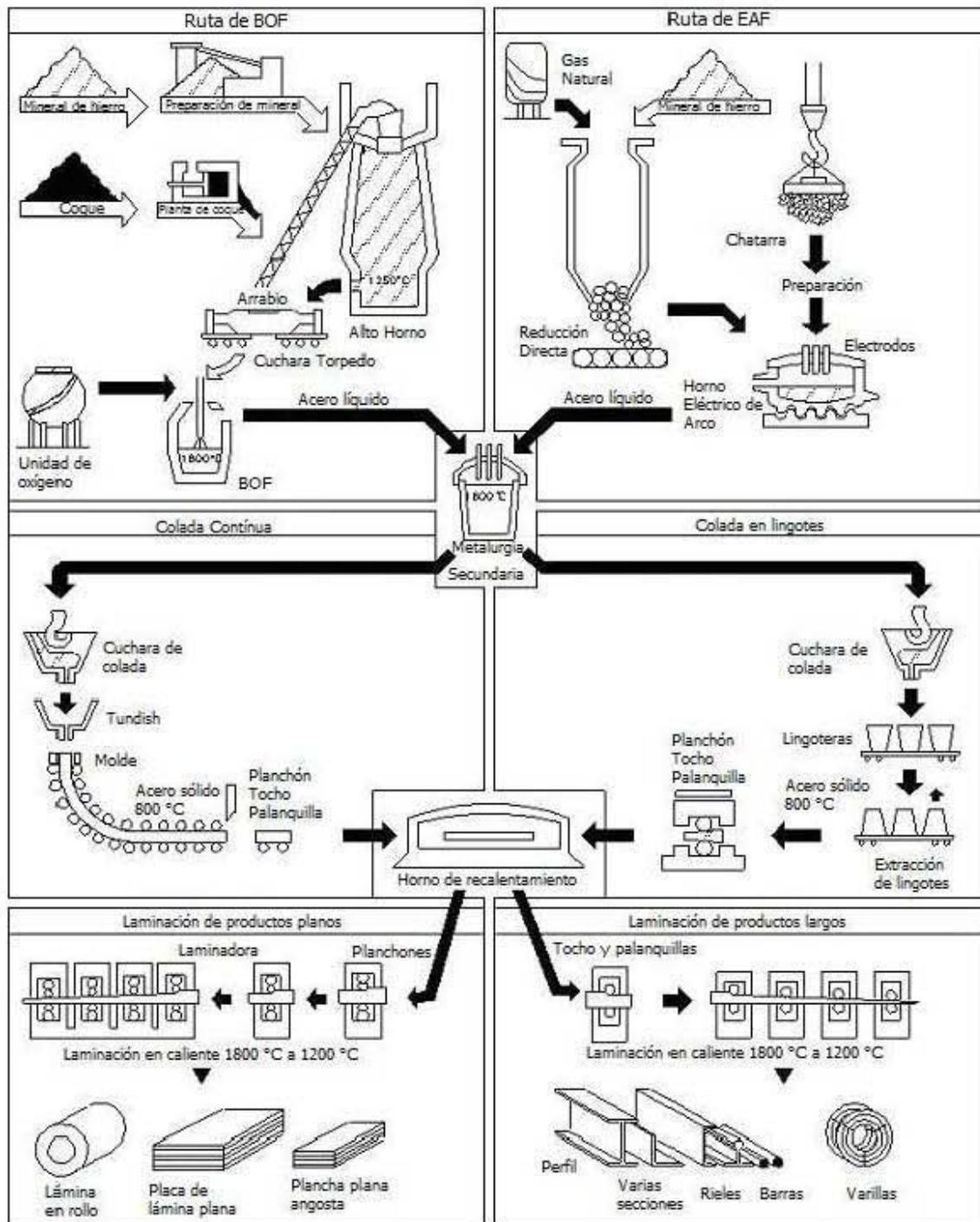


Figura 1.1: Procesos de producción de acero [7]

1.3. Aspectos económicos de la producción de acero en México

En el año 2011 se mostró un avance en la industria siderúrgica, teniendo una producción mundial de mil 527 millones de toneladas de acero, un 6.8 por ciento más que en 2010, además con crecimientos considerables en países como Turquía, Corea del Sur e Italia. China, el mayor productor de acero, tuvo una producción en 2011 de 695 millones de toneladas, con un aumento del 10.8 por ciento respecto al 2010 y que representa el 46 por ciento de la producción total mundial [8].

En cuanto a México, el sector acero es sumamente importante tanto nacional como mundialmente. En el año 2011 México se colocó en la décimo tercera posición mundial (1.2 % del total) y segunda en América Latina (26.7 % del total regional) con 18 millones de toneladas por encima de países como España y Francia, teniendo el récord más alto en los últimos 5 años, como se observa en la Figura 1.2, Esta producción generó una contribución del acero al Producto Interno Bruto (PIB) de 381 mil millones de pesos, equivalente al 15 % del PIB manufacturero, 7.5 % del PIB industrial y 2.6 % nacional [9].

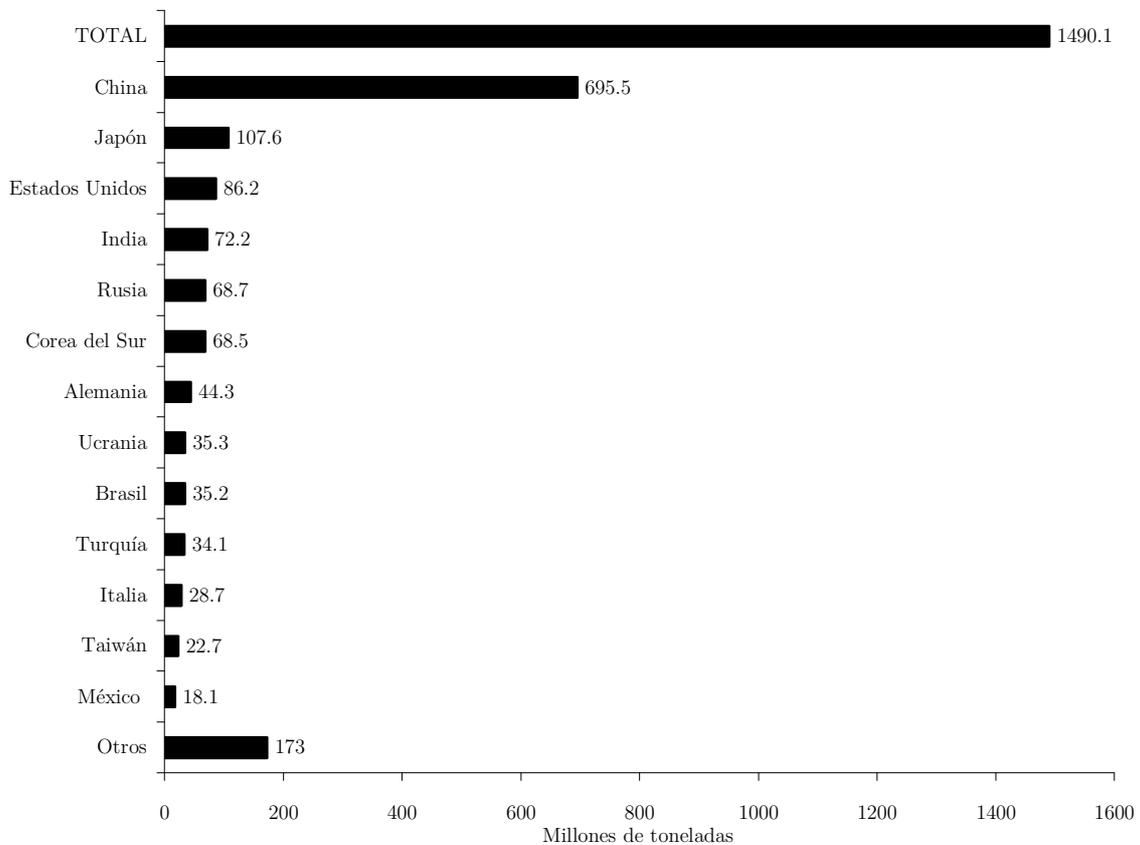


Figura 1.2: Principales países productores de acero durante el año 2011 [10]

En lo que respecta a la producción nacional, como se observa en la Tabla 1.1, desde el año 2005 la producción en las empresas siderúrgicas han mantenido un incremento considerable logrando superar obstáculos como la crisis del año 2009, donde prácticamente toda la industria mundial del acero disminuyó su producción. Arcelor Mittal se coloca como la mayor empresa productora con un crecimiento del 39% respecto al 2009. Las empresas AHMSA y Ternium se colocan en la segunda y tercera posición respectivamente, teniendo esta última una tendencia constante y sin variación de consideración desde los últimos cinco años.

Tabla 1.1: Producción de acero por empresas en México, 2005-2010

(Miles de toneladas) [11].

Empresa	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Total	16282	16447	17573	17209	14132	16710
Altos Hornos de México, SA	3244	3366	3541	3667	2990	3690
Hierro y Lámina, SA	3182	3222	3212	2975	3038	3381
Arcelor Mittal	5011	4784	5192	4987	2874	3949
Deacero	1448	1568	2126	2089	2038	2266
Tubos de Acero de México, SA	933	943	810	825	701	869
Otras acererías	2464	2564	2692	2666	2491	2555

En lo que respecta a la producción de acero por zona geográfica en el país, se muestra en la Figura 1.3 la distribución de las principales empresas siderúrgicas, teniendo para el 2011 en el estado de Coahuila la mayor producción con el 33.6% del total nacional, seguido por Michoacán con el 22.5% y que ha mostrado una gran disminución de aproximadamente el 30% de su producción en los últimos 10 años, y en tercer lugar el estado de Nuevo León con el 15.4% de producción de acero a nivel nacional [12].



Figura 1.3: Distribución geográfica de las empresas siderúrgicas en México [9]

1.4 Planteamiento y justificación del problema

Esta tesis se centra en la refinación secundaria del acero, específicamente en el Horno Olla. El Horno Olla es un reactor metalúrgico en donde se realiza la refinación del acero en estado líquido. Un esquema de este reactor se observa en la Figura 1.4. A todo el conjunto de operaciones que se llevan a cabo durante esta etapa también se le conoce como refinación secundaria. Esta etapa es sumamente importante ya que como se mencionó en secciones anteriores, después de la etapa de aceración por cualquiera de los dos procesos (BOF u Horno eléctrico de arco), es necesario realizar la limpieza del acero mediante la metalurgia de la olla para mejorar la calidad del acero significativamente antes de pasar al acero a la máquina de colada continua, ya que es muy difícil llevar a cabo ciertos aspectos de refinación en condiciones oxidantes dentro de un convertidor de oxígeno (BOF) o un horno de arco eléctrico.

Por ejemplo, la desulfuración, se realiza únicamente bajo condiciones reductoras o cuando el contenido de oxígeno en el acero es muy bajo.

Actualmente todo el acero producido en el mundo utiliza la refinación secundaria en reactores diferentes a los de aceración o refinación primaria [13].

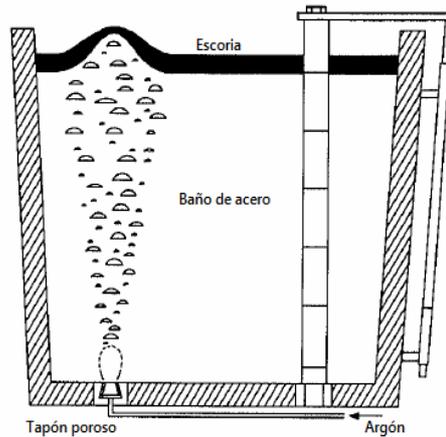


Figura 1.4: Representación esquemática de un horno olla [14]

La refinación secundaria en la Olla se acelera con la agitación del baño líquido mediante la inyección de gas argón por el fondo del reactor a través de tapones porosos. Esta inyección provoca la recirculación y agitación del acero líquido, por lo que se incrementan las velocidades o cinéticas de eliminación de elementos residuales e inclusiones nocivos a las propiedades mecánicas del acero, ya que estas eliminaciones son gobernadas por la transferencia de masa, aumentando la productividad y ahorro de la energía eléctrica, lo que conlleva a una reducción de los costos de producción.

En el horno olla pueden alcanzarse diversos objetivos tales como [13] [15]:

- Incorporación eficiente de elementos aleantes.
- Eliminación de elementos residuales nocivos al acero como lo son oxígeno, azufre, fósforo, nitrógeno e hidrógeno, a través de intercambios metal-escoria y gas-metal.
- Mejorar la homogenización térmica y química.
- Controlar la temperatura y composición química.
- Control de forma de sulfuros y óxidos.
- Eliminación de inclusiones no metálicas o su modificación morfológica.

Este último punto (eliminación de inclusiones) es el que resulta de interés para el presente trabajo, ya que las inclusiones no metálicas como óxidos (FeO , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO), sulfuros (FeS , CaS , MnS , MgS), óxido sulfuros (MnS.MnO , $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaS}$), nitruros (TiN , AlN , VN) y fosfuros (Fe_3P , Mn_5P_2) son perjudiciales para las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión del acero, principalmente las llamadas macro inclusiones con un tamaño mayor de $100\ \mu\text{m}$. Por esta razón es fundamental obtener un acero “limpio” ya que existen alrededor de 1000 inclusiones por cada tonelada producida de acero [16]. Las inclusiones existen debido a su formación durante la transferencia de acero líquido de un reactor a otro o en la solidificación del acero, llevándose a cabo por distintos mecanismos como:

- La reacción entre los elementos rechazados en el soluto durante la solidificación, por ejemplo, la reacción entre el azufre y manganeso o entre el oxígeno y el aluminio.

- La erosión mecánica y química de los materiales refractarios.
- El oxígeno en exceso retenido formando posteriormente óxidos.
- Las reacciones químicas en el proceso

Realizar estudios en planta de la cinética de remoción de inclusiones resulta muy complicado y costoso, por lo que otra herramienta usada en la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos además de la medición en planta, es el modelado físico, que en condiciones tan agresivas de operación como las de la Olla (alta temperatura) tiene una gran importancia al facilitar y proveer condiciones seguras para la experimentación. El modelo físico acoplado a un modelo matemático puede dar un panorama muy cercano a la realidad del proceso.

1.5. Hipótesis

Se puede simular el sistema de un horno olla compuesto de acero-escoria-inclusiones mediante un modelo físico utilizando agua, monómero de metilmetacrilato y partículas de polimetilmetacrilato, respectivamente, para conocer la cinética de eliminación de inclusiones no metálicas. Con el modelo físico se pueden estimar cuantitativamente los efectos de las principales variables de operación y diseño (flujo de gas, posición y número de inyectores) sobre la cinética de eliminación de inclusiones.

1.6. Objetivos

1. Determinar la cinética de eliminación de inclusiones mediante una nueva metodología experimental en función del flujo de gas, posición del inyector y número de inyectores en un modelo físico de una olla de acero agitada con gas.
2. Establecer el efecto del flujo de gas, posición de inyector y número de inyectores sobre la cinética de remoción de inclusiones de una olla de acero agitada con gas mediante modelado físico.
3. Proponer en base a los resultados una práctica idónea para la remoción de inclusiones no metálicas.

1.7. Revisión bibliográfica

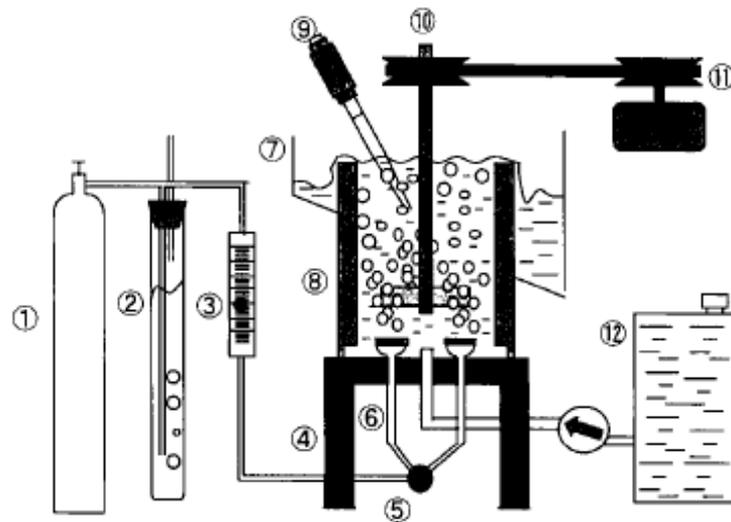
El estudio acerca de simulación física de remoción de inclusiones es pobre hasta la fecha, por lo cuál se cuenta con pocos trabajos de investigación que aborden este tema.

Un trabajo relacionado es el presentado por Zhang L., Tanaguchi S., y Matsumoto K. [17] [18], donde investigaron la remoción de inclusiones mediante la flotación de burbujas implementando un modelo físico.

Primeramente, estudiaron el efecto del tamaño de burbuja con variables como la rapidez del flujo de gas inyectado, el tamaño de los poros del tapón, la concentración de NaCl (empleado como surfactante) y la intensidad de la agitación del reactor. Posteriormente, con los resultados obtenidos investigaron el efecto de la remoción de partículas utilizando variables como la rapidez de desbordamiento, la concentración

inicial de partículas, la rapidez de flujo de gas, la velocidad de agitación y el tamaño de burbuja y partícula.

Para la parte experimental implementaron un modelo físico de la Olla que consistió en un recipiente cilíndrico de acrílico con dimensiones de 0.1 m de diámetro y 0.3 m de altura, agua y partículas de polimetilmetacrilato, para simular al acero líquido y las inclusiones no metálicas respectivamente. En este caso se mantuvo la inyección de nitrógeno para la generación de burbujas como se lleva a cabo comúnmente en la industria. El modelo físico se esquematiza en la Figura 1.5.



1: tanque de gas; 2: tubo de sobreflujo; 3: rotámetro; 4: mesa; 5: válvula de inyección de gas; 6: tubo de vidrio con filtro en la parte superior; 7: receptor de sobreflujo; 8: recipiente de acrílico; 9: muestras; 10: agitador; 11: motor; 12: tanque de agua.

Figura 1.5: Esquema del equipo experimental de la remoción de partículas por flotación de burbujas [17]

Encontraron que con un aumento de la rapidez de desbordamiento y flujo de gas se acelera la remoción para un mismo tamaño de partículas. Además, con una menor concentración inicial de inclusiones disminuye la rapidez de remoción de inclusiones. También encontraron que si la velocidad de agitación se mantiene baja, la

turbulencia no es suficientemente fuerte para remover las partículas, además, el tamaño de burbuja aumenta en estas condiciones, lo que provoca una disminución de probabilidad de colisión con la partícula. Por el contrario, con una alta velocidad de agitación, es mayor la turbulencia que genera burbujas muy pequeñas y aumenta la probabilidad de adhesión de partículas. Para el efecto del tamaño partícula utilizaron una distribución de partículas como se muestra en la Figura 1.6.

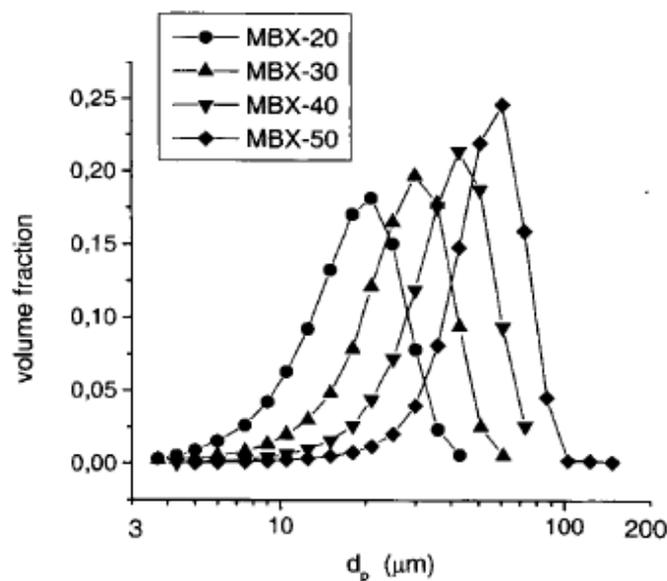


Figura 1.6: Distribución de tamaño de tamaño de la remoción de partículas por flotación de burbujas [17]

Observaron que las partículas de mayor tamaño se remueven más rápidamente por flotación de burbujas que las partículas más pequeñas. Concluyeron que la remoción de partículas por flotación de burbujas depende de la concentración inicial de partículas y la favorece el flujo alto gas, tamaño de burbuja pequeño, tamaño de partícula grande y condiciones fuertes de agitación.

Como crítica a este trabajo, el modelo físico usó variables y condiciones de operación que no representan de forma realista la refinación secundaria que se emplea industrialmente en nuestro país, como la agitación aportada por el rotor para la generación de burbujas finas o el desbordamiento constante del baño líquido; además, no se considera a la capa de escoria en el sistema lo que hace que los resultados experimentales se alejen aún más a los que suceden en la realidad.

Otro trabajo es el realizado por Zheng S. G, y Zhu M. Y. [19], donde investigaron la remoción de inclusiones mediante el efecto del tiempo burbujeo y flujo de argón inyectado implementando un modelo físico. El equipo experimental consta de un recipiente de acrílico escalado a 1:9, una solución de NaCl, aire y gotas de dibutil ftalato para simular la olla, acero líquido, argón e inclusiones no metálicas respectivamente, teniendo un arreglo experimental y una curva de distribución de tamaño de gotas de emulsión como lo muestra la Figura 1.7.

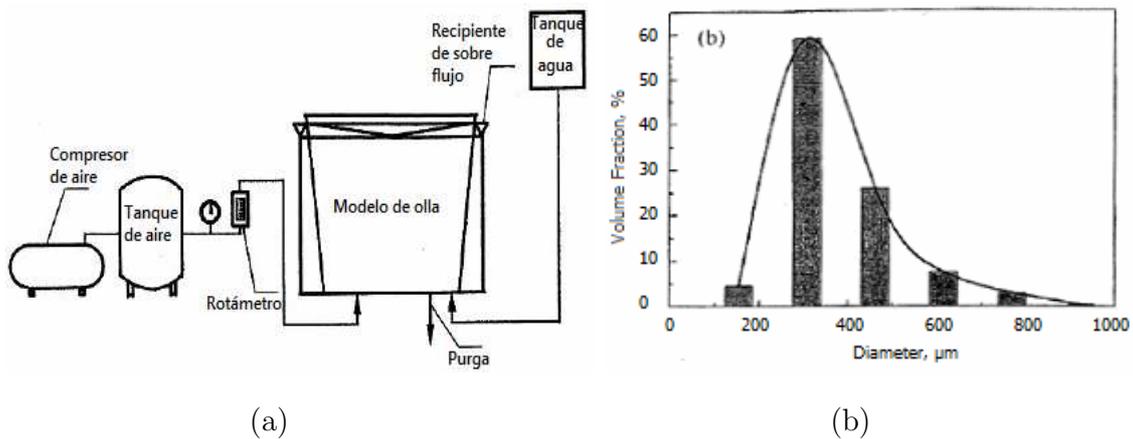


Figura 1.7: Esquema del equipo experimental (a) y distribución de tamaño de gotas (b) de la refinación secundaria mediante burbujeo de argón [19]

El efecto de las gotas que representan a las inclusiones es estar en colisión entre sí para poder flotar sin desprenderse y finalmente ser desbordadas. En la experimentación encontraron que hay una mayor remoción de inclusiones en los primeros 8 minutos de burbujeo y con el menor flujo de gas, ya que al aumentar el flujo se necesita el doble del tiempo para igualar el porcentaje de remoción, obteniendo una remoción total de inclusiones hasta los 26 minutos de burbujeo. También concluyeron, que a flujos bajos el mecanismo que controla la remoción es por atrapamiento de burbujas y a flujos altos es por la “estela” que generan las burbujas de gran tamaño, que provoca que las gotas de dibutil ftalato sean arrastradas. En este trabajo consideran la remoción de inclusiones como una eliminación por flotación y, como se mencionó anteriormente, este hecho no representa la realidad industrial; además, de la misma manera que en la otra investigación [17], se desprecia a la capa de escoria que tiene un gran efecto durante el proceso de eliminación. Otro aspecto negativo de este estudio es que en la distribución de tamaño de gotas de emulsión que simulan a las inclusiones no metálicas, se observan intervalos de tamaños desde 120 μm a 800 μm de diámetro, valores que no satisfacen los criterios de similitud dinámica del trabajo experimental.

Kang Y., Yu L. y Sichen D. [20], estudiaron la remoción de inclusiones mediante la creación de un ojo abierto por la salida de burbujas generadas por un flujo turbulento de gas. Utilizaron un reactor de polimetilmetacrilato, agua y aceite de silicón para simular la olla, el acero líquido y la escoria respectivamente. En la Figura 1.8 se observa una foto de la apertura del ojo en la capa de escoria.

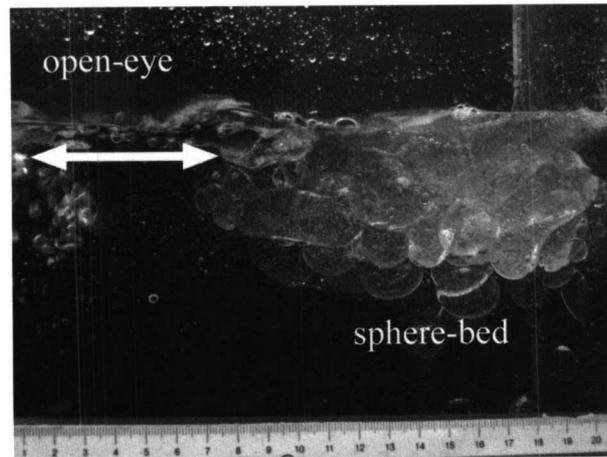


Figura 1.8: Ojo abierto y capa de escoria [20]

Las inclusiones se simularon con partículas de carbón y gotas finas de aceite de silicón. Por la acción del flujo turbulento se formaba como escoria una cama de esferas compuesta de gotas de silicón cubiertas por una pequeña capa de agua, la cual funcionaba como filtro para retener algunas partículas de carbón y de gotas de silicón, pero otras volvían al baño líquido, obteniendo una mejor remoción al tener tamaños grandes de inclusiones pasando a través de gotas pequeñas de silicón que forma la escoria y con flujos altos de gas. Los autores del trabajo cumplen con la mayoría de los criterios de similitud (cinemático y dinámico) y representan de mejor forma la interacción del sistema ya que involucran una capa de escoria. Sin embargo, no se justifica en la experimentación un factor de escala del modelo con el prototipo, como lo es el diámetro del inyector tan grande (10 mm), el flujo turbulento de gas (1.7 y 3 L/min) y el tamaño de partículas (45, 87 y 140 μm), considerando un reactor de dimensiones de 250 mm de diámetro por 400 mm de altura, incumpliendo con el criterio de similitud geométrico.

Los trabajos de la literatura revisados demuestran la dificultad e importancia que se debe tener para seleccionar el material, equipo y condiciones de operación

adecuados para realizar la experimentación con modelado físico, ya que entre los mismos resultados aportados se muestran contradicciones entre los autores. Por lo tanto, la valía en el presente trabajo es el utilizar una metodología experimental muy distinta a la estudiada hasta ahora, cumpliendo con los criterios de similitud de mejor manera y así tener un acercamiento con el proceso real de refinación secundaria; además, estudiando el efecto de las principales variables que afectan la cinética de remoción de inclusiones, como el flujo de gas, el número y posición de inyectores, estos dos últimos puntos siendo una marcada diferencia y mejoría respecto a los trabajos desarrollados previamente por otros autores y comentados con anterioridad.

Capítulo 2:

Experimentación

En la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos se cuenta con diversas herramientas que ayudan a la resolución de problemas en la metalurgia. Una de estas herramientas es la modelación física, cuyo objetivo es hacer una representación realista de un sistema utilizando materiales y equipo con los cuales se puedan realizar mediciones a un costo efectivo. Un modelo físico se clasifica según la exactitud y semejanza que muestra con el sistema (prototipo) a simular. Por esta razón, el modelo físico del horno olla utilizado en el presente trabajo se clasifica como riguroso, ya que como se explicará a continuación, cumple estrictamente con los criterios de similitud que describen el comportamiento del sistema real [21].

2.1. Criterios de similitud

Los criterios de similitud son el requisito para la representación real de un sistema a simular, entre los que se encuentran similitudes de tipo: geométrica, dinámica, térmica, cinemática y química. En la mayoría de los casos, al implementar la herramienta de modelación física es muy complicado satisfacer todos los criterios

simultáneamente, por lo tanto, se deben establecer restricciones y considerar únicamente algún aspecto del sistema para ser investigado. Debido a que los criterios de similitud química y térmica son muy difíciles de alcanzar y en el caso del estudio de remoción de inclusiones en ollas de acero se requiere comprender la fluidinámica del sistema, los criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática son suficientes para simular el proceso de forma satisfactoria [21].

La similitud geométrica, como su nombre lo sugiere, es la similitud de la forma cuando se tiene una relación de las medidas de longitud de los materiales entre el modelo y el prototipo, conocida como factor de escala λ . La similitud dinámica mantiene en una relación fija entre las fuerzas que actúan en el sistema real y el modelo y que provocan el movimiento del fluido. Para la simulación de hornos olla se puede satisfacer el criterio de similitud dinámica igualando el número adimensional de Froude modificado (fuerzas inerciales/fuerzas boyantes) en ambos sistemas. La similitud cinemática se refiere al movimiento y se logra cuando se satisface la similitud dinámica y los fluidos entre el sistema real y el modelo poseen las mismas viscosidades cinemáticas.

El modelo físico del horno olla utilizado en este trabajo fue construido previamente [22] tomando las dimensiones del prototipo de un horno olla industrial de la empresa TAMSA considerando un factor de escala $\lambda = 1/6$. En lo que corresponde a la simulación del argón como gas de inyección y al acero como líquido a refinar, se conoce por medio de la literatura especializada los materiales con los cuales pueden ser simulados eficazmente por sus propiedades, siendo el aire y agua los implementados en el modelo. Lo complejo en el modelo físico se encuentra en los materiales a simular tanto a la escoria como las inclusiones no metálicas, ya que la interacción entre ellos debe ser tal que la escoria logre atrapar a las inclusiones no

metálicas. Por tal motivo, se decidió utilizar lo investigado y reportado en la literatura [23], donde se usa monómero de metilmetacrilato (MMA) combinado con polietileno de baja densidad y partículas finas de polimetilmetacrilato (PMMA) para simular la escoria y las inclusiones no metálicas respectivamente (estudio hecho en esta Facultad dentro del mismo grupo de investigación). Sin embargo, en la experimentación se realizó una pequeña variación respecto a la técnica reportada por González Martínez [23], al descartar el uso de polietileno de baja densidad como parte de la escoria, ya que el MMA era suficiente para obtener dicha capa simulada.

La Tabla 2.1 muestra a detalle las características del modelo y las propiedades físicas de los materiales utilizados en el modelo físico que validan el cumplimiento de los criterios de similitud establecidos. En el último renglón de la Tabla 2.1, se presentan las velocidades terminales de las partículas calculadas con la ley de Stokes y que asumen que las partículas flotan o se sedimentan por fuerzas boyantes en un líquido estático. Se nota que por si solas las partículas que simulan a las inclusiones no flotan, sino que sedimentan, lo cual es contrario al comportamiento de las inclusiones en el acero (flotan). Sin embargo, las partículas son tan pequeñas que la velocidad de sedimentación es mínima, por lo que el movimiento de estas es principalmente promovido por el arrastre del líquido, lo que es suficiente para simular la cinética de eliminación de inclusiones pequeñas en el acero, las cuales flotan muy despacio y solo pueden eliminarse por el arrastre de las burbujas.

Tabla 2.1: Parámetros del prototipo y modelo físico y propiedades físicas de los materiales empleados

	Prototipo	Modelo físico
Reactor	Horno olla industrial (TAMSA)	Recipiente de acrílico
Altura (m) [22]	3.736	0.622
Diámetro (m) [22]	3.226	0.537
Líquido	Acero	Agua
Densidad acero/agua (kg/m ³) [24]	7020	1000
Viscosidad acero/agua (kg/ms) [24]	7×10^{-3}	1×10^{-3}
Viscosidad cinemática acero/agua (m ² /s) [24]	1×10^{-6}	1×10^{-6}
Temperatura (°C)	1600	25
Capa líquida	Escoria	Monómero de metilmetacrilato
Densidad escoria/MMA (kg/m ³) [25] [26]	4500	940
Viscosidad escoria/MMA (kg/ms) [25] [26]	3.5×10^{-1}	6×10^{-4}
Viscosidad cinemática escoria/MMA (m ² /s) [25] [26]	7.78×10^{-5}	6.4×10^{-7}
Temperatura (°C)	1200	25
Gas	Argón	Aire
Densidad argón/aire (kg/m ³) [27]	1.5	1.2
Partículas dentro del líquido	Inclusiones no metálicas	Partículas de polimetilmetacrilato
Tamaño (μm) [28]	10-140	2-150
Densidad inclusiones/PMMA (kg/m ³) [29] [17]	2700	1200
Velocidad ascendente (m/s) [23]	0.002	-0.00059

2.2. Instalación del modelo físico

Como se mencionó anteriormente, el modelo físico del horno olla utilizado en el presente trabajo fue construido previamente con un factor de escala $1/6$, el cuál consta de los materiales siguientes:

- Para el arreglo del reactor de acrílico
 - Un compresor *Coleman*
 - Un rotámetro con escala de 0 a 100 L/min
 - Mangueras para gas de $1/4$ "
 - 3 conexiones rápidas macho de bronce de $1/4$ "
 - 3 conexiones de manguera con válvula
 - 3 coples con rosca de bronce de $1/4$ "
 - 1 conexión en cruz de bronce de $1/4$ "
 - Tapones de $1/4$ "
 - Cinta teflón
 - 2 extensiones eléctricas
 - 1 jeringa de 10 mL con aguja de 12 cm

- Para la realización del experimento
 - 90 L de agua
 - 200 mL de alcohol etílico
 - 1 probeta graduada de 1 L
 - 1 balanza analítica *Sartorius*
 - 1 taladro reversible *Truper* acoplado con flecha de acero de 50 cm y aspas en la punta.

- 1 turbidímetro portable *Hanna instruments*
- 800 mL de MMA
- 382 g de PMMA
- 2 pissetas de 500 mL
- 1 atomizador
- 1 lata de silicón en aerosol
- 1 embudo
- 2 vasos de precipitados de 1 L
- 4 micas adhesivas de 56 × 63 cm
- 5 vasos de 10 mL especiales para mediación de turbidez
- Paños y aceite de silicón para la limpieza de los vasos de 10 mL.

El arreglo experimental se realiza siguiendo los pasos a continuación:

1. Anticipadamente se tiene preparado un juego de tres mangueras junto con las 3 conexiones rápidas macho por un extremo y por el otro a las conexiones con válvula a la salida de aire del rotámetro. El juego de las mangueras con el rotámetro se acopla al compresor para la salida de aire de los inyectores.
2. Se protege totalmente al reactor de acrílico con las micas adhesivas haciendo orificios para permitir la salida de aire por el inyector. También se esparce silicón en aerosol en el interior para generar una capa adicional de protección.
3. Se conecta la cantidad de mangueras necesarias para el experimento según sea el caso y se verifica que los otros orificios tengan un tapón con teflón para evitar fugas durante el llenado con agua.
4. Se coloca la aguja con la jeringa en la posición asegurando que no haya presencia de fugas.

5. Se comienza con el llenado del reactor con agua directa de la llave hasta un volumen de 90 L que previamente ha sido marcado.
6. Se conecta el compresor y el turbidímetro a las extensiones eléctricas y se verifica su correcto funcionamiento.

La preparación de material y calibración de turbidímetro se realiza de la siguiente manera:

1. Se pesan 382 g de partículas de PMMA en la balanza analítica que son contenidos en un vaso de precipitados de 1 L
2. Se miden 800 mL de monómero y se contienen en el otro vaso de precipitados de 1 L.
3. Para la calibración del turbidímetro se cuenta con 4 mezclas estandarizadas de 0.1, 15, 100 y 750 NTU (Nefelometric Turbidity Unit) para tener un intervalo amplio de lectura sin errores de medición y se lleva a cabo siguiendo el manual del fabricante.

Al terminar esta serie de pasos se tiene el arreglo experimental como el que se muestra en la Figura 2.1, donde los elementos mostrados son: (a) reactor de acrílico, (b) rotámetro, (c) compresora, (d) manguera con conexión rápida y (e) turbidímetro con vasos de 10 mL. Con este diseño es posible comenzar la experimentación siguiendo a detalle el protocolo experimental. En el esquema de la Figura 2.2 se aprecian con mayor claridad las conexiones de gas y todos los elementos del arreglo experimental.

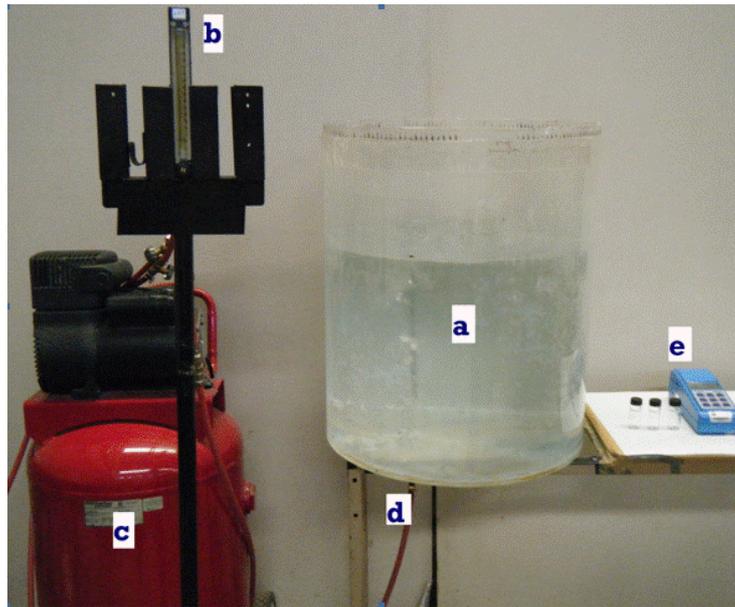
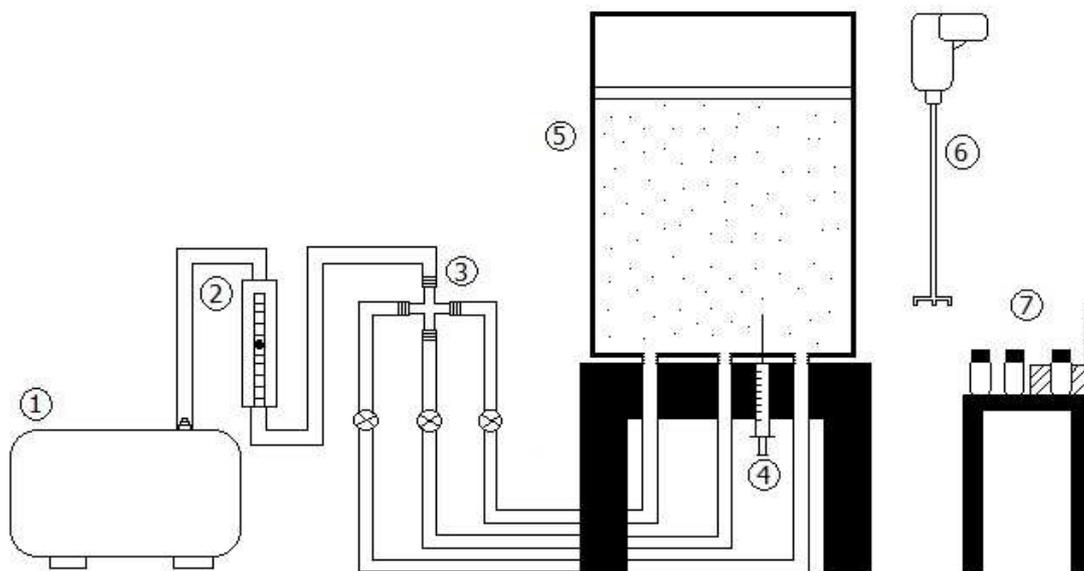


Figura 2.1: Instalación del modelo físico de remoción de inclusiones



1: compresor; 2: rotámetro; 3: conexión en cruz y mangueras con válvula; 4: jeringa de adquisición de muestra; 5: recipiente cilíndrico de acrílico; 6: taladro con flecha; 7: turbidímetro con vasos de 10 mL.

Figura 2.2: Esquema del arreglo experimental del modelo físico para medir la cinética de remoción de inclusiones

2.3. Protocolo experimental

Las variables involucradas durante la experimentación fueron el flujo de gas y el número y posición de inyectores. Los flujos de gas utilizados fueron de 7, 17 y 37 L/min, mismos que están escalados del prototipo y se seleccionaron para abarcar distintos grados de agitación; el número de inyectores fue de 1, 2 y 3; y la posición r/R (relación de distancia entre el centro del reactor y la posición del inyector respecto al radio total del reactor de acrílico) de los inyectores fue de 0, $1/3$, $1/2$, y $2/3$.

La experimentación consistió en medir los valores de la turbidez a través del tiempo variando las diferentes condiciones de operación. La matriz experimental se puede observar en la Tabla 2.2, además se precisa en la Figura 2.3 la ubicación de los inyectores y de la jeringa para adquirir las muestras en cada experimento realizado, con símbolos que son definidos en la Tabla 2.2. La jeringa se colocó en la posición de $r/R=2/3$, a una altura de 10 cm (longitud de la jeringa) del fondo del reactor y a la mitad de distancia que hay entre los inyectores para que en todos los experimentos las muestras sean tomadas dentro de un circuito de circulación.

Tabla 2.2: Matriz experimental

No. de inyectores	No. de experimento	Flujo [L/min]	Posición [r/R]	Simbología
1	1	7	0	
	2	17		
	3	37		
	4	7	1/3	
	5	17		
	6	37		
	7	7	1/2	
	8	17		
	9	37		
	10	7	2/3	
	11	17		
	12	37		
2	13	7	1/3	
	14	17		
	15	37		
	16	7	1/2	
	17	17		
	18	37		
	19	7	2/3	
	20	17		
	21	37		
3	22	7	1/3	
	23	17		
	24	37		
	25	7	2/3	
	26	17		
	27	37		

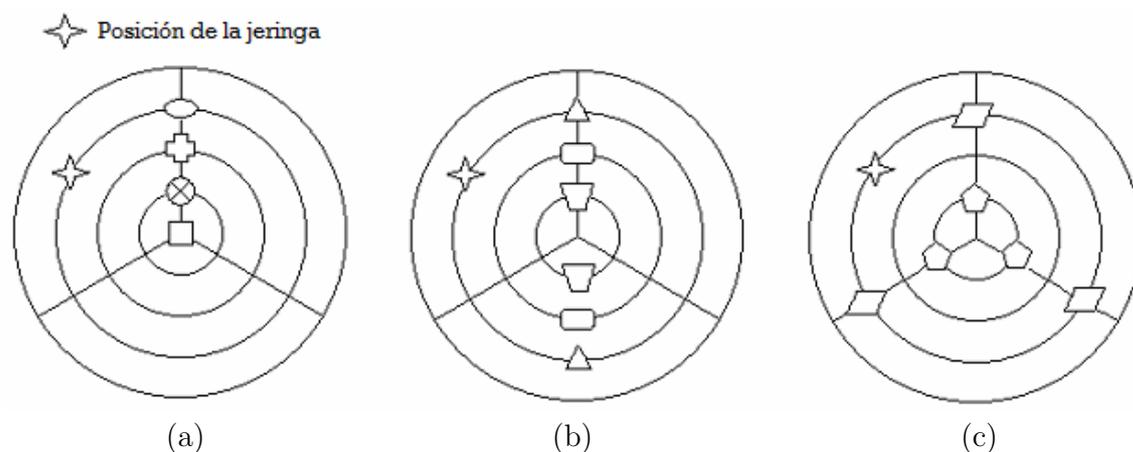


Figura 2.3: Esquema de la posición para uno (a), dos (b) y tres (c) inyectores

Debido a cuestiones de tiempo de experimentación, deterioro de material y equipo así como gasto económico por cada experimento realizado, se decidió no realizar réplicas que dan a conocer la reproducibilidad de las mediciones y el error experimental. El tiempo de cada prueba se fijó en 100 minutos de burbujeo, periodo en el que se observa que no cambia el contenido de inclusiones en el baño o dicho de otra manera, se alcanza la máxima limpieza posible.

Una vez que se colocaba el arreglo experimental, se comienza con la agitación del baño por encima del reactor con la flecha del taladro para obtener un vórtice por donde se añaden las partículas de PMMA acompañado de alcohol que se proyecta mediante un atomizador para su humectación. Se realiza de esta forma ya que en pruebas preliminares no se lograba su incorporación y no se tenía una mezcla perfecta, si no que se concentraban las partículas en la superficie del agua provocando su flotación. Inmediatamente después de incorporar las partículas se obtenía la medición del valor inicial de turbidez y se sigue con la agitación de la flecha pero en sentido contrario para estabilizar y contrarrestar el movimiento del fluido. La medición de turbidez se da de una manera muy rápida ya que para

colectar la muestra de 10mL, limpiarla y colocarla dentro del turbidímetro, se requieren de aproximadamente 15 s. Para comenzar la prueba el valor de turbidez debe ser o estar cercano al valor teórico de turbidez de 208 NTU que se obtuvo con la ayuda de la curva de calibración [13] que se muestra en la Figura 2.4.

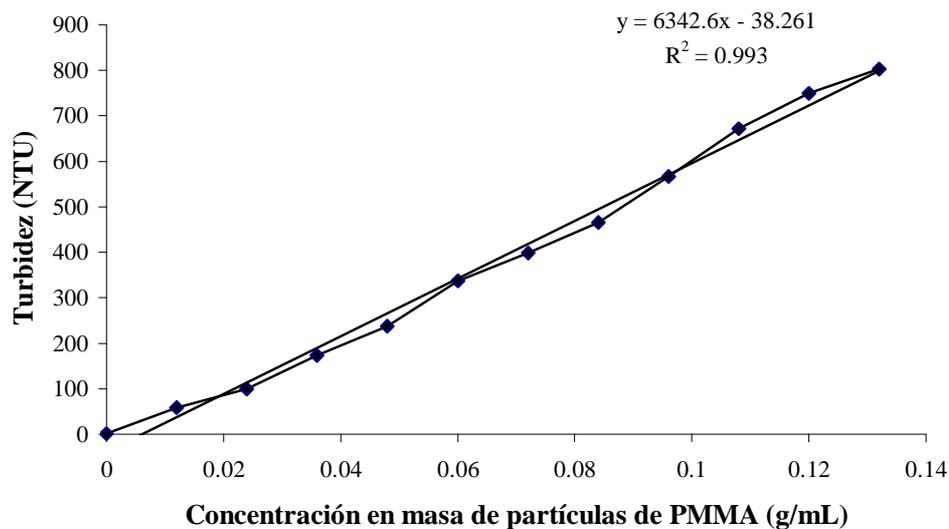


Figura 2.4: Curva de calibración de partículas de PMMA en agua [13]

Si no se tiene la turbidez inicial teórica, se agita el baño hasta lograr la mezcla adecuada y el valor de turbidez inicial. Con el sistema quieto se añaden gradualmente 800 mL de MMA para formar una capa por encima del baño líquido (escoria) e inmediatamente comienza la inyección del flujo de aire y la contabilización del tiempo de remoción de inclusiones. La toma de muestras se realiza cada minuto del experimento para tener mayor certeza y confiabilidad. Además, cada muestra se lee por triplicado obteniendo al final el promedio. Durante el tiempo de experimentación, se tienen que mantener constantes ciertos detalles como el limpiar adecuadamente los vasos de medición con agua y alcohol ya que como la reacción

entre las partículas de PMMA y el líquido de MMA es muy agresiva, se quedan partículas de la mezcla que van solidificando y al quedar dentro de los vasos de 10 mL generan errores en la medición de turbidez. También se debe supervisar el flujo inyectado debido a que en la recarga del compresor ocurre un pequeño aumento en la lectura del rotámetro. Al final del experimento, se vacía por completo el reactor de acrílico removiendo la capa superior de partículas que reaccionaron con el monómero y las micas que protegen al modelo físico. Los datos obtenidos se procesan en una hoja de cálculo para realizar el gráfico de cinética de remoción de inclusiones.

Capítulo 3:

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de la cinética de remoción de inclusiones en el proceso de refinación secundaria de acero mediante la simulación física de un horno olla. Se analiza la influencia de las variables como el flujo de gas, número y posición de inyectores, así como imágenes que muestran la variación cualitativa de concentración de inclusiones con el tiempo.

3.1. Observaciones experimentales

En la Figura 3.1 se muestra la apertura del ojo de escoria para diferentes números de inyectores con un flujo de gas de 37 L/min. Al inicio de cada prueba experimental la separación de las dos fases, agua y el monómero de MMA, era complicada de percibir ya que ambas son incoloras. Sin embargo, en el transcurso del experimento la reacción entre las partículas de PMMA y el monómero de MMA provoca la formación de una capa blanca uniforme que se distinguen de los “ojos” provocados por la salida de aire por la superficie libre.



Un inyector

Dos inyectores

Tres inyectores

Figura 3.1: Apertura de ojo de la capa de escoria para: 1, 2 y 3 inyectores.

En la Figura 3.2 se observa un ejemplo de las muestras obtenidas en el vaso de 10 mL durante el experimento 26 (3 inyectores, $r/R = 2/3$ y flujo de 17 L/min) para distintos tiempos desde el inicio de la remoción (0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 minutos). Se aprecia cualitativamente el cambio de la turbidez a través del tiempo, recordando que a mayor turbidez mayor contenido de inclusiones. Se observa mayor rapidez de cambio en la concentración de partículas de PMMA de la muestra durante los primeros 20 minutos de experimentación; posteriormente (mayor a 20 minutos) la rapidez cambio de la turbidez con el tiempo es menor. Desde el minuto 60 hasta el 100 no se aprecian cambios significativos en turbidez.

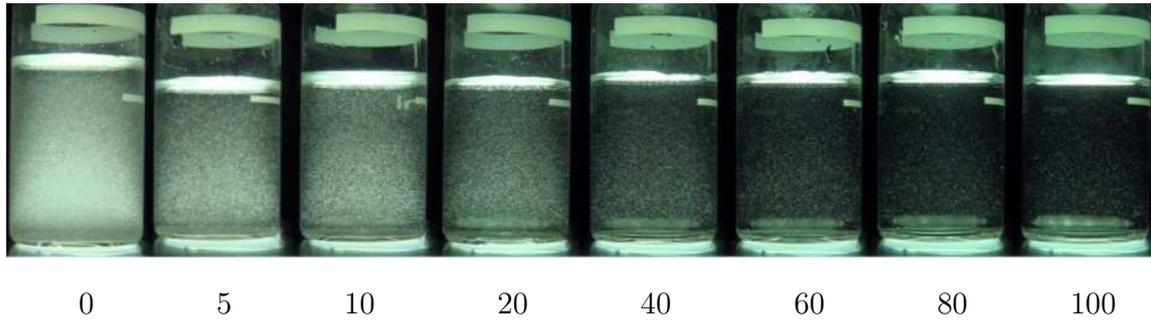


Figura 3.2: Muestras tomadas en: 0, 5, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 minutos

3.2. Efecto del flujo de gas

A continuación se presentan los resultados experimentales de la variación de la concentración de inclusiones con el tiempo para diferentes flujos de gas inyectado. En todas las gráficas, la concentración de inclusiones se presenta de manera adimensional, normalizando la turbidez instantánea (C) al dividirla entre la turbidez inicial teórica (C_0) que corresponde al contenido inicial de inclusiones en el volumen del baño (208 NTU).

En las Figuras 3.3, 3.4, 3.5, y 3.6 se muestra la disminución de la concentración de partículas con el tiempo manteniendo 1 inyector y variando la cantidad de flujo de gas en cada caso para posiciones de $r/R=0$, $1/3$, $1/2$ y $2/3$ respectivamente. En el caso de la posición $r/R=0$ (ver Figura 3.3), se observa una mayor disminución para el flujo más alto de 37 L/min durante los primeros 20 minutos, mientras que con los flujos de 7 y 17 L/min la remoción de inclusiones es muy parecida durante todo tiempo de inyección de gas.

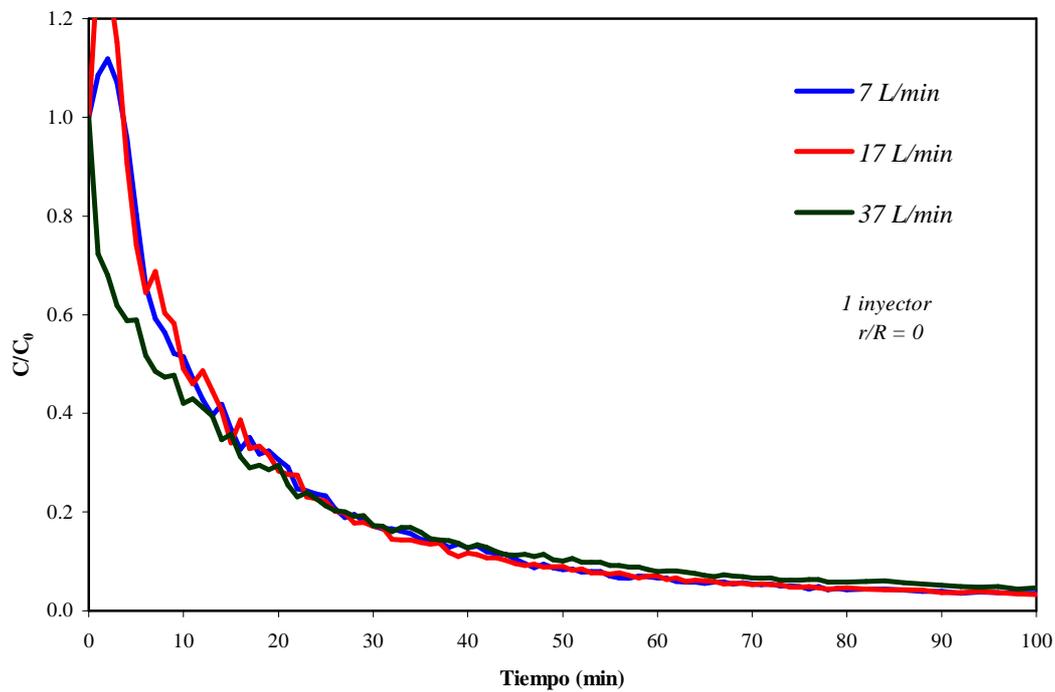


Figura 3.3: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes flujos, 1 inyector y $r/R=0$

Cuando la posición del tapón está en $r/R=1/3$ (Figura 3.4), se aprecia una mayor eliminación de partículas para los flujos extremos de 7 y 37 L/min siendo muy parecidos durante el experimento. Con 17 L/min se logra igualar la concentración de partículas hasta los 30 minutos de inyección, pero la remoción en los primeros minutos es más lenta que con los otros flujos.

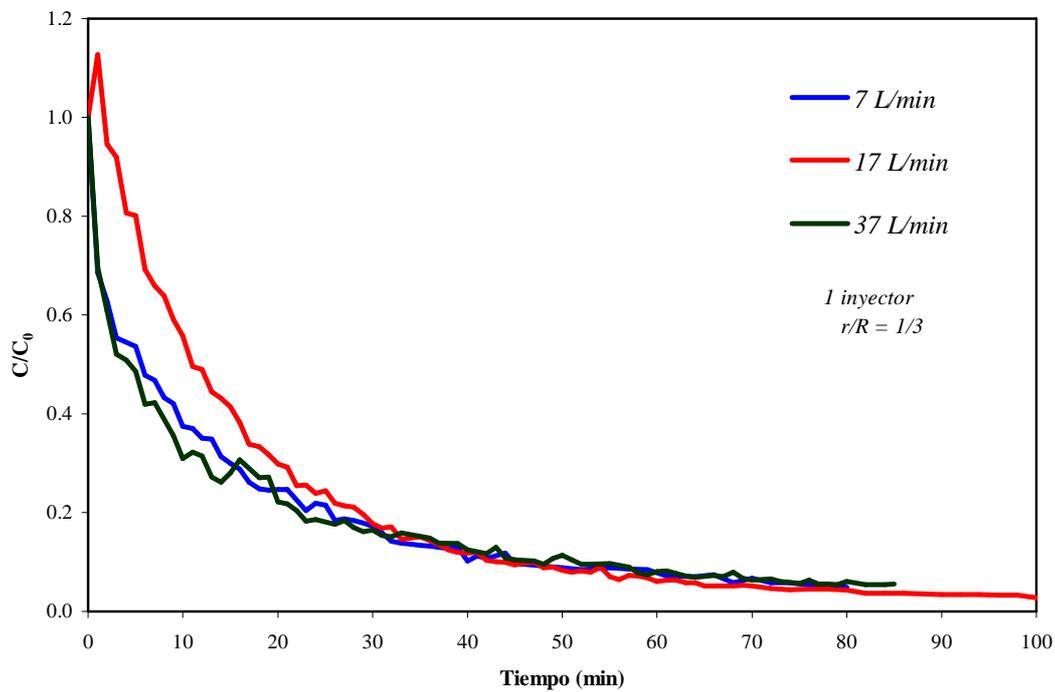


Figura 3.4: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes flujos, 1 inyector y $r/R=1/3$

En el caso de la posición del tapón $r/R=1/2$ (Figura 3.5), se observa una menor rapidez de eliminación de partículas conforme aumenta el flujo de gas para los primeros 40 minutos. Después de este tiempo la rapidez de remoción de inclusiones es independiente del flujo de gas.

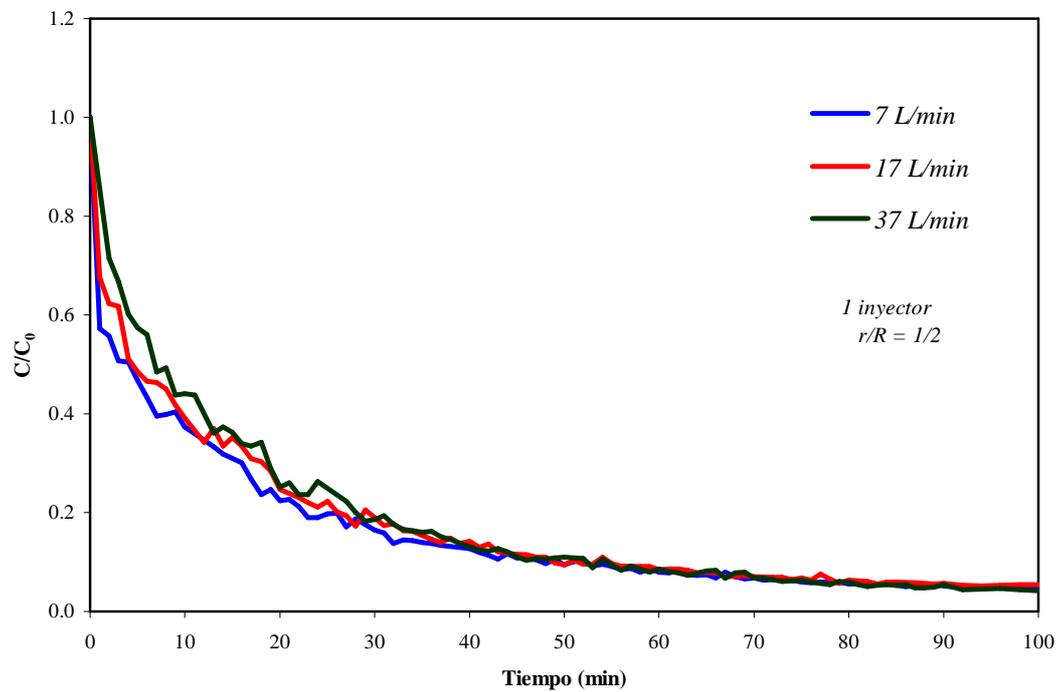


Figura 3.5: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes flujos, 1 inyector y $r/R=1/2$

Finalmente, cuando el tapón está en $r/R=2/3$ (Figura 3.6), se muestra una cinética similar de eliminación de inclusiones para los dos flujos altos de 17 y 37 L/min, mientras que para el menor flujo de 7 L/min la rapidez de eliminación es mayor durante los 40 minutos iniciales.

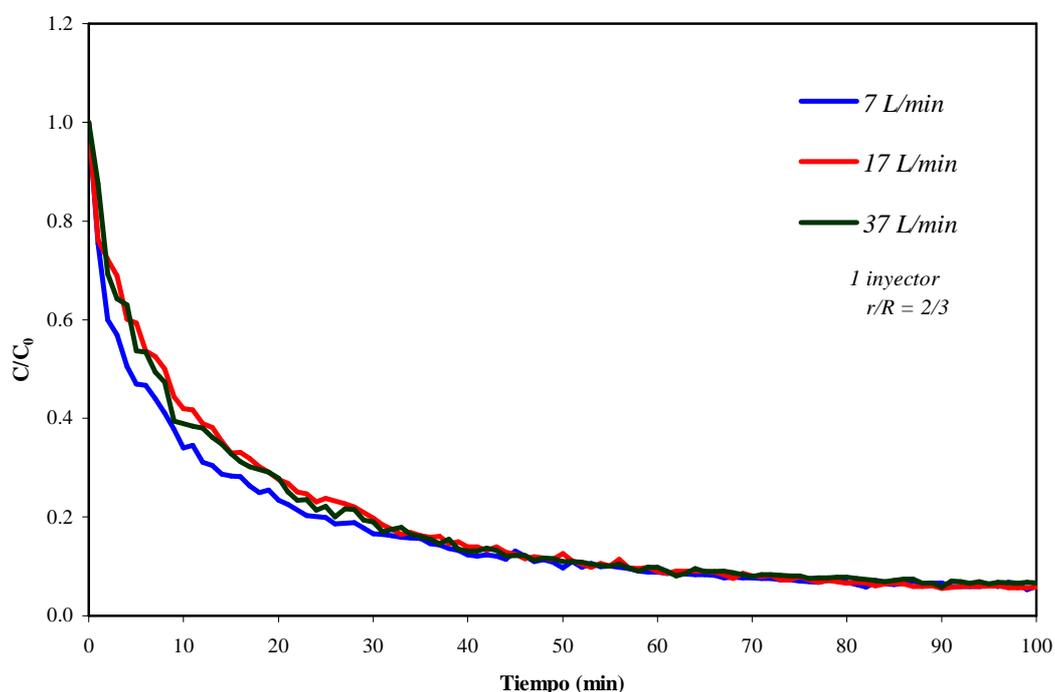


Figura 3.6: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes flujos, con 1 inyector y $r/R=2/3$

Se aprecia que en algunas curvas (Figuras 3.3 y 3.4) al inicio de la remoción, la concentración de inclusiones aumenta en vez de disminuir. Este comportamiento se puede explicar debido a que existe una gran cantidad de partículas al inicio del experimento y en algunos casos hay una posible aglomeración junto con el monómero, por lo que la lectura de turbidez presenta un sesgo. Este fenómeno se corrige a los pocos minutos de iniciada cada prueba y se retoma la cinética de primer orden que está caracterizando la remoción de inclusiones presentando la tendencia en forma exponencial decreciente que sigue la concentración de inclusiones con el tiempo de burbujeo.

De los resultados mostrados respecto a la cinética de eliminación de inclusiones con 1 tapón variando el flujo de gas y la posición de inyección, no hay una tendencia clara y se puede afirmar que existe un efecto combinado entre las variables de flujo de gas y posición del tapón, ya que con posición cercanas al centro ($r/R=0$ y $1/3$) los flujos de gas altos favorecen la remoción de partículas del baño, mientras que con posiciones cercanas a la pared ($r/R=1/2$ y $2/3$) son flujos bajos los que mejoran la eliminación de partículas. Estas diferencias son sutiles en magnitud y sólo se presentan en los primeros 20 o 40 minutos del proceso, ya que a tiempos mayores prácticamente la cinética de remoción es independiente del flujo de gas y de la posición.

Es sabido que la remoción de inclusiones de un baño con burbujeo de gas por el fondo es dominado por dos efectos: (a) la formación de agregados estables burbuja-partícula que implican partículas con características superficiales hidrofóbicas que ayudan a estabilizar el agregado y promueven la flotación. Surfactantes son añadidos a celdas de flotación para modificar la tensión superficial de las partículas en procesos de concentración de minerales. En el caso de la refinación de acero, los elementos químicos de aleación también actúan como surfactantes, pero en el modelo físico se usó agua de la llave sin controlar las impurezas, aunque las partículas son de naturaleza hidrofóbica ya que no se mojan con agua. El número y tamaño de burbujas es también un factor importante junto con las condiciones hidrodinámicas y de turbulencia. Muchas burbujas en un fluido agitado y turbulento incrementan la probabilidad de que una partícula choque con una burbuja y forme el agregado que flotará y eliminará la inclusión. En nuestro modelo se introduce gas por una tobera y no por un tapón poroso (como se hace en la industria) por lo que el tamaño de la burbuja es grande e irregular y el flujo de gas no controla el número de burbujas; posiblemente esto explique la poca dependencia de la cinética de remoción de

inclusiones con el flujo de gas. El otro efecto que domina la remoción de inclusiones es (b): el arrastre del baño sobre las partículas. Este efecto es muy importante para partículas pequeñas (menores a 10 micras) que son fácilmente arrastradas por las corrientes convectivas del baño. Si el baño sigue patrones recirculatorios en toda la olla como los que se forman con un tapón en $r/R=1/2$ y $2/3$, las partículas quedan atrapadas en esos circuitos y no flotarán ni se eliminarán sino solamente las que estén cerca de la pluma o por turbulencia, mientras que la inyección por el centro dirige al fluido verticalmente hacia la escoria y promovería la mejor eliminación de inclusiones ya que no forma circuitos de circulación en toda la olla. Sin embargo, no se ha distinguido en nuestros resultados un efecto claro de la posición de inyección, lo cual se verá en la siguiente sección.

3.3. Efecto de la posición del inyector

En las Figuras 3.7, 3.8, y 3.9 se muestra la disminución de la concentración de partículas con el tiempo manteniendo 1 inyector y variando la posición del inyector en cada caso para flujos de gas de 7, 17 y 37 L/min respectivamente.

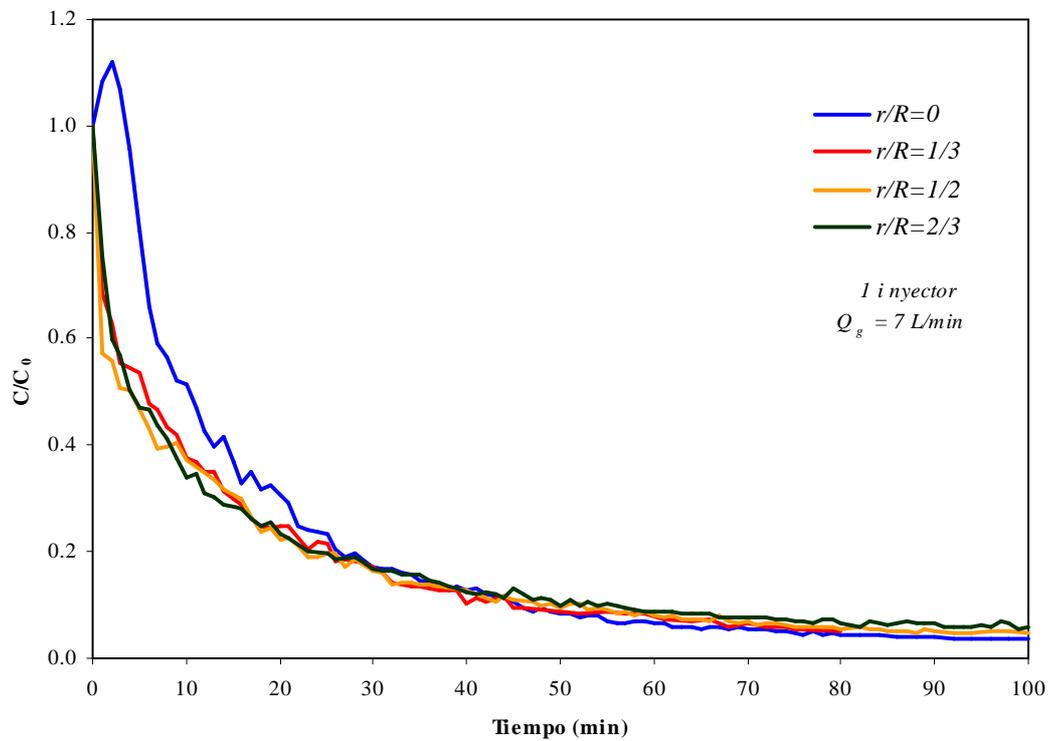


Figura 3.7: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes posiciones, 1 inyector y flujo de 7 L/min

De la Figura 3.7 (con un flujo de 7/min) se observa que la disminución de la concentración de inclusiones es parecida para inyectores en las posiciones de $r/R=1/3$, $1/2$ y $2/3$, mientras que para una inyección por el centro ($r/R=0$), la eliminación es más lenta durante los primeros 25 minutos de remoción.

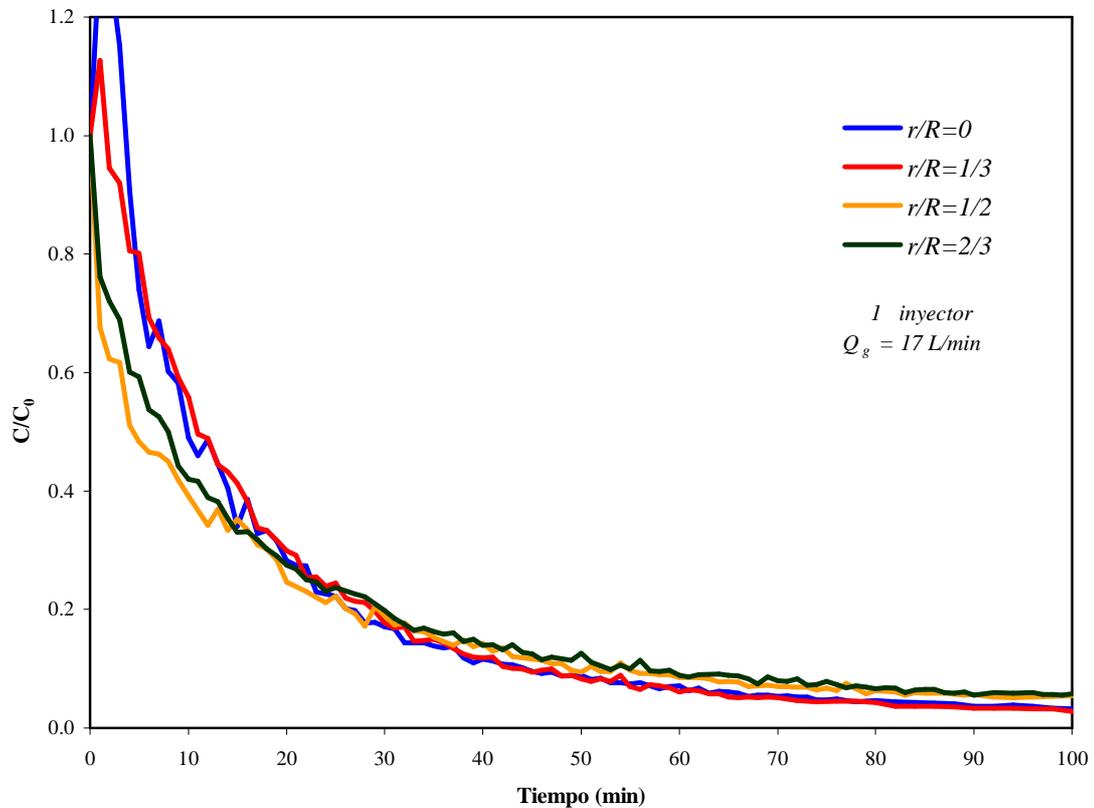


Figura 3.8: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes posiciones, 1 inyector y flujo de 17 L/min

De la Figura 3.8 (con un flujo de 17/min) se observa una mayor disminución en la concentración de inclusiones en la posición de 1/2 seguida por la posición de 2/3, mientras que para las posiciones de 0 y 1/3 las remociones son parecidas, siendo más lentas en los primeros 25 minutos de inyección.

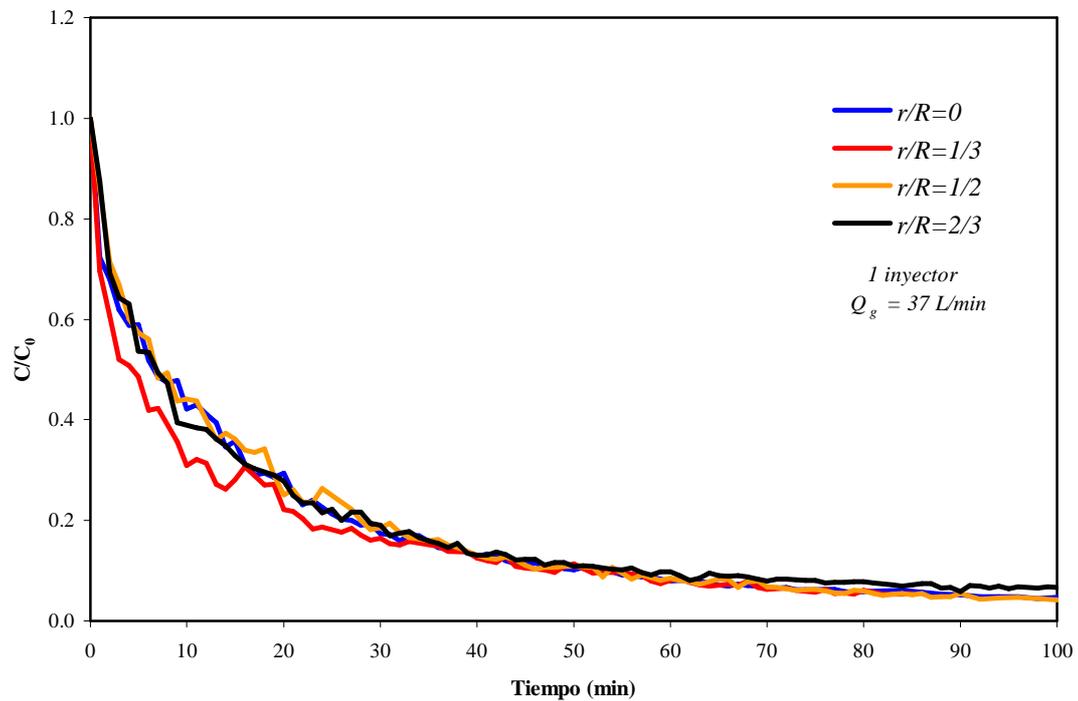


Figura 3.9: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferentes posiciones, 1 inyector y flujo de 37 L/min

Para un mayor flujo de gas de 37 L/min (ver Figura 3.9) se observa que para la posición r/R de 1/3 hay una mayor disminución de concentración de inclusiones, aunque la variación es muy pequeña respecto a las posiciones de 0, 1/2 y 2/3 que mantienen una cinética de eliminación similar durante el tiempo todo el tiempo de inyección.

A flujos altos de gas la cinética de remoción es independiente de la posición del tapón, pero a flujos bajos de gas se remueven más rápidamente las inclusiones en posiciones alejadas del centro ($r/R=1/2$ y $2/3$), y son las posiciones centrales las peores para purificar al baño de partículas. Ya se han señalado los aspectos físicos que dominan la remoción de partículas de un baño por burbujeo y que son la

estabilidad de agregados sólido-burbuja y arrastre de las partículas por convección del líquido. Resulta complejo determinar cual de los efectos domina el presente estudio. Nuevamente, se ve un efecto combinado entre el flujo y la posición del tapón que demuestran la complejidad del fenómeno observado y que imposibilitan una conclusión contundente acerca del efecto del flujo y de la posición del tapón sobre la eliminación de inclusiones.

3.4. Efecto del número de inyectores

En las Figuras 3.10, 3.11, y 3.12 se muestra la disminución de la concentración de partículas con el tiempo manteniendo un flujo de gas de 7 L/min y variando el número de inyectores en 1, 2 y 3 angularmente equidistantes en cada caso y con posición del inyector de $r/R=1/3$, $1/2$ y $2/3$ respectivamente.

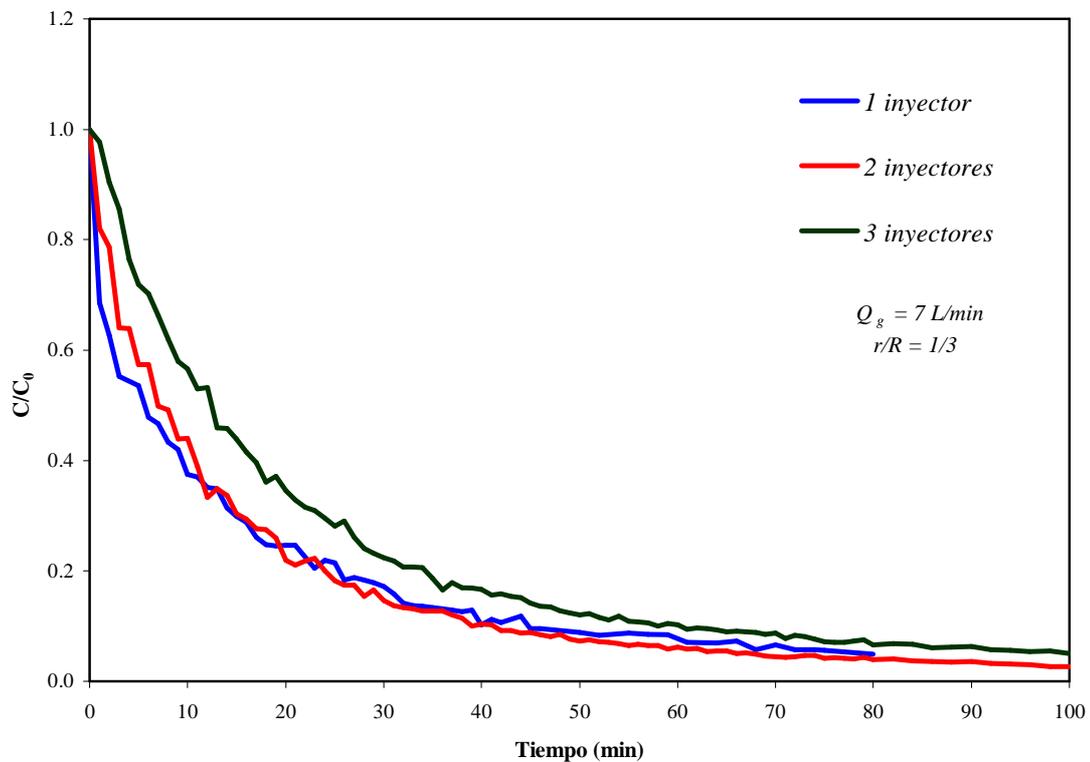


Figura 3.10: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferente número de inyectores, $r/R=1/3$ y flujo de 7 L/min

Respecto a la variación de número de inyectores, se observa en la Figura 3.10 para una posición de $r/R=1/3$, que para los primeros 15 minutos de inyección hay una mayor remoción de inclusiones a menor número de inyectores. Transcurridos los 15 minutos la disminución de concentración es parecida para 1 y 2 inyectores, mientras que para 3 se mantiene una menor rapidez de remoción durante todo el experimento.

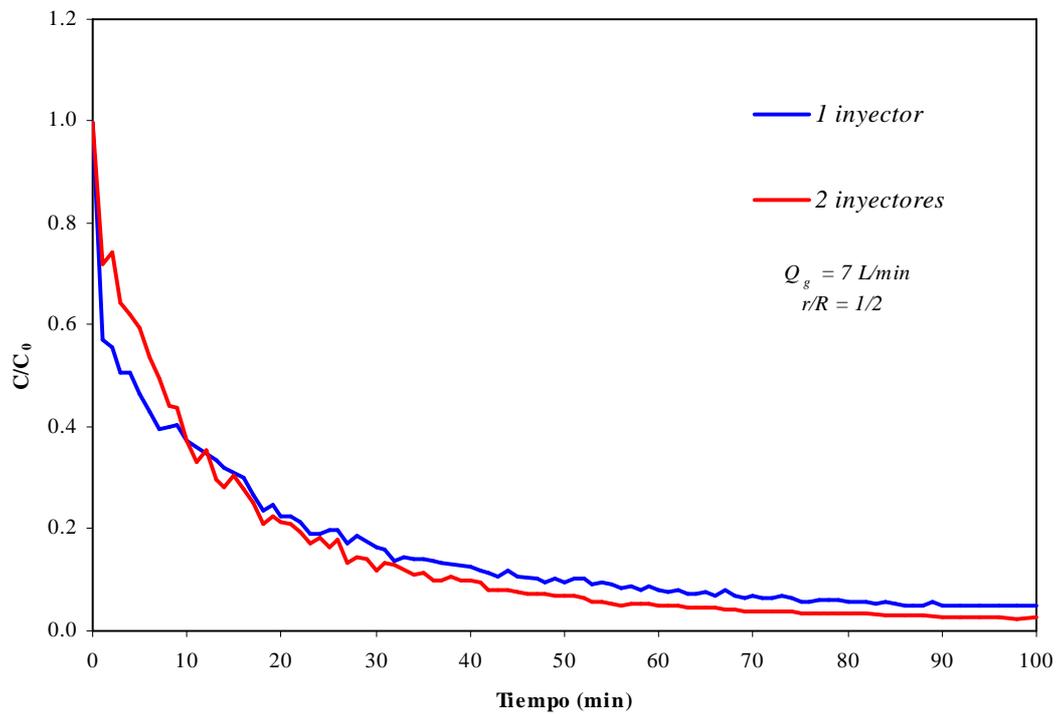


Figura 3.11: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferente número de inyectores, $r/R=1/2$ y flujo de 7 L/min

En la Figura 3.11($r/R=1/2$) se observa para los primeros 10 minutos de inyección una mayor remoción de inclusiones con un inyector. Después de esos 10 minutos, la disminución de concentración para 2 inyectores es más rápida que para un tapón.

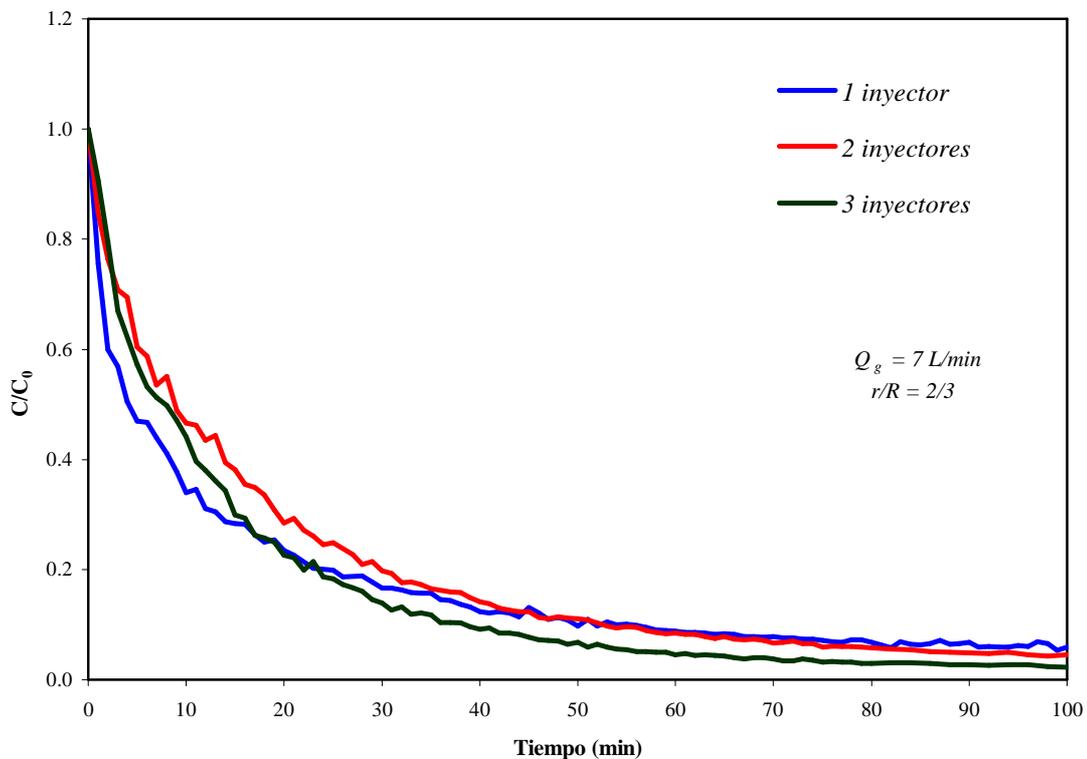


Figura 3.12: Variación de la concentración de inclusiones con el tiempo a diferente número de inyectores, $r/R=2/3$ y flujo de 7 L/min

Finalmente, en la Figura 3.12 se observa (para una posición de $r/R=2/3$) que en los primeros 15 minutos de inyección hay una mayor remoción de inclusiones con un inyector. Transcurridos los 15 minutos, la disminución de concentración es mejor con 3 tapones y se mantiene mejor su rapidez de remoción durante todo el experimento, mientras que con 1 y 2 tapones la cinética se iguala a los 45 minutos.

En todos los casos, analizando el efecto del número de tapones, se encontró una cinética inicial mejor con 1 tapón (en los primeros 10 a 20 minutos) y pasado esta etapa inicial, es mejor la remoción con más de un tapón. Es decir, el flujo promovido

por un solo tapón sin tantas recirculaciones es mucho más eficiente para remover inclusiones en un baño concentrado de partículas. Conforme disminuye la concentración de inclusiones, la presencia de más plumas de gas que arrastran líquido verticalmente, es más eficiente para eliminar inclusiones en un baño diluido de éstas. Es decir, se mejora la probabilidad de que una partícula encuentre en su camino una burbuja, lo cual implica que el mecanismo dominante de remoción de inclusiones a bajas concentraciones de partículas es el de la formación de agregados, mientras que a altas concentraciones de inclusiones es el arrastre de estas por el líquido lo que domina su cinética de remoción.

Retomando los objetivos de la refinación secundaria del acero, los cual implican la uniformidad térmica y química de acero, así como la eliminación de elementos residuales como el oxígeno y azufre a través de intercambios metal-escoria y finalmente la eliminación de inclusiones no metálicas, se puede establecer prácticas de operación para mejorar dicha refinación. Los primeros objetivos señalados (uniformidad y desulfuración/desoxidación) están asociados al mezclado del acero que depende del grado de agitación del mismo. Las condiciones óptimas de mezclado están comprendidas gracias a estudios previos hechos en nuestro y en otros grupos, las cuales consisten en usar flujos de gas altos, posiciones del inyector cercanos a la pared (hasta $r/R=2/3$) y con un solo tapón. Sin embargo, para eliminar inclusiones no es tan claro el efecto del flujo ni de la posición, aunque para baños diluidos de partículas son claramente mejores las cinéticas de remoción con 2 y 3 tapones que con uno. Por lo tanto, una práctica industrial para refinar integralmente al acero debe contar con dos etapas de burbujeo con argón: una primera etapa que ayude a agitar vigorosamente al baño con un solo tapón colocado a $1/2$ del radio de la olla para que se mezcle eficientemente al baño y así obtener la uniformidad química y térmica, y acelerar los intercambios entre el metal y la escoria. Una vez desulfurado y

desoxidado el acero durante la primera etapa, en la cual paralelamente se eliminarán algunas inclusiones, ya no habrá fuente de formación de inclusiones nuevas y entonces puede arrancar la segunda etapa de burbujeo. En esta etapa se propone un flujo bajo de gas, ya que el efecto de flujo no es muy significativo sobre la cinética de eliminación de partículas, pero el flujo bajo ahorra costos de producción. Este flujo bajo puede dividirse entre 2 o tres tapones para mejorar aún más la limpieza del acero.

3.5. Evaluación cuantitativa de la cinética de remoción de inclusiones

La cinética de remoción de inclusiones estudiada experimentalmente con la ayuda del modelo físico, se ajustó asumiendo que dicha cinética sigue un comportamiento de reacción de primer orden, por lo que la rapidez de remoción de inclusiones, en función del tiempo se expresa a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$v = -\frac{d[C]}{dt} = k[C] \quad (3.1)$$

donde $[C]$ es el valor de la concentración instantánea de inclusiones, k es la constante de rapidez de remoción de inclusiones, t es el tiempo y v es la rapidez de remoción de inclusiones. Integrando la ecuación (3.1), con el límite inferior igual a la condición inicial (al tiempo cero la $[C]=[C_0]$), se obtiene la siguiente expresión que describe la concentración instantánea de inclusiones en función del tiempo.

$$[C] = [C_0]e^{-kt} \quad (3.2)$$

La ecuación 3.2 representa una función exponencial decreciente, siendo este decrecimiento dependiente del valor de k . Cuanto mayor sea el valor de k más rápidamente decrece la función, es decir se eliminan más rápido las inclusiones.

Las curvas de las funciones exponenciales decrecientes obtenidas en la experimentación se ajustaron con la ecuación 3.2 mediante la utilización del software *TableCurve 2D*, obteniendo los valores preexponencial, $[C_0]$, y exponencial, k , para cada experimento realizado como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores de C_0 y k obtenidos en los experimentos de remoción de inclusiones.

Experimento	$[C_0]$	k
1	1.026	0.059
2	1.033	0.060
3	0.731	0.044
4	0.719	0.051
5	1.035	0.058
6	0.653	0.047
7	0.634	0.0408
8	0.737	0.042
9	0.733	0.021
10	0.617	0.042
11	0.671	0.041
12	0.743	0.044
13	0.822	0.058
14	0.778	0.073
15	0.788	0.072
16	0.807	0.063
17	0.787	0.054
18	0.790	0.054
19	0.810	0.045
20	0.887	0.048
21	0.799	0.047
22	0.918	0.044
23	0.990	0.063
24	0.780	0.049
25	0.869	0.063
26	0.986	0.064
27	0.880	0.066

Los ajustes de las curvas experimentales con la ecuación 3.2 del mejor caso (experimento 27) y del peor caso (experimento 7) se presentan en las Figuras 3.13 y 3.14, donde se ve un ajuste bueno a tiempos largos pero un pobre ajuste al inicio de la remoción.

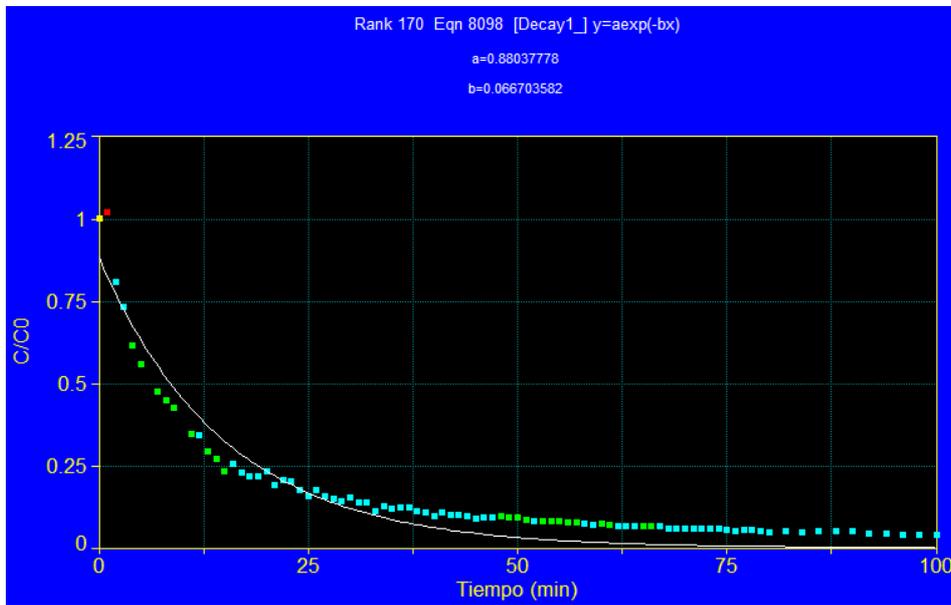


Figura 3.13: Ajuste cinético de la remoción de inclusiones del mejor caso (experimento 27)

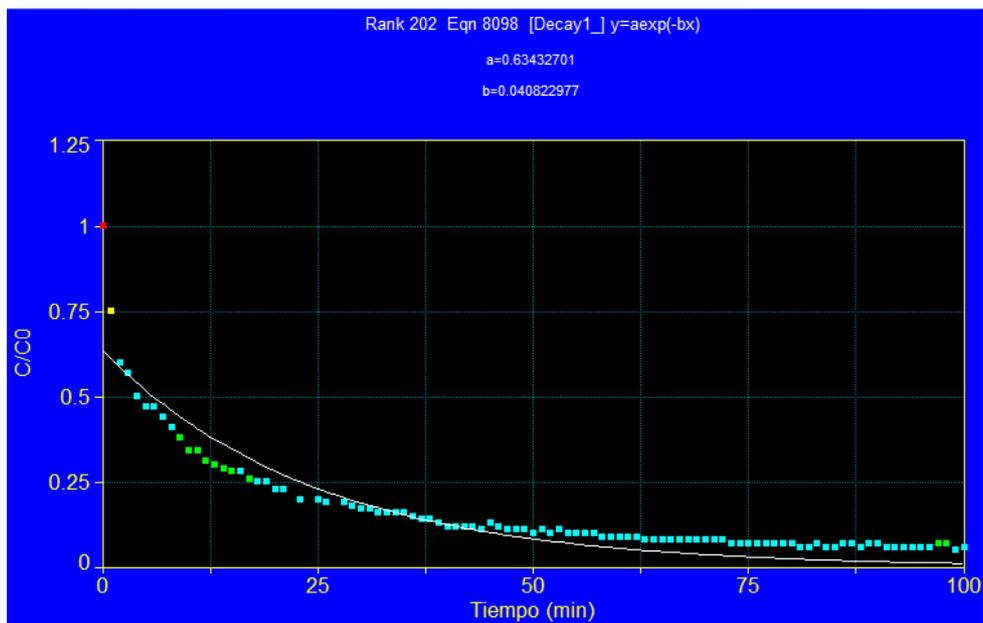


Figura 3.14: Ajuste cinético de la remoción de inclusiones del peor caso (experimento 7)

Este mal ajuste al inicio de las experimentaciones explica la gran variación en el término preexponencial $[C_0]$, el cual debió ser más constante, ya que en cada experimento se inició con la misma composición de 1.0. Sin embargo, el término exponencial si refleja la tendencia de la curvas y es este término el que se usa para evaluar la cinética de remoción de inclusiones. El mejor caso corresponde a la inyección de gas con tres tapones con un flujo alto de 37 L/min y una posición de 2/3 de R de cada tapón. Mientras que el peor caso corresponde a un tapón con un flujo de 7 L/min y colocado a 1/2 de R. Es interesante contrastar estos resultados con los obtenidos en otros trabajos acerca del mezclado en estas ollas. Para un mezclado eficiente las condiciones propuestas en el caso 27 son muy malas mientras que las del caso 7 no son tan malas en términos de mezclado. Por lo tanto, nuestros resultados sugieren que la eliminación de inclusiones es parcialmente independiente del mezclado en la olla. Este hecho implicaría que en las ollas industriales de acero se opere con las dos etapas de burbujeo que ya se han planteado en esta tesis.

Referente al mejor caso, se debe señalar que el término exponencial es muy similar al del caso 25 que presenta la misma configuración de tapones pero con un menor flujo de 7 L/min, por lo cual, en la práctica se propone operar a bajo flujo de gas con tres tapones colocados a 2/3 de R porque como se mencionó anteriormente, se ahorraría gas respecto al caso 27 con casi los mismos resultados de limpieza en el acero.

Capítulo 4:

Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en el estudio de la cinética de remoción de inclusiones son:

- La cinética de remoción de inclusiones en el modelo físico sigue la tendencia descrita por una función exponencial que decae con el tiempo típica de cinéticas de primer orden.
- La posición del tapón y el flujo de gas son variables que presentan un efecto combinado complejo sobre la cinética de remoción de inclusiones por lo que no se puede afirmar por separado el efecto de cada una de estas variables sobre la rapidez de eliminación de partículas en el modelo físico.
- Se mejora la rapidez de remoción de inclusiones a tiempo mayores a 10 minutos conforme aumenta el número de tapones, aunque inicialmente (antes de 10 minutos) es más rápida la limpieza de inclusiones inyectando gas con un solo tapón.
- La peor eliminación de inclusiones se obtiene con un tapón, flujo de 7 L/min y posición de r/R de $1/2$; mientras que la mejor remoción de inclusiones se logra con 3 tapones, flujo de 37 L/min y posición de r/R de $2/3$.

- No obstante que los resultados no son concluyentes en varios sentidos y se obtuvieron de un modelo físico, se propone una práctica industrial que incluya dos etapas de burbujeo: una primera etapa con flujos altos y con un solo tapón colocado en $r/R=1/2$ para mezclar (uniformidad química y térmica y para acelerar la desulfuración y desoxidación), seguida de una segunda etapa de burbujeo a bajo flujo para ahorro de costos y usando 2 o 3 tapones para limpiar el remanente de inclusiones no metálicas.

Referencias

- [1] Totten. G. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*; CRC Press: 2006.
- [2] <http://www.anselm.edu/homepage/dbanach/h-carnegie-steel.htm>, consultado el 2 de abril de 2012.
- [3] Szekely J. *Steelmaking and Industrial Ecology-Is Steel a Green Material?* ISIJ International. 1996, 36, 121-132.
- [4] <http://www.steeluniversity.org>, consultado el 3 de abril de 2012.
- [5] <http://www.energiron.com/tour/HYL%20DR-Minimill%20QTVR%20tour/files/supportdocs/overview/steelmaking.pdf>, consultado el 3 abril de 2012.
- [6] <http://www.steel.org/en/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/The%20Basic%20Oxygen%20Steelmaking%20Process.aspx>, consultado el 3 de abril de 2012.
- [7] http://www2.amk.fi/mater/tekniikka_ja_tuotanto/raktekn/streng2/files/StructEngII_Processing_91-101.pdf, consultado el 2 de abril de 2012.
- [8] http://www.canacero.org.mx/Archivos/Prensa/DocInformativos/SUPLEMENTO_SIDERURGICA_2012.pdf, consultado el 4 de abril de 2012
- [9] http://www.canacero.org.mx/archivos/Prensa/DocInformativos/Perfil_Industria_Siderurgica_2007-2011.pdf, consultado el 4 de abril de 2012.
- [10] <http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2012/2011>

- world-crude-steel-production.html, consultado el 20 de marzo de 2012.
- [11] http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/siderurgica/2010/ism-2010.pdf consultado el 4 de abril de 2012.
- [12] http://www.canacero.org.mx/archivos/Prensa/DocInformativos/Indicadores_Resumen_2002-2011.pdf, consultado el 5 de abril de 2012.
- [13] Frueham R. *Ladle Metallurgy: Principles and Practices*; Iron and Steel Society: 1985.
- [14] Mazumdar D.; Guthrie R. *The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems*. ISIJ International, 1995, 35, 1-20.
- [15] Szekely J.; Carlsson G. *Ladle metallurgy*; MRE Springer-Verlag: 1988.
- [16] Frueham R. *The Making Shaping and Treating of Steel*. The AISE Steel Foundation: 1998.
- [17] Zhang L.; Taniguchi, S.; Matsumoto K. *Water model study on inclusion removal from liquid steel by bubble flotation under turbulent conditions*. Ironmaking and steelmaking, 2002, 29, 325-336.
- [18] Zhang L.; Taniguchi S. *Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation*. International Materials Reviews. 2000, 45, 59-82.
- [19] Zheng S. G.; Zhu M. O. *Physical Modelling of Inclusion Behaviour in Secondary Refining with Argon Blowing*. Steel Research Int 79. 2008, 9, 685-690.
- [20] Kang Y.; Yu L.; Sichen D. *Study of inclusion removal mechanism around open eye in ladle treatment*. Iron making and steelmaking. 2007, 34, 253-261.

- [21] Szekely J.; Evans J.; Brimacombe J. *The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations*. Wiley-Interscience: 1988.
- [22] Israel Orta Sánchez. *Construcción de un modelo físico de un horno olla para la refinación secundaria de acero*. Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Química: 2008.
- [23] Edgar Francisco González Martínez. *Modelado físico de la cinética de remoción de inclusiones en ollas de acero agitadas con gas*. Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Química: 2011.
- [24] Ghorai S.; Roy G.; Roy S. *Physical Simulation of Impurity Renoval through Submerged Liquid Slag Injection in Steel Melt*. ISIJ International. 2004, 44, 37-42.
- [25] <http://www.columbia.edu/itc/ldeo/lackner/E4900/Themelis3.pdf>, consultado 18 abril de abril de 2012.
- [26] [http://www.corquiven.com.ve/PDF/MSDS-METIL-METACRILATO - MONOMERO.pdf](http://www.corquiven.com.ve/PDF/MSDS-METIL-METACRILATO-MONOMERO.pdf), consultado el 18 abril de 2012.
- [27] <http://physics.info/density/>, consultado el 18 abril de 2012.
- [28] Wang L.; Zhang Q.; Peng S.; Li Z. *Mathematical Model for Growth and Renoval of Inclusion in a Multi-Tuyere Ladle During Gas-Stirring*. ISIJ International. 2005, 45, 331-337.
- [29] http://www.matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle_stirring/stirring_4.htm, consultado el 18 de abril de 2012