



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**MODELADO FÍSICO DE LA CINÉTICA DE REMOCIÓN DE  
INCLUSIONES EN OLLAS DE ACERO AGITADAS CON GAS.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**EDGAR FRANCISCO GONZÁLEZ MARTÍNEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2011**



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

**2° SUPLENTE:** Profesor: AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: EDIFICIO D, FACULTAD DE QUIMICA UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:** \_\_\_\_\_

**Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez**

**SUPERVISOR TÉCNICO:** \_\_\_\_\_

**M. EN I. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA**

**SUSTENTANTE:** \_\_\_\_\_

**Edgar Francisco González Martínez**

## **Agradecimientos**

**Quiero agradecer el interés puesto que me incentivo para elaborar el presente trabajo, a las siguientes personas:**

**Al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez, por sus valiosos comentarios al engrandecimiento de este proyecto y por el tiempo dedicado y la revisión de este trabajo, gracias por su ayuda**

**Al M. en I. Adrian Manuel Amaro Villeda, por la entrega, esmero e ideas en toda la parte experimental, gracias por su ingenio.**

**Al Dr. Carlos González Rivera, por la disponibilidad y tiempo dedicado a la conclusión de este trabajo.**

**Al Ing. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco por la aportación de ideas y corrección de esta tesis y por el tiempo ofrecido.**

**A Beto Martínez por la ayuda, ideas y tiempo dedicado para que juntos pudiéramos concluir este proyecto.**

**Finalmente agradezco a la máxima casa de estudios: la Universidad Nacional Autónoma de México por darme una de las más grandes satisfacciones en mi vida y cultivar en mí a una mejor persona en beneficio de mi gente y mi país.**

**Dedicatorias.**

**Quiero reconocer y admirar el esfuerzo, coraje y amor de mi mamá que siempre creyó en mi y siempre me apoyo a pesar de cualquier circunstancia, gracias este trabajo es también para ti.**

**A mi papá, gracias por tus comentarios y por tus incansables incentivos, gracias por todo el apoyo que recibí de tu parte el cual fue mucho y no lo hubiera logrado sin tu ayuda.**

**A mi hermano Oscar, gracias por tu apoyo y por tu confianza, gracias por creer en mí.**

**A Alejandra mi sobrina, que con tu sonrisa y tus juegos hicieron todo este proceso más agradable, gracias por estar.**

**A mi tía Estela, gracias tía por siempre estar junto a nosotros, cuidarnos y querernos.**

**A ti Vanessita, que con tu buen humor y fe en mi logramos este proyecto tan grande en mi vida, te agradezco el tiempo compartido juntos y serán tiempos inolvidables.**

**A la banda: Leo y Eri, Omar y Alejandro, Carmen, Miriam (ropecita) y Lety, Alvaro y Lorena, Cesar, Angel y Zoe, Carlos (chiquilin), gracias por su amistad, confianza y por los buenos tiempos.**

**A ti Iyeli que has entrado en mi vida y has sido un motor para que yo siga en marcha con este proyecto y muchos más, gracias por el apoyo desinteresado.**

***Porque aunque estés en  
silencio sigues inspirando  
mi camino.***

***A ti Sergio  
que siempre te quiero y te recuerdo.***

## **Índice.**

### **Introducción.**

### **Capítulo 1**

#### **Marco teórico.**

<b>1.1</b>	Historia del acero.	10
<b>1.2</b>	La producción de acero en México y su posición en el mundo.	11
<b>1.2.1</b>	Minerales siderúrgicos.	14
<b>1.2.1.1</b>	Minerales de hierro.	14
<b>1.3</b>	Producción de acero.	16
<b>1.4</b>	Revisión bibliográfica de artículos más relevantes asociados con la eliminación de inclusiones.	20
	<b>Hipótesis</b>	26
	<b>Objetivo general</b>	26
	<b>Objetivos particulares</b>	26

### **Capítulo 2**

#### **Metodología experimental.**

<b>2.1</b>	Desarrollo experimental	27
<b>2.1.1</b>	Caracterización y preparación de partículas PMMA.	28

2.1.2	La elección de la sustancia a simular a la escoria en el modelo físico.	30
2.1.2.1	Pruebas preliminares	31
2.1.2.2	Protocolo de preparación	32
2.1.3	Parámetros de operación	35
2.1.4	Protocolo de experimentación.	42
<b>Capítulo 3</b>		
<b>Resultados y análisis.</b>		
3.1	Distribución y caracterización de partículas.	47
3.2	Curva de calibración de turbidez	49
3.3	Remoción de partículas en los tres experimentos	51
<b>Conclusiones</b>		54
<b>Referencias bibliográficas</b>		56
<b>Páginas de internet</b>		57

## **Introducción.**

En la producción de acero, y una vez terminado el proceso de aceración se refina el acero en lo que se denomina el proceso de horno olla, el cual es fundamental para asegurar la calidad del acero y que consiste en agitar el acero mediante la inyección de argón por el fondo a través de tapones porosos en presencia de escorias básicas y reductoras. En el horno olla se mejora la calidad del acero al:

- Eliminar inclusiones no metálicas indeseables.
- Incorporar elementos aleantes para satisfacer la composición química del grado de acero a fabricar.
- Eliminar elementos residuales nocivos a las propiedades mecánicas del acero como lo son el oxígeno, el azufre, fósforo, nitrógeno, carbono e hidrógeno a través de intercambios metal-escoria o gas-metal.
- Establecer uniformidad térmica y química
- Controlar la temperatura final del acero

La agitación del acero es fundamental para acelerar las cinéticas de eliminación de inclusiones y elementos residuales, así como establecer un mezclado óptimo y una uniformidad química y térmica. Esta agitación es promovida por la inyección de argón. Optimizar esta inyección puede mejorar la productividad y disminuir costos de producción. Uno de los aspectos más importantes es lograr la limpieza del acero la cual radica en eliminar el mayor número posible de las inclusiones no metálicas del acero y que por cierto es uno de los aspectos menos entendidos hasta ahora.

En esta tesis, con la ayuda de la modelación física se determinó la metodología experimental para realizar estudios de eliminación de inclusiones no metálicas del acero en un horno olla, empleando aceite de silicón, aceite de auto y finalmente un monómero de metacrilato de metilo en conjunto con partículas de polietileno y partículas de polimetilmetacrilato simulando la escoria y las inclusiones no metálicas del acero respectivamente. Este estudio facilitará la realización de experimentos posteriores para poder determinar las mejores condiciones

dinámicas y cinéticas para la remoción de las inclusiones como son: la posición y número de tapones y flujo.

Con este estudio se pretende entender la dinámica de las inclusiones dentro de un horno olla para poder eliminar el mayor número de éstas ya que debido a las condiciones agresivas de operación no se puede estudiar directamente en planta su dinámica, por eso, en este caso nos valemos de un modelo físico en el cual se utiliza una escoria haciendo mas realista el modelo comparado con los muy pocos trabajos que hay acerca de la eliminación de inclusiones, lo cual sin lugar a dudas da originalidad a este trabajo.

## Capítulo 1

### Marco teórico.

#### 1.1 Historia del acero.

Se desconoce la fecha exacta en que se descubrió la técnica para obtener hierro a partir de la fusión de minerales. Sin embargo, los primeros restos arqueológicos de utensilios de hierro datan del 3000 a. C. y fueron descubiertos en Egipto, aunque hay vestigios de adornos anteriores. Algunos de los primeros aceros provienen del este de África, cerca de 1400 A.C.<sup>1</sup>

Entre los siglos IX y X se produjo en Merv el acero de crisol (*Crucible steel*), consistente en obtener acero utilizando calentamiento lento a la vez que el hierro y el carbón eran enfriados mediante distintas técnicas.

Fue Benjamín Huntsman quien desarrolló un procedimiento para fundir hierro forjado con carbono, obteniendo de esta forma el primer acero conocido.<sup>15</sup>

El proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. Esto hizo posible la fabricación de acero en grandes cantidades.<sup>16</sup>

En 1857, Carl Wilhelm Siemens ideó otro procedimiento de fabricación industrial del acero, que en la actualidad ha caído en desuso: el reactor Siemens-Martin. En este reactor se da la descarburación de la fundición de hierro dulce y óxido de hierro, calentando con aceite, gas de coque, o una mezcla de gas de alto horno y de coque.

El metalúrgico francés Paul Héroult inició en 1902 la producción comercial del acero en hornos eléctricos a arco.

En 1948 se inventa el proceso del convertidor básico al oxígeno o BOF por sus siglas en inglés. El éxito se logró en Austria en 1948, cuando una fábrica de

acero situada cerca de la ciudad de Linz, Donawitz desarrolló el proceso del oxígeno básico. En 1950 se inventa el proceso de colada continua que se usa cuando se requiere producir perfiles laminados de acero de sección constante y en grandes cantidades.

En la actualidad se utilizan algunos metales y metaloides en forma de ferroaleaciones, que, unidos al acero, le proporcionan excelentes propiedades de dureza y resistencia mecánica.<sup>15</sup>

## **1.2. La producción de acero en México y su posición en el mundo.**

China ha mantenido constante el crecimiento en su producción de acero, en contraste con el resto del mundo que cayó 7% en 2009, pero que se recuperó 15% en 2010. Este crecimiento no es suficiente para alcanzar los niveles de producción de acero anteriores a la crisis.

China y Japón son los mayores productores de acero en el mundo, dejando en la tercera posición a Estados Unidos. México se ubicó en el lugar 13, luego que en 2009 superó a Francia y en 2010 a España al sumar 16.7 millones de toneladas de acero (Ver Tabla 1). La producción de acero en México creció 19.7% en el 2010 siendo noviembre el menor mes de producción con 1.3 millones de toneladas, mientras que mayo fue el mes con mayor volumen de producción con 1.5 millones. Durante este año, fueron cinco los meses en los que se superaron las 1.4 millones de toneladas producidas y en general el promedio mensual de producción fue más constante con relación al 2009. La mayor parte del crecimiento en la producción de acero del 2010 está relacionada con el incremento en la demanda del sector industrial, motivada principalmente por las exportaciones de producto terminado hacia los Estados Unidos.

PRODUCCIÓN DE ACERO POR REGIÓN (Millones de Toneladas)

PROYECTO	2008	2009	2010	VAR% 10/09
<b>Asia</b>	<b>771.0</b>	<b>804.9</b>	<b>897.9</b>	<b>11.6</b>
China	500.3	573.6	626.7	9.3
Japón	118.7	87.5	109.6	25.2
<b>Europa</b>	<b>331.6</b>	<b>255.7</b>	<b>300.7</b>	<b>17.6</b>
Rusia	68.5	60.0	67.0	11.7
<b>Norteamérica</b>	<b>124.5</b>	<b>82.4</b>	<b>111.5</b>	<b>35.3</b>
EUA	91.4	58.2	80.6	38.5
México	17.2	14.0	16.7	19.7
<b>Sudamérica</b>	<b>47.4</b>	<b>37.8</b>	<b>43.8</b>	<b>15.9</b>
Brasil	33.7	26.5	32.8	23.8
<b>Medio Oriente</b>	<b>16.6</b>	<b>17.7</b>	<b>19.6</b>	<b>11.0</b>
Irán	10.0	10.9	12.0	10.0
<b>África</b>	<b>17.0</b>	<b>15.2</b>	<b>17.5</b>	<b>15.4</b>
Sudáfrica	8.3	7.5	8.5	13.3
<b>Oceania</b>	<b>8.4</b>	<b>6.0</b>	<b>8.1</b>	<b>35.5</b>
Australia	7.6	5.2	7.3	39.0
<b>Total Mundial</b>	<b>1,327.2</b>	<b>1,229.4</b>	<b>1,413.3</b>	<b>15.0</b>

Fuente: W.S.A.

Tabla 1.- producción de acero por región (Millones de toneladas).<sup>2</sup>

El 2010, la empresa con mayor crecimiento fue ArcelorMittal con 38% después de haberse visto afectada por huelgas en el 2009. Esta recuperación del mercado le ayudó a posicionarse nuevamente como el principal productor de acero en México con 3.95 millones de toneladas anuales.

En segundo lugar se encuentra AHMSA con 3.69 millones de toneladas anuales y un crecimiento de 23% con respecto al año anterior. Esta mejora en su producción motivó a la reactivación del proyecto "El Fénix" arrancando pruebas en el nuevo Alto Horno 6 (AH6) de Altos Hornos de México (AHMSA), que entró en operación productiva, con capacidad para generar 4 mil toneladas diarias de arrabio (hierro de primera fusión).

Instalado en la Siderúrgica 1 de AHMSA en Monclova, el AH6 requirió una inversión de 250 millones de dólares y fue diseñado a partir de tecnología propia por técnicos de Altos Hornos de México y cuenta con los más avanzados equipos automatizados de operación y control.

El Alto Horno 6 es la primera unidad productiva que entra en operación dentro del Proyecto Fénix, destinado a concretar la máxima capacidad de AHMSA para incrementar en 40 por ciento sus actuales niveles de fabricación y alcanzar las 5 millones de toneladas anuales de acero líquido.

Con 70 metros de altura, la construcción del AH6 requirió 10 mil toneladas de estructuras y piezas de acero, 3 mil 800 metros de bandas transportadoras de mineral y fundentes, y 2 mil 800 toneladas de ladrillo y concreto refractario para soportar las temperaturas mayores a 1,200 grados en su operación.

Acorde con el compromiso ambiental de AHMSA, EL AH6 cuenta con avanzados sistemas de control a través de la captura, extracción, confinamiento y lavado de gases y partículas, así como un circuito cerrado de 42 kilómetros de tuberías para agua, que permite reutilizar los 40 litros por segundo requeridos para su enfriamiento.<sup>17</sup>

Ternium mostró una tendencia más estable en la producción de acero, debido a que mantuvo un nivel de exportaciones constante en el periodo 2008-2010.<sup>5</sup> La Tabla 2, muestra las producciones de 2008 a 2010 de las empresas productoras de acero más importantes en México.

**PRODUCCIÓN NACIONAL  
DE ACERO POR EMPRESAS**  
(Miles de toneladas)

Empresa	2008	2009	2010	Var %
• ArcelorMittal	4,987	2,867	3,949	37.7
• AHMSA	3,667	2,990	3,690	23.4
• Ternium	2,975	3,038	3,381	11.3
• DeAcero	2,189	2,038	2,266	11.2
• Tamsa	839	701	869	23.9
• Otros	2,571	2,323	2,486	7.1
<b>Total</b>	<b>17,230</b>	<b>13,957</b>	<b>16,710</b>	<b>19.7</b>

Fuente: Canacero

Tabla 2. Producción nacional de acero por empresas, (miles de toneladas).<sup>2</sup>

### 1.2.1 Minerales siderúrgicos.

Tras la crisis financiera global, la producción mundial de acero en 2010 mostró señales de recuperación al registrarse un crecimiento de 15% frente al bienio anterior en que se registraron pérdidas en el 2008 de -1.4% y en el 2009 de -7.4%. Esta significativa alza, propició que minerales como el manganeso, coque y pellet de hierro también incrementaran su producción.<sup>2</sup>

#### 1.2.1.1 Mineral de hierro.

La demanda de mineral de hierro incrementó debido a la recuperación en el consumo de acero y por la reposición de inventarios.

China, el mayor consumidor de acero en el mundo, no es autosuficiente en mineral de hierro y, por el contrario, es el mayor importador con 70% de sus requerimientos. Esa alta demanda propició que el precio internacional oscilara entre 120 a 170 dólares por tonelada, un significativo incremento frente al precio de 70 a 115 dólares por tonelada del 2009.

Cabe destacar que México no posee significativas reservas de mineral de hierro, las cuales, sin embargo, cubren la demanda nacional actual y futura (Ver Figura 1).

DISTRIBUCIÓN DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE MINERAL DE HIERRO 2010

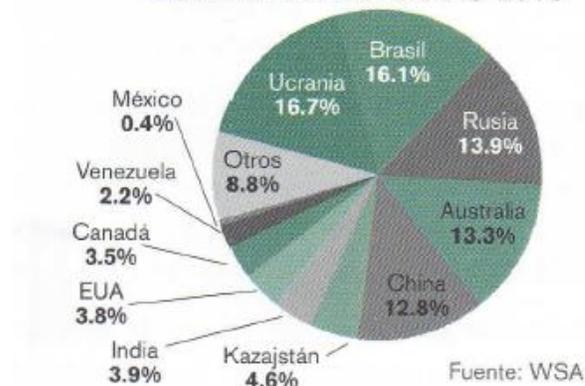


Figura 1. Distribución de las reservas mundiales de mineral de hierro 2010.<sup>2</sup>

Cifras del INEGI indican que se produjeron en nuestro país 13.9 millones de toneladas de mineral de hierro en 2010, 20% más que en 2009. En los estados de Colima, Durango y Michoacán se concentra el 100% del total de la producción (ver Tabla 3).

**PRODUCCIÓN NACIONAL  
DE PELLETS DE MINERAL  
DE HIERRO POR EMPRESA**  
(Miles de toneladas)

Empresa	2010	2009	Var %
GAN	4,095	3,637	12.6
Peña Colorada	4,070	4,011	1.5
Ternium	1,756	1,756	-6.7
ArcelorMittal	3,910	2,526	54.8
<b>Total</b>	<b>13,831</b>	<b>11,930</b>	<b>15.9</b>

Tabla 3. Producción nacional de pellets de mineral de hierro por empresa, (miles de toneladas).<sup>2</sup>

De acuerdo con el Grupo de Minerales Siderúrgicos de la Camimex la producción de pellets de hierro en el año fue de 13.8 millones de toneladas, 16% más que en 2009.

Los datos anualizados del INEGI reportaron una producción de pellets de hierro de 7.9 millones de toneladas, con un valor de 7 mil 88 millones de pesos, 45% más que en 2009.

La gran demanda de mineral de hierro en China ha provocado el crecimiento de la minería furtiva e ilegal en el mundo. Entre 2009 y 2010, en México se exportaron más de un millón de toneladas adicionales de mineral de hierro hacia China. Este mineral fue exportado principalmente por los puertos de Lázaro Cárdenas y Manzanillo por 14 nuevas empresas, que actuaron como traders o consolidadores. La Secretaría de Economía está implementando medidas para controlar la exportación de mineral extraído ilegalmente.

En México se prevé superar marginalmente la producción de pellet debido al anuncio de proyectos de expansión de reservas. La tendencia mundial señala que los precios del mineral de hierro continuarán incrementándose de manera significativa como se aprecia en la Figura 2, que muestra el aumento en el precio del mineral de hierro en la última década.<sup>2</sup>



Figura 2. Evolución del precio del mineral de hierro en la última década<sup>2</sup>

### 1.3 Producción de acero.

En la Figura 3 se presentan algunas de las etapas individuales que participan en la fabricación de acero.



Figura 3. Etapas en la fabricación de acero<sup>18</sup>

Dentro de las etapas para la fabricación de acero hablaremos primeramente de lo que se conoce como ruta integrada, donde el proceso comienza con la extracción del mineral de hierro, la obtención de coque a partir del carbón y la explotación de piedra caliza, así como la preparación de los diferentes minerales que incluyen el lavado, triturado, cribado y sinterizado a una temperatura adecuada. Una vez completada ésta etapa de preparación de los minerales, estos se procesan en el alto horno y como producto resultante obtenemos al llamado arrabio y a la escoria. El arrabio contiene un alto porcentaje de carbono y otros elementos que impiden su uso como producto final. Esta refinación se hace en la etapa de aceración o refinación primaria que consiste en cargar arrabio desde el alto horno junto con la escoria. Un jet supersónico de oxígeno sopla la carga a través de una lanza insertada desde arriba del horno. Esta operación oxida gran parte del carbono, silicio, manganeso, y fósforo. Una alternativa para la producción de acero dentro de la ruta integrada es el proceso de reducción directa, que emplea agentes reductores como el gas natural, coque, monóxido de carbono o grafito. El procedimiento consiste en triturar el mineral de hierro y pasarla por un reactor con los agentes reductores, con lo que algunos elementos no convenientes para la fusión de hierro son eliminados. El producto de la reducción directa es el hierro esponja, que proviene de pellets de mineral de hierro, y que al reducirse quedan huecos por la mayor densidad del hierro que la del mineral precursor. Este hierro esponja o DRI (Direct Reduced Iron) se puede cargar directamente en el horno de arco eléctrico para la producción de acero.<sup>19,3</sup>

Para la ruta no integrada de producción de acero se parte de chatarra de acero que es fundida en hornos de arco eléctrico. Estos hornos funden acero aplicando arcos eléctricos a una carga de chatarra por medio de electrodos de grafito. Para producir una tonelada de acero partiendo de chatarra como carga se requiere aproximadamente 350kWh a 440kWh de electricidad y el tiempo estimado es de 60 min y en algunos hornos de 35 a 40 min, y la temperatura del arco eléctrico supera los 10,000°C.<sup>4 20 21</sup>

El proceso de fabricación del acero, se completa mediante la llamada metalurgia secundaria. Los objetivos principales para el tratamiento de la olla o refinación secundaria incluyen desoxidación, desulfuración, adición de elementos de aleación, control de la forma y eliminación de las inclusiones, mezclado químico, y mezclado térmico.<sup>5</sup>

El acero producido en la refinación primaria en el convertidor con oxígeno o en el horno de arco eléctrico, se puede refinar en un dispositivo llamado horno olla (ver Figura 4). La olla se transporta a la posición donde se encuentra una cubierta provista de tres electrodos de grafito conectados a un transformador trifásico. Los arcos eléctricos producidos son capaces de calentar al acero a una rapidez de  $3^{\circ}\text{C} / \text{min}^{22}$ . En el fondo de la olla se tiene uno (o dos) tapones porosos empotrados en el refractario, conectados a una tubería que suministra argón. Este horno olla además está equipado con una lanza de agentes desulfurantes, así como los gases producidos en la refinación secundaria son extraídos a través de la cubierta. Los elementos de aleación y/o componentes de descorificación pueden ser añadidos por la parte superior del horno olla.

La inyección de gas argón no solo contribuye a la homogenización de temperatura y composición química del acero al agitarlo, sino que también ayuda a remover inclusiones. Las inclusiones deben de ser capturadas por la escoria como paso final del proceso de refinación.<sup>6</sup>



Figura 4. Izquierda. Horno olla en las instalaciones de NKMZ en Ucrania.<sup>23</sup>

Derecha. Esquema de un horno olla.<sup>22</sup>

Como se indicó inicialmente, la metalurgia secundaria en particular, ha contribuido a una mejora significativa en la productividad y la calidad de fabricación de acero teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- La desoxidación, descarbonización y desulfuración de acero y el ajuste del contenido de elementos de aleación para lograr la composición química requerida.
- Eliminación o flotación de inclusiones no metálicas a la escoria.
- Modificación de inclusiones mediante la alimentación de calcio ( $\text{CaSi}$ ,  $\text{CaC}_2$ ).
- Tratamiento de vacío que se realiza para disminuir la cantidad de los gases hidrógeno y nitrógeno disueltos en el acero.
- Homogenización de la temperatura en toda la olla para evitar gradientes térmicos.
- El ajuste de la temperatura de colada también se realiza durante la metalurgia secundaria <sup>7</sup>

Además existen varias opciones de refinación de acuerdo a la calidad y grado de acero a producir. En la Figura 5 se muestran algunas variaciones en procesos de metalurgia secundaria para remover impurezas como carbono, azufre, hidrógeno, nitrógeno, etc.

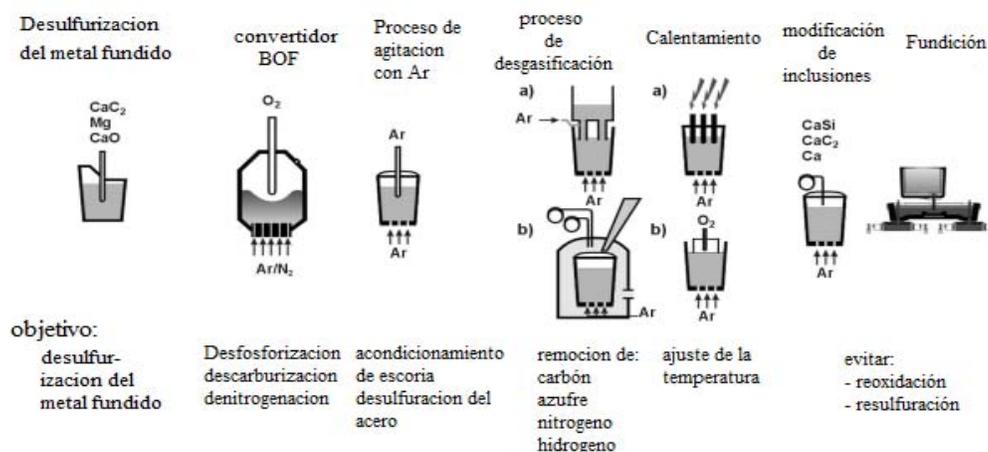


Figura 5. posibles etapas de producción de acero en la metalurgia secundaria. <sup>18</sup>

El siguiente pasó en la producción de acero es la colada continua que ha sustituido en gran medida la tradicional fundición en lingoteras, debido a la mayor producción, menores costos de energía y la mejora en la calidad. Sin embargo, la colada continua requiere una mayor demanda en la calidad de acero, en donde la composición, la temperatura y el nivel de inclusiones no metálicas deben ser estrictamente controlados. El producto final de la colada continua nos da como producto secciones largas (slabs), medias (blooms), y pequeñas (billets) que posteriormente serán laminadas para usos como panel de autos, laminas para productos de línea blanca, vigas para la construcción, varillas, alambón, entre muchas otras (Ver Figura 6).<sup>7</sup>

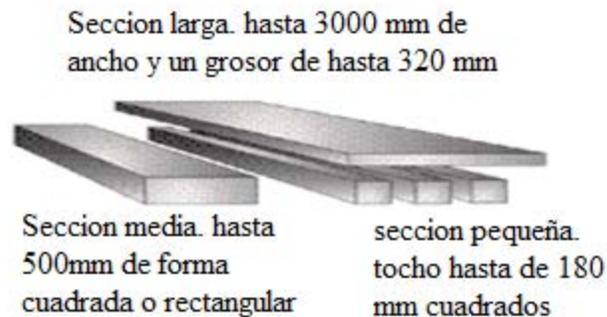


Figura 6. Diferentes secciones de acero producidas en la colada continua.<sup>24</sup>

#### 1.4 Revisión bibliográfica de artículos más relevantes asociados con la eliminación de inclusiones.

Shu-gou Z. y Miao-yong Z<sup>8</sup> investigaron mediante un modelo físico la remoción de las inclusiones mediante la inyección de gas. Reportan la construcción de un modelo físico con una escala 1:9 con la configuración experimental mostrada esquemáticamente en la Figura 7. Una solución de NaCl y aire fueron escogidos para simular el metal líquido y el argón respectivamente, mientras que gotas de aceite de dibutil ftalato fueron escogidas para simular las inclusiones. Las gotas colisionadas pueden coalescer unas con otras bajo la acción de la tensión interfacial, lo cual es similar a la colisión y agregación de inclusiones no metálicas

en el acero líquido. Estos fenómenos así como la distribución de tamaños se presentan en la Figura 8.

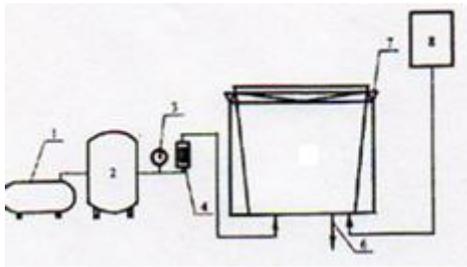
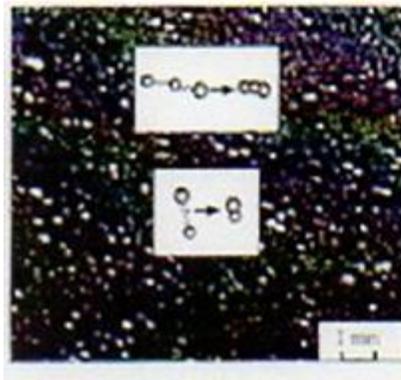


Figura 7. Diagrama esquemático del arreglo experimental. 1: Compresor de aire; 2: tanque de aire; 3: medidor de presión; 4: control de flujo de gas; 5: modelo de la olla; 6: desagüe; 7: contenedor de desbordamiento; 8: tanque de agua.<sup>8</sup>



% fracción volumen

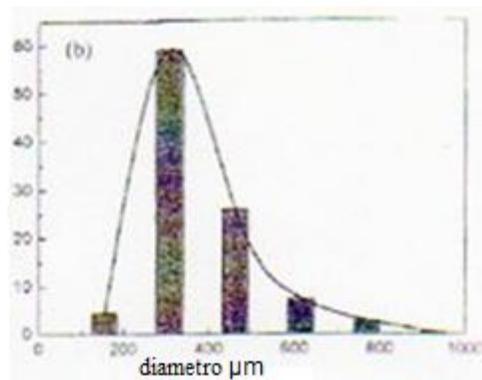


Figura 8. Izq. Colisión y agregación de las partículas de la emulsión. Der.

Distribución de partículas<sup>8</sup>

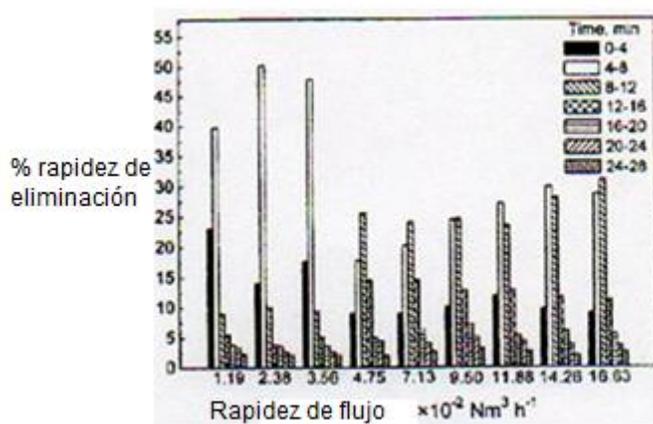


Figura 9. Porcentaje de remoción de inclusiones en función del flujo de gas y del tiempo.<sup>8</sup>

Una de las consideraciones tomadas por los autores de este artículo es suponer que las partículas (inclusiones) de aceite se comportan de igual manera

que las partículas en la flotación de minerales, la cual nos dice que las burbujas atraparán y arrastrarán a las partículas hasta la parte superior del baño y serán eliminadas por flotación. Sin embargo, esto no es así en la realidad de una olla de metalurgia secundaria puesto que las inclusiones no metálicas en el acero no se eliminan por flotación. Otro aspecto poco realista de este modelo físico, es que no toma en cuenta una capa de escoria encima del líquido, lo que resulta en una representación poco aproximada de la fluidinámica en el interior del modelo físico en relación al sistema real. Por lo que podemos decir que su modelo físico no es realista, pudiendo generar resultados inválidos en cuanto a la cinética de remoción de inclusiones. Los resultados presentados indican una gran influencia del flujo de gas en la cinética de remoción de las inclusiones, obteniéndose una mejor remoción con flujos de gas bajos (Ver Figura 9).

Otro trabajo reportado sobre la remoción de inclusiones con modelado físico fue el de Y. J. Kang, L. Yu y Du Sichen<sup>9</sup>, en donde se estudia la remoción de las inclusiones debido a un flujo crítico de gas que genera un ojo abierto en el sistema. Agua fue utilizada para simular el baño de acero y aceites de silicón de diferentes viscosidades para simular la escoria. Para simular a las inclusiones se utilizó aceite de silicón, y su preparación fue la siguiente: para obtener gotas de aceite lo más pequeñas posibles, se agitó el aceite y una porción de agua en un agitador magnético a  $600 \text{ rev min}^{-1}$  durante 6 horas, las gotas obtenidas son de alrededor de 0.1mm. Para obtener imágenes claras de la eliminación de estas partículas se colorearon con un aceite de color azul en una porción muy pequeña (0.05g) el cual no era soluble en agua y solo pintó las gotitas de aceite. Una segunda opción para la simulación de las inclusiones fue usar polvo de carbón el cual se hizo pasar por mallas para obtener los diferentes tamaños de partículas; 140, 87 y 45 micrómetros. Este polvo se secó en un horno a 383K durante doce horas y al igual que las gotitas de aceite estas se mezclaron con agua en un agitador magnético a  $600 \text{ rev min}^{-1}$  durante 6 horas.

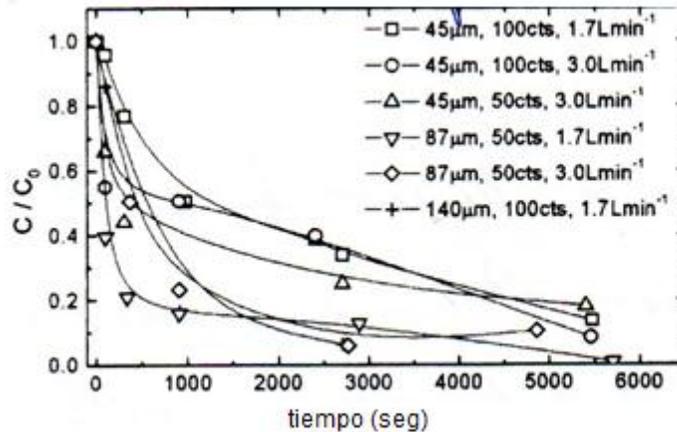


Figura 10. Concentración normalizada  $C/C_0$  de partículas de carbón en función del tiempo.<sup>9</sup>

Observamos en la Figura 10 que la concentración de inclusiones decrece rápidamente al principio de la inyección de gas. El autor concluye que la rapidez de la remoción de las partículas de carbón depende mucho de las condiciones experimentales, especialmente del tamaño de las partículas. Mientras más partículas grandes haya en el sistema, mayor será la rapidez de remoción de inclusiones. A una alta rapidez de flujo se asocia una mayor rapidez de remoción de inclusiones en este experimento.

Las variables con las que decide trabajar el autor de este modelo son diferentes tamaños de partículas y diferentes flujos de gas. Los tamaños de las partículas no corresponden al escalamiento usado por el autor por lo que no se cumplen estrictamente los criterios de similitud. Para que fuera más real su modelo debería de trabajar con partículas más pequeñas. Por lo tanto, sus resultados no son confiables porque los criterios de similitud dinámica no se satisfacen, aunque no podemos descartar que el trabajo pueda dilucidar el mecanismo de remoción de las inclusiones.<sup>9</sup>

Lifeng Zhang, S. Taniguchi, y K. Matsumoto<sup>10</sup>, estudiaron la remoción de inclusiones del acero líquido por flotación de burbujas bajo condiciones turbulentas usando un modelo físico. Las variables que se analizan en este modelo son el tamaño de los poros del tapón, la rapidez de flujo, la concentración de NaCl y la velocidad de agitación.

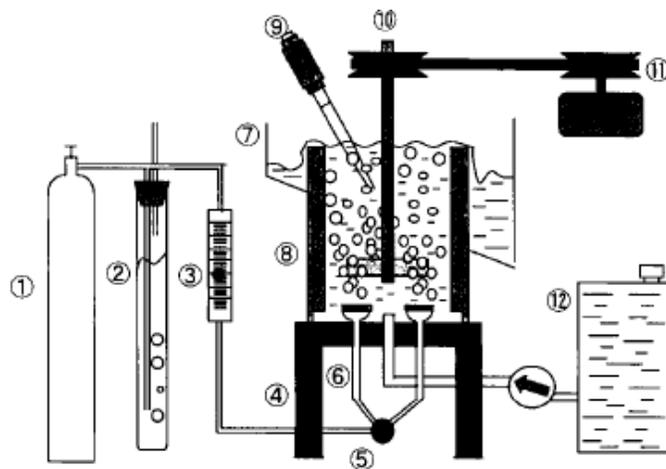


Figura 11. Representación del equipo experimental en la remoción de partículas por flotación de burbujas<sup>10</sup>

En este caso se utilizan partículas de polimetilmetacrilato para simular las inclusiones y agua para simular el baño metálico y en la Figura 11 se presenta un esquema del arreglo experimental del modelo físico. La remoción de las inclusiones se logra por el desbordamiento del líquido por la parte superior del tanque.

Los efectos de la rapidez del flujo en la remoción de las partículas por flotación de las burbujas nos dice que incrementando la rapidez se acelera la remoción de las inclusiones y cuando la rapidez de flujo es cero, o sea cuando no hay inyección de gas, algunas partículas son removidas como resultado del sobrellenado o desborde del agua. Otro efecto a destacar es la velocidad de la agitación. Si la velocidad de agitación es alta, se genera mayor turbulencia y

tamaños de burbuja muy pequeños con lo que se consigue atrapar mayor número de partículas debido a las colisiones más probables y frecuentes entre las partículas y las burbujas. Por el contrario, cuando la velocidad de agitación es muy baja, hay menor remoción de inclusiones. Se concluye que un tamaño de burbuja grande provoca una remoción más lenta que con burbujas pequeñas. Por último, partículas grandes serán más fácilmente removidas del sistema que las partículas pequeñas.

Este modelo físico está muy alejado de lo que es la realidad de la refinación secundaria, ya que ninguno de los procesos de refinación secundaria industriales en México es similar al descrito en este trabajo, es decir, no presentan agitación mecánica del baño metálico ni remoción de las inclusiones por flotación. Otro de los puntos no considerados en este trabajo es la escoria, lo cual aleja la aproximación del modelo, por lo que estos resultados no son aplicables a la industria.<sup>10</sup>

De esta revisión breve de la literatura especializada se puede concluir que los modelos físicos que se han usado para estudiar la remoción de inclusiones no se aproximan a la realidad de la refinación secundaria del acero, distintos autores reportan resultados contradictorios entre sí, y que es uno de los temas menos estudiados hasta ahora, a pesar de que la remoción de inclusiones es actualmente uno de los temas que más preocupan en la producción de acero debido a que las demandas en calidad del acero aumentan día a día. Es decir, es muy importante encontrar la manera de eliminar las inclusiones de manera más eficiente, por lo que este trabajo de tesis intenta proponer una nueva metodología que permita modelar físicamente la remoción de inclusiones de manera más realista que los esfuerzos reportados hasta ahora.

## **Hipótesis.**

Usando modelado físico con agua, monómero de metil metacrilato y partículas de polimetilmetacrilato, es posible simular el sistema acero-escoria-inclusiones para medir la cinética de eliminación de inclusiones.

El arrastre es la principal fuerza que actúa sobre las partículas o inclusiones por lo que es posible usar partículas de polimetilmetacrilato para simular inclusiones en el acero líquido, a pesar de que la relación de densidades partícula/líquido no se respeta en el modelo respecto al sistema acero inclusiones.

## **Objetivo General.**

Modelar físicamente la eliminación de inclusiones de acero líquido en ollas agitadas con gas.

## **Objetivos Particulares.**

Determinar un fluido inmiscible en agua que simule la presencia de escoria en un horno olla a través del modelado físico.

Establecer una metodología experimental que sirva para realizar estudios de la cinética de eliminación de inclusiones no metálicas del acero a través de modelado físico, empleando una sustancia simulando escoria y partículas de polimetilmetacrilato simulando las inclusiones no metálicas en el acero.

## Capítulo 2

### Metodología experimental.

#### 2.1 Desarrollo experimental.

Con la ayuda de los artículos leídos relacionados con la modelación física de un horno olla se determinó simular a las inclusiones no metálicas en el acero con partículas de polimetilmetacrilato también conocido por sus siglas en inglés como PMMA. Se eligieron estas partículas para simular las inclusiones debido a que tienen una mayor similitud geométrica y dinámica con las inclusiones reales en el acero.

La similitud geométrica como su nombre lo indica se refiere a la similitud en la forma de los sistemas. Dos sistemas son geoméricamente similares si la relación entre la longitud de un sistema y su correspondiente longitud en el modelo es la misma en cualquier otro sitio, la relación se denomina factor de escala  $\lambda$ .

El modelo físico de la olla presenta un factor de escala de  $\lambda=1/6$ , con respecto a un horno olla utilizado en la empresa TAMSA. Las dimensiones tanto del horno real de TAMSA como las del modelo físico se pueden apreciar en la Tabla 4. Se utilizó un reactor cilíndrico de acrílico de 53.7 cm de diámetro por 62.2 cm de altura, como nuestro modelo físico construido previamente en el grupo del Dr. Ramírez Argáez en la Facultad de Química.

Después de un arduo trabajo también se determinó que la mejor simulación de escoria para nuestro modelo físico es la utilización de una capa de monómero. Se emplea un fluido de viscosidad cinemática similar que el sistema real, por lo que el agua es el líquido natural para simular el acero, así que a lo largo de este capítulo detallaremos el porqué de utilizar estos diferentes materiales y con que criterios se llegó a tomar la decisión de utilizarlos.

	Altura del horno [m]	Altura del baño [m]	Diámetro del horno [m]
Olla industrial	3.736	2.460	3.226
Modelo físico	0.622	0.410	0.537

Tabla 4. Valores geométricos de un horno olla industrial propiedad de Tenaris TAMSA Y los del modelo físico.<sup>11</sup>

### 2.1.1 Caracterización y preparación de partículas PMMA.

El primer paso en el desarrollo experimental fue la caracterización de las partículas de polimetilmetacrilato. Estas partículas se analizaron en un visualizador de imágenes con ayuda de un microscopio metalográfico observando las partículas a diferentes aumentos de 10X, 20X, 25X. El procedimiento utilizado para el análisis de tamaño fue el siguiente:

1. Una muestra de partículas de PMMA de aproximadamente 500 gramos se vació a un vaso de precipitados de 800ml para poder mezclar las partículas y así conseguir una muestra homogénea, ya que debido a la gravedad y al peso de las partículas, se podría observar solo partículas grandes estratificadas en la parte superior del frasco de PMMA.
2. Una vez que se tienen bien mezcladas las partículas, se colocan en un portaobjeto y se humedecen con unas gotitas de alcohol para evitar que las partículas se caigan al objetivo.
3. Ya que se tienen enfocadas las partículas en el microscopio, se elige una zona donde se encuentre un mayor número de partículas, se toma la fotografía y con ayuda del visualizador de imágenes se miden cada una de las partículas, tal y como lo podemos ver en la Figura 12.
4. En este desarrollo experimental se tomaron 15 muestras y cada muestra tenía alrededor de 350 partículas. Los resultados arrojados por este

muestreo determinaron que las 15 muestras fueron suficientes para determinar el promedio del tamaño de las partículas de PMMA.

5. Los datos del tamaño de las partículas de las diferentes muestras, se trataron de la siguiente manera: se contó el número de partículas que había en los rangos de tamaño de 0-10 $\mu$ , 10-20 $\mu$ , 20-30 $\mu$  y así subsecuente hasta llegar al tamaño mayor, para obtener la frecuencia de los diferentes tamaños. Posteriormente, se graficaron estos resultados.

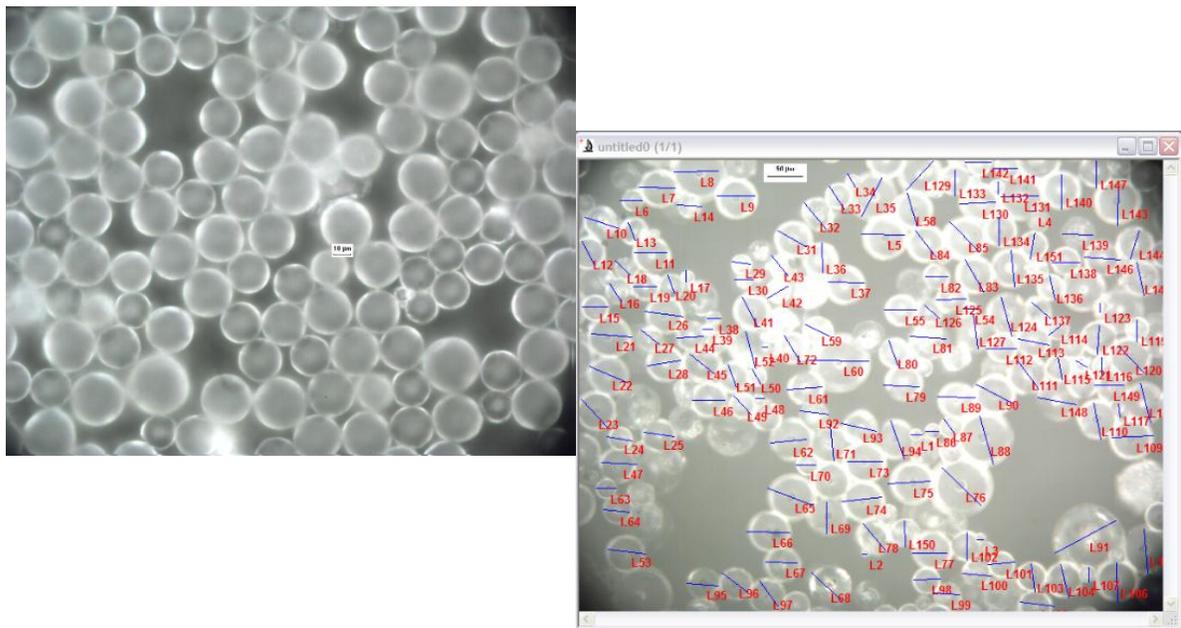


Figura 12. Partículas de PMMA vistas a 10X en un microscopio metalográfico y su posterior medición en un visualizador de imágenes.

El siguiente paso de la metodología propuesta es la preparación de las partículas. Como estas partículas son un polímero, es difícil humectarlas solo con agua por lo que se encontró en la literatura que se pueden humectar con alcohol, esto es para que no floten y formen conglomerados de estas esferitas en la parte superior del baño. Lo que se pretende con la humectación de estas partículas es distribuir las homogéneamente en todo el baño de agua y que queden suspendidas en el seno del baño, tal y como pasa con las inclusiones en un horno olla

industrial. El procedimiento propuesto para humectar y preparar las partículas a partir de varios intentos en el laboratorio queda como sigue:

- Se pesa la cantidad deseada de partículas de PMMA en una balanza analítica en un vaso de precipitados limpio y seco.
- Con una pipeta se verterá alcohol hasta que el total de la masa de PMMA quede húmeda.
- Previamente se tiene en un vaso de precipitados agua y un agitador magnético. En este vaso se vierten las partículas húmedas de PMMA y se ayuda a bajar toda la masa con una pipeta de alcohol, intentando que las partículas caigan en el vórtice formado por la agitación, con la finalidad de que no se formen conglomerados en la superficie de este baño.
- El tiempo de agitación es de 5 min para que las partículas estén bien humectadas y a la hora de vaciarlas en el reactor de plexiglás se homogenicen en el baño y no formen conglomerados de partículas

### **2.1.2 Elección de la sustancia idónea para simular a la escoria en el modelo físico.**

El segundo paso del desarrollo experimental de esta tesis, fue la búsqueda de la sustancia que simule mejor a la escoria para nuestro modelo físico. Cuando el objetivo es simular la fluidinámica de sistemas acero-escoria con modelado físico, existen varias opciones reportadas en la literatura, sin embargo, siendo nuestro objetivo eliminar inclusiones del agua y atraparlas en la fase escoria, la elección es mucho más compleja y la literatura especializada no proporciona sugerencias adecuadas, por lo que un aspecto vital en este trabajo y que consideramos de gran valor y originalidad es la determinación de la sustancia que además de simular fluidináticamente a la escoria, atrape a las inclusiones y nos permita evaluar con el modelo físico la cinética de remoción de inclusiones. Antes de encontrar el que fuera el mejor sistema agua-escoria para nuestro sistema se hicieron una serie de experimentos que a continuación se mencionan.

### **2.1.2.1 Pruebas preliminares**

Debido a los costos de la experimentación en el reactor original de nuestro modelo físico (1:6) se creyó pertinente construir un modelo físico un poco más pequeño para fines prácticos y económicos; cuyas características son: factor de escala 1/32 respecto a un horno olla utilizado en la industria (ver Figura 13). En este modelo se realizaron pruebas para encontrar la sustancia que más nos acercara a la realidad para la simulación de la escoria. El primer sistema estudiado fue el de agua – aceite de silicón. Los resultados en este experimento no fueron alentadores ya que esta capa de aceite no era capaz de atrapar las inclusiones de PMMA. Otro problema fue que la viscosidad de este aceite es muy baja, lo que con flujos altos de gas genera emulsiones de aceite en agua por lo que las pocas partículas atrapadas volvían a reintegrarse al agua. Tomando en cuenta esta problemática se buscaron diferentes aceites con grados de viscosidad mayor que ayudaría a corregir el mencionado problema. La emulsión se evitó con un aceite de auto, pero la remoción de las inclusiones seguía sin éxito. Algunas partículas se atraparon, pero en su mayoría seguían flotando en el baño de agua. Este modelo se instrumentó con un turbidímetro para la medición de turbidez, con el objetivo de determinar la cinética de remoción de inclusiones, en nuestro caso de partículas de polimetilmetacrilato. A mayor concentración de partículas mayor turbidez.



Figura 13. Modelo físico (1/32). Equipo experimental; Turbidímetro, Jeringa, Compresor, Rotámetro.

### 2.1.2.2 Protocolo de preparación

Después de hacer varios intentos hechos con distintas sustancias para simular a la escoria que atrape inclusiones, se utilizó un monómero líquido para la remoción de las partículas de PMMA, debido a que este monómero tiene la densidad adecuada para retener este líquido en la parte superior del baño de agua simulando a la escoria real de un horno olla. Se utilizó polietileno de baja densidad para lograr una capa delgada del polietileno y monómero como una simulación de la escoria:

1. Hojas de polietileno se hacen rollo lo más compacto posible para así poder triturarlas con ayuda de una carda y obtener partículas finas de este material, las cuales son recolectadas en un contenedor limpio. Es muy importante cuidar que las partículas queden lo más homogéneas de tamaño

posible y que caigan directamente al contenedor para contar con partículas limpias.

2. Después, estas partículas se criban con ayuda de una maquina Ro Tap (testing sieve shaker model B, Tyler industrial products), mostrada en la Figura 14, mediante 6 diferentes mallas: 6, 12, 20, 30 y 40, para eliminar a las partículas más finas, ya que estas precipitan y se irán directamente a la superficie del baño de agua. Lo que se busca al cribar las partículas de polietileno es tener el tamaño correcto para que estas queden flotando en el baño aun cuando el flujo de fluidos interno pudiera ser muy turbulento.



Figura 14. Ro tap donde se realizaron las pruebas de cribado del poliuretano.

3. Una vez que se tiene homogéneo el tamaño de las partículas de polietileno se mojan con el monómero y debido a que el polietileno es muy poroso, éste absorbe muy bien al líquido y así se obtiene lo que constituye nuestra capa de escoria (sistema polietileno- monómero). En la Figura 15 se puede observar el tamaño y la textura de las partículas de polietileno después de que fueron trituradas mediante la carda y después de haber pasado por el sistema de cribado.



Figura 15. Partículas de polietileno.

Otros métodos fueron utilizados para obtener esta capa que nos ayudaría a que el monómero se quedara en la superficie del baño pero debido a los resultados obtenidos, se determinó que el mejor método para obtener estas partículas fue el obtenido con la carda y el cribado. Sin embargo, para completar la metodología usada en esta tesis, se comentan los otros métodos utilizados: 1) El primer método probado fue lijar las hojas de polietileno en una banda para obtener el polvo y verter el monómero para que este humectara e hiciera una sola capa. Sin embargo, se obtuvieron partículas muy finas parecidas al polvo, que afecta la medición de turbidez; 2) El segundo intento consistía en hacer recortes a partir de la hoja de polietileno hasta obtener cuadritos de aproximadamente 3mm de lado, pero lamentablemente había una interacción del baño con la capa de escoria, siendo la escoria muy pesada y estancada, por lo que la fluidinámica del sistema cambia por completo debido a que hay una mayor fricción entre la capa tan pesada de escoria y el acero lo que a su vez modificaría el grado de agitación del

baño. Otro problema era que el tiempo para obtener dichos cuadritos era grande por lo que este procedimiento no resultaba muy práctico.

### **2.1.3 Parámetros de operación**

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las características específicas de nuestro modelo físico junto con las propiedades físicas requeridas para cumplir con los criterios de similitud dinámica y cinemática entre el modelo y el reactor industrial.

Similitud Geométrica <sup>11</sup>			
Horno olla de la industria (Tenaris TAMSA)	Altura del horno=3.736 m	Modelo físico, reactor de plexiglás factor de escala 1/6	Altura del horno=0.622 m
	Altura del baño=2.460 m		Altura del baño=0.410 m
	Diámetro del horno=3.226 m		Diámetro del horno=0.537m
Inclusiones			
Tamaño aproximado	10 $\mu\text{m}$ - 140 $\mu\text{m}$ <sup>12</sup>	Partículas de PMMA	$\approx 70 \text{ m}$
Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2700 <sup>25</sup>	Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1200 <sup>10</sup>
Angulo de contacto	140 <sup>o12</sup>	Angulo de contacto	91 <sup>o10</sup>
Velocidad ascendente de la inclusión calculado con la ley de Stokes.[m/s]	0.002	Velocidad ascendente de la inclusión calculado con la ley de Stokes.[m/s]	-0.00059
Acero (1600 °C) <sup>13</sup>		Agua (25°C) <sup>14</sup>	
Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	7020	Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1000
Viscosidad dinámica [Kg /ms]	0.0055	Viscosidad dinámica [Kg/ms]	0.000891
Viscosidad cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$7.834 \times 10^{-7}$	Viscosidad cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$8.91 \times 10^{-7}$
Escoria <sup>13</sup>		Monómero de metilmetacrilato <sup>26</sup>	
Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	3500	Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	940
Viscosidad dinámica [Kg /ms]	0.06	Viscosidad dinámica [Kg /ms]	$6 \times 10^{-4}$
Viscosidad cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1.71 \times 10^{-5}$	Viscosidad cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$6.4 \times 10^{-7}$
Argón (25°C)		Aire	
Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1.6228	Densidad ( $\rho$ ) [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1.2

Tabla 5. Datos del sistema real comparados con datos del modelo físico.

El procedimiento para determinar los líquidos que simulen las interacciones involucradas entre el acero líquido y la escoria y que cumplan con la relación establecida para el modelo físico está dado por la siguiente ecuación que simplemente busca mantener la relación de viscosidades cinemáticas iguales entre los dos fluidos del horno real (escoria-acero) y del modelo físico (orgánico x – agua)

$$\frac{\nu_{escoria}}{\nu_{acero}} = \frac{\nu_{monomero}}{\nu_{agua}}$$

Para fines prácticos, el agua es la sustancia empleada que sustituye el acero. Se conocen las viscosidades cinemáticas del acero típico procesado en el Horno de Arco Eléctrico y sus escorias

$$\nu_{acero} \text{ a } 1600^{\circ}\text{C: } 7.834 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$\nu_{escoria}: 1.71 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Si la viscosidad cinemática del agua es de:

$$\nu_{agua}: 8.91 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Entonces se requiere usar una sustancia inmisible con el agua que tenga la siguiente viscosidad cinemática:

$$8.91 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{/s} \left( \frac{1.71 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}}{7.834 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}} \right) = 1.9 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Esta viscosidad cinemática era la que se esperaba tener en el modelo físico, pero en realidad la viscosidad cinemática que obtuvimos al usar el monómero líquido fue de  $6.4 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}$  lo que representa una variación en la viscosidad de dos órdenes de magnitud. No obstante, se decidió usar esta sustancia como escoria, ya que se desea una representación de la escoria más parecida a la realidad en cuanto a la eliminación de inclusiones, que por cierto no ha sido reportada de manera satisfactoria en la literatura especializada.

Ya que se establecieron las diferentes sustancias usadas en nuestro modelo físico con sus propiedades físicas conocidas, lo siguiente es describir el desarrollo paso a paso de la experimentación en nuestro reactor de plexiglás para llevar a cabo la simulación de la remoción de las inclusiones en nuestro sistema con los parámetros de operación. En la Tabla 6 se presentan los parámetros de operación usados en 3 experimentos realizados, en donde se especifica el flujo de gas, la posición de inyección, el número de tapones, el tipo de monómero y las sustancias usadas. Se debe recordar que el objetivo de este trabajo es proponer una metodología que sirva para estudiar la cinética de la remoción de inclusiones del acero con modelado físico, y no realizar un estudio paramétrico que determine el efecto de las variables de proceso sobre la cinética de remoción de inclusiones. En este sentido, 3 pruebas son suficientes para alcanzar el objetivo propuesto.

Experimento.	1	2	3
Flujo de aire [ L/min]	17	37	37
Posición de los tapones r/R	2/3	2/3	2/3
Numero de tapones	1	3	3
Tipo de monómero / polietileno	Curado: Normal/lento / Partículas cortadas en cuadritos de aprox. 3 mm	Curado: Normal/lento / partículas obtenidas mediante lijado (200g)	Curado: Normal/lento / partículas obtenidas mediante la carda y cribado (200g)
Relación en peso , monómero: partículas de PMMA	2.5:1  955ml:382g	3:1  1800ml:600g	3:1  1800ml:600g
Baño de agua.	Agua de la llave  90 L	Agua de la llave  90 L	Agua de la llave  90 L
Partículas simulando inclusiones	PMMA  382 g	PMMA  600 g	PMMA  600 g

Tabla 6. Parámetros de operación

En la Figura 16 podemos observar el reactor acondicionado para hacer la determinación de la remoción de las inclusiones. En este caso el reactor está preparado con todos los parámetros de experimentación correspondientes al experimento 1. En la figura se puede observar simulando a la escoria a las partículas de polietileno cortadas en cuadritos de aproximadamente 3 mm. A la derecha observamos el turbidímetro y los frascos de 10 ml destinados a guardar las muestras obtenidas periódicamente del baño y que se usan para medir la turbidez del baño a través del tiempo.



Figura 16. Experimento 1

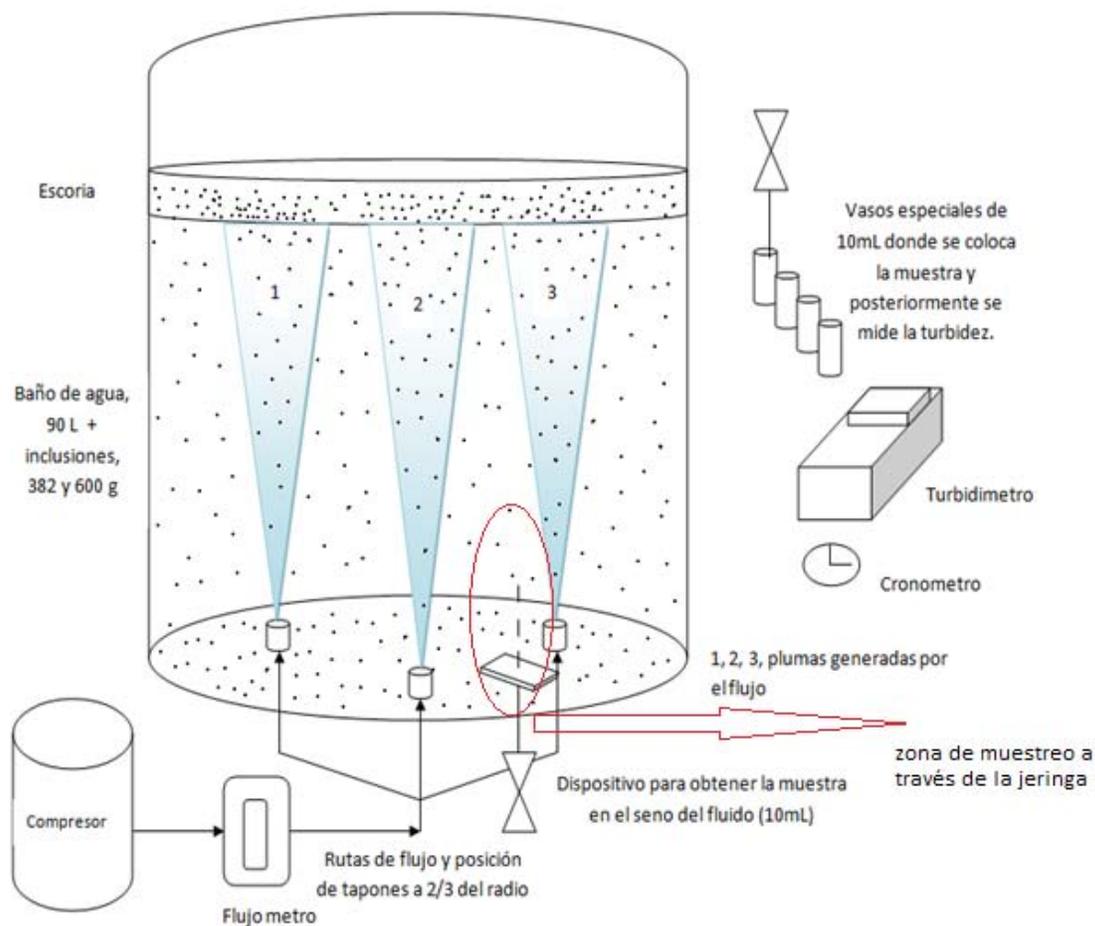


Figura 17. Arreglo esquemático del diseño experimental

La Figura 17 muestra un diagrama esquemático del arreglo experimental montado en este trabajo para medir la remoción de inclusiones. El esquema incluye el reactor con las tres sustancias que simulan al acero (agua), escoria (monómero) e inclusiones (polimetilmetacrilato) junto con el sistema de inyección de gas que en este caso tiene 3 tapones abiertos, el turbidímetro y los frascos para guardar las muestras de baño a distintos tiempos. También se presenta el sitio de muestreo dentro del baño.

### 2.1.4 Protocolo de experimentación.

Este protocolo ayuda a realizar las pruebas con una secuencia evitando errores en las mediciones y permite ser metódicos para que los experimentos puedan ser reproducibles. En cada corrida experimental se verificó el estado del material y su limpieza. Es muy importante asegurar la limpieza de los vasos que se utilizan para guardar muestras cuya turbidez se determine en el turbidímetro porque se pueden obtener resultados falsos debido a material de vidrio sucio, por la presencia de burbujas, o por efectos de vibración que puedan alterar la visibilidad en la superficie de la muestra de la solución.

Material utilizado.

Del reactor de plexiglás:

- Mangueras para gas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada
- Conexión en cruz de  $\frac{1}{4}$  de bronce
- 3 conexiones rápidas macho  $\frac{1}{4}$  de bronce
- 3 coples con rosca de bronce  $\frac{1}{4}$
- 3 conexiones de manguera con válvula
- Tapones de  $\frac{1}{4}$
- Un flujómetro [L/min]
- Un compresor marca Coleman
- Extensión eléctrica
- Una jeringa de 10 ml con aguja de 12 cm
- Plástico hermético (con el que se saca la muestra con la jeringa para evaluar la turbidez)
- Agua de la llave
- Manguera para llenar el reactor.
- Cinta teflón

De la preparación de las partículas de PMMA (inclusiones)

- Balanza analítica (sartorius)
- Vaso de precipitados de 1000 mL
- Vaso de precipitados de 800 mL
- Vaso de precipitados de 250 mL
- Piseta
- Agitador magnético (thermoline)
- Alcohol
- Agua

De la preparación del monómero de metilmetacrilato – partículas de polietileno.  
(escoria)

- Hojas de polietileno de baja densidad
- Moto tool Bosch
- Contenedor de plástico
- Ro-Tap con mallas 6, 12, 20, 30 y 40
- Balanza analítica (sartorius)
- Contenedor pequeño de plástico
- Monómero
- Probeta 100 mL
- espátula
- Del turbidímetro.
- Medidor de turbidez
- 12 vasos de vidrio de 10 ml
- Paños limpios y secos
- Aceite de silicón para la limpieza de los vasos
- Piseta
- Alcohol
- Agua

La primera parte del proceso experimental fue realizar una curva de calibración que nos indica el nivel de turbidez [NTU] (*Nefelometric Turbidity Unit*), con relación a la concentración de partículas de PMMA adicionadas en 2ml de alcohol y 8 ml de agua de la llave. Como ya se había mencionado en esta tesis el alcohol sirve para humectar las partículas de PMMA y evitar que se formen aglomerados de partículas en la superficie de la solución. Se realizaron 12 mediciones de turbidez por sextuplicado para asegurar la confiabilidad de la prueba. La primera medición fue con cero gramos de partículas de PMMA, 2 ml de alcohol y 8 ml de agua de la llave para obtener nuestro blanco o la turbidez del agua con el alcohol (0.52 NTU), aunque también se hicieron pruebas sin alcohol y no se noto cambio significativo en la turbidez del agua. Se prosiguieron las mediciones de turbidez con intervalos de 0.012 gramos de PMMA hasta llegar a una cantidad de 0.132 gramos de PMMA, cuya lectura de turbidez fue de 813.66 NTU. Estos datos se aprecian mejor en la Figura 21 que se encuentra en la sección de resultados y en la cual se ve la curva de calibración que ayuda a determinar la concentración o la masa de partículas con una simple lectura de turbidez. Al reactor de plexiglás se agregaron 600 gramos de PMMA, por lo que la curva de calibración está hecha en base a esta cantidad de partículas.

Para realizar las pruebas experimentales se realizan los pasos siguientes:

- se hace una revisión de las mangueras para que estén en condiciones de operación y se verifica que esté lista la compresora. Se realiza la conexión de las mangueras y se verifica que los tapones estén en buenas condiciones y con teflón para evitar fugas a la hora del llenado. También se verifica que no tenga fugas el dispositivo donde se inserta una jeringa para el muestreo del baño. En la Figura 18 apreciamos la posición de los tapones para los experimentos, (1,2,3) y la posición del dispositivo de toma de muestras del baño (4).

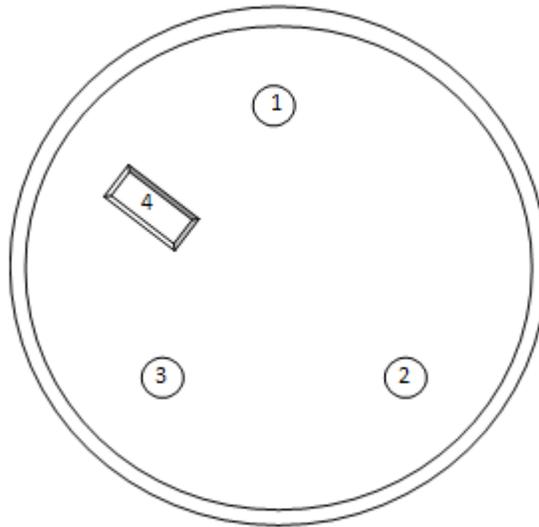


Figura 18. Posición de las entradas de aire (2/3) para el modelo físico.

- Se llena el reactor de plexiglás con agua de la llave hasta un volumen de 90 litros.
- Se ajusta el flujo de gas en cada uno de los tapones [L/min]
- Se acondiciona un lugar limpio para el turbidímetro y los vasos, teniendo todo el material necesario y a la mano.
- Se pesan las partículas de PMMA y se realiza el procedimiento que se describe en la sección 2.1.1. También se pesa el monómero y el polietileno conforme a los parámetros de operación y se procede como se describe en la sección 2.1.2.2.
- Se detiene el flujo de los tapones en el momento que se vierten las partículas de PMMA en el reactor previamente humectadas, después de que se han vertido se aumenta el flujo para que el sistema se homogenice y evitar que algunas partículas se depositen en el fondo del reactor. Se baja el flujo alrededor de 5 L/min y a continuación, y de manera inmediata, se coloca la escoria (monómero- polietileno). A partir de este momento se toma el tiempo y se considera como el tiempo inicial para la remoción de las inclusiones.

- En este tiempo se toma una primera muestra del baño. Este procedimiento se hace con ayuda de una jeringa de 10 ml. Se colecta la muestra por la parte inferior del reactor. Esta primera muestra sería la concentración inicial de inclusiones. Las muestras se toman en intervalos de tiempo de un minuto hasta llegar a los 35 min, es decir se toman 36 muestras considerando la inicial.
- Una vez colectada la muestra, se vierten inmediatamente en un vaso los 10 ml extraídos del reactor y posteriormente se mide en el turbidímetro su turbidez. Las pruebas de turbidez se realizan hasta en 6 repeticiones. El promedio de la turbidez se registra y los resultados se procesan en una hoja de cálculo para obtener el gráfico correspondiente a la cinética de remoción de inclusiones. Dichas gráficas se presentan en la siguiente sección de esta tesis.

En la Figura 19 observamos una vista aérea de la escoria de nuestro modelo físico para el experimento número 3, donde se aprecia la apertura de la escoria y el descubrimiento del baño promovido por la inyección simultánea por los tres tapones abiertos con un flujo total de 37 L/min.

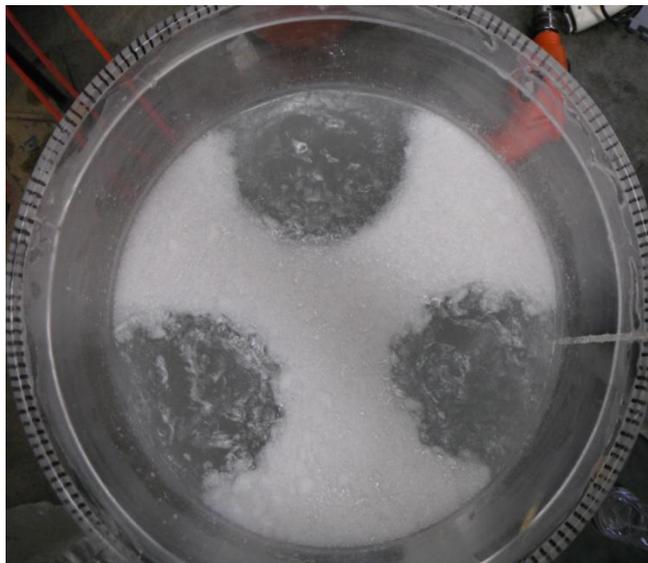


Figura 19. Apertura de la capa de escoria; experimento 3.

## Capítulo 3.

### Resultados y análisis

#### 3.1 Distribución y caracterización de partículas.

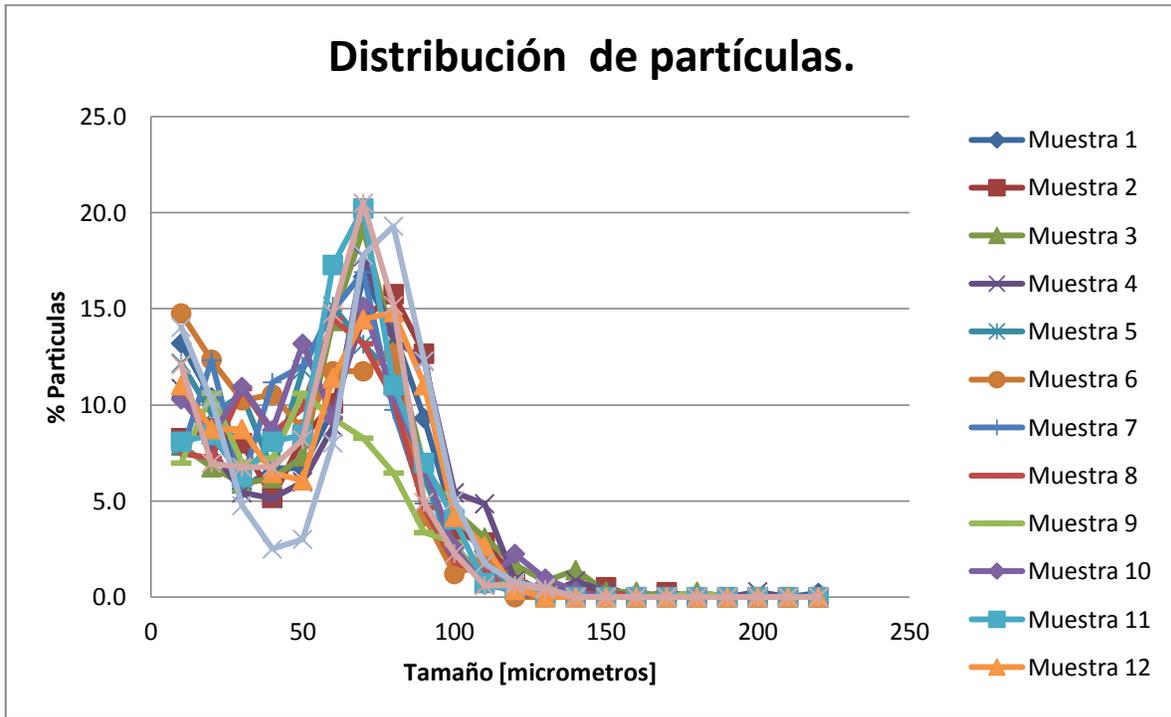


Figura 20. Muestreo de partículas PMMA

Para poder validar el tamaño de las partículas de PMMA reportado en algunos artículos, primero se realizó una caracterización de la distribución de tamaños de las partículas de PMMA empleadas en esta tesis. En la Figura 20 observamos el tamaño de partículas y el porcentaje de partículas que hay de dicho tamaño por cada muestra. En cada muestra se analizaron alrededor de 350 partículas. El análisis de la figura nos indica que tenemos un tamaño medio de 65 a 85 micrometros, siendo 75 micrometros el tamaño más frecuente para la mayoría de las muestras. Estos datos que coinciden con las frecuencias de tamaño reportadas en algunos otros trabajos.<sup>10 12</sup> No obstante, el tamaño que se esperaba era mucho más pequeño puesto que estos tamaños de partículas son los rangos de inclusiones reales en el horno olla, pero se sabe que los tamaños que generan el

problema en el acero son menores a las 20 micras. Las partículas más chicas medidas de 3 a 20 micrometros aunque no son muy frecuentes ayudarán a simular a las partículas finas en el acero. Cabe señalar que la similitud que debería de cumplirse con las partículas es la de flotación para lo cual la relación de densidades del sistema real, es decir, la relación de densidades de inclusiones/acero de aproximadamente 1/3 debería de cumplirse en el sistema PMMA/agua, relación que no se cumple y que incluso es mayor a uno. Sin embargo, nuestra hipótesis (que resultó ser cierta) fue considerar que las partículas de estos tamaños no flotan (o se sedimentan) siguiendo la ley de Stokes que solo aplica a un baño quieto, sino que en un baño tan agitado como el que se encuentra en la olla de acero, la fuerza de arrastre es la que gobierna la trayectoria de las partículas más que las fuerzas boyante y de gravedad. Entonces, la decisión de simular a las inclusiones con estas partículas de PMMA tuvo dos causas: 1) son partículas usadas en la mayoría de los artículos de modelación física en remoción de inclusiones, lo que nos genera una experiencia para determinar que era una buena opción a utilizar, y 2) el diámetro de las partículas tan pequeños hacen que la fuerza boyante sea menos determinante en la trayectoria de las mismas que la fuerza de arrastre. Esto se corrobora con los cálculos de la velocidad de ascenso de las partículas con la ley de Stokes que se aprecian en la Tabla 5, donde tanto las partículas más grandes (85 micrometros) como las más pequeñas de hasta 3 micro metros, quedan flotando en el seno debido a que su velocidad terminal es muy pequeña con un orden de magnitud de  $10^{-4}$  m/s.

### 3.2 Curva de calibración de turbidez

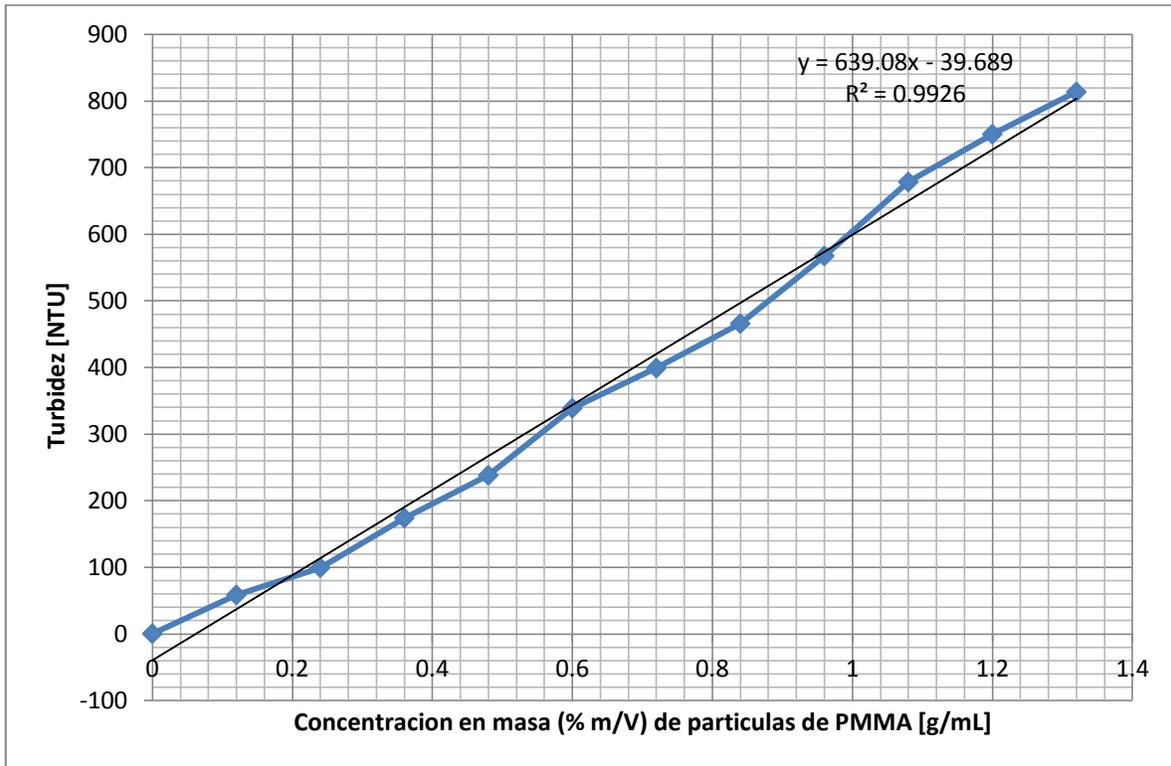


Figura 21. Curva de calibración. Turbidez de la solución en función de la concentración de partículas.

La Figura 21 es la curva de calibración que ayuda a determinar la concentración de partículas en el baño de agua, esperando poder observar la cinética de la remoción de las inclusiones como una función del tiempo. La selección del peso inicial de partículas se determinó a partir de dos formas: 1) la primera fue basada en un trabajo previo de Zhang,<sup>10</sup> quien usó un reactor de 2.356 litros, utilizando tres pesos de 5, 10 y 15 gramos de partículas de PMMA. Por lo tanto, se decidió tomar el peso de 15 gramos y escalarlo a nuestro modelo de 90 litros, para igualar la concentración y por lo tanto la turbidez, lo cual nos da como resultado un peso de 573 gramos de partículas de PMMA a usar en nuestro modelo; 2) la segunda fue a partir de la Figura 21. Al hacer la experimentación para obtener la curva de calibración se determinó empíricamente que una turbidez de 400 NTU era suficientemente turbia donde podríamos observar si existía un cambio conforme

se fueran removiendo las inclusiones de nuestro modelo. Esta turbidez equivale en nuestro reactor de 90 litros a 630 gramos de partículas. Si se saca el promedio de los dos valores obtenidos hasta ahora, el peso de partículas a inyectar al reactor de plexiglás es de 601.5 gramos, lo que en números cerrados llevo a elegir 600 gramos en los experimentos 2 y 3.

Otro aspecto importante en esta figura es la regresión lineal realizada, la cual representa bastante bien a una línea recta con ordenada al origen igual a cero, obteniéndose un coeficiente de correlación muy cercano a 1, confirmando la gran confiabilidad de los datos y la pertinencia de medir la concentración de partículas en el baño de manera indirecta a través de la medición de la turbidez.

### 3.3 Remoción de partículas en los tres experimentos

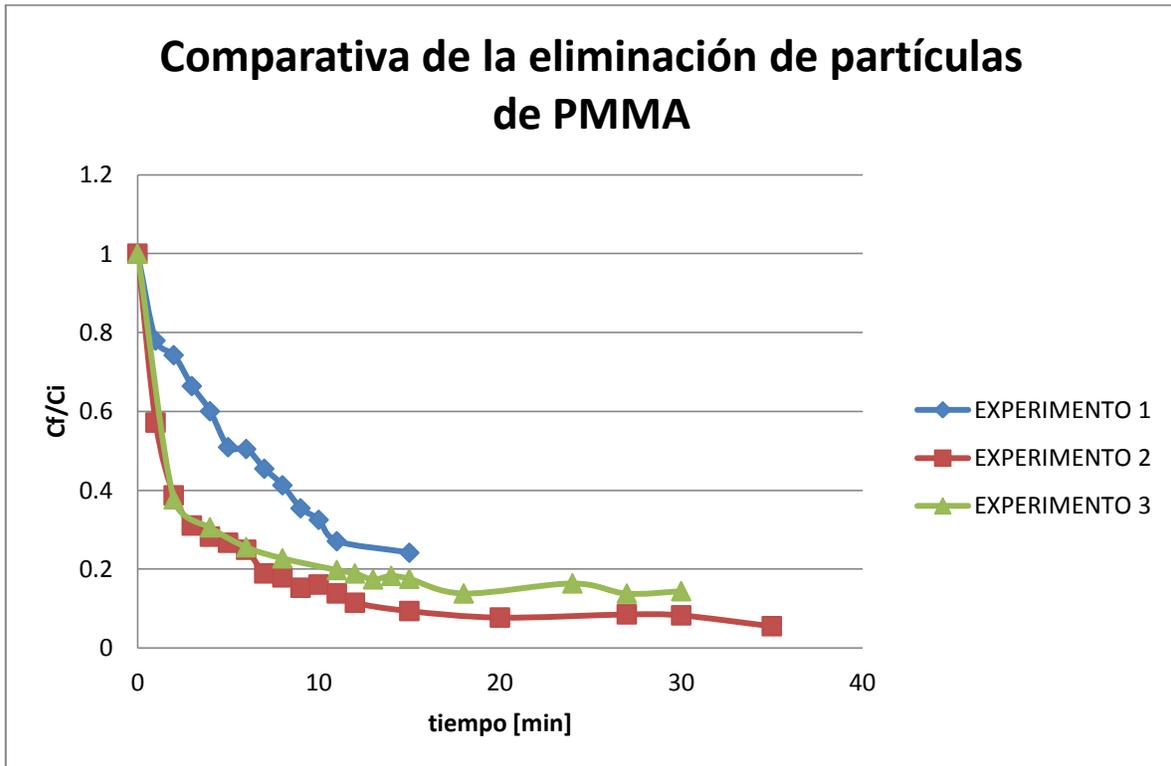


Figura 22. Representa la remoción de las partículas a través del tiempo de los tres experimentos

En la Figura 22 se presentan las cinéticas de remoción de inclusiones obtenidas en los 3 experimentos realizados con el fin de establecer la metodología del estudio de remoción de inclusiones.

Para el experimento 1 observamos que la concentración de las inclusiones con relación al tiempo es lenta respecto a los otros experimentos (2 y 3). Esto se debe a que solo teníamos un tapón y un flujo, 17 L/min. Al tener un solo tapón tenemos un solo circuito de movimiento re circulatorio de líquido, lo que provoca que las inclusiones sean arrastradas por el flujo de agua y describan trayectorias que van de acuerdo al patrón de flujo. El patrón de flujo con un solo tapón hace que las partículas suban a través de la pluma a la superficie y toquen a la escoria. Sin embargo, las partículas que no estén en la pluma seguirán un patrón recirculatorio a través de todo el baño y será difícil que toquen la escoria y se

remuevan del agua, siendo solo la turbulencia la única posibilidad de salir del circuito de recirculación único. Además, el flujo de gas es bajo y esto no genera mucha turbulencia en el sistema, la cual es necesaria como ya se dijo para remover a las partículas. Esto va en contra a lo que ya se conoce respecto a la cinética de mezclado, es decir, se sabe que para mezclar el baño, las mejores condiciones se logran agitando con un solo tapón en una posición 2/3, mientras que para remover inclusiones no son las condiciones mejores, sino más bien desfavorables, debido a que las partículas deben ser arrastradas a la escoria para que puedan ser removidas, y el patrón de flujo en este caso no promueve ese movimiento vertical. En cambio, los experimentos 2 y 3 que usan 3 tapones y un flujo alto de gas de 37L/min si promueven movimiento masivo de fluido dirigido de manera vertical hacia la escoria y alta turbulencia lo que propicia el arrastre de partículas a la superficie y el contacto con la escoria por lo que se ve acelerada la cinética de remoción de inclusiones.

La única diferencia entre los experimentos 2 y 3 fue la manera de obtener la escoria: en el experimento 3 se obtuvo una concentración final de inclusiones menor que en el 2, lo que se puede explicar debido a que las partículas de polietileno obtenidas mediante la lija fueron tan finas que precipitaban al fondo del baño y nos incrementaba la turbidez del mismo. Otro aspecto importante fue el polvo de polietileno, el cual no daba la consistencia que se quisiera de la escoria puesto que después de unos minutos no era capaz de mantenerse en la superficie y se emulsionaba con el baño. Estas variables que no se pueden controlar eran suficientes para seguir en la búsqueda de optimizar el comportamiento de la escoria. El experimento 3 resultó ser más estable y los resultados fueron los esperados, es decir, se obtuvo una concentración final aceptable de partículas donde es bastante notoria la disminución de turbidez en el agua debido a que el baño ya no presentaba tantas partículas como al principio del experimento.

Otro aspecto interesante que se desprende de la Figura 22 es que los tiempos de remoción de partículas no superaron los 35 minutos, lo cual es importante de señalar, ya que el lavado de las inclusiones en un horno olla industrial no lleva

más de 35 minutos, con lo que podríamos escalar las cinéticas de remoción de inclusiones obtenidas en nuestro modelo a las cinéticas industriales, aunque aún no se cuenta con este escalamiento riguroso.

## **Conclusiones.**

Se puede concluir que se ha desarrollado una metodología robusta para estudiar la cinética de la remoción de inclusiones de polimetilmetacrilato en el baño de agua hacia una capa de monómero, simulando físicamente a la remoción de inclusiones no metálicas del acero hacia la escoria.

Con los rangos empleados en las condiciones de operación en nuestro modelo físico el tiempo de remoción no rebasó los 35 minutos.

Condiciones buenas para la eliminación de las partículas fueron con tres tapones, un flujo alto de gas de 37 L/min y una posición de los tapones de 2/3 del radio, porque promueve un movimiento general del fluido vertical dirigido a la escoria y alta turbulencia que arrastra a las partículas y las lleva en contacto con la escoria facilitando su remoción. Estas condiciones mejores de remoción de inclusiones no concuerdan con las mejores condiciones para el mezclado químico obtenidas con tesis anteriores y estudios recientes, indicando que ambos fenómenos (trayectoria de partículas y mezclado) son muy distintos, lo cual sugiere condiciones industriales de operación distintas para lograr mezclado y remoción de inclusiones y que por supuesto implica que ambas operaciones no pueden realizarse simultáneamente sino una después de otra.

Las partículas de PMMA son adecuadas para simular a las inclusiones no metálicas del acero por la distribución de tamaños que presenta y que siendo tan pequeñas se arrastran minimizando las fuerzas boyantes, ya que de otra manera no cumplirían con la similitud de Stokes entre el modelo y el horno industrial.

La escoria usada con la preparación reportada en esta tesis sirve como una escoria adecuada para estudiar la remoción de inclusiones a pesar de que se pierde un poco la similitud cinemática y la fluidodinámica se puede ver afectada.

La medida de turbidez es adecuada para cuantificar la concentración de inclusiones en el baño mostrando una excelente correlación entre este parámetro

(turbidez) y la concentración de inclusiones pudiendo obtener una curva de calibración con un coeficiente de correlación de casi uno.

## Referencias Bibliográficas.

- 
- <sup>1</sup> Civilizations in Africa: The Iron Age South of the Sahara.
- <sup>2</sup> LXXIV Asamblea general ordinaria; "Situación de la minería mexicana 2010", Minería CAMIMEX. Vol. X, Núm. 2, Cámara Minera de México, México, Abril – Junio 2011 pág. 6 a 30.
- <sup>3</sup> Gordon H. Geiger. Iron blast furnace. Inland steel company. East Chicago, Indiana. Mac Graw Hill. 1974
- <sup>4</sup> Published by the center for metals production, Vol. 3 No. 2. cmP Technocomentary. An EPRI sponsored R&D applications center. 1987
- <sup>5</sup> J. Szekely, G. Carlsson , L. Helle. Ladle metallurgy. Materials research and engineering, Ed. Springer-Verlag. New York, Berlin Heidelberg, London, Paris, Tokio 1989.
- <sup>6</sup> Satadal Ghoral, G.G.Roy and S.K. Roy Physical Simulation of impurity removal through submerged liquid slag injection in steel melt. ISIJ International, Vol. 44 (2004) No. 1 pág. 37 a 42.
- <sup>7</sup> Norbert Bannenberg. Recent development in steelmaking and casting. AG der Dillinger Hüttenwerke Postfach 1580 66748 Dillingen, Germany.
- <sup>8</sup>.Shu-gou Zheng and Miao-young Zhu. Physical modeling of inclusion behaviour in secondary refining with argón blowing. Steel Research int 79 (2008) No. 9. p.p. 685-690.
- <sup>9</sup> Y. J. Kang, L. Yu and Du Sichen. "Study of inclusion removal mechanism around open eye in ladle treatment". Iron making and steel making 2007 Vol. 34 No. 3 2007 pág. 253 a 261.
- <sup>10</sup> Lifeng Zhang, S. Taniguchi, and K. Matsumoto. "water model study on inclusion removal from liquid steel by bubble flotation under turbulent conditions". Ironmaking and steelmaking. Vol. 29 No. 5 2002 pág. 325 a 336

---

<sup>11</sup> Orta Sánchez Israel. Tesis licenciatura: Construcción de un modelo físico de un horno olla para la refinación secundaria de acero. Facultad de Química. UNAM. 2008.

<sup>12</sup> Li Tao Wang, Qiao Zhang, Shi Heng Peng and Zheng Bang Li, “mathematical model for growth and removal of inclusion in a multi - tuyere ladle during gas – stirring”. ISIJ international. Vol 45 (2005) No.3 p. 334

<sup>13</sup> Heping Liu, Zhenya Qi, and Mianguang Xu. “Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual pulgs”.steel research int. 82(2011) No. 4 p. 44

<sup>14</sup> Morua Ramírez Miguel Ángel. Tesis licenciatura. Estudio experimental de mezclado en ollas agitadas con gas asistido por modelación física. Facultad de Química. UNAM. 2010

### **Páginas de internet.**

<sup>15</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>, 09 de septiembre de 2011.

<sup>16</sup>. <http://www.ipac.es/acero/historia.asp>, 09 de septiembre de 2011.

<sup>17</sup><http://www.ahmsa.com/3386/entra-en-operacion-plena-nuevo-alto-horno-6>, 10 de octubre de 2011

<sup>18</sup>. [www.steeluniversity.org/virtual\\_steelmaking](http://www.steeluniversity.org/virtual_steelmaking), 15 de Octubre de 2011

<sup>19</sup>.<http://ilsap.matter.org.uk/> secondary steel making: overview. 15 de Octubre de 2011

<sup>20</sup>. <http://www.sidor.com/> 27 de octubre de 2011

<sup>21</sup>. <http://www.steel.org/> 27 de octubre de 2011

---

<sup>22</sup>. <http://www.substech.com/>, 09 de septiembre de 2011.

<sup>23</sup>. <http://www.nkmz.com/English/> , 09 de septiembre de 2011.

<sup>24</sup>. <http://resources.schoolscience.co.uk/corus/14-16/steel/msch5pg1.html>. The chemistry of steel making. 23 de Noviembre de 2011.

<sup>25</sup>. [http://www.matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle\\_stirring/stirring\\_4.html](http://www.matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle_stirring/stirring_4.html), 17 de Noviembre de 2011

<sup>26</sup>. <http://www.corquiven.com.ve/PDF/MSDS-METIL-METACRILATO-MONOMERO.pdf>