



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“MODELACIÓN FÍSICA Y MATEMÁTICA DE LA
RECIRCULACIÓN DE UN BAÑO LÍQUIDO
PROMOVIDA POR UN JET GASEOSO
INCIDIENDO EN LA SUPERFICIE LIBRE”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A :

MARCOS COLÍN VEGA



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Prof. Carlos González Rivera

SECRETARIO: Prof. Marco Aurelio Ramírez Argáez

1er. SUPLENTE: Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

2° SUPLENTE: Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO "D"
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
LABORATORIO DE SOLIDIFICACIÓN Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DR. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. EN I. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SUSTENTANTE:

MARCOS COLÍN VEGA

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1.11 <i>Definición del acero</i> | 5 |
| 1.12 <i>Propiedades del acero</i> | 5 |
| 1.13 <i>Aplicaciones del acero</i> | 6 |
| 1.14 <i>Procesos de producción</i> | 6 |
| 1.15 <i>Situación actual de la siderurgia en México.</i> | 11 |
| 1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 1.21 <i>Teorías de penetración del jet</i> | 15 |
| 1.22 <i>Teorías de escorias</i> | 19 |
| 1.23 <i>Revisión de modelos matemáticos</i> | 23 |
| 1.3 HIPOTESIS | 25 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 25 |
| 2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 26 |
| 2.1 <i>Metodología del modelado físico</i> | 26 |
| 2.11 <i>Materiales empleados</i> | 28 |
| 2.12 <i>Procedimiento</i> | 30 |
| 2.13 <i>Matriz Experimental</i> | 30 |
| 2.2 MODELO MATEMÁTICO | 31 |
| 2.21 <i>Definición modelo matemático</i> | 31 |
| 2.22 <i>Definición de la física del modelo</i> | 32 |
| 2.221 <i>Conservación de la masa, fracción del volumen y ecuaciones de propiedades físicas.</i> | 32 |
| 2.223 <i>Condiciones de frontera e iniciales</i> | 35 |
| 2.3 <i>Solución del problema en CFD</i> | 35 |
| 2.31 <i>Etapas de para la resolución en CFD</i> | 36 |
| 2.32 <i>Creación de la geometría / malla</i> | 37 |
| 2.33 <i>Condiciones de frontera.</i> | 38 |
| 2.331 <i>Condición entrada del gas del jet.</i> | 38 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 41 |
| 4. CONCLUSIONES..... | 55 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA..... | 56 |

1. INTRODUCCIÓN

El acero es uno de los materiales más empleados en la vida cotidiana de los seres humanos, es difícil analizar un objeto, mecanismo o proceso y no encontrar algún elemento que contenga esta aleación; esto se debe a que aún en la actualidad no han podido elaborarse nuevos materiales que superen las propiedades de elevada resistencia mecánica de este metal. De ahí radica la importancia de seguir innovando los procesos de producción de acero para mejorar la sustentabilidad del mismo.

1.11 Definición del acero

Se denomina acero a aquellos productos ferrosos cuyo porcentaje de carbono está comprendido entre 0.05 y 1.8 %. Se añaden otros elementos químicos como manganeso, cromo, níquel, molibdeno etc. para definir ciertas propiedades.

El acero es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable, ampliamente usado y con un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la maquinabilidad, lo que es ideal para el uso como material estructural. Asimismo sus propiedades mecánicas pueden ser modificadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos térmicos, trabajo mecánico o a través de su composición química.

1.12 Propiedades del acero

Existen diversos tipos de acero, entre los cuales podemos encontrar los aceros inoxidables, aceros de herramienta, aceros aleados, aceros microaleados de alta resistencia (por sus siglas en inglés, HSLA) y aceros al carbono, siendo estos últimos los más comunes. El contenido de carbono de la aleación está directamente relacionado con las propiedades mecánicas del metal, siendo que el acero al bajo carbono es un material moldeable, dúctil y tenaz, a diferencia de un acero al alto carbono que tiene mayor resistencia y dureza con tendencia a ser frágil.

1.13 Aplicaciones del acero

Su amplia gama de composiciones proporciona un amplio rango de propiedades mecánicas, formas de productos y de aleaciones que hacen de éste un material multifuncional que es usado en componentes tanto pequeños como grandes, de baja o alta tecnología como de uso diario o específico.

En gran parte, el acero se encuentra en la industria del transporte, refiriéndose así a automóviles, ferrocarriles, barcos y aeronaves. Se puede encontrar este metal en carrocerías, partes de automóviles, cajas de cambio, ruedas, ejes, anclas, trenes de aterrizaje, motores, etc.

En segundo término, la rama de construcción hace gran uso del acero en las edificaciones de altas o bajas alturas, viviendas modulares, multifamiliares, edificios de tipo industrial, hospitales. Las barras que refuerzan los hormigones, las placas para puentes y en los revestimientos metálicos es donde se puede encontrar al acero.

Por otra parte, el uso doméstico del acero es trascendente, lo encontramos en los refrigeradores, lavadoras, hornos, utensilios de cocina, latas, hojas de afeitar, alfileres, cafeteras, microondas, etc. Este material es indispensable en casi todo lo que nos rodea, es así que ha surgido como un elemento crítico que proporciona seguridad y durabilidad.

1.14 Procesos de producción

En la actualidad existen dos rutas para la obtención de acero partiendo de mineral de hierro: La ruta alto horno – convertidor básico al oxígeno (por sus siglas en inglés, BOF), y la ruta reducción directa – horno eléctrico de arco (por sus siglas, HEA).

Ambas rutas parten de mineral de hierro, pero la diferencia básica se encuentra en la forma de reducción. En la ruta de alto horno la reducción de la hematita o wustita a hierro metálico es con CO producido con carbón y aire, cuya combustión además suministra calor que produce un hierro metálico saturado en carbono conocido como arrabio.

En un alto horno se logra la transformación del mineral de hierro en arrabio (ver Figura 1.1). Los minerales de hierro contienen del 60 al 70% de hierro; el resto se compone de oxígeno, arena, arcilla y piedras, que a su vez contienen sílice (óxido de silicio). Es necesario deshacerse de la sílice para evitar que una parte del hierro se desperdicie al formar compuestos con esta sustancia. Por la parte inferior, utilizando ductos llamados toberas, se introduce un soplo de aire caliente que fluye por los huecos que quedan entre las partículas de la carga. En el alto horno, el aire caliente sirve para producir la combustión del coque y para elevar la temperatura. El oxígeno del aire se combina con el carbono para producir el monóxido de carbono que, a su vez, reacciona con el óxido de hierro para producir hierro y dióxido de carbono.

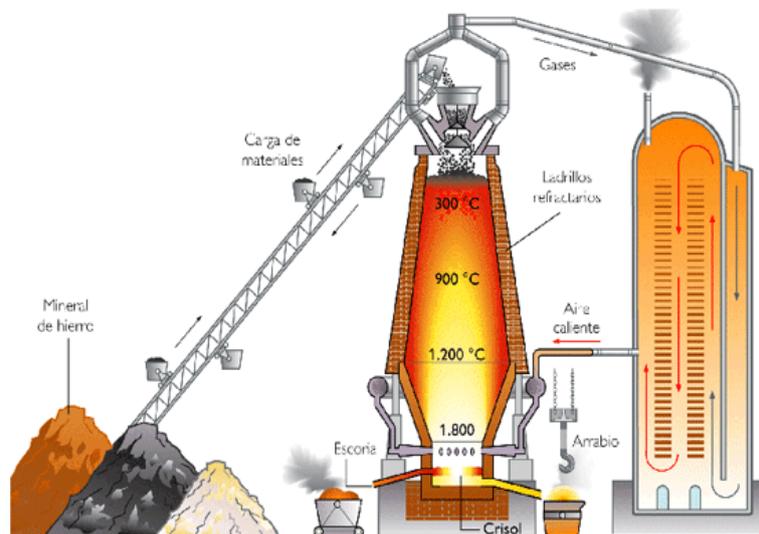


Fig. 1.1. Esquema de Alto Horno. [2]

La ruta de reducción directa se lleva a cabo con un gas reductor a base de H_2 y CO, generado a partir de la reformación de gas natural. El proceso consiste en reducir al mineral de hierro en forma de “pellets” sin fusión hasta transformarlo en hierro metálico que por mayor densidad en relación al mineral es poroso, conocido como “hierro esponja” o DRI (Direct Reduced Iron). El calor se

proporciona calentando el gas reductor en un intercambiador de calor. Existen varios procesos de reducción directa, pero la gran parte del mercado maneja sólo dos; el proceso Midrex y el proceso HYLIII (ver Figura 1.2).

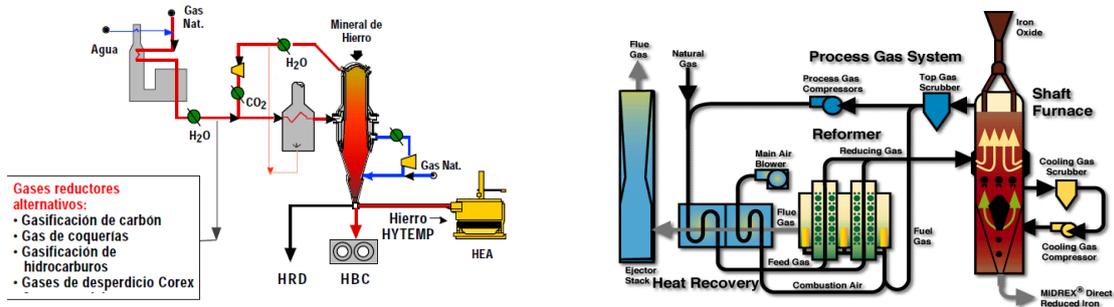


Fig. 1.2. Esquema del Proceso HyLIII (izquierda)[6] y Midrex (derecha).[3]

Los convertidores BOF logran la refinación del arrabio para eliminar las impurezas y el exceso de carbono por oxidación, además de aprovechar el calor de la oxidación como fuente de energía para la fusión. En los BOF la oxidación se hace directamente con oxígeno.

El BOF consiste en una olla de acero recubierta en su interior con material refractario del tipo básico. En el BOF se inyecta el oxígeno por una lanza que entra por la parte superior. La lanza se enfría con serpentines de agua para evitar que se funda (ver Figura 1.3).

Una de las grandes ventajas que desde un principio se observó en los convertidores BOF fue su capacidad para aceptar hasta un 20% de chatarra junto con la carga de arrabio líquido.

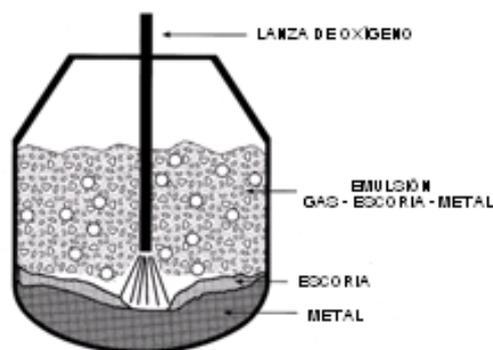


Fig. 1.3. Esquema de BOF.[1]

En el proceso de Horno de Arco Eléctrico (por sus siglas en inglés, EAF) se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada y/o arrabio fundido proveniente del Alto Horno o bien DRI del proceso de Reducción Directa. Si la carga de chatarra es muy baja en carbono, se agrega coque (el cual es casi puro carbono) o electrodos de carbono de desecho, para aumentar así su contenido.

Un polo está constituido por electrodos de grafito o de carbón y el otro es el mismo acero que se quiere fundir. En este sistema, que es empleado en casi el 40% de la producción total de acero en el mundo, si la corriente pasa a través del material el proceso se denomina como horno eléctrico de arco de corriente directa (HEA-DC en la Figura 1.4), mientras que si el arco se establece entre los extremos de tres electrodos de grafito para las tres fases de la corriente alterna se llama horno eléctrico de arco de corriente alterna (HEA-AC, cuyo esquema se ve en la Fig. 1.4). Los hornos de arco funcionan con un voltaje no muy alto (de 150 voltios a 1200V para hornos de ultra alta potencia) y alto amperaje (2500 a 50000 amperios).

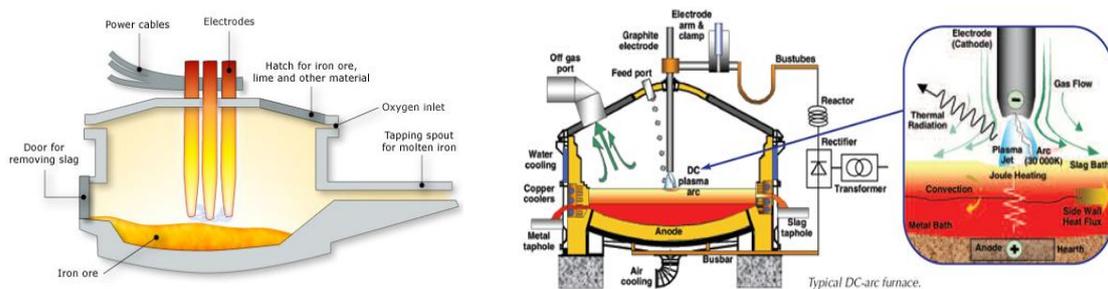


Fig. 1.4. Esquema de HAE – AC (izquierda)[4] y HAE – DC (derecha).[5]

Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso que funde completamente la carga dentro del horno.

Para acelerar la remoción del carbono, oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro de acero fundido por medio de una tobera o lanza. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las

impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes.

Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada.

En los últimos años se ha comprobado la importancia del uso del HEA como un proceso alterno de producción de acero dadas las mejoras tecnológicas que se han desarrollado con la intención de obtener menores costos en base a la disminución en el consumo de electrodos y electricidad (ver Figura 1.5). Una de esas mejoras tecnológicas en que han mejorado la eficiencia del HEA es precisamente el uso de lanzas de O₂ que junto con la inyección de finos de carbono proporcionan calor mediante la combustión de carbono que ahorra energía eléctrica cara. Los jets de oxígeno también proporcionan cantidad de movimiento o agitación al baño de acero en los HEA que no son muy agitados que a su vez homogeniza la temperatura, y la composición química del baño mejorando la transferencia de calor y masa por movimientos convectivos del acero líquido.

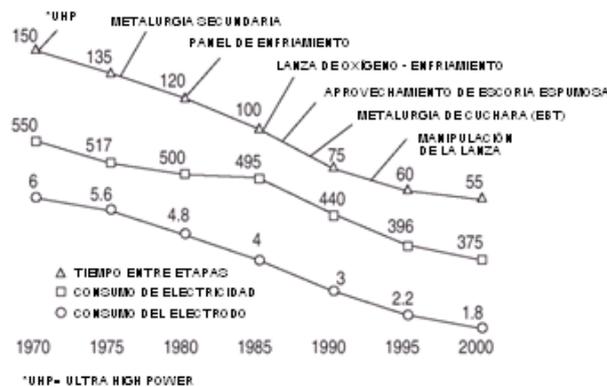


Fig. 1.5. Evolución del rendimiento del HEA[8]

En tanto, se ha visto reflejado una mayor implementación del HEA para la producción de acero a nivel mundial en comparación con otros procesos que han caído en el desuso hasta llegar casi al 40% del total de acero producido mundialmente en la actualidad que se aprecia en la Figura 1.6.

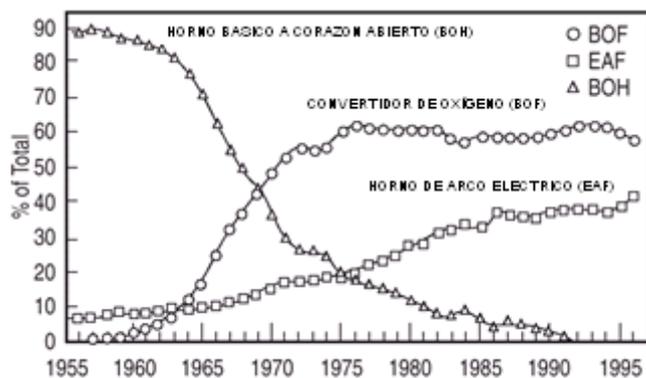


Fig. 1.6. Evolución productiva del HEA[8]

1.15 Situación actual de la siderurgia en México.

La industria siderúrgica mexicana atraviesa por obstáculos que han frenado su recuperación después de la crisis del 2009, provocados por factores diversos como un mercado doméstico muy debilitado, crecimiento lento de la demanda internacional, fuertes alzas en los costos de las materias primas y tarifas altas en el consumo de energía, entre otros.

Ante esta situación, las acereras del país como Deacero, Ternium, AHMSA, ArcerlorMittal o Gerdau han implementado varias estrategias de negocios, con el fin de superar el tropiezo que ha dejado la recesión económica, pero el pronóstico indica que la completa recuperación del sector será lenta.

En cuanto al consumo doméstico del acero, que es el mercado que representa el 65% de la producción nacional, el sector siderúrgico experimenta una demanda aún más débil que el mercado de exportación, debido a la recuperación de la industria, como la construcción, maquinaria, automotriz e infraestructura, que ha sido moderada.

El primer semestre del año 2010, el consumo nacional creció 26% respecto al 2009; sin embargo, se encuentra aún 23% por debajo de los niveles del 2007. Por otra parte, los costos de producción se han disparado rápidamente, tanto en materias primas como insumos energéticos.

Datos de Canacero [7] muestran que en el 2010 el costo del mineral de hierro se ha elevado un 132% con respecto al 2009; la chatarra lo ha hecho en 87% y el zinc en un 31%.

Las tarifas eléctricas, por su parte, han registrado aumentos de un 30% y el gas natural uno de 22%, respecto al 2009, a sabiendas que los energéticos constituyen el 30% en los costos totales de producción.

Al cierre de septiembre de 2010, el precio de la tonelada de planchón de acero era de aproximadamente \$12,200 NMX, un 39% mayor al punto más bajo de la crisis, cuando el producto se cotizó en \$8,800 NMX; sin embargo, el precio actual referido está 44% por debajo del nivel anterior a la crisis, cuando el precio era de un \$15,800 NMX.

China es el principal causante de las alzas en el precio del mineral de hierro, pues mantiene políticas de comercio desleal como subsidios en sus productos, el manejo de su tipo de cambio para favorecer las exportaciones.

Con todo ello, las acereras han puesto en marcha agresivas estrategias para abatir estos efectos y lograr la recuperación.

Una de ellas es aumentar las exportaciones a nuevas regiones del mundo. Otra más, es producir los productos que la industria mexicana todavía importa del exterior porque en el país aún no se fabrican.

Lamentablemente, al término del 2010, el valor de las importaciones siderúrgicas alcanzó 7 mil 986 millones de dólares, mientras que el de las exportaciones fue de 5 mil 79 millones de dólares, lo que evidencia una balanza comercial siderúrgica con un fuerte déficit.

Por otra parte, la generación de nuevos productos, como la reja, algunos cables electromecánicos para pozos de perforación o para plataformas petroleras, es otra manera de cubrir mayores mercados.

La industria siderúrgica tiene programado invertir cerca de 12 mil millones de dólares en los siguientes 5 años para ampliar la capacidad de producción de acero en alrededor de 5 millones de toneladas anuales.

Para el año 2011 se conoce que hay incertidumbre en la velocidad de la recuperación, pero se estima que el PIB del sector industrial, manufacturero y de construcción crezca alrededor de 3%, por lo que el consumo de acero dentro de México se espera que aumente un 4% respecto al 2010.

La producción siderúrgica del 2010 se resume en 342,642 millones de pesos, los cuales representan un 2.6% del PIB total, un 7.9% del PIB industrial y 15.1% del PIB manufacturero.

Durante el 2010, la producción mundial de acero alcanzó 1,412.8 millones de toneladas, en los que México ocupó la 13^a posición mundial con 16.7 millones de toneladas (1.2% del total) y la 2^a de América Latina (27.1% del total regional), tal y como se aprecia en la Figura 1.7.

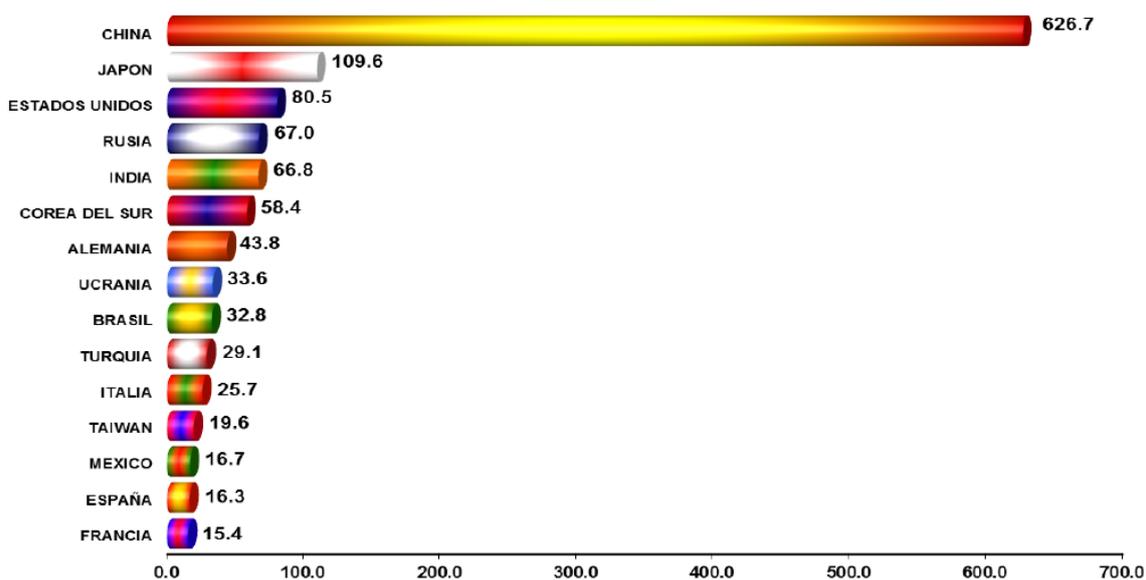


Fig. 1.7. Producción mundial de acero en 2010. [7]

1.2 Revisión Bibliográfica

En muchos procesos metalúrgicos, tales como los procesos de BOF (Basic Oxygen Furnance) como de HEA, en los que se envuelve la incidencia de un jet de oxígeno sobre la superficie de un baño de acero, la comprensión de la dinámica de fluidos es fundamental con la intención de optimizar los fenómenos cinéticos tales como las transferencias de calor y de masa que intervienen en las reacciones químicas por efecto del oxígeno inducido, que están directamente relacionados con la efectividad de la recirculación, así como también la generación de escoria espumosa y el denominado “splashing” que se refiere al material que se chorrea por causa del momentum del jet.

La penetración del jet es determinado principalmente por la forma, el diámetro y la profundidad de la cavidad, los cuales se emplean como parámetros en la investigación sobre la comprensión del efecto de los mismos y así hacer el mejor uso de tales dichos en la producción de acero. Debido a la agresividad de las condiciones de operación en los procesos de aceración, el modelado físico usando agua y aire como en el modelado matemático representan herramientas valiosas para estudiar la interacción entre jets y baños líquidos.

Varios estudios experimentales para estudiar la transferencia de momentum entre un jet gaseoso y un baño líquido con modelos físicos de agua y con materiales reales (acero líquido) han llevado a entender el efecto de distintas variables tales como la altura de la lanza, diseño de la tobera, velocidad de flujo gaseoso, diámetro de la tobera, etc. sobre el intercambio de momentum en jet y baño. En la Tabla 1.1 se resumen los estudios del intercambio de momentum jet-baño por diversos investigadores mostrando también el año en que se generó el estudio y las variables involucradas en cada caso.

| No. de modelo | Referencias | Año | Aire - Agua | Oxígeno - Acero | Tobera cilíndrica | Tobera plana | Tobera Convergente - Divergente | Múltiples toberas | Diámetro de tobera | Altura del baño | Altura de la lanza | Velocidad de flujo | Diámetro del Recipiente | Ángulo de Tobera |
|---------------|---|------|-------------|-----------------|-------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------------|------------------|
| 1 | R.D. Collins & Lubanska | 1954 | x | | x | | | | x | | x | x | | x |
| 2 | R.B. Banks & D.V. Chandrasekhara | 1963 | x | | x | x | | | x | x | x | x | | |
| 3 | W.G. Davenport, D.H. Wakelin & A.V. Bradshaw | 1966 | x | | x | | | | x | | x | x | | |
| 4 | R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass & P.O. Hays | 1967 | | x | | | x | | x | x | x | x | x | |
| 12 | A. Chatterje & A.V. Bradshaw | 1973 | x | | x | | | | x | x | x | x | x | |
| 5 | S.K. Sharma, J.W. Hlinka & D.W. Kern | 1977 | x | x | x | | x | | x | x | x | x | | |
| 6 | S.C. Koria & K.W. Lange | 1987 | | x | x | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 7 | F. Qian, R. Mutharasan & B. Farouk | 1996 | x | | x | | | | x | x | x | x | x | |
| 8 | T. Kumagai & M. Iguchi | 2001 | x | | x | | | | x | | x | x | x | |
| 9 | O. Olivares, A. Elías, R. Sánchez, M.D. Cruz & R.D. Morales | 2002 | x | | x | | | | x | x | x | x | x | |
| 13 | A. Nordquist, N. Kumbhat, L. Jonsson & P. Jonsson | 2004 | x | | x | | | | x | | x | x | | |
| 14 | Actual caso de estudio | 2010 | x | | x | | | | x | | x | x | | x |

Tabla 1.1. Estudios realizados y factores considerados por diversos investigadores. [8]

1.21 Teorías de penetración del jet

Diversas investigaciones experimentales han sido desarrolladas con el propósito de determinar el tamaño de la penetración durante el soplado de la lanza en el proceso de refinación de acero. El objetivo de tales experimentos ha sido encontrar el efecto del diámetro de la tobera, la altura del baño, la altura de la lanza y la velocidad de flujo sobre la profundidad de la penetración.

Muchos de los investigadores han estudiado diversos fenómenos relacionados con la inducción del jet gaseoso, mencionando algunos como la incidencia de gases en líquidos, transferencia de masa en la incidencia del gas, recirculación en el baño para efecto de mezclado.

Collins y Lubaska [9] desarrollaron una correlación para la máxima longitud de penetración y también hallaron que una máxima depresión no siempre representa una alta efectividad de mezclado.

Banks y Chandrasekhara [10] estudiaron tanto jets gaseosos planos como circulares, con flujo turbulento e incidiendo en agua. Ellos sugirieron que bajo un flujo turbulento y un jet libre de turbulencia (free streamline) se crean distribuciones de presión idénticas.

Davenport, Wakelin y Bradshaw [11] investigaron la transferencia de masa, la recirculación en el baño y la longitud de la profundidad para la incidencia de un jet gaseoso en líquidos y expresaron la profundidad de la penetración como función del momentum del jet y la distancia entre la tobera y el baño.

Flinn, Pehlke y Glass [12] estudiaron el sistema oxígeno – acero para obtener una relación empírica entre el momentum del jet y la longitud de la penetración. También analizaron el patrón de recirculación y recomiendan que la penetración del jet ubicado en el centro del convertidor es una apropiada condición para la refinación del acero.

Sharma, Hlinka y Kern [13] usaron modelos a altas temperaturas para estudiar las zonas de reacción, la recirculación del baño y la penetración del jet. Concluyeron que la forma y la longitud de la cavidad no son afectadas por reacciones químicas y altas temperaturas, únicamente por fuerzas mecánicas. También encontraron que tanto las toberas cilíndricas como las convergentes – divergentes producen un fuerza de jet similar, por lo que también se obtienen longitudes de penetración muy parecidos bajo condiciones de soplado similares.

Koria and Lange [14] llevaron a cabo un estudio experimental para determinar la penetrabilidad de incidencia del jet gaseoso en un baño de acero de BOF bajo varias condiciones de soplado en la refinación del baño. Sugieren que la penetrabilidad del jet, definida como la capacidad del jet para penetrar el baño, puede ser calculada con una relación entre la longitud de la depresión en el metal fundido y el diámetro de la depresión. Se encontró que la distancia y el diámetro de la depresión en el metal líquido producido por la incidencia del gas dependen principalmente por la presión ejercida por el soplado del oxígeno, la distancia entre la tobera y el baño metálico, y el número de toberas.

Qian, Mutharasan y Farouk [15] estudiaron la región de incidencia usando un modelo físico consistente en un jet de aire y un baño de agua. Se emplearon queroseno y aceite de maíz como una segunda capa para investigar el efecto de una capa de escoria en la interface y la recirculación en el baño, siendo éste uno de los pocos trabajos que estudian la incidencia del jet en un baño bifásico. Se estableció el modelo para la predicción de la profundidad de la penetración.

Kumagai e Iguchi [16] estudiaron los patrones de burbujeo generado por el soplado en un modelo de agua. Dichos patrones fueron analizados con la salida de la tobera por encima y por debajo de la superficie del agua. Una vez que se encontró que el fenómeno de inestabilidad pudo estar relacionado con la profundidad de la penetración, fue propuesta una relación empírica para la predicción de la profundidad de penetración.

Olivares [17] simularon la dinámica de fluidos de la interacción líquido – gas en un convertidor LD, con modelos tanto físico como matemático.

En la Tabla 1.2 se muestran los valores de las variables empleadas por los investigadores previamente mencionados en sus estudios de la incidencia del jet gaseoso en una superficie libre líquida con el fin de analizar el efecto de las mismas en las características morfológicas de la cavidad y en la recirculación del líquido.

| Modelo | Diámetro tobera (mm) | Velocidad de flujo (L/min) | Altura del baño (cm) | Altura de la lanza (cm) | Presión (bar) | Diámetro Recipiente (cm) | Diámetro de la lanza (cm) |
|--------|----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|
| (1) | 6.14 – 11.2 | 180 – 350 | - | 0 – 15.8 | - | - | 0.61 – 1.12 |
| (2) | 6.35 – 19 | 14.6 – 1967.5 | 2.5 – 91.4 | 3 – 30.5 | - | 76.2 | 3.81 |
| (3) | 4.1 – 8 | - | 7.6 – 36.1 | 15.5 – 33 | 0.724 – 7.24 | 25.4 – 81.3 | 0.41 – 0.8 |
| (4) | 1.78 – 2.06 | 170 – 311 | - | 8.57 | - | - | - |
| (5) | 8 | - | 20 – 23 | 10.2 – 53.3 | - | - | - |
| (6) | 1.2 | - | < 12 | 30 – 60 | 3 – 6 (abs) | 10 | - |
| (7) | 5.8 – 23 | 8 – 200 | < 20.3 | 1.5 – 21 | - | 29.8 | - |
| (8) | 1 – 4 | 0.2 – 50 | - | -2.0 – 2.0 | - | 12 – 40 | - |
| (9) | 1 | 15 – 18 | 10 – 18 | 3 – 10 | - | 60 | 10 |
| (13) | 0.8 – 3 | 5 – 70 | 40 | 5 – 20 | - | 20 | 1 |
| (14) | 1.58 – 3.17 | 60 - 120 | 25 | 2 - 10 | - | 20 | - |

Tabla 1.2. Variables experimentales de los casos de estudios de diversos investigadores. [8]

Los análisis dimensionales han sido uno de los principales recursos que muchos investigadores han empleado para llegar a una correlación de los factores que afectan la longitud de penetración. La razón de aplicar estos modelos justifica que el número de variables que pueden ser tratadas sean reducidas.

En la Tabla 1.3 se presenta un resumen de los estudios reportados en la literatura que correlacionan el tamaño de la depresión formada en la superficie libre por la acción del jet incidente como función de las principales variables operativas como son el flujo de gas y la distancia entre la tobera y la superficie libre, entre otras.

| Investigador | Año | Correlación del tamaño de la profundidad |
|---|------|---|
| Collins y Lubanska. | 1954 | $H_j = (0.53 * P * \cos \alpha) / [(\rho_l * g * h^2 * \sec^2 \alpha) + 19 * (\rho_l * g * P^2)^{1/3}]$ |
| Banks y Chandrasekhara | 1963 | $(H_j/h) * (1 + H_j/h)^2 = (125/\pi) * (P/\rho_l * g * h^3)$ |
| Wakelin. | 1966 | $(H_j/h) * (1 + H_j/h)^2 = [(2 * K_2^2)/\pi] * (P/\rho_l * g * h^3); K_2 = 6.4$ |
| Davenport. | 1966 | $(H_j/h) * (1 + H_j/h)^2 = [(2 * K_1^2)/\pi] * (P/\rho_l * g * h^3); K_1 = 7.6$ |
| Flinn, Pehlke, Glass y Hays. | 1967 | $H_j' = 1.5 * p_o' * d_t' * h^{0.5} + 1.5$ |
| Chatterjee. | 1973 | $H_j/h * \{1 + [H_j - (7 * d_c)]/h\}^2 = 100 * P / (\pi * g * \rho_l * h^3)$ |
| Koria y Lange. | 1987 | $H_j/h = 4.469 * [0.7854 * 10^5 * d_t^2 * p_{amb} * (1.27 * p_o / p_{amb} - 1) * \cos \alpha / (g * \rho_l * h^3)]^{0.66}$ |
| Qian, Muthasaran y Farouk. | 1996 | $(H_j/h) * (1 + H_j/h)^2 = [(2 * K_2^2)/\pi] * [P / (\rho_l * g * h^3)]; K_2 = 7.5$ |
| Kumagai y Iguchi. | 2001 | $H_j = 4.1 * d_e * [Fr'_m]^{1/3}; Fr'_m = [(4/\pi)^2 * \rho_g * (V'_g)^2 / (\rho_l * g * d_e)]; V'_g = V_g / \{[0.00523(h/d_e - 1.26)^2] + 1\}$ |
| Olivares, Elías, Sánchez, Cruz y Morales. | 2002 | $(H_j * h / d_t^2) = 1.508 * Fr^{0.714}; Fr = (V_g^2 / d_t * g) * [\rho_g / (\rho_l - \rho_g)]$ |

Tabla 1.3. Correlaciones encontradas en la literatura con relación a la dimensión de la cavidad en función de diversas variables de la incidencia de un jet gaseoso en un baño líquido[8]. Los símbolos de la Tabla 1.3 representan: H_j : Profundidad de la cavidad, P : Presión del gas, α : Angulo, ρ_l : Densidad del líquido, g : Aceleración de la gravedad, h : Altura de la lanza, K_1 y K_2 : Constantes, d_t : diámetro de tobera, ρ_g : Densidad del gas, Fr_m : Número de Froude modificado, V_g : Velocidad del gas.

1.22 Teorías de escorias

En el HEA con la inyección de oxígeno y finos de carbono, se genera CO al producirse la reacción de oxidación del carbono en forma de polvo o disuelto en el metal. Las burbujas de gas son atrapadas en la capa de escoria provocando una expansión considerable al volumen original de esta fase líquida. Este fenómeno es referido comúnmente como escoria espumosa. Dicha escoria espumosa es esencial en el proceso debido a que permite una rápida transferencia de calor proveniente de la postcombustión al baño líquido y sobre todo desde los arcos eléctricos. Por otro lado, un espumamiento excesivo puede causar un desbordamiento del material. Por lo tanto, el control de formación de escoria espumosa se ha vuelto una cuestión primordial del proceso de aceración, teniendo como objetivos aprovechar al máximo la energía del sistema así como considerar la escoria espumosa como un factor limitante en la productividad de los procesos de fabricación del acero.

La escoria espumosa consiste en la introducción de burbujas de gas en el metal fundido y escoria ya sea por la inyección de burbujas o por reacción química. Aunque se pensaba que la escoria espumosa tenía efectos negativos en la producción de acero, con estudios recientes se ha encontrado que son más los beneficios que se obtienen con esta operación. En efecto, la escoria provee un escudo protector del arco a los productos de combustión extendiendo la vida útil del revestimiento refractario y evita pérdidas considerables de calor radiado a los paneles enfriados con agua. Además, la escoria espumosa previene la oxidación del metal fundido, teniendo así un mayor control en la composición química. También actúa como un aislante térmico entre el baño líquido y los alrededores, reduciendo así la energía eléctrica requerida para mantener la temperatura de operación y la limitación del consumo de electrodos. Recientemente surgió un interés por desarrollar procesos innovadores de producción de acero, en particular baños de fusión. Debido a los beneficios encontrados en la escoria espumosa, es esencial la predicción precisa del volumen de la espuma para controlar el proceso y así optimizar el diseño de operación. La formación y la estabilidad de la espuma

dependen de las propiedades termodinámicas de la escoria, el tamaño de burbuja y la velocidad de formación del gas.

El rango de viscosidades de la escoria es muy grande en la aceración en HEA, y su valor de viscosidad depende fundamentalmente de la composición y el proceso con el que se esté formando. La Tabla 1.4 muestra una serie de escorias de aceración junto con sus propiedades termofísicas.

| Escoria | Dimensiones | Gas | Tipo de tobera | Flux del gas (mm/s) | σ (mN/m) | μ (mPa.s) | ρ (Kg/m ³) | T (°C) | r_c (mm) |
|---|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|-------------|------------|
| 40%CaO-40%SiO ₂ 5%FeO-10Al ₂ O ₃ | $i.d.$ = 9.2 cm H_z = 4.5 cm | Argón | Simple y Multiple | 0 a 50 | 463 | 398 | 2743 | 1500 | 7.8 a 13.5 |
| 48%CaO-32%SiO ₂ 10%FeO-10Al ₂ O ₃ | $i.d.$ = 4.1 cm H_z = 4.2 cm | Argón | Simple | 0 a 30 | 477.2 | 381 | 2733 | 1600 | 12 |
| 75SiO ₂ -15Na ₂ O-10CaO (33%) vidrio | $i.d.$ = 6.5 cm H_z = 2.0 cm | Aire | Simple | 0 a 25 | 297.7 a 307.7 | 7450 a 12100 | 2346 a 2358 | 1425 a 1500 | 15 a 20 |
| Agua + 78% a 95% glicerina + SDBS | $i.d.$ = 10.7 cm H_z = 16.7 cm | N ₂ | Disco de Borex | 0.83 a 1.5 | 69.5 a 72.3 | 46.5 a 520.8 | 1204 a 1251 | 20 | 0.7 a 1.1 |
| 30%FeO-42%SiO ₂ 28%CaO | $i.d.$ = 3.2/5 cm H_z = N.A. | Argón | Simple | 0 a 27 | 477.9 | 1605 | 3055 | 1300 | 12 |
| 3%FeO (Ca/SiO ₂ =1.25) | $i.d.$ = 9.2 cm H_z = 4.5 cm | Argón | Simple | 0 a 30.3 | 477.2 | 381 | 2733 | 1500 | 12 |
| 0%FeO (Ca/SiO ₂ =1.25) | $i.d.$ = 9.2 cm H_z = 4.5 cm | Argón | Simple | 0 a 40.4 | 472.8 | 396 | 2693 | 1500 | 12 |
| 30%CaO-60%SiO ₂ 10%CaF ₂ | $i.d.$ = 4.1 cm H_z = 4.5 cm | Argón-He-H ₂ | Simple | 0 a 40.4 | 338 | 533 | 2534 | 1400 a 1500 | 13 |
| 34.78%CaO-33.76%SiO ₂ 22.52%FeO-8.94%MgO | $i.d.$ = 4.5 cm H_z = 4 cm | Argón | Simple | 0 a 67.3 | 502 | 270 | 2956 | 1600 | 17 |
| 37.39%CaO-35.37%SiO ₂ 20.87%FeO-6.17%Al ₂ O ₃ | $i.d.$ = 4.5 cm H_z = 4 cm | Argón | Simple | 0 a 67.4 | 493 | 291 | 2936 | 1600 | 17 |

Tabla 1.4. Rango de viscosidades de acuerdo a su composición química y sus respectivas propiedades. [18]

Para la construcción del modelado físico requerido para el estudio de la recirculación en presencia de escoria y de la interacción entre el jet gaseoso y la superficie libre con escoria, dado que son extensivamente complicadas las condiciones reales de trabajo, se ha realizado una revisión exhaustiva de varios modelos físicos con la finalidad de discernir la opción que permita llevar la simulación. A continuación, en la Tabla 1.5, se muestran los modelos físicos encontrados en la literatura que han usado distintos líquidos para representar a la escoria encima del acero (sabiendo que el agua se usa para simular al acero). Además, se presenta el objetivo y el sistema estudiado en cada caso.

| Autores | Objetivo | Aplicaciones | Sistema |
|---|--|--|--|
| LOTUN, PILON.[18] | Encontrar o predecir la formación de escoria en estado estable y sus dimensiones (espesor) comparando algunas correlaciones empíricas (Buckingham's Pi) con pruebas experimentales. También se busca la variación de la tensión superficial en función del radio de burbuja del gas inyectado. | Escorias de BOF y EAF (en la Tabla 1.4 se observan los diferentes tipos de escoria de acuerdo al proceso). | Se simula solamente a la escoria con una mezcla de agua de un 78 a 95% de glicerina junto con SDBS. |
| GHORAI, G.G.ROY, S.K. ROY.[19] | Estudiar el comportamiento de partículas adheridas a un gas inerte para la refinación secundaria de acero así como el transporte de masa involucrado en el sistema. Se valida con un modelado físico. | Sistema Escoria – Acero en refinación secundaria. | Se emplea una mezcla de ácido benzoico (5L) simulando el acero así como aceite (no se especifica cuál) simulando la escoria. En la Tabla 1.7 se anexa los parámetros de industria con sus respectivas escalas en el experimento. |
| IWAMASA, FRUEHAN.[20] | Estudiar la separación de fases de acero líquido – escoria con una variación de aceites en el modelado físico y empleando la ecuación de Stokes para encontrar las condiciones apropiadas para el experimento | Un convertidor en ladesulfurización de acero proveniente de alto horno. | Se emplearon diversas mezclas de aceites simulando la escoria (Tabla 1.6) así como agua sustituyendo el acero así como esferas de polipropileno simulando una segunda fase sólida. |
| MIAO-YUNG, JONES, Du SICHEN. [21] | Se estudia el comportamiento químico de la escoria, específicamente los parámetros cinéticos de la formación de CO y la evolución del mismo. La influencia del tamaño de burbuja del gas inyectado también se analiza. | Formación de escorias de Arco Eléctrico | Para la simulación de acero se emplea una solución de 1M de NaHCO ₃ para la escoria aceite de silicona y ácido oxálico para la simulación del carbono en solución. En la Tabla 1.6 se comprenden algunas propiedades del aceite de silicona |
| STADLER, EKSTEEN, ALDRICH [22] | Se buscan los principales factores que determinan la estabilidad de la escoria, así como la influencia de sólidos precipitados y la importancia de tamaño y distribución de burbujas. Se determina que el factor más importante a estudiar es la viscosidad de la escoria. | Escorias de Arco Eléctrico | Sólo se simula la escoria con la interacción del gas, empleando diferentes mezclas (Tabla 1.6) así metilisobutilcarbinol para controlar la tensión superficial de la mezcla. Como partículas suspendidas se empleó Starch. |
| GHAG, HAYES, GEONLEE [23] | Se realizan las pruebas para determinar la relación entre las propiedades físico-químicas de la fase líquida y su relación con el tamaño de burbuja, flujo de gas y tiempo de residencia del gas en la escoria. | Procesos de reducción en general. | Para la escoria se utilizan varias soluciones de glicerol – Agua. El Dodecylbencenosulfonato de sodio (SDBS) es usado para controlar la tensión superficial de la solución dada una viscosidad. |

| | | | |
|-------------------|---|---------------------------|--|
| LEI, ZHU, HE [24] | <p>De acuerdo a la escoria que se está estudiando, dependerán sus propiedades fisicoquímicas. En este caso, la viscosidad cinemática es la principal referencia para determinar la sustancia que se va a emplear para la simulación física de la escoria. Es decir, se debe cumplir con la siguiente</p> $\nu_{slag}/\nu_{steel} = \nu_{oil}/\nu_{water}$ <p>condición: El rango de viscosidades de la escoria es muy grande, de ello depende la composición y el proceso en el que se esté formando.</p> | Molde de colada continua. | Se emplean diversas mezclas de aceites de acuerdo a la densidad de la escoria y como el acero se emplea agua. En la Tabla 1.6 se muestran las propiedades de dichos aceites. |
|-------------------|---|---------------------------|--|

Tabla 1.5. Modelos físicos encontrados en la literatura.

En la Tabla 1.6 se presentan las propiedades de algunas sustancias hasta ahora utilizadas como escoria en estudios reportados en la literatura.

| Sustancia | Densidad (g/cm ³) | Viscosidad (P) |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Aceite Ligero de Parafina | 0.858 | 0.327 (30.2° C) |
| Aceite Pesado de Parafina | 0.880 | 1.08 (30.2° C) |
| Aceite de Algodón | 0.917 | 0.442 (30.2° C) |
| Aceite de Silicón | 0.961 | 0.425 (30.2° C) |
| Aceite Mezcla A | 0.877 | 1.50 (22° C) |
| Aceite Mezcla B | 0.872 | 1.11 (21° C) |
| Agua (20° C) | 0.99823 | 0.01002 |
| Agua (30° C) | 0.99567 | 0.007975 |

Tabla 1.6. Propiedades de las sustancias a emplear en el modelado físico acero – escoria. [20]

En la Tabla 1.7 se presentan los valores de las propiedades físicas requeridas de los líquidos inmiscibles en agua (modelo físico de laboratorio) y acero (industria) para cumplir con los factores de escalamiento que promuevan la mejor similitud dinámica y cinemática entre el modelo físico y el proceso industrial.

| Parámetros | Industria | Laboratorio |
|--|---|-----------------------|
| Diametro del tanque (m) | ~3 | 0.2 |
| Coefficiente de correlación del tanque (m) | 0.9-1 | 0.9 |
| Viscosidad del agua/metal (Kg/ms) | 7×10^{-3} | 1×10^{-3} |
| Densidad del agua/metal (Kg/m ³) | 7×10^3 | 1×10^3 |
| Viscosidad cinemática del agua/metal (m ² /s) | 1×10^{-6} | 1×10^{-6} |
| Viscosidad cinemática de la escoria/aceite (m ² /s) | 1×10^{-5} - 3.3×10^{-5} | 0.86×10^{-3} |
| Coefficiente de correlación de la escoria/metal o aceite/agua | 0.1 | 0.1 |

Tabla 1.7. Parámetros a considerar en el modelado físico en la industria y en el laboratorio así como sus factores de escalamiento. [19]

1.23 Revisión de modelos matemáticos

De acuerdo a los hallazgos experimentales en los modelos matemáticos de los investigadores citados, se ha comprobado que los parámetros más importantes para caracterizar la transferencia de cantidad de movimiento entre un jet gaseoso incidiendo en un baño líquido son la distancia de la cavidad formada por el jet y su forma, así como la magnitud de los campos de velocidad. Existen diversos estudios experimentales que abordan el problema así como algunos estudios numéricos hechos con software CFD (Computational Fluid Dynamics), específicamente usando FLUENT.

Turkdogan [25] encontró una correlación entre la cavidad formada y la velocidad de flujo del jet en los que relaciona que la tensión superficial y la presión del impacto del jet afectan el “splashing” cuando varios líquidos son usados.

Molloy [26] ha llamado tres diferentes mecanismos asociados con el impacto del jet en la superficie del líquido: “dimpling”, “splashing” y penetración.

Kumagai and Iguchi [16] enlistaron diferentes patrones generados en el fluido debido a la incidencia del jet.

Nordquist, Kumbhat, Jonsson and Jönsson [8] investigaron el efecto de la distancia de la tobera, altura del baño y el diámetro de la tobera que tienen en la distancia de la profundidad en un modelo físico de agua.

Banks y Chandrasekhara [10] investigaron la distribución de la presión, perfiles de cavidad y de velocidad para jets circulares y planos.

Szekely y Asai [27] presentaron un modelo computacional de la incidencia de un jet en una superficie líquida, empleando una forma predeterminada de la superficie como una condición de frontera.

Nguyen y Evans [28] investigaron el efecto de la tobera y la relación del diámetro de la deformación de la superficie del líquido usando un modelo computacional.

Nakazono [29] describe un análisis numérico de la incidencia de un jet supersónico de O_2 en la superficie de acero líquido con alto contenido de carbono. Los cálculos fueron planteados bajo vacío y con superficie química localizada.

Son muchos los aspectos que dificultan los cálculos numéricos de la incidencia del jet en la superficie de un líquido. Por ejemplo, el radio de una tobera cilíndrica es muy pequeña por lo que es forzoso armar una “grid” muy grande no uniforme con una velocidad axial del jet alta con posibilidad de generar un flujo bifásico numéricamente inestable presentando divergencia. Además, es contrastante la diferencia entre los parámetros del gas y del líquido tales como la viscosidad y la densidad. Finalmente, la modelación de la turbulencia debe ser capaz de predecir la velocidad de propagación del jet así como la recirculación en el baño.

Este trabajo es motivado en el estudio de la transferencia de la cantidad de movimiento que jets gaseosos aportan a baños líquidos, particularmente en baños líquidos bifásicos como el sistema acero-escoria que poco ha sido estudiado como se ha demostrado en la revisión bibliográfica. Desgraciadamente, las condiciones agresivas de operación tanto en BOF como en HEA impiden un estudio experimental en condiciones industriales, por lo que

herramientas como el modelado físico y el matemático surgen como importantes herramientas de análisis como en este caso del estudio de la transferencia de cantidad de movimiento desde un jet a un baño de dos fases.

1.3 HIPOTESIS

El proceso de inyección de un jet gaseoso de oxígeno incidiendo en una superficie libre líquida en un sistema de dos líquidos inmiscibles acero-escoria, se puede analizar usando la modelación física con agua simulando acero, aceite de silicón simulando la escoria y aire simulando al oxígeno y los resultados de la circulación encontrada y las depresiones formadas se pueden escalar al sistema real. Esta aseveración tiene el mismo alcance para el caso del modelo matemático, que para tal efecto, ocupando las mismas variables con valores iguales a los del modelo físico, los resultados deben ser cualitativamente similares.

1.4 OBJETIVOS

Evaluar y analizar las diferencias entre las recirculaciones formadas por la influencia del flujo gaseoso y la distancia y ángulo entre la superficie libre y la punta de la lanza.

Comparar los resultados obtenidos en el modelado físico con un modelo matemático como parte de la validación.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este trabajo se aisló el intercambio de momentum entre un jet gaseoso y un baño bifásico como el que se genera en el BOF y en el HEA entre el oxígeno y el acero y escoria líquidas. La transferencia de masa y calor no son consideradas en este estudio. Las condiciones agresivas de operación impiden visualizar este intercambio de momentum en planta, por lo que la modelación física y matemática son herramientas útiles para cuantificar dicho intercambio. A continuación se describen las metodologías empleadas en el modelado físico y matemático.

2.1 Metodología del modelado físico

Un modelo físico es una construcción de un fenómeno o proceso complejo usando materiales distintos y usualmente en una escala menor con el fin de reproducir el comportamiento del sistema físico de interés y así mejorar los diseños.

Para este caso de estudio, el modelo físico construido es un recipiente cilíndrico enchaquetado con otro recipiente de paredes planas con el propósito de evitar distorsión, ambos hechos de acrílico transparente. Con un compresor y mediante una lanza de cobre con una boquilla circular, se genera el jet de aire que va incidir sobre la superficie libre del baño líquido bifásico. La lanza se coloca a una distancia y ángulo conocidos para evaluar el efecto de estas dos variables sobre el intercambio de momentum. Un flujómetro controla la rapidez de flujo de aire. Se iluminan planos del modelo físico con un haz de láser y el baño se siembra con partículas luminiscentes para que el arrastre del fluido refleje los patrones de flujo que fueron captados por un cámara de alta velocidad. El modelo físico fue construido previamente en otro trabajo y su construcción involucró satisfacer los criterios de similitud dinámica y cinemática para un baño monofásico [33]. La similitud dinámica involucra igualar los números de Reynolds y de Froude en donde participan fuerzas boyantes e inerciales. La similitud cinemática se satisface al tener la misma viscosidad cinemática del acero líquido a 1600 °C que en el agua a 25°C ($\mu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Desafortunadamente los números de Weber del modelo y de los reactores

industriales no pueden ser satisfechos ya que la tensión superficial del agua con el aire y con el acero con oxígeno no son iguales por lo que el número de Weber no es igual entre el reactor industrial y el modelo físico.

Este recipiente de acrílico de forma cilíndrica tiene un diámetro, D , de 20 cm y una altura, h , de 30 cm y como ya se mencionó, se encuentra enchaquetado con la finalidad de evitar la difracción por curvatura. En la Figura 2.1 se muestra una foto del modelo físico de acrílico transparente empleado, mientras que en la Figura 2.2 se presenta un esquema del modelo físico. Este esquema representa el arreglo experimental empleado para medir los patrones de flujo y muestra los elementos esenciales que son: a) el modelo físico de acrílico, b) la lanza de cobre soportada por su mecanismo, c) el compresor de aire, d) el flujómetro, e) la cámara de alta velocidad que captura las imágenes y f) la fuente generadora del haz láser. La Figura 2.3 muestra el mecanismo que permite posicionar la lanza de cobre para ajustar la altura y el ángulo de ésta. Finalmente, la Figura 2.4 presenta una fotografía en donde se aprecian los elementos más importantes del arreglo experimental también presentados en el esquema de la Figura 2.2 donde destaca el modelo, la lanza y la cámara de alta velocidad.

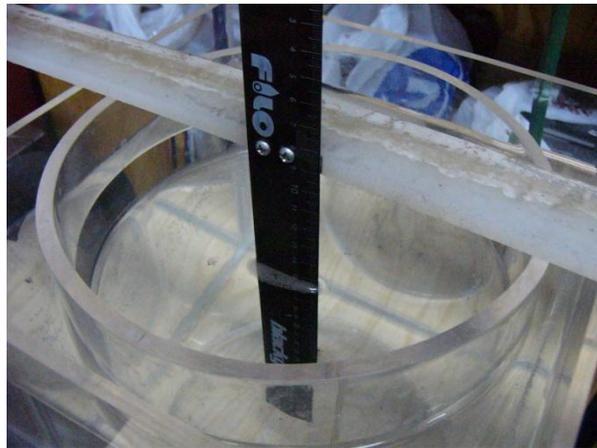


Fig. 2.1. Vista superior del tanque. El cilindro es llenado por agua y se rectifica la altura del mismo en las pruebas preliminares.

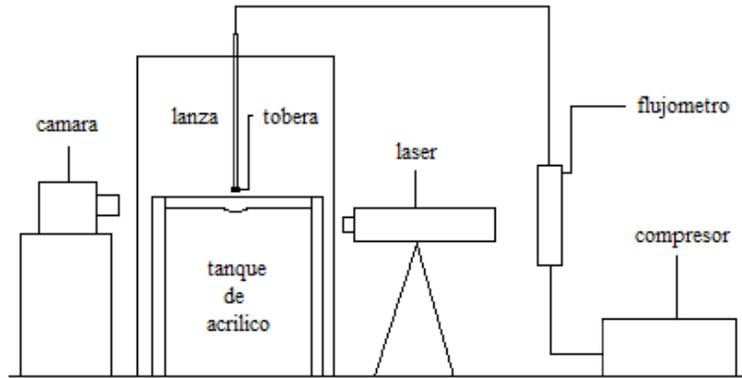


Fig. 2.2. Esquema general del montaje del equipo que muestra los elementos principales.



Fig. 2.3. Estructura metálica que permite la variación entre la altura de la tobera y la superficie y el ángulo de la tobera.



Fig. 2.4. Fotografía del montaje del equipo. Se coloca una cámara ultra rápida a una distancia aproximada de 1 metro con el propósito de visualizar panorámicamente los sucesos fenomenológicos bajo la incidencia de un flujo gaseoso en la superficie libre. Posteriormente se analizan las imágenes adquiridas.

2.11 Materiales empleados

Como se ha establecido que la similitud cinemática es satisfecha usando agua para simular el acero líquido caliente, se requiere encontrar una sustancia para simular la escoria, que es más complejo ya que de la revisión bibliográfica se conoce el uso de al menos 10 sustancias distintas que simulan escorias de aceración tanto en la refinación primaria como en la secundaria.

El procedimiento para elegir dicho líquido fue determinar los líquidos inmiscibles que simulen las interacciones involucradas entre el acero líquido y la escoria y que cumplan con la relación establecida para el modelo físico dada en la ecuación 2.1, la cual simplemente representa la relación de viscosidades cinemáticas iguales entre los dos fluidos del horno real (escoria-acero) y del modelo físico (orgánico x – agua)

$$\nu_{\text{slag}}/\nu_{\text{steel}} = \nu_{\text{oil}}/\nu_{\text{water}} \dots\dots\dots \text{(Ec. 2.1)}$$

Para fines prácticos, el agua es la sustancia empleada que simula al acero. Se conocen las viscosidades cinemáticas del acero típico procesado en el Horno de Arco Eléctrico y sus escorias (ν_{acero} a 1600°C: $8.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y ν_{escoria} (40%CaO-40%SiO₂-5FeO-15%Al₂O₃): $1.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Si la viscosidad cinemática del agua es de $1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a 25°C, entonces se requiere usar una sustancia inmiscible con el agua que tenga la siguiente viscosidad cinemática:

$$1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \left(\frac{1.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}}{8.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} \right) = \mathbf{1.73 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} \dots\dots\dots \text{(Ec. 2.2)}$$

Dado que es factible la accesibilidad del aceite de silicona a varias viscosidades, se ha determinado que un aceite comercial de grado 100 (100 cp = $1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) es la mejor opción para las pruebas.

Se empleó aire como jet gaseoso aire en vez del oxígeno. La única diferencia significativa radica en el número de Mach empleado en este estudio físico, ya que en la plana se usan flujos supersónicos y en este trabajo se usan flujos subsónicos respetándose aun así la similitud dinámica.

2.12 Procedimiento

Para realizar las mediciones cualitativas de los patrones de flujo, una vez montado el sistema experimental como el mostrado en la Figura 2.2, se usó el siguiente procedimiento en un cuarto oscuro:

- 1.- Es vertida la cantidad de agua que alcance los 25 cm de altura, aplicando aproximadamente 1 mililitro de aperlante en frío como trazador con el fin de verificar las cantidades necesarias para lograr apreciar la recirculación del líquido provocada por la acción del jet incidente.
- 2.- Se añade una mínima cantidad de partículas trazadoras de plata en el agua.
- 3.- Se vierte aceite de silicón sobre el baño de agua hasta alcanzar una capa de aceite de un espesor de 2 mm.
- 4.- Se ajusta la posición del haz láser para ubicar un plano de buena visualización respecto a la cámara fotográfica.
- 5.- Se posiciona la lanza a una altura y ángulo predeterminados de acuerdo al experimento.
- 6.- Se inicia el soplido del jet gaseoso ajustando el flujo con el rotámetro.
- 7.- Una vez que se establecen los patrones de flujo después de un cierto tiempo, se tomaron fotografías con diferentes condiciones de tiempo de exposición y aperturas de diafragma para lograr la mejor toma.
- 8.- Se procesaron las imágenes digitalmente para alcanzar una mejor definición en los patrones de flujo.

2.13 Matriz Experimental

Con este modelo físico se visualizaron los patrones de flujo en función de las siguientes variables:

- Flujo de aire.
- Distancia entre la punta de la tobera y la superficie libre.
- Ángulo de la lanza.

Se diseñaron una serie de pruebas en las cuales se pretende variar los parámetros más importantes (ángulo de la tobera en relación a la horizontal, flujo gaseoso y altura entre la tobera y la superficie libre) que afectan la profundidad de la cavidad y los patrones de flujo del líquido provocados por la incidencia del jet gaseoso. La abertura de la tobera se mantuvo en 1/16 de pulgada. Se realizaron nueve pruebas con las condiciones de operación señaladas en la Tabla 2.1.

| Prueba | Flujo (L/min) | Altura de la tobera (mm) | Ángulo (°) |
|---------------|----------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 60 | 50 | 60 |
| 2 | 80 | 20 | 60 |
| 3 | 80 | 50 | 60 |
| 4 | 80 | 80 | 60 |
| 5 | 80 | 100 | 60 |
| 6 | 80 | 50 | 75 |
| 7 | 80 | 50 | 90 |
| 8 | 100 | 50 | 60 |
| 9 | 120 | 50 | 60 |

Tabla 2.1. Matriz de experimentos.

2.2 MODELO MATEMÁTICO

Como parte del estudio del intercambio de momentum entre un jet gaseoso y un baño bifásico, además del modelo físico, se desarrolló un modelado matemático con el fin de simular la recirculación del flujo, el campo de velocidad y la cavidad formada bajo la incidencia del jet gaseoso.

2.21 Definición modelo matemático

El desarrollo del modelo matemático consiste plantear las ecuaciones diferenciales de conservación que rigen al fenómeno físico que se quiere resolver, considerando las condiciones de frontera e iniciales apropiadas, planteando ciertas suposiciones simplificativas. Las condiciones de frontera se establecen a partir de las restricciones físicas que existen en las fronteras del flujo. Las condiciones iniciales describen el campo de flujo en el tiempo inicial.

Las ecuaciones diferenciales antes mencionadas se establecen a partir de la Ley de la Conservación de la Masa y de la conservación de la Cantidad de Movimiento, resumidas así como las ecuaciones de Navier-Stokes.

2.22 Definición de la física del modelo

El modelo matemático implementado para la simulación de la recirculación del flujo, el campo de velocidad y la cavidad formada bajo la incidencia del jet gaseoso fue desarrollado mediante FLUENT CFD bajo las siguientes suposiciones:

- Tanto la fase líquida como la fase gaseosa se consideran fluidos newtonianos e incomprensibles.
- El perfil de velocidad del gas incidente se asume uniforme con un valor constante.
- Dada la geometría del sistema, se considera un plano de simetría vertical con respecto al flujo.

El sistema de inyección del jet gaseoso es gobernado por los flujos de gas y líquido y puede ser modelado usando la técnica del volumen de fluido (volumen of fluid, por sus siglas, VOF), el cual se define como una técnica para una malla fija designado para dos o más fluidos inmiscibles en donde la posición de la interfase es de interés. La parte de la superficie libre se plantea como un solo fluido que se resuelve con la ecuación de conservación de masa con variable escalar ϕ , marcador cuyo valor define al fluido en cualquier punto del dominio junto con las propiedades del fluido.

2.221 Conservación de la masa, fracción del volumen y ecuaciones de propiedades físicas.

En el modelo de VOF, la fracción de volumen de cada uno de los fluidos se realiza en cada celda en todo el dominio computacional. En adición a la velocidad y la presión, la fracción de volumen también es una variable del campo del flujo en la técnica del VOF, por lo que se encuentra contenido en las

ecuaciones de conservación de masa y de momentum. La ecuación de continuidad para la fase líquida con fracción volumen, φ , se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div} \cdot (\mathbf{u}\varphi) = 0 \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.3})$$

Donde \mathbf{u} es el vector de velocidad y t es el tiempo. Una expresión similar es usada para la fase gaseosa, donde la fracción volumen del gas, φ_g , está dado por:

$$\varphi_g = 1 - \varphi \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.4})$$

En cada control de volumen las fracciones de volumen de todas las fases deben sumar la unidad. Por lo tanto, si el control de volumen del líquido es total entonces $\varphi = 1$ mientras que un valor de $\varphi = 0$ evidencia solo presencia de gas. La fracción de volumen para cada una de las fases es usada para determinar los valores promedio ponderados para variables y propiedades físicas del fluido tales como la densidad y la viscosidad.

La densidad ρ y la viscosidad μ para cada control de volumen dentro el dominio son determinados por las siguientes expresiones:

$$\rho = \rho_g(1 - \varphi) + \rho_l\varphi, \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.5})$$

$$\mu = \mu_g(1 - \varphi) + \mu_l\varphi \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.6})$$

Donde ρ_g es la densidad del gas y ρ_l la densidad del líquido mientras que μ_g es la viscosidad del gas y μ_l es la viscosidad del líquido.

2.222 Ecuaciones de conservación de momentum

La ecuación de conservación de momentum generalizada para el dominio computacional se escribe como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = -\text{grad}(P) + \text{div}[\mu \text{grad}(\mathbf{u})] + \rho \mathbf{g}, \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.7})$$

Donde \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad, p es la presión del fluido y ρ y μ son la densidad y la viscosidad, basadas en las ecuaciones 2.5 y 2.6.

Considerando que las velocidades de los flujos gaseosos en las salidas de las toberas son relativamente altas, es apropiado simular el flujo en el sistema de chorreo con un modelo de flujo turbulento. Para hacer esto, las variables dependientes del flujo, tales como velocidades o composiciones y variables de turbulencia pueden representarse de manera general con la variable dependiente ϕ . Aplicando los principios de conservación, se obtiene como resultado las ecuaciones de conservación para masa y momentum, así como la energía cinética turbulenta, k , de turbulencia y su velocidad de disipación, ε . De esta forma, la ecuación que representa el balance general de conservación para la variable dependiente general, ϕ , es expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\mathcal{D}_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \dots \dots \dots \text{(Ec. 2.8)}$$

donde las ecuaciones gobernantes de la variable dependiente ϕ , el coeficiente de difusión \mathcal{D}_ϕ y el término fuente S_ϕ son dados en la Tabla 2.1 para cada ecuación de conservación, es decir, conservación de masa, de conservación de momentum en las tres direcciones del espacio y las conservaciones de k y de ε que representan al modelo estándar de turbulencia $k-\varepsilon$.

En las ecuaciones gobernantes de la Tabla 2.2, el efecto de la turbulencia es incorporado por medio del término de “tensiones de Reynolds” los cuales están relacionados con las variables de flujo a través del modelo estándar $k-\varepsilon$ de turbulencia. El modelo de $k-\varepsilon$ consta de dos ecuaciones de conservación, una para k y otra para ε y este modelo es ampliamente utilizado para cálculos ingenieriles de flujo de fluidos. Este modelo de turbulencia es semiempírico y es apropiado para números de Reynolds de flujos altos así como para sistemas de inyección.

| Eq. | ϕ | D_ϕ | S_ϕ |
|---------------------|----------------|--------------------------------|---|
| Cont. | φ/ρ | 0 | 0 |
| r - Mom. | V | μ_{eff} | $-\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{\text{eff}} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right]$ |
| θ - Mom. | W | μ_{eff} | $-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu_{\text{eff}} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rW) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right]$ |
| z - Mom. | U | μ_{eff} | $-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{\text{eff}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right] + g$ |
| k- Eq. | k | $\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ | $\mu_t \left[\left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] - \rho \varepsilon$ |
| ε - Eq. | ε | $\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ | $C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left[\left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$ |

$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ (=viscosidad turbulenta); $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ (=viscosidad efectiva); $C_\mu = 0.09$; $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$. Las demás variables son: V= Componente con respecto al radio r de la velocidad (m/s); W= Componente con respecto al ángulo θ de la velocidad (m/s); U= Componente con respecto a la posición z de la velocidad (m/s).

Tabla 2.2 Ecuaciones de conservación involucradas en el cálculo.[39]

2.223 Condiciones de frontera e iniciales

Las condiciones de frontera representan el no deslizamiento y la ausencia de turbulencia en las paredes laterales y del fondo del reactor, es decir, valor cero de las componentes de las velocidades y de los parámetros turbulentos k y ε . El plano de simetría representa una condición de cero flujo convectivo y difusivo de masa, momentum y de turbulencia. En la tobera sale gas con una velocidad determinada por el flujo de aire y por el diámetro de la tobera, mientras que en la frontera superior se asume una condición de presión fija de la atmósfera. La condición inicial está dada por cero velocidades (baño estático) y turbulencia antes del soplido de gas sobre el baño, y una condición inicial importante es establecer los dominios ocupados por baño (agua), escoria (aceite) y aire (atmósfera gaseosa) dentro del dominio de cómputo.

2.3 Solución del problema en CFD

La solución de las ecuaciones de conservación para problemas de flujo de fluidos son soluciones analíticas solo en algunos casos sencillos. Para casos

más complejos como el presente problema, en los que la dinámica de fluidos representa una dificultad de origen matemático y/o físico, se pueden realizar aproximaciones precisas de las ecuaciones diferenciales con los métodos de la Fluidodinámica Computacional (por sus siglas en inglés, CFD). Se han desarrollado una gran variedad de métodos de dinámica de fluidos computacional, siendo el de elemento o volumen finito uno de los que más prevalecen. Este problema resuelve numéricamente las ecuaciones gobernantes usando el código comercial FLUENT.

El método de volúmenes finitos consiste en la discretización espacial del dominio para posteriormente calcular sobre la misma aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. Dicho método comienza con una división del dominio en elementos triangulares o *quad* en 2-D o tetraédricos, hexas o prismas y otras en 3-D, generando una malla. Dependiendo del tipo de elemento, de la capacidad de computación disponible y de la precisión que se quiera en la resolución del flujo, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos.

El método aproxima la función incógnita en cada nodo por su desarrollo en serie de Taylor. El número de términos del desarrollo, para cada nodo, junto con las condiciones de frontera e iniciales, da lugar a un sistema de ecuaciones cuya resolución lleva a una solución aproximada. La solución a este sistema de ecuaciones es un proceso iterativo que puede resolverse utilizando varios métodos.

2.31 Etapas de para la resolución en CFD

La realización de una simulación en CFD se divide en cuatro etapas:

- Creación de la Geometría / Malla.
- Definición de la física del modelo.
- Solución del problema en CFD.
- Visualización de los resultados en el Post-procesador.

2.32 Creación de la geometría / malla

Los pasos básicos a realizar para generar la geometría y posteriormente la malla, implican:

- Definición de la geometría de la región de interés.
- Creación de regiones de flujo fluido, regiones sólidas y nombres divisorios superficiales.
- Ajuste de propiedades para la malla (número de nodos, número de elementos, mallas refinada en capas límites, etc).

El volumen de control se debe crear a partir de puntos, posteriormente líneas a partir de los puntos y, finalmente, superficies a partir de las líneas. Para la creación de la geometría se ha empleado el software Gambit versión 2.4.6. Éste es un programa CAD que permite crear geometrías para una posterior simulación en Fluent.

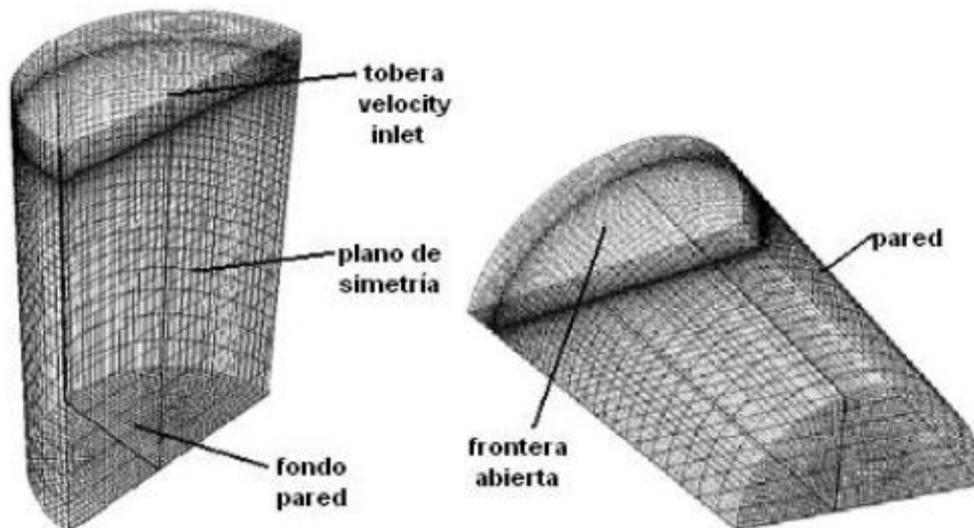


Fig. 2.5. Diseño computacional de la geometría, mallado y condiciones de frontera del recipiente problema. [30]

2.33 Condiciones de frontera.

Aunque las condiciones de frontera ya descritas, se pueden representar en forma de ecuaciones de manera formal, el software requiere de especificar condiciones de frontera adecuadas que simplifiquen fielmente la física real. De acuerdo a la Figura 2.5 se muestran las fronteras sobre el control de volumen, que consiste en una mitad longitudinal de un recipiente cilíndrico (se considera una condición de simetría) que contiene una cantidad de líquido a cierto nivel, del cual el resto es aire. Las fronteras son la pared cilíndrica y el fondo del recipiente; la instrucción en código Fluent es “Wall” para establecer el no deslizamiento y cero turbulencia en las paredes. El plano de simetría es empleado para disminuir tiempos de cálculos computacionales al reducir el tamaño del dominio y emplear menos nodos. El código empleado usa una frontera denominada como “Symmetry”. La parte superior del recipiente está dada como una frontera abierta a la atmósfera así como una sección delimitada por entrada de flujo incidente de la tobera. El código Fluent aplicado tanto para la frontera abierta como para la entrada de flujo de aire son “Pressure Outlet” y “Velocity Inlet”, respectivamente.

2.331 Condición entrada del gas del jet.

La condición en la tobera (frontera AG en la Fig. 2.5) es importante para la predicción de la velocidad del eje y de los esfuerzos cortantes. El perfil de velocidad en la salida de la tobera es afectado por el diseño de la misma tal como la relación entre la longitud y el diámetro, así como la forma de la tobera. Las condiciones de frontera de la velocidad de entrada (VELOCITY INLET) aplicadas en la tobera están descritas como:

$$U = U_{\text{inlet}} \text{ and } V = 0 \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.9})$$

$$k = k_{\text{inlet}} = 1.5(U_{\text{inlet}}I)^2 \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.10})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{inlet}} = \frac{(C_{\mu})^{\frac{3}{4}}(k_{\text{inlet}})^{\frac{3}{2}}}{l} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2.11})$$

donde la escala de longitud de turbulencia, l , en la entrada se asume como el 7% de la abertura de la tobera. La intensidad de la turbulencia, I , en la entrada

es estimada usando las fluctuaciones turbulentas en el sentido de la velocidad en la entrada como $I = u'/U_{inlet} \cong 0.16Re^{-1/8}$, donde Re es el número de Reynolds del flujo basado en la apertura y en la velocidad de entrada.

Las propiedades físicas de las sustancias usadas en las soluciones numéricas están dadas en la Tabla 2.3. Todas las simulaciones numéricas fueron llevadas a cabo en sistemas de aire – agua y temperaturas ambientales.

| Constante | Valor |
|----------------------|-------------------------|
| ρ_{aire} | 1.225 Kg/m ³ |
| μ_{aire} | 1.85e-5 Kg/ms |
| ρ_{agua} | 1000 Kg/m ³ |
| μ_{agua} | 1.003e-3 Kg/ms |
| $\sigma_{aire/agua}$ | 0.073 Kg/s ² |

Tabla 2.3. Propiedades físicas de los fluidos considerados en el modelo.

Las ecuaciones diferenciales de transporte gobernantes fueron convertidas en ecuaciones algebraicas antes de ser resueltas numéricamente. En la técnica del volumen finito se involucran la integración de las ecuaciones gobernantes sobre cada volumen de control, y en la obtención de las ecuaciones discretas en cada nodo se aplicó la ecuación 2.8.

Las ecuaciones gobernantes fueron discretizadas usando el esquema de segundo orden - corriente arriba para lograr una mayor exactitud. La interpolación de los valores de presión en las caras de la celda, usando la ecuación de momentum, fue llevado a cabo usando el sistema de PRESTO (PREssure STaggering Option) el cual mejora la convergencia y la estabilidad computacional. El acoplamiento de la presión de la velocidad se realizó usando el algoritmo PISO (Pressure – Implicit with Splitting of Operators) con corrección vecina, el cual es altamente recomendado para cálculos en estado estable y transitorio con mallados con un grado de distorsión. Las ecuaciones gobernantes fueron resueltas secuencialmente usando el código comercial FLUENT.

La solución secuencial del algoritmo usado en los cálculos numéricos computacionales requiere menos memoria que un algoritmo de resolución integrado, siendo más efectivo para fluidos incompresibles. El algoritmo

segregado incluye los siguientes pasos. Primero, las propiedades de los fluidos son actualizados en base a la solución corriente. Las ecuaciones de momentum fueron resueltas para obtener los campos de velocidad usando valores corrientes para los fluxes de presión y masa. La ecuación de continuidad es actualizada y corregida usando una ecuación tipo Poisson para la corrección de la presión derivada de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de momentum linearizadas.

Finalmente, las ecuaciones para la turbulencia fueron resueltas usando los valores de las variables previamente actualizados. En el método de VOF implementado en Fluent las ecuaciones de momentum fueron resueltas a través del dominio, y los campos de velocidad resultantes son compartidos entre las fases. Las soluciones transitorias fueron obtenidas con relativos pasos de tiempo cortos, es decir, de 1×10^{-4} s.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

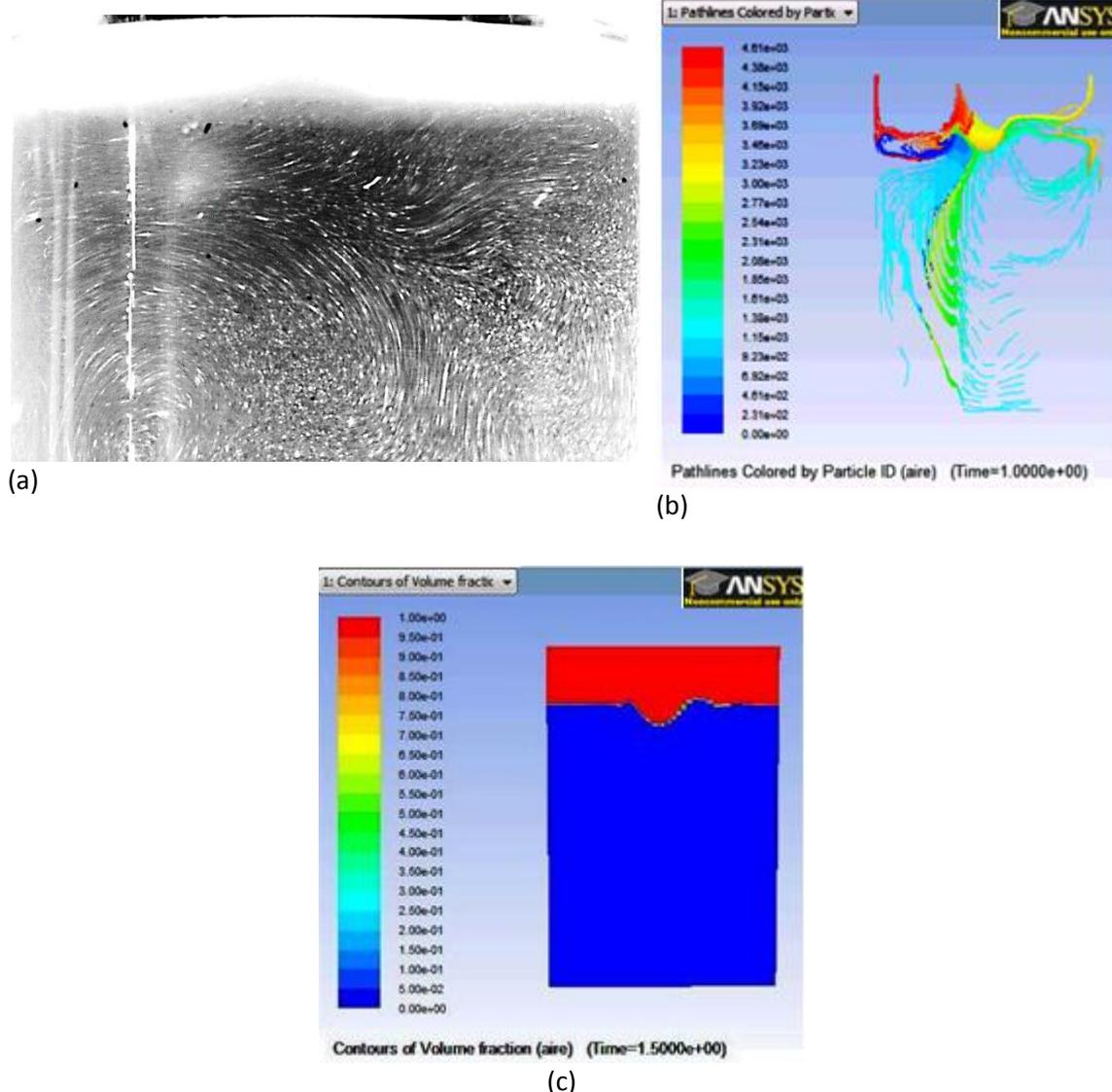
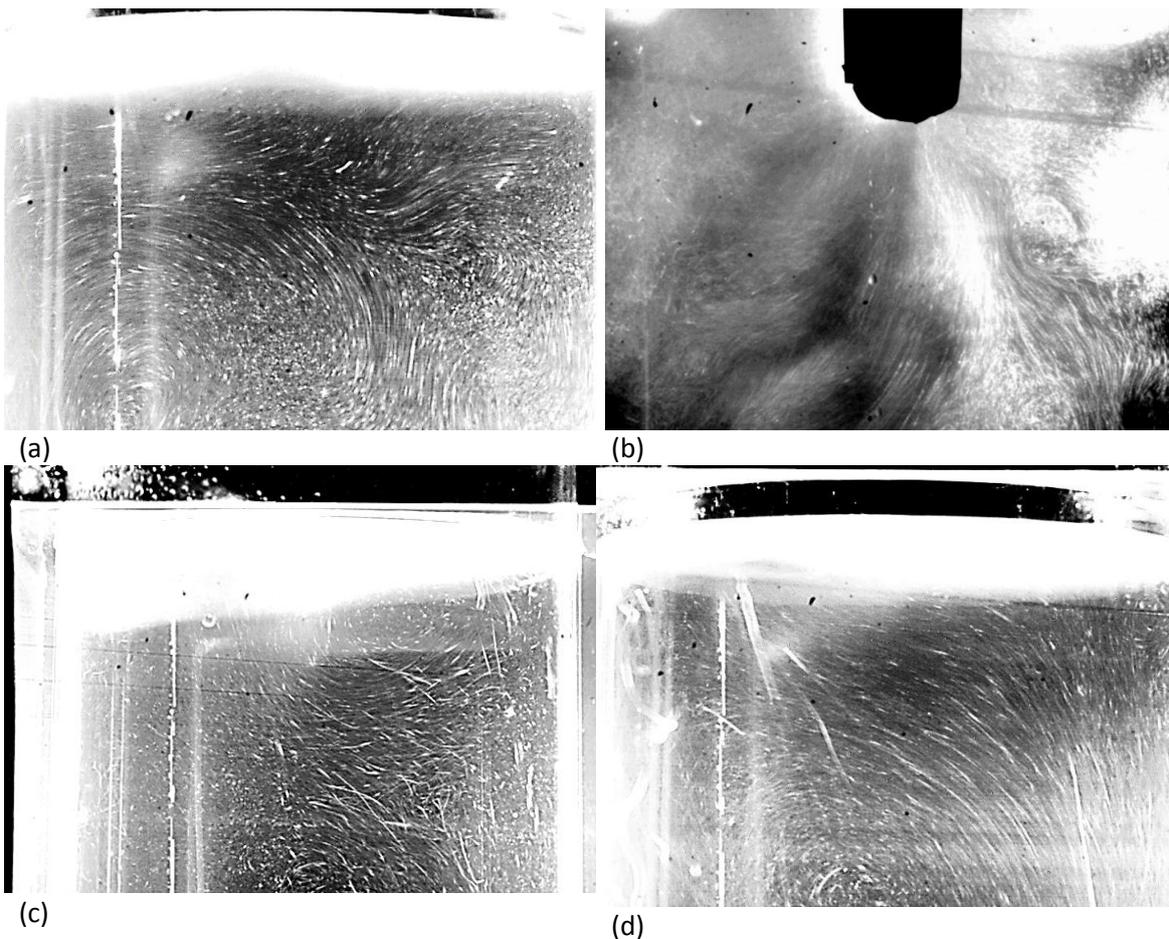


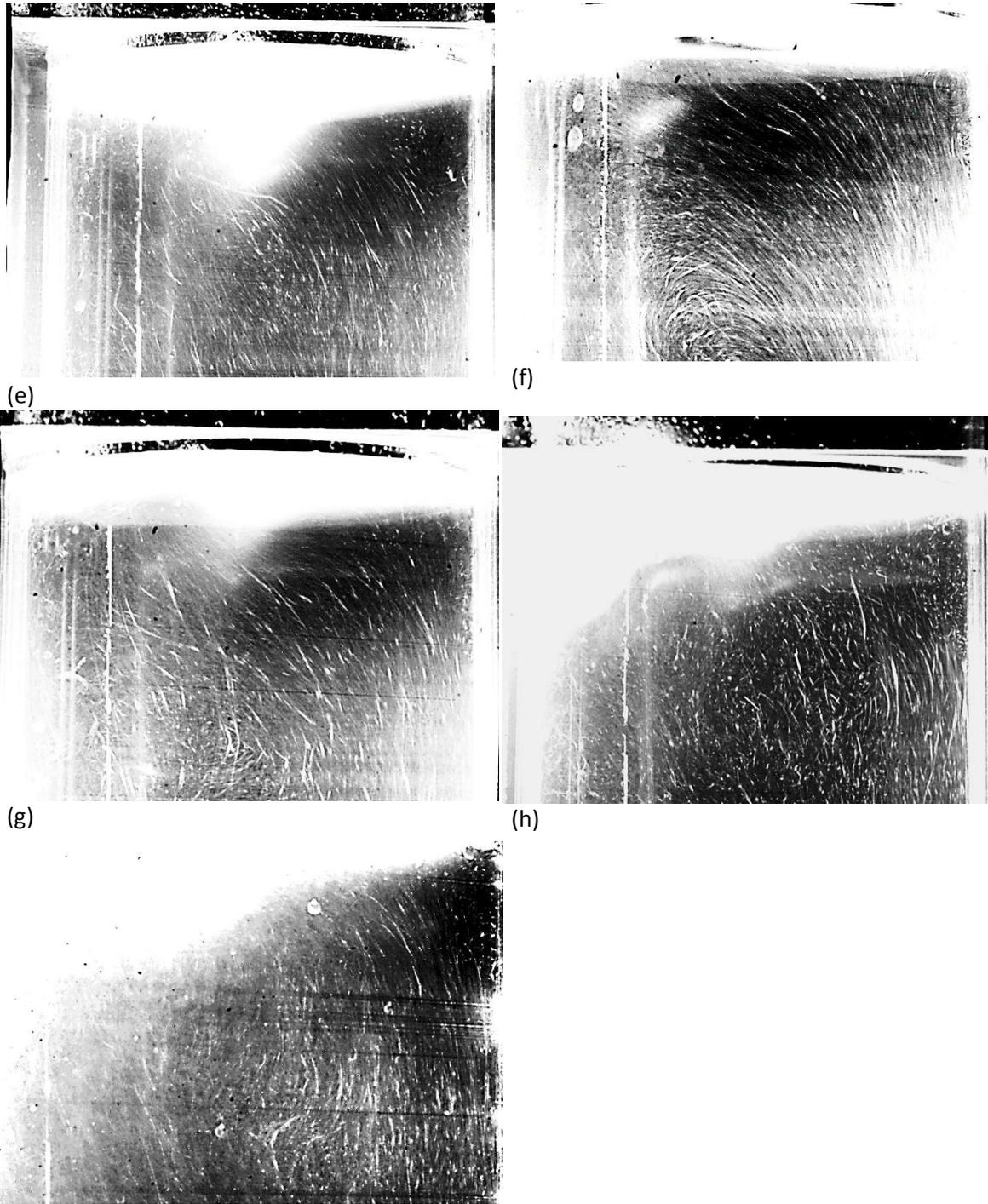
Fig. 1.- Resultados de la “Prueba 1” con una lanza a 60°, 1.58mm de boquilla a 50 mm del baño y soplando aire a 60 L/min a) Foto de los patrones de flujo en el modelo físico, b) patrones de flujo simulados, c) deformación de la interfase simulada.

Los resultados de este trabajo consistieron en medir experimentalmente los patrones de flujo exclusivamente en el agua dentro del sistema trifásico jet de gas-agua-aceite, aunque el sistema es trifásico, es el agua que simula al acero la fase importante o relevante en cuanto al estudio de su flujo de fluidos. En este sentido se ha determinado el patrón de flujo y la cavidad formada de manera experimental en el modelo físico (ver Figura 1a como ejemplo). Adicionalmente, se han calculado los patrones de flujo y las cavidades con el modelo matemático desarrollado en este trabajo (ver figuras 1b y 1c).

Con el propósito de ver el efecto de algunas de las variables del proceso de inyección de gases mediante un jet en un baño de dos fases, se hizo un estudio paramétrico donde se varió el flujo de gas (80, 100 y 120 L/min de aire), el ángulo de lanza (60° y 75°), la distancia entre la punta de la tobera y la superficie libre del baño (20, 50, 60, 80 y 100 mm) y el diámetro de tobera (1.58 y 3.16 mm).

En la Figura 2 se observan los patrones de flujo medidos en un instante en este flujo turbulento en la zona del baño de agua cercana al impacto del jet gaseoso. Los patrones fueron obtenidos al sembrar el baño de agua con partículas trazadoras que fluorescen con la presencia de hazes de luz laser. Esta figura contiene todos los experimentos realizados en este trabajo variando los parámetros ya señalados (flujo de gas, distancia de la tobera a la superficie libre y ángulo de lanza).





(i)
 Fig. 2.- Patrones de flujo del agua instantáneos medidos en el modelo físico con partículas trazadoras y tomadas con fotografías y producidos por la acción de un jet de gas incidiendo sobre un baño agua-aceite con las siguientes condiciones: a) ángulo de lanza de 60° , 50 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 60 L/min; b) ángulo de lanza de 60° , 20 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; c) ángulo de lanza de 60° , 50 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; d) ángulo de lanza de 60° , 80 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; e) ángulo de lanza de 60° , 100 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; f) ángulo de lanza de 75° , 50 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; g) ángulo de lanza de 60° , 50 mm de altura de boquilla, 3.16mm

diámetro de tobera y flujo de 80 L/min; h) ángulo de lanza de 60°, 60 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 100 L/min; i) ángulo de lanza de 60°, 60 mm de altura de boquilla, 1.58mm diámetro de tobera y flujo de 120 L/min.

La naturaleza caótica y turbulenta de la fluidinámica se hacen notar en cada uno de los patrones de flujo que se dejan ver en la Figura 2. Quizás un análisis más provechoso pudo hacerse con el empleo de un equipo PIV (Particle Image Velocimetry) en donde se toman muchas fotos por segundo y con la ayuda de un software se calcula un patrón de flujo de fluidos promediado en el tiempo y que podría darnos una mejor idea del campo vectorial de las velocidades presentes en el sistema. Por esto, en estas imágenes solo podemos apreciar el campo de velocidades instantáneo y que no refleja el comportamiento promedio del sistema durante todo el proceso de soplado, por lo que no es posible hacer un análisis de las principales variables de proceso en este sistema con estos resultados.

A pesar de lo poco conclusivas para el análisis que resultan estas imágenes, se pueden visualizar los complejos patrones de flujo que se pueden formar en este sistema, tal y como lo denotan las Figuras 2a y 2b, que muestran patrones de flujo en 2D con varias recirculaciones y eddys grandes que seguramente se disipan en la superficie libre o cerca de las paredes del cilindro, lo cual refuerza la idea de mostrar un campo de flujo promedio en el tiempo más que un campo instantáneo.

Otra característica de estas mediciones fue la incapacidad experimental de determinar el tamaño de las cavidades formadas con el arreglo de luces y cámara seleccionados, así como la poca visualización de la fase aceite, la cual fue empujada por el jet de gas hacia las paredes del recipiente. En las Figuras 2e, 2g y 2i se pueden intuir los tamaños de las depresiones aunque no son claras las medidas de estas.

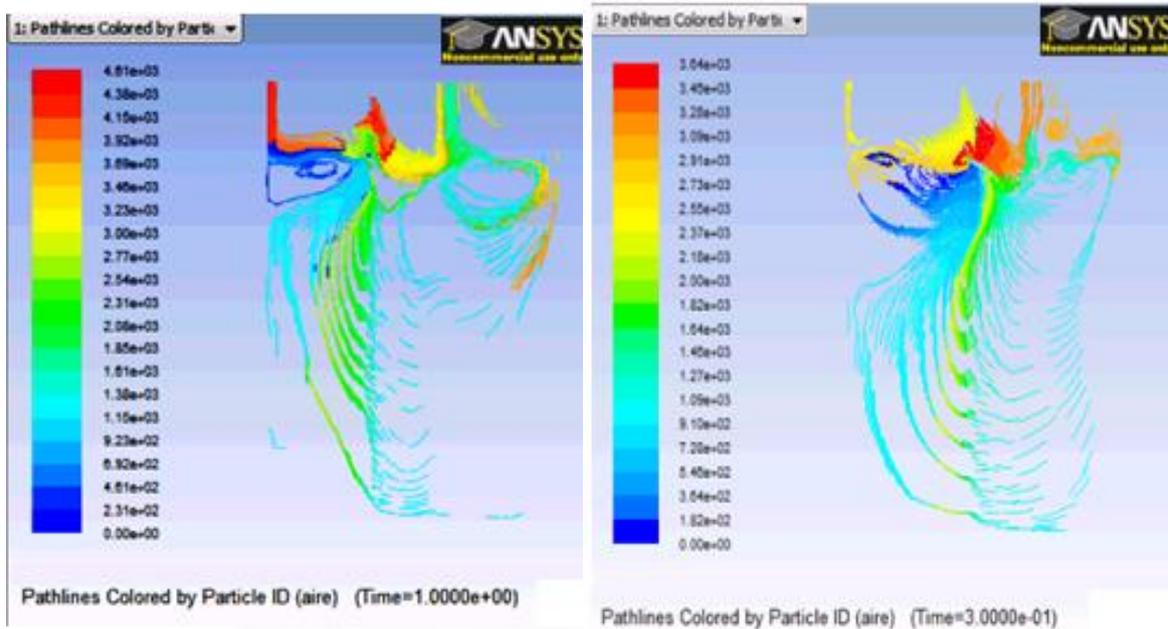
El efecto de las variables de proceso sobre los patrones medidos y las cavidades fotografiadas no puede establecerse con los resultados obtenidos, por lo que se omite cualquier interpretación.

Cabe señalar que los experimentos a pesar de que se realizaron con el cuidado experimental requerido, simplemente como se ha explicado antes, las

fotografías instantáneas tomadas no permiten evaluar de manera global el patrón de flujo obtenido, por lo que no se tiene que repetir lo experimentado en esta tesis sino que se debe usar otra técnica (PIV) que por motivos de logística no estuvo dentro de las posibilidades experimentales disponibles para este trabajo.

Por otra parte, el modelo matemático desarrollado en este trabajo sí arrojó resultados conclusivos.

Las Figuras 3, 4, 5 y 6 muestran los patrones de flujo calculados en las fases gas y líquidas variando el ángulo de la lanza (Figura 3), el flujo de gas (Figura 4), la distancia entre la tobera y la superficie libre (Figura 5) y el diámetro de la tobera (Figura 6).



(a) (b)
Fig. 3. Patrones de flujo calculados con un jet incidiendo en un baño de dos fases con un flujo de aire de 80 L /min, un diámetro de tobera de 1.58 mm, una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm y variando el ángulo de lanza: a) 60° y b) 75°.

El efecto de variar el ángulo de la lanza sobre el patrón de flujo en el agua se aprecia en la Figura 3, en donde el ángulo ha variado de 60 (Figura 3a) a 75 grados (Figura 3b) manteniendo el resto de variables constantes (flujo de 80 L/min, diámetro de tobera de 1.58 mm, distancia entre tobera y superficie libre de 50 mm). Al acercarse a la vertical la lanza se aumenta la depresión del fluido, y disminuye el tamaño de las circulaciones del fluido provocado por el jet,

mientras que la recirculación contraria al impacto de jet crece. Globalmente, el líquido tiene más convección con ángulos de lanza más horizontales (60°), ya que el movimiento de fluido es producido por el esfuerzo de corte que ejerce el jet de gas sobre el fluido. Dicho esfuerzo de corte aumenta al colocar la lanza más horizontal, mientras que la presión del jet disminuye conforme la lanza es más horizontal lo que explica las menores depresiones formadas con ángulos de 60 grados.

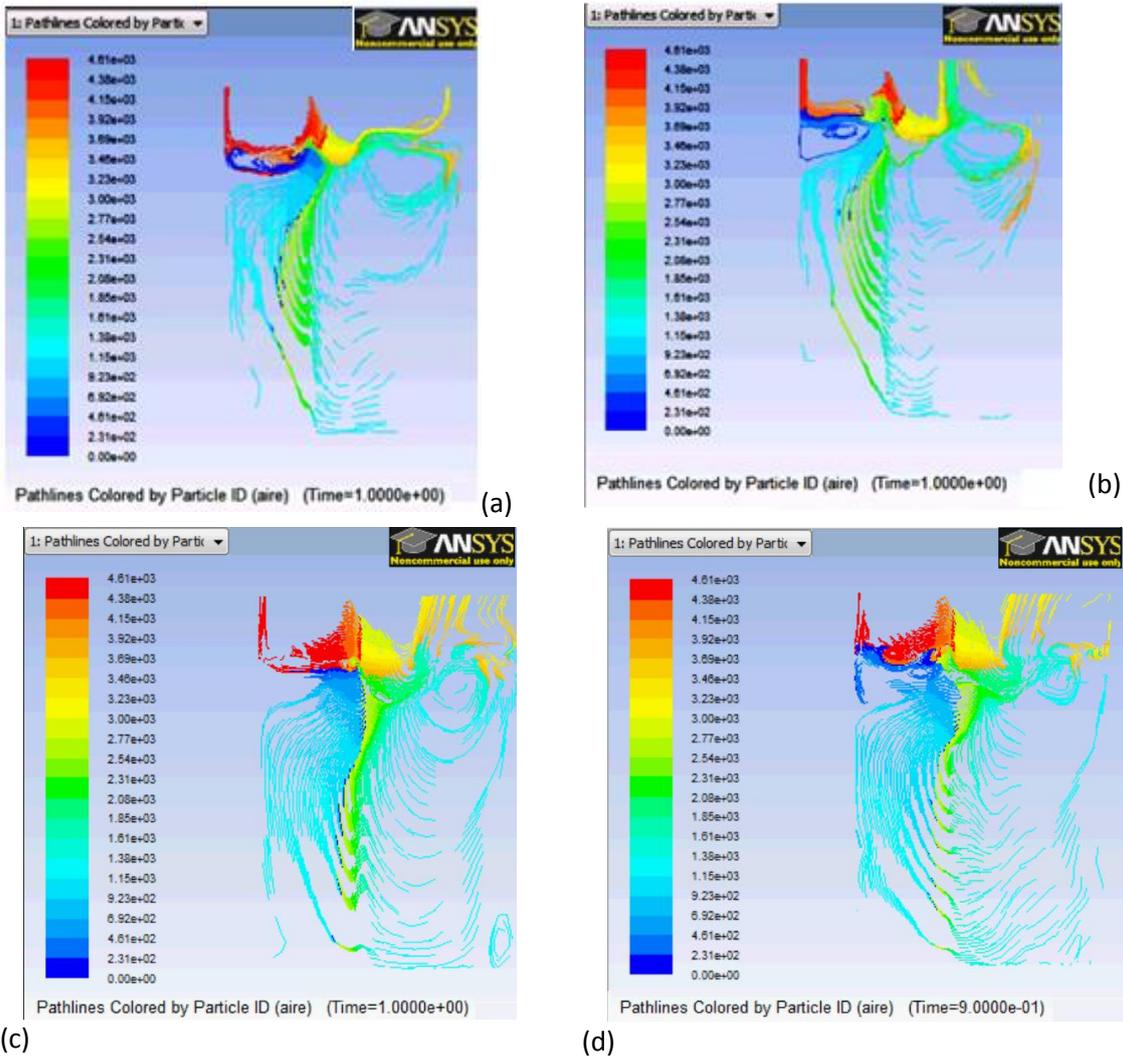
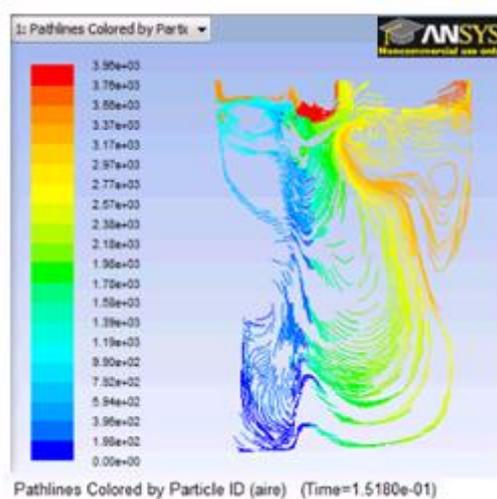


Fig. 4.- Patrones de flujo calculados con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° a una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm (a) y (b) y de 60 mm (c) y (d), un diámetro de tobera de 1.58 mm, y variando el flujo de aire de: a) 60, b) 80, c) 100 y d) 120 L/min.

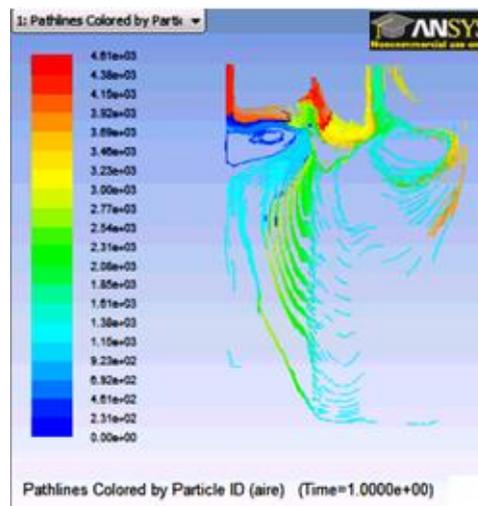
El efecto del flujo de gas del jet sobre los patrones de flujo en el agua se ve en la Figura 4, en donde se ha variado el flujo de 60, 80, 100 y 120 L/min, manteniendo el resto de variables constante: lanza a 60 grados y a una

distancia de la superficie libre de 50 mm (incisos (a) y (b)) o 60 mm (incisos (c) y (d)) y con una tobera de 1.58 mm.

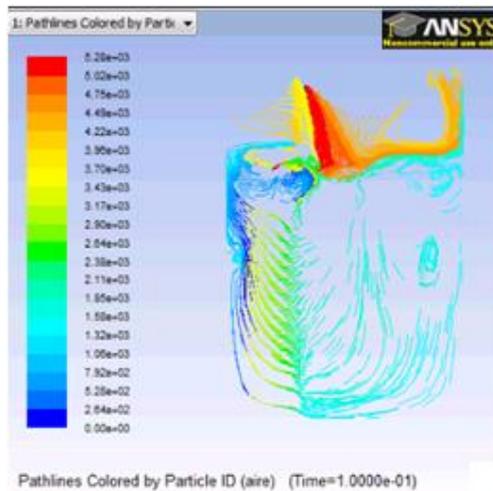
Es claramente apreciado de la Figura 4 que un aumento en el flujo de aire provoca un incremento en la depresión formada y existe una mayor tendencia a crear splashing del fluido. Otro aspecto interesante es apreciar que el movimiento recirculatorio provocado por la incidencia del jet disminuye en extensión cuando aumente el flujo de gas. Esto indica que menor cantidad de líquido se mueve dentro de los circuitos de circulación, lo que implica una disminución neta de la transferencia de cantidad de movimiento desde el jet. Esto se puede explicar debido a que el jet transfiere el movimiento al líquido solo por el esfuerzo de corte sobre la superficie libre y que un aumento en la velocidad del jet (un aumento del flujo de aire con el mismo diámetro de tobera) no implica mayor esfuerzo de corte, ya que la inercia mayor de jet se disipa en la superficie libre creando cavidades más grandes o salpicaduras y no creando convección en el baño. Es muy significativo de lo anterior a Figura 4d que con el mayor flujo de gas no presenta un patrón de flujo con recirculaciones ni con altas velocidades en el líquido.



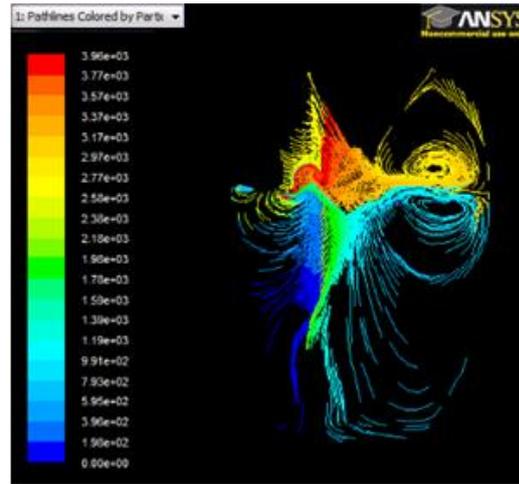
(a)



(b)



(c)



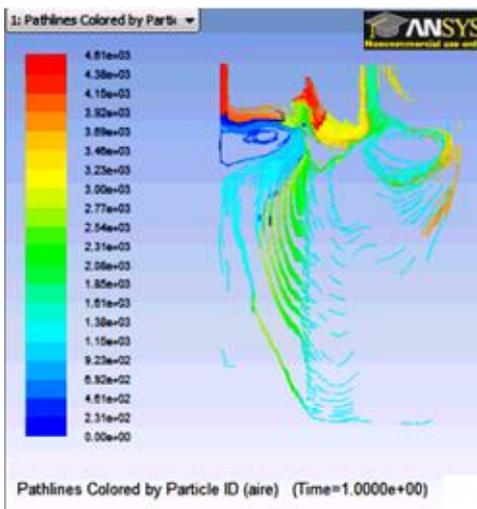
(d)

Fig. 5.- Patrones de flujo calculados con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° , un diámetro de tobera de 1.58 mm, un flujo de aire de 80 L/min y variando la distancia entre la boquilla y la superficie libre de: a) 20, b) 50, c) 80 y d) 100 mm.

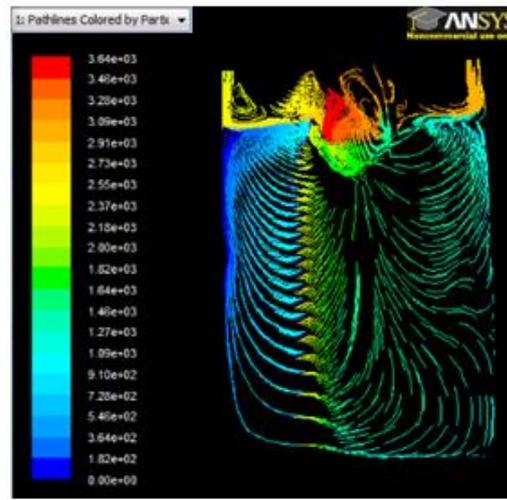
El efecto de la distancia entre la tobera y la superficie libre sobre los patrones de flujo en el agua se aprecia en la Figura 5, variando esta de 20, 50, 80 y 100 mm, manteniendo el resto de parámetros sin cambio con un flujo de gas de 80 L/min, una tobera de 1.58 mm de diámetro y una lanza colocado con un ángulo de 60 grados.

Definitivamente, la distancia entre la tobera y la superficie libre es la variable que muestra un mayor efecto sobre la circulación del líquido promovido por un jet incidente en un baño bifásico. A 20 mm de distancia (Figura 5a) es claramente apreciado la enorme influencia del jet sobre el baño, provocando altas velocidades en el líquido y creando una enorme recirculación, que aunque distorsionada, presenta una gran profundidad (casi llega a la mitad del cilindro), e incluso el movimiento de líquido es tan intenso que la recirculación se ha roto en varias circulaciones que disipan la energía cinética que se transfiere desde el jet y que en términos de mezclado es muy beneficioso. Conforme la distancia crece, la circulación se estabiliza, se hace más definida pero la circulación de líquido es menos profunda y las velocidades decrecen considerablemente. La explicación de estos fenómenos es clara. El jet gaseoso que sale de la tobera va ensanchándose conforme viaja el gas desde la tobera y esto hace que conforme aumenta la distancia viajada el jet se expande pero su velocidad

máxima decrece, por lo que a mayor distancia desde la tobera, el jet tocará la superficie libre con menor velocidad y por ende el esfuerzo de corte y la transferencia de cantidad de movimiento disminuyen conforme la distancia de la tobera a la superficie libre del baño crece. En términos de desarrollo de la cavidad, se aprecia que mientras más cerca este la tobera del baño la cavidad es más profunda, aunque este efecto no es tan claro como en el caso del flujo de aire.



(a)



(b)

Fig. 6.- Patrones de flujo calculados con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° y a una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm, un flujo de aire de 80 L/min y variando el diámetro de tobera de: a) 1.58, y b) 3.16 mm.

El efecto del diámetro de la tobera sobre el patrón de flujo de fluidos en un baño bifásico al incidir un jet gaseoso se aprecia en la Figura 6, manteniendo el resto de variables constantes como el flujo de gas en 80 L/min, el ángulo de lanza de 60 grados y la distancia de 50 mm desde la punta de la tobera a la superficie del baño. El aumento en el tamaño de tobera con el mismo flujo de aire provoca menores velocidades del jet pero un jet gaseoso más ancho, lo que se aprecia en la Figura 6. Un jet con menos inercia promoverá menos recirculación de líquido pero no es claro si la transferencia de movimiento es menos intensa, ya que las circulaciones propias del sistema (una a la derecha y la otra a la izquierda) desaparecen con una tobera de diámetro de 3.16 mm aunque la profundidad del movimiento crece. Otro tipo de análisis como un estudio de tiempos de mezclado podrá determinar en que condiciones se

favorece la convección y el mezclado, es decir, si es mejor una tobera ancha o no.

El tamaño de la cavidad formada en la superficie libre es otro parámetro que vale la pena analizar en función de los mismos parámetros del proceso, ya que este tamaño es de interés por ser indicativo de la inercia del jet y de la posibilidad de provocar salpicaduras indeseables en los procesos metalúrgicos.

Las Figuras 7, 8, 9, y 10 analizan los efectos del ángulo de la lanza, flujo de gas, distancia de la tobera a la superficie libre y tamaño de la tobera sobre el tamaño de la cavidad formada, al presenta contornos de fase que dibujan la cavidad formada. La fase azul es el agua y la roja es la gaseosa.

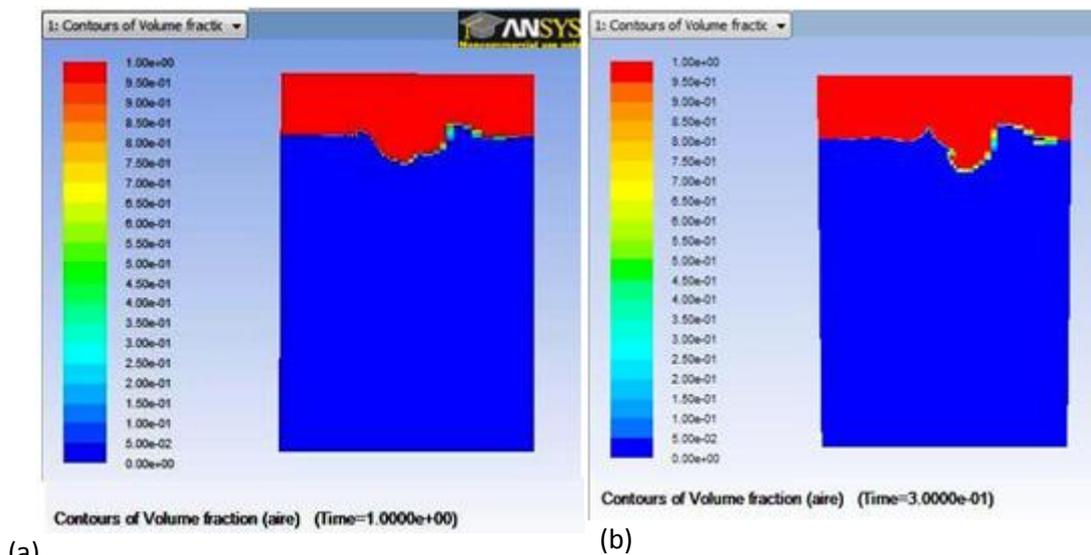


Fig. 7.- Cavidades de agua calculadas con un jet incidiendo en un baño de dos fases con un flujo de aire de 80 L/min, un diámetro de tobera de 1.58 mm, una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm y variando el ángulo de lanza: a) 60° y b) 75°.

El efecto de variar el ángulo de la lanza sobre el tamaño de la cavidad formada en el agua se aprecia en la Figura 7, en donde el ángulo ha variado de 60 (Figura 7a) a 75 grados (Figura 7b) manteniendo el resto de variables constante (flujo de 80 L/min, diámetro de tobera de 1.58 mm, distancia entre tobera y superficie libre de 50 mm).

Al aumentar y acercar el ángulo de la lanza a la vertical, la cavidad formada en el baño de agua es más profunda y más estrecha que con ángulos más horizontales. Esto se puede explicar porque se incrementa la presión que

ejerce el jet de gas sobre la superficie libre disminuyendo al mismo tiempo el esfuerzo cortante. Incluso la lanza más vertical parece promover salpicaduras de agua.

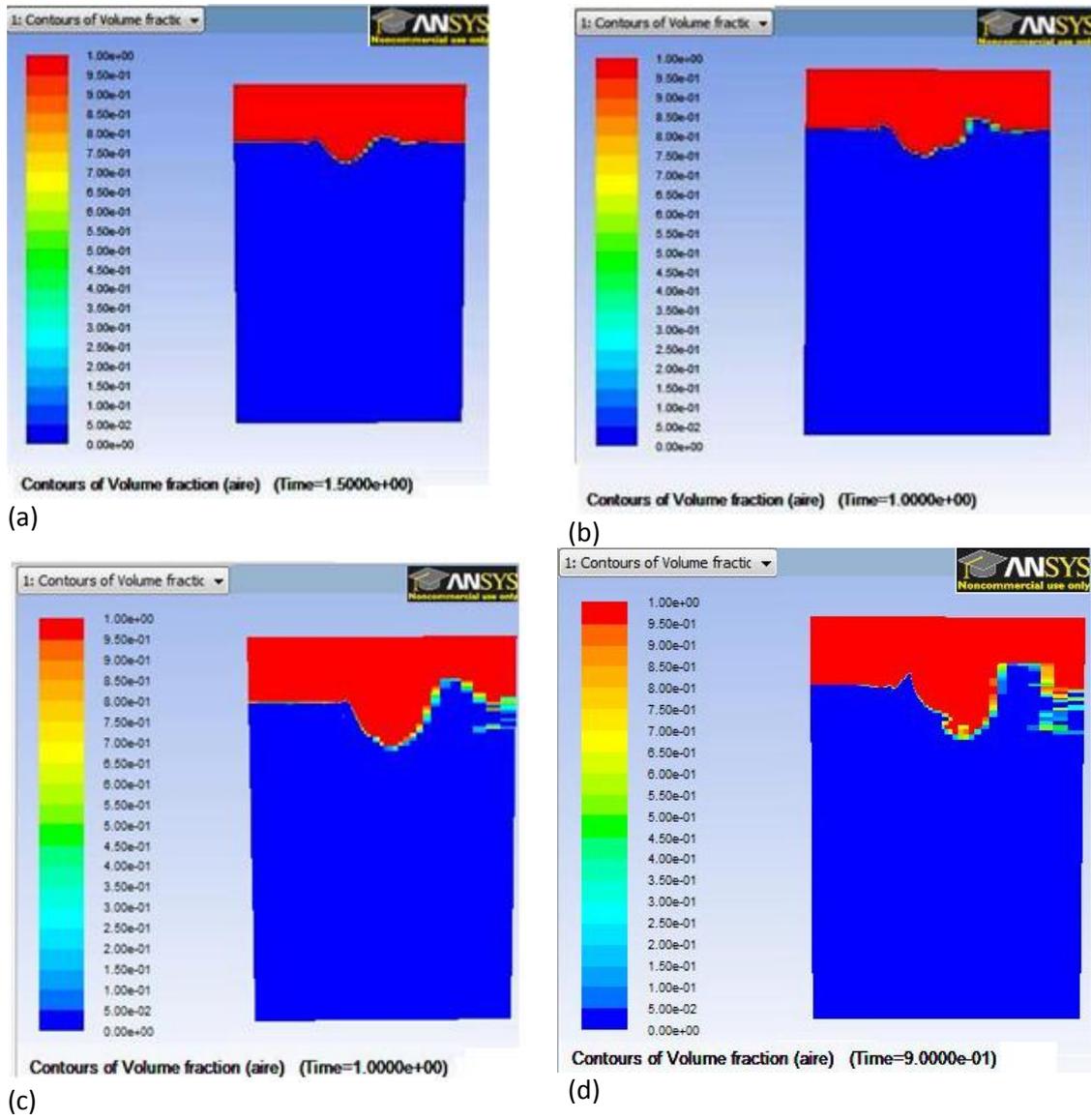
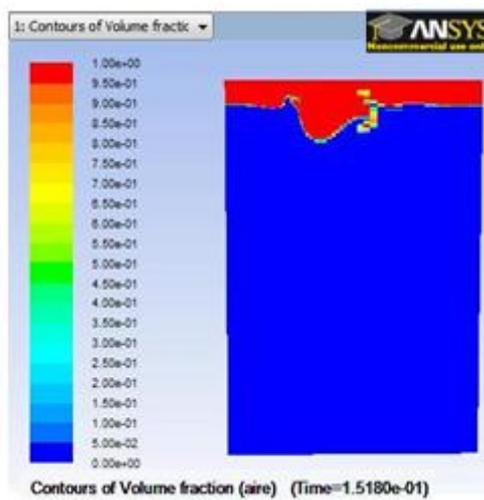


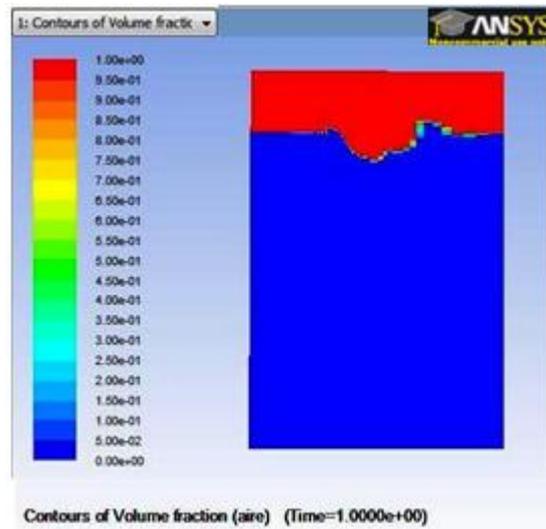
Fig. 8.- Cavidades de agua calculadas con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° a una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm (a) y (b) y de 60 mm (c) y (d), un diámetro de tobera de 1.58 mm, y variando el flujo de aire de: a) 60, b) 80, c) 100 y d) 120 L/min.

El efecto del flujo de gas del jet sobre el tamaño de las cavidades en el agua se ve en la Figura 8, en donde se ha variado el flujo de 60, 80, 100 y 120 L /min, manteniendo el resto de variables constante: lanza a 60 grados y a una distancia de la superficie libre de 50 mm (incisos (a) y (b)) o 60 mm (incisos (c) y (d)) y con una tobera de 1.58 mm. Claramente se aprecia un incremento en profundidad y ancho en la cavidad como resultado de un aumento en el flujo de

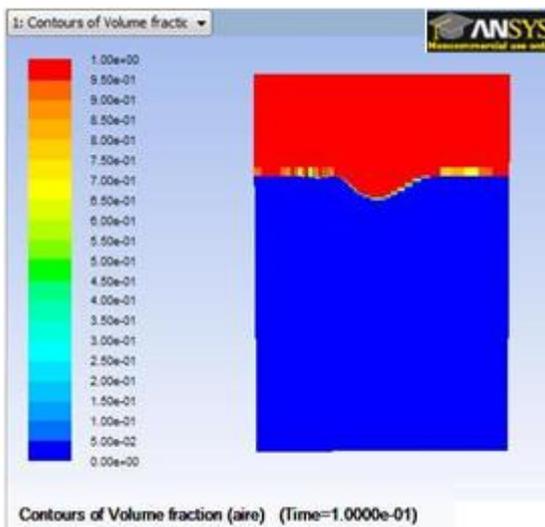
gas. También el aumento de flujo de gas promueve salpicado como se aprecia en la Figura 8d. Como se ha mencionada ya, las salpicaduras son indeseables en los procesos de refinación como en el BOF o el Horno Eléctrico de Arco para aceración por lo que el uso de jet potentes debe ser evaluado antes de proceder con su práctica. También queda claro que gran parte de la inercia o energía cinética del jet se consume al generar la cavidad y las salpicaduras y no en mover la masa de líquido que es la energía deseable para promover mezclado y acelerar las cinéticas químicas que demandan los procesos de refinación de metales.



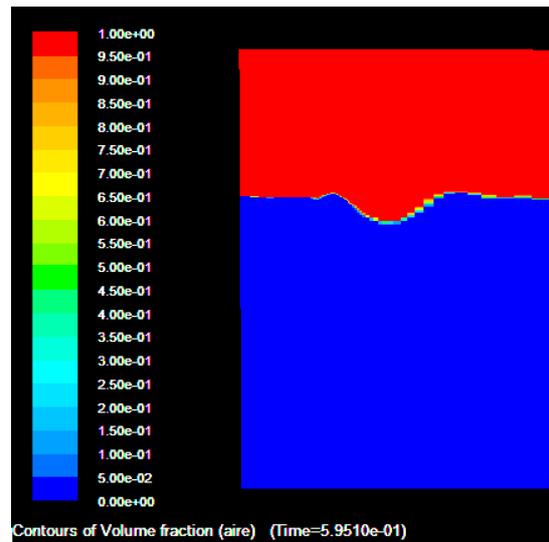
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9.- Cavidades de agua calculadas con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° , un diámetro de tobera de 1.58 mm, un flujo de aire de 80 L/min y variando la distancia entre la boquilla y la superficie libre de: a) 20, b) 50, c) 80 y d) 100 mm.

El efecto de la distancia entre la tobera y la superficie libre sobre el tamaño de las cavidades formadas en el agua se aprecia en la Figura 9, variando esta de 20, 50, 80 y 100 mm, manteniendo el resto de parámetros sin cambio con un flujo de gas de 80 L/min, una tobera de 1.58 mm de diámetro y una lanza colocado con un ángulo de 60 grados. Se aprecia muy claramente el efecto de acercar la lanza al baño que es incidir un jet con mayor inercia sobre el baño, lo cual implica un aumento en la profundidad de la cavidad pero posibles salpicaduras (Figura 9a), mientras que alejando la lanza, la cavidad se hace menos profunda y más ancha, lo cual no implica que no se de una transferencia de momentum por esfuerzo de corte, lo cual se intuye que la fase de escoria no es empujada tan drásticamente hacia las orillas del cilindro. Este es otro aspecto importante a destacar, ya que la formación de emulsiones entre el metal y la escoria es dañina en los procesos de refinación ya que puede haber atrapamiento de escoria y en consecuencia presencia final de inclusiones no metálicas perjudiciales a las propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas.

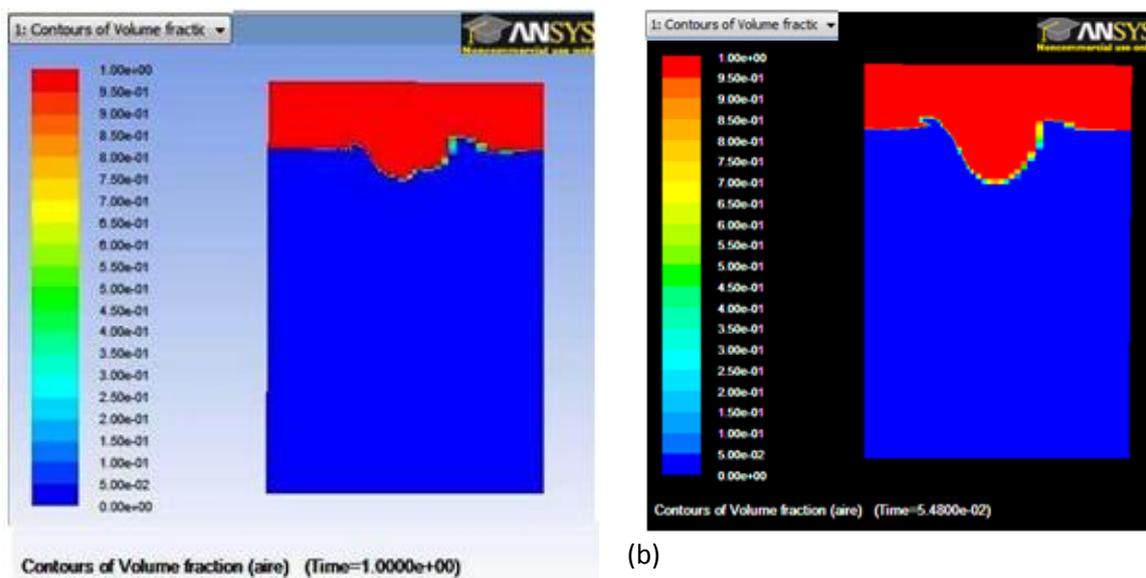


Fig. 10.- Cavidades de agua calculadas con un jet incidiendo en un baño de dos fases con una lanza colocada con ángulo 60° y a una distancia entre la boquilla y la superficie libre de 50 mm, un flujo de aire de 80 L/min y variando el diámetro de tobera de: a) 1.58, y b) 3.16 mm.

El efecto del diámetro de la tobera sobre el tamaño de las cavidades formadas en un baño bifásico al incidir un jet gaseoso se aprecia en la Figura 10,

manteniendo el resto de variables constantes como el flujo de gas en 80 L/min, el ángulo de lanza de 60 grados y la distancia de 50 mm desde la punta de la tobera a la superficie del baño. La cavidad crece en profundidad con la tobera más ancha (Figura 10b) pero se aprecia menor tendencia al salpicado y la formación de emulsión con la escoria. El jet tiene menos inercia pero es más ancho.

4. CONCLUSIONES

La modelación física propuesta y llevada a la experimentación nos permite tener una noción de la caracterización de las cavidades y recirculaciones formadas, sin embargo, no es posible considerarlo como un caso de estudio debido a que las imágenes tomadas por el equipo son difusas dado el sistema caótico, inestable y turbulento en el que se realizaron.

Considerando las limitaciones de la cámara ultrarápida, el tipo de iluminación y haz de láser empleados, se propone en una investigación futura considerar mediciones de los campos de velocidades en este sistema con uso de la técnica PIV.

De acuerdo a los resultados del modelo matemático, tomando en cuenta que la variable que ejerce mayor influencia en la formación de cavidades y recirculaciones en los baños es la distancia de la tobera, se ha hallado que dicha distancia ideal es de 50 mm debido a que en estas condiciones es capaz de transferir la suficiente cantidad de momentum para efecto de mezclado sin la necesidad de provocar salpicaduras.

Para efecto de investigaciones futuras, se propone la realización de modelado matemático en el que se incluya el aceite de silicona como tercera fase con el fin de analizar el efecto del espumamiento de escoria.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] http://www.emt-india.net/process/iron_steel/BOS_steel.htm (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [2] http://www.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpingtcn&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070822klpingtcn_35.Kes (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [3] <http://www.kobelco.co.jp/p108/dri/e/dri04.htm> (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [4] <http://www.teara.govt.nz/en/iron-and-steel/2/4> (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [5] <http://www.pythongroup.ca/mining-news/article/id/79> (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [6] <http://viewforyou.blogspot.mx/2009/10/hyl-iii-and-slrn-two-widely-accepted.html> (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [7] http://www.canacero.org.mx/Archivos/Prensa/DocInformativos/PerfillIndustria Siderúrgica_2006-2010.pdf (Fecha de consulta: Marzo/2012)
- [8] A., KUMBHAT, N., JONSSON, L., JONSSÖN, P. *The effect of Nozzle Diameter, Lance Height and Flow Rate on Penetration Depth in a Top-blown Water Model*, Steel Research International. Vol. 77 (2006), No. 2, pp. 82-90.
- [9] R.D. COLLINS, H. LUBANSKA, *The Depression of Liquid Surfaces by Gas Jets*. British Journal of Applied Physics, Vol. 5 (1954), pp. 22-26.
- [10] R. B. BANKS and D.V. CHANDRASEKHARA; *Experimental Investigation of the Penetration of a High-Velocity Gas Jet through a Liquid Surface*. Journal of Fluids Mechanics, Vol. 15 (1963), pp. 13-34.
- [11] W.G. DAVENPORT, D.H. WAKELIN, A.V. BRADSHAW. *Proceedings of Symposium on Heat and Mass Transfer in Process Metallurgy*, IMM, (1966). pp. 207-244.

- [12] R.A. FLINN, R.D. PEHLKE, D.R. GLASS., *Jet Penetration and Bath Circulation in the Basic Oxygen Furnace*. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 239 (1967), pp. 1776 – 1791.
- [13] S. K. SHARMA, J. W. HLINKA, D.W. KERN. *The Bath Circulation Jet Penetration and High-Temperature Reaction Zone in BOF Steelmaking*. Iron and Steelmaker, Vol. 4 (1977), No. 7, pp. 7 - 18.
- [14] S.C. KORIA and K. W. LANGE. *Penetrability of Impinging Gas Jets in Molten Steel Bath*. Steel Research, Vol. 58 (1987), No. 9, pp. 421- 426.
- [15] F. QIAN, R. MUTHARASAN, B. FAROUK. *Studies of Interface Deformations in Single – and Multi-Layared Liquid Baths due to an Impinging Gas Jet*. Metallurgical and Materials Transactions B, 27B (1996), No. 6, pp. 911 – 920.
- [16] T. KUMAGAI and M. IGUCHI. *Instability Phenomena at Bath Surface induced by Top Lance Gas Injection*. ISIJ International, Vol. 41 (2001), pp. S52-S55.
- [17] O. OLIVARES , A. ELIAS, R. SANCHEZ. *Physical and Mathematical Models of Gas-Liquid Fluid Dynamics in LD Converters*. Steel Research ,Vol. 73 (2002), No. 2, pp. 44-51.
- [18] LOTUN and PILON. *Physical Modeling of Slag Foaming for Various Operating Conditions Slag Compositions*. ISIJ International, Vol. 45 (2005) No. 6, pp. 835 – 840.
- [19] GHORAI, 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, pp. 37-42.
- [20] IWAMASA and FRUEHAN. *Separation of Metal Droplets from Slag*. ISIJ International, Vol. 36 (1996), No. 11, pp. 1319-1327.
- [21] MIAO-YONG ZHU, TICORA JONES, Du SICHEN. *Modelling Study of Slag Foaming by Chemical Reaction*. Journal of Metallurgy. Vol. 30 (2001); pp. 51– 56.

- [22] S.A.C. STADLER, J.J. EKSTEEN, C. ALDRICH. *Physical Modelling of Slag Foaming in Two-Phases and Three-Phases Systems in the Churn-Flow Regime*. Minerals Engineering Vol. 19 No. 3 (2006). pp. 237–245.
- [23] GHAG, HAYES, LEE. *Physical Model Studies on Slag Foaming*. ISIJ International, Vol. 38 (1998), No. 11, pp. 1208 – 1215.
- [24] H. LEI, M.Y. ZHU, J.C. HE. *Mathematical and Physical Modeling on Interfacial Phenomena in Continous Casting Mould With Argon Injection through Submerged Entrv Nozzle*. Acta Metallurgica Sinica. Vol. 13 (2000) No. 5 pp. 1079-1086.
- [25] E. T. TURKDOGAN. *Fluid Dynamics of Gas Jets Impinging on Surface of Liquids*. Chen. Eng. Sci, Vol. 21 (1966), pp. 1133.
- [26] N. A. MOLLOY. J. *Impinging Jet Flow in a Two Phases System: The Basic Flow Pattern*. Iron Steel Inst., Vol. 208 (1970), pp. 943.
- [27] J. SZEKELY and S. ASAI. *Turbulent Fluid Flow Phenomena in Metals Processing Operations: Mathematical Description of the Fluid Flow in a bath caused by an Impinging Gas Jet*. Metall Trans, Vol. 5 (1974), pp. 464.
- [28] A. Nguyen and G. EVANS. *Computational Fluid Dynamics Modeling of Fast Jets Impinging Onto Liquid Pools*. 3er Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia (2003), pp. 313-320.
- [29] D. NAKAZONO, K.-I. ABE, M. NISHIDA and K. KURITA. *Supersonic O₂-Jet Impingement on Liquid Iron with Surface Chemistry*. ISIJ Int, Vol. 44 (2004). No. 1, p.p. 91.
- [30] J. SOLORZANO, *Modelado Físico y Matemático de las Interacciones Jets/Baño Metálico en Hornos Eléctricos de Arco*. Tesis Doctoral UNAM Fac. de Química. Dic. 2010.
- [31] <http://www.construmatica.com/construpedia/Acero> (Fecha de consulta: Mayo/2011)
- [32] <http://www.abcpedia.com/construccion/materiales/acero.html> (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[33] http://grafito.fime.uanl.mx/texto_completo/aniac18_siumulacion.pdf (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[34] <http://www.hbia.org/Technical/openpdf.cfm?filename=DRProcess/1995-1DR.pdf> (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[35]
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_7.htm (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[36] <http://www.comsigua.com.ve/tecnologia.htm> (Fecha de consulta: 17 de mayo de 2011)

[37] <http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/23/reduccion-directa/> (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[38] <http://www.docstoc.com/docs/41139784/Understanding-Electric-Arc-Furnace-Operations> (Fecha de consulta: Mayo/2011)

[39] R.B. BIRD, W. E. STEWART, and E. N. Lightfoot. *Fenómenos de Transporte*. Reverte S.A. FEB 2007. p.p 3-15 – 3-17.