



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

**CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO FÍSICO DE UN HORNO
OLLA PARA LA REFINACIÓN SECUNDARIA DEL ACERO**

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico Metalúrgico

Presenta:

ISRAEL ORTA SÁNCHEZ



MÉXICO, D. F.

2008



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	JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA
Vocal	CARLOS GONZÁLEZ RIVERA
Secretario	MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGÁEZ
1er. Suplente	JORGE SERGIO TÉLLEZ MARTÍNEZ
2º Suplente	HÉCTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ

Sitio en donde se desarrolló el tema: Edificio D, Facultad de Química,
UNAM

Asesor:

Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez

Sustentante:

Israel Orta Sánchez

Agradecimientos

Gracias al proyecto PAPIIT IN118105-2 con título *Modelación Física Y Matemática De La Separación De Inclusiones No Metálicas Del Acero Por Medio De Burbujeo En La Olla*, dirigido por el Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	2
Objetivo	2
Antecedentes	3
Alcances	9
Revisión bibliográfica	10
Capítulo 2. Modelado físico	23
Criterios de similitud	23
Capítulo 3. Metodología experimental	28
Desarrollo experimental	28
Capítulo 4. Resultados y discusión	37
Cálculo de escalamiento	37
Construcción del modelo físico	44
Capítulo 5 Conclusiones	48
Abreviaturas	50
Lista de figuras	52
Referencias bibliográficas	54

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Objetivo

Construir el modelo físico de un horno olla para la refinación secundaria del acero simulando las condiciones hidrodinámicas que ocurren dentro de este tipo de reactores a través de satisfacer estrictos criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática.

Sentar la base para posteriores investigaciones en el ámbito siderúrgico. Por ejemplo, con este modelo se va a poder entender el efecto de variables de diseño, tales como el número y posición de los tapones sobre el mezclado en ollas agitadas con gas.

Antecedentes

El uso de gases que son insuflados o inyectados a través de orificios de distintos tamaños en hornos para la producción de hierro y acero se remonta aproximadamente 3500 años atrás, con los hornos ideados por los hititas.

En la industria moderna del acero se emplea la inyección de gases en varias operaciones unitarias, tales como en el proceso BOF (Basic Oxygen Furnace) donde se inyecta oxígeno con flujo supersónico con una lanza por encima del baño, o en el proceso AOD (Argon-Oxygen Descarburization) donde se inyecta gas a través de toberas laterales, o en el proceso de refinación secundaria en la Olla (Ladle Furnace) con inyección de gases por el fondo a través de tapones porosos (Figura 1.1).

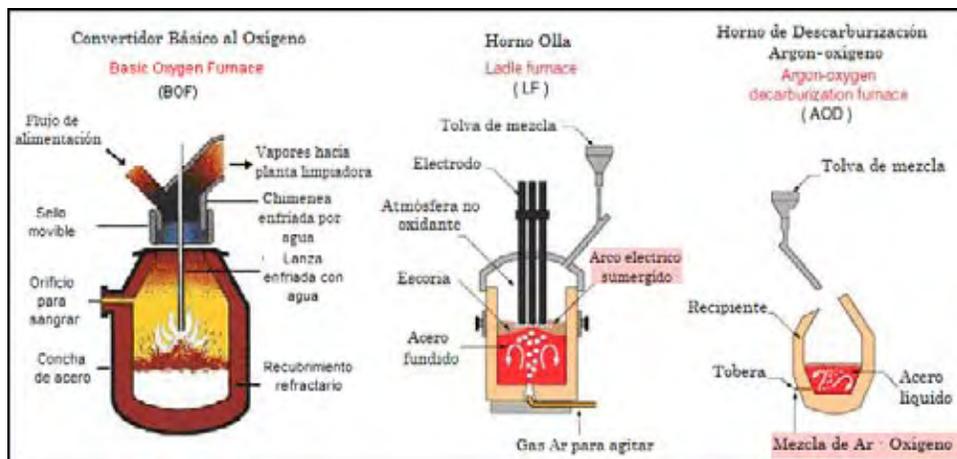


Figura 1.1 Tipos más comunes de hornos en los que se lleva a cabo la limpieza de los aceros mediante inyección de gases.

Inyección de gas

Se puede describir en más detalle la forma de inyectar los gases, que va desde el uso de lanzas simples, helicoidales, toberas (Figura 1.2) y tapones porosos como es el caso del Horno Olla (Figura 1.3).

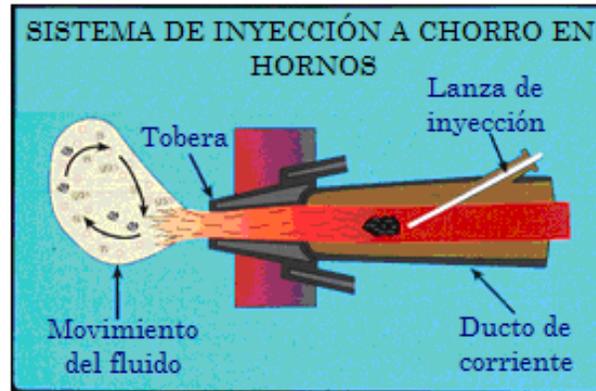


Figura 1.2 Sistema de inyección tipo tobera, esta se usa generalmente en el tipo AOD e inclusive en el Alto Horno

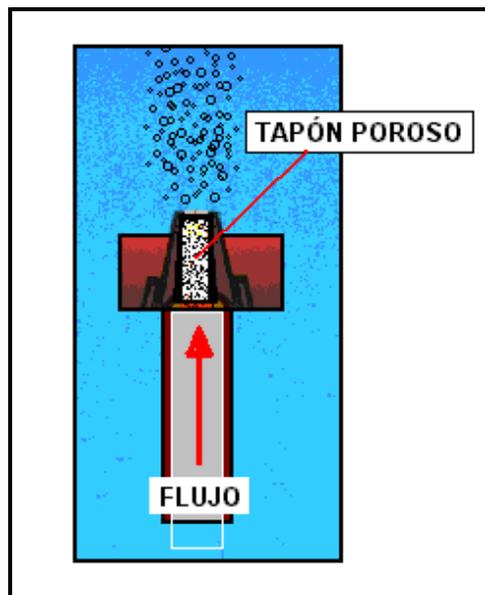


Figura 1.3 Mecanismo de inyección del fluido a través de un tapón poroso.

Horno olla

Como se observa en la Figura 1.1, particularmente, en el Horno Olla, la agitación del baño se lleva a cabo a través de la insuflación de un gas inerte con tapones porosos ubicados en el fondo de la Olla, ayudando a mejorar la homogenización química y térmica en un tiempo más corto. También, la inyección de gases mejora la cinética de la desulfuración y desoxidación, reduciendo los contenidos de azufre y de oxígeno a niveles deseados, ayuda a la remoción de inclusiones no-metálicas y controla la eliminación de gases como el hidrógeno y el nitrógeno, que pueden afectar directa y negativamente las propiedades mecánicas del acero.

Todos estos efectos benéficos asociados a la inyección de gases son resultado de la agitación generada por la misma inyección. El mecanismo de agitación consiste en el arrastre o fricción que ejercen las burbujas de gas sobre el líquido cuando las primeras ascienden por diferencias de densidad o fuerzas boyantes. Para cuantificar el grado de agitación del baño metálico, se han propuesto varios parámetros, entre los cuáles destaca el tiempo de mezclado y la determinación de los patrones de flujo.

Modelo físico

Debido a las condiciones agresivas de operación en la Olla (temperaturas arriba de 1600° C) y a la opacidad de los metales y escorias fundidos, la medición

del tiempo de mezclado, la determinación de los patrones de flujo en la estructura turbulenta y demás parámetros relevantes, son muy difíciles o casi imposible de determinar en sistemas industriales reales, por lo que es común recurrir a la modelación física y matemática de los reactores como una herramienta que permite entender y predecir la fluidinámica y los fenómenos de mezclado en reactores agitados con gas como la Olla de acero. En particular, los modelos físicos permiten visualizar y medir los patrones de flujo utilizando recipientes de mucho menor tamaño, es decir, se escalan satisfaciendo rigurosos criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática. Otra ventaja de los modelos físicos es que emplean materiales distintos, sustituyendo al acero líquido por agua y al argón por aire bajo condiciones experimentales controladas (bajas temperaturas y pocos riesgos), satisfaciendo el criterio de similitud dinámica. Además, la viscosidad cinemática del acero a 1600°C es la misma que la del agua a 20°C (ver Tabla 1.1), satisfaciendo la similitud cinemática. Los modelos físicos son una de las principales herramientas del análisis de los procesos metalúrgicos (junto con modelos matemáticos y mediciones tanto en planta como en el laboratorio), con las que cuenta un ingeniero de procesos metalúrgicos para entender, controlar y optimizar procesos existentes o para diseñar nuevos procesos.

El entendimiento de la física asociada a la inyección de gases por el fondo (con la ayuda del modelado físico y matemático) es muy necesaria, ya que a pesar de que la inyección con tapones porosos es de uso común y se sabe de los beneficios de la misma, hay ciertos aspectos que aún se requieren comprender

para usar correctamente esta inyección, razón por la cual, estudios científicos aún siguen realizándose en esta área de la siderurgia.

Entonces, los modelos físicos representan una herramienta útil para visualizar directamente los fenómenos de interés, asimismo permiten atacar con mayor prontitud y eficacia los problemas que se generan dentro de los procesos industriales y de manera indirecta, además, permiten satisfacer los estándares de calidad y productividad a bajo costo que hoy se demandan, por lo que estos modelos han sido y siguen siendo muy populares. Sin embargo, la etapa crítica del modelado físico es la construcción del mismo, el cual debe cumplir rigurosamente con criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica.

Aspectos económicos

El mundo globalizado obliga a las empresas a competir cada vez más ferozmente para obtener un nicho de mercado mundial. Aquellos productores que puedan fabricar acero con mínimos costos, pero además con alta calidad, en poco tiempo y respetando el medio ambiente podrán sobrevivir en tal marco competitivo. La calidad del material también es una constante preocupación del acerista. En particular, la industria se encuentra en busca de lo que se denomina “acero limpio”, este acero debe de tener una mínima concentración de elementos residuales y además un número bajo de inclusiones no-metálicas controladas en su forma. Para lograr este objetivo es fundamental mejorar, controlar y optimizar las operaciones metalúrgicas que se llevan a cabo en la olla, las cuales

constituyen la refinación secundaria del acero, donde la composición, homogeneidad química y térmica deben de asegurarse. Además, aspectos como la remoción de inclusiones y la productividad en esta etapa de aceración, constituyen tópicos de actualidad importantes desde el punto de vista económico.

Alcances

En el presente trabajo se construyó un modelo físico simulando un horno olla agitado por argón. Para esto se efectuaron cálculos de escalamiento satisfaciendo los principales criterios de similitud geométrica, dinámica, y cinemática. Al modelo se le adaptaron varios sistemas de agitación por medio de tapones porosos ubicados en distintas posiciones del fondo de la olla para estudiar en trabajos o tesis futuras el efecto del número y posición de los tapones porosos en el mezclado de la olla. Se efectuaron comparaciones cualitativas en cuanto al tamaño de burbuja, ya que es importante que las burbujas producidas en los tapones sean homogéneas en tamaño, pero además lo suficientemente pequeñas para tener un tiempo de residencia en el baño más prolongado y asegurar la interacción sólido-líquido-gas ya que es a esta interacción a la que se le atribuye la limpieza en cuanto a inclusiones no metálicas en el baño, paradójicamente el reducir en tamaño las burbujas, podría provocar un aumento en el tiempo de mezclado.

Este trabajo tiene como principal contribución calcular, escalar (1:6) y construir en plexiglass un modelo físico de una olla industrial de 200 toneladas de acero, además de realizar ensayos de hermeticidad en la olla, y de manera semi-cuantitativa pruebas de mezclado. Este modelo servirá como base para futuros trabajos de investigación en donde se evaluará el efecto cuantitativo de la posición de inyección, del número de tapones, del flujo de gas, etcétera, sobre el tiempo de mezclado en la olla.

Revisión Bibliográfica

Inyección en procesos metalúrgicos

La tecnología de inyección de gases en metales fundidos se aplica ampliamente en las industrias metalúrgicas.

La inyección de gases se realiza por medio de lanzas¹, toberas y/o tapones porosos² (ver Figura 1.2, 1.3 respectivamente). Los tapones porosos se localizan en el fondo del reactor, mientras que las toberas se colocan comúnmente en los lados. Por otro lado, las lanzas se aplican por la parte superior del baño. También se utilizan “snorkels” con boquillas incorporadas¹.

La efectividad de la inyección sumergida del gas se relaciona con el patrón de flujo de fluido, velocidad del fluido y propiedades de turbulencia, las que dependen del comportamiento de las burbujas, método de sople, geometría del baño, propiedades físicas del líquido y rapidez de flujo³.

Se han hecho esfuerzos considerables durante las pasadas dos décadas para investigar las operaciones de inyección de gas en las ollas de aceración y de esta manera entender y mejorar el mezclado y la interacción metal-escoria en este reactor. Hacia esto, numerosos modelos físicos han sido reportados para poder entender los fenómenos de flujo de fluidos y de transferencia de calor y masa en las ollas metalúrgicas.

La mayoría de los estudios de modelación física en sistemas a escala gas-agua han sido hechos principalmente para medir velocidades del líquido y la forma de la pluma^{4,5}, para investigar diferentes aspectos tales como la interacción gas-líquido, la estructura turbulenta^{6,7}, fenómenos de mezclado⁸, transferencia de masa gas-líquido, transferencia de masa líquido-líquido⁹, comportamiento de burbujas¹⁰ y aspectos de transferencia de calor¹¹. La inyección del gas por el fondo del convertidor puede ser céntrica cuando el gas se induce en el centro de una olla simétrica (Figura 1.4 A), este método de inyección ha sido muy estudiado. Otra forma de inyectar el aire puede ser la inyección de aire excéntrica (Figura 1.4 B) la cual ha sido menos estudiada¹² aunque industrialmente la inyección excéntrica es la más usada. Los modelos físicos agua-aire han sido los más estudiados.

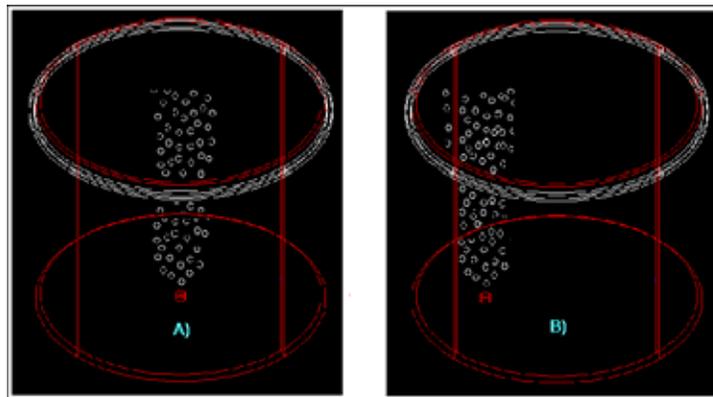


Figura 1.4 Esquema de inyección de gas céntrica A), y excéntrica B). AutoCad 2007.

La Figura 1.5 proporciona un esquema de la inyección de gas dentro de una olla de acero. Como se puede observar, se inyecta Ar/N₂ a través de un tapón poroso, localizado en la base de la olla, la cual es un convertidor cilíndrico

ligeramente cónico que contiene acero líquido. La inyección de gas induce un flujo recirculatorio turbulento en el líquido, que ayuda a la homogenización química y térmica y acelera la absorción de inclusiones no metálicas nocivas hacia la escoria. Algunas condiciones de agitación intensa pueden también ser practicadas para acelerar las reacciones metal escoria, consecuentemente, dependiendo de los objetivos específicos de la operación de refinación de la olla, un amplio rango de flujos de gas pueden ser aplicados⁴ (de 0.001 a 0.015 Nm³ (STP)/t.min).

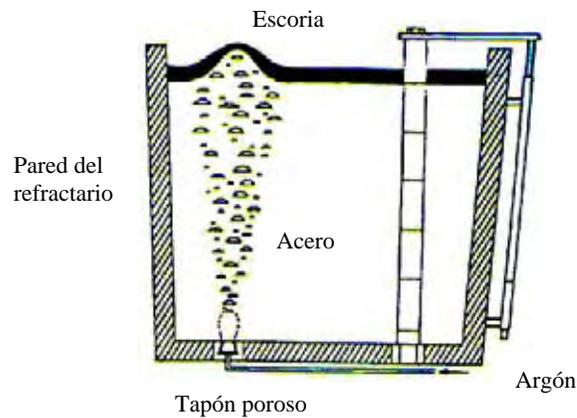


Figura 1.5 Esquema de la inyección de gas en una olla de acero

Como se ve en la Figura 1.5, los procesos físicos involucrados en los sistemas de ollas agitadas con gas son complejos. Muchos fenómenos físicos distintos pueden ser identificados, los cuales incluyen interacción gas-líquido (fricción o arrastre entre el gas y el líquido), el desarrollo de un movimiento recirculatorio turbulento del metal líquido, transferencia de masa entre la escoria y el metal en la vecindad de la superficie libre, entre otros. Altas temperaturas y la opacidad visual del acero líquido, así como el gran tamaño de las ollas industriales, hacen muy difícil y peligroso realizar mediciones experimentales u observaciones directas en este reactor.

Es por lo anterior que los modelos físicos, en particular, diseñados para este tipo de reactores, (sistemas gas-metal líquido) han sido realizados para investigar fundamentalmente procesos hidrodinámicos. Sustituyendo el acero por agua y al argón por aire. Lo cual hace referencia a una pregunta obligada, ¿cómo es que podemos sustituir acero por agua y asegurar que los resultados son aplicables?, la respuesta por supuesto tienen un sustento científico, basado en la definición de viscosidad cinemática, ecuación (1).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1)$$

Como podemos observar en la Tabla 1.1 la viscosidad cinemática (ν , representa la característica intrínseca del líquido a fluir desechando las fuerzas que genera su movimiento⁴¹) es prácticamente la misma para el agua a 20° C y para el acero a 1600° C a lo que se le denomina similitud cinemática.

Tabla 1.1- Datos de densidad y viscosidad, tanto dinámica como cinemática, reportados en la literatura.

	ρ [kg/m ³]	η [N s/m ²]	ν [m ² /s]
Agua 20° C	1000 [Ref. 40]	0.001 [Ref. 38]	1.00E(-6)
Acero 1600° C	7000 [Ref. 37]	0.0068 [Ref. 37]	0.97E(-6)

Muchos estudios de modelación física han sido reportados en las últimas dos décadas sobre los sistemas de ollas agitadas con gas.

El grado de mezclado es una medida de la efectividad de agitación cuando se usa inyección de gases. La intensidad del mezclado es usualmente representada por el tiempo de mezclado, que es el tiempo requerido para alcanzar un nivel arbitrario de aproximación al nivel deseado de homogeneidad en el baño, por ejemplo un 95% de uniformidad, por lo que representa un índice de eficiencia o bien un estado de agitación en las ollas.

El mezclado incrementa la rapidez de reacción, favoreciendo también la homogenización térmica y química dentro de la olla. Por tales motivos es deseable tener el mejor mezclado posible, en el menor tiempo posible. Hacia esto, diferentes técnicas experimentales han sido aplicadas, siendo los métodos basados sobre las mediciones del pH y la conductividad eléctrica los más populares. También, se han utilizado pruebas de dispersión para estimar las velocidades de mezclado en sistemas de altas temperaturas.

Nakanishi y col.¹⁶ fueron los primeros en graficar datos experimentales de tiempos de mezclado contra velocidad global de disipación de energía específica para una unidad de desgasificado al vacío RH y para ollas agitadas con argón de modelos de agua. Estos autores proporcionan la siguiente correlación entre tiempo de mezclado, τ_m en función de la velocidad de disipación de energía, ε_m , de acuerdo a la ecuación (2).

$$\tau_m = 12.68 \times 10^3 \varepsilon_m^{-0.4} \quad (2)$$

El tiempo de mezclado ha sido medido vía diferentes técnicas experimentales, tomando en cuenta varios criterios. En consecuencia, una gran variedad de relaciones funcionales entre tiempos de mezclado, velocidad de entrada de energía específica y variables de operación (altura, L, radio interno, R, flujo de gas, Q) han sido propuestos.

La Tabla 1.2 resume las diferentes correlaciones propuestas por algunos investigadores entre el tiempo de mezclado y las condiciones experimentales en ollas agitadas con gas.

Tabla 1.2 Resumen de las correlaciones para obtener el tiempo de mezclado reportadas en la literatura.

Investigador	Técnica Experimental	Criterio de mezclado	Dimensiones del convertidor y masa del fluido	Flujo de gas específico. (m ³ /min/T)	Correlación de tiempo de mezclado.
Nakanishi y col. ¹³	pH	Indefinido	L = 0.465m, D = 0.42 m; 64 kg.	0.015 a 0.06	$\tau_m = 800\varepsilon_m^{-0.4}$
Asai y col. ¹⁴	Conductividad eléctrica	99%	D = 0.405 L/D = 0.5; 52 kg	0.019 a 0.90	$\tau_m = 274\varepsilon_m^{-0.33} L^{-1} R^{1.36}$
Sinha y McNallan ¹⁵	pH	97.7%	L = 0.48m, D = 0.45 m; 76 kg.	0.02 a 0.4	$\tau_m = 692\varepsilon_m^{-0.89}$
Themelis y Stapurewicz ¹⁶	Foto celda	95%	L = 0.67m, D = 0.66 m; 310 kg.	0.13 a 0.96	$\tau_m = 164\varepsilon_m^{-0.39} L^{0.39}$
Mietz y Oeters ¹⁷	Conductividad eléctrica y calorimetría	95%	L = 1.0m, D = 0.63 m; 311 kg.	0.038 a 0.29	$\tau_m = C_1 Q_g^{-n} C_1$ n es función de la adicción del trazador y monitoreo
Mazumdar y Guthrie ¹⁸	Conductividad eléctrica	95%	L = 0.5m, D = 1.12 m; 1000 kg.	0.012 a 0.06	$\tau_m = 37\varepsilon_m^{-0.33} L^{-1} R^{1.66}$
Krishnamurthy y col. ¹⁹	Conductividad eléctrica	99.9%	L = 0.1m, D = 0.48 m; 81 kg.	0.11 a 2.67	$\tau_m = C_1 Q_g^{-n} C_1$ n es función del régimen de flujo y profundidad del líquido

Varios intentos han sido hechos en el pasado para caracterizar fenómenos de mezclado en sistemas de ollas agitadas con gas en términos de ya sea convección de masa o fenómenos denominados corrientes convectivas. Esto fue primero sugerido por Nakanishi y col.¹⁶ que dijeron que el mezclado en reactores metalúrgicos es causado principalmente por corrientes convectivas en vez de circulación de masa en el baño. En un estudio posterior Mazumdar y Guthrie²¹ encontraron una relación funcional entre las variables de operación y los tiempos de mezclado, ecuación (3).

$$\tau_m = C \varepsilon_m^{-0.33} R^{1.66} L^{-1} \quad (3)$$

Como se ve en la ecuación (3), esta expresión ilustra el hecho que el tiempo de mezclado es inversamente proporcional a la altura del líquido dentro del convertidor (L), y que este se incrementa con el radio del convertidor (R) y decrece de acuerdo a la velocidad de entrada del gas. El valor de la constante C, es función del grado y definición del tiempo de mezclado aplicado.

Estudios de mezclado en modelos acuosos con dos mecanismos diferentes de inyección de gas y un gran número de flujos de gas reportados por Stapurewicz y Themelis¹⁹ confirman que las condiciones de mezclado son relativamente insensibles del mecanismo de inyección de gas aplicado.

Haida y col.²³ investigaron el papel de una capa de escoria sobre el mezclado con ayuda de un modelo de agua, encontrando que los tiempos de

mezclado medidos con una escoria simulada tiende a ser considerablemente diferente a una situación sin escoria.

A través de consideraciones de datos de tiempo de mezclado medidos en convertidores industriales así como en modelos de agua de varios tamaños y diferentes flujos de gas, muestran que las diferencias en tiempos de mezclado, pueden ser adecuadamente expresadas como una función de la energía de mezclado, ε_m .

Neifer y col.²⁴ sugirieron la siguiente correlación, ecuación (4).

$$\tau_m = 71.84 \left(Q_g \frac{\rho_{g,n}}{\rho_{g,B}} \right)^{-0.38} D^{2.0} L^{-0.66} \quad (4)$$

Donde: D = Diámetro interno

L = Altura del líquido

Q_g = Flujo de gas.

$\left(\frac{\rho_{g,n}}{\rho_{g,B}} \right)$ es la relación de densidad del gas en baños a temperaturas normales. La

ecuación (4) proporciona excelentes estimaciones de tiempos de mezclado en varios sistemas de ollas agitadas con gas.

El tiempo de mezclado se puede estimar a partir del modelo del tiempo de circulación. El tiempo de circulación es el tiempo que tarda un paquete de fluido en

volver al mismo lugar. El modelo del tiempo de circulación está basado en que el tiempo de circulación es proporcional al tiempo de mezclado. Otra forma de estimar el tiempo de mezclado es con el número de circulación (igual al tiempo de circulación entre el tiempo de mezclado). El número de circulación se ha aplicado a modelos de tanques en serie. El flujo recirculante y la difusión turbulenta del trazador (en el volumen enriquecido y en el intercambio de masa entre zona quieta y el volumen remanente de líquido en el tanque), son parámetros a ser considerados en esos modelos de tanques en serie o tiempo de recirculación.

Otros parámetros que pueden utilizarse en la descripción del grado de mezclado son el tiempo de turbulencia, que es el tiempo que dura el torbellino más pequeño en la microescala de Kolmogorov, y el tiempo de esfuerzos de Reynolds, que es el tiempo que tarda en pasar un remolino en un punto del fluido.

Trazadores

Para seguir la trayectoria del fluido se utilizan trazadores, que son partículas detectables que se adicionan para ser arrastradas junto con el fluido²². Para que los resultados sean representativos, el trazador debe tener una densidad cercana a la del fluido. Algunos trazadores empleados para modelos físicos de agua son: partículas de priolita, soluciones de azul de metileno y hojuelas de aluminio (ver Figura 1.6). La trayectoria del trazador depende de la participación de las fuerzas viscosas, de inercia, viscosa turbulenta, la convección y la difusión turbulenta¹¹.

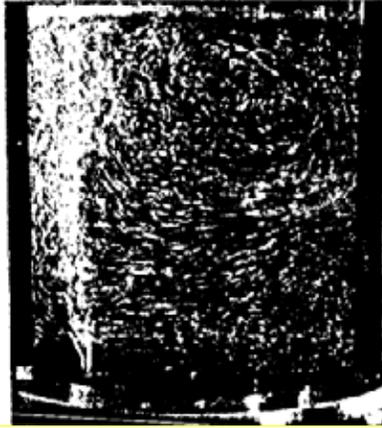


Figura 1.6 Ejemplo de la visualización del patrón de flujo utilizando hojuelas de aluminio como trazador. Ref. (Hsiao, ISIJ International, v. 35(1995), no. 5 pp. 472-479).

Cuando se utiliza un trazador en polvo, la variación de la cantidad de movimiento del trazador respecto del tiempo es función del arrastre, tensión superficial, fuerza boyante y presión hidrostática²³. Un trazador acuoso (soluble en agua) se considera parte del mismo fluido, por lo que se evitan los defectos de las variables anteriores.

Otros trazadores no pueden visualizarse, por lo que su trayectoria se detecta por la concentración que alcanzan al dispersarse²⁴. Un ejemplo de esta técnica consiste en la aplicación de un ácido o una base fuertes, como trazadores. El punto de medición se considera representativo de una concentración global expresada por el pH alcanzado en el agua. El tiempo de residencia del trazador de HCl es en este caso igual al tiempo de mezclado, y es mayor que el tiempo de disolución, prácticamente instantáneo por ser ambas fases acuosas completamente miscibles. Se supone que no hay mezclado del trazador en el tubo capilar que se utiliza para inyectar el trazador, y que la rapidez de reacción en el electrodo del pH es instantánea.

También se han utilizado trazadores radioactivos, tales como: cobalto 60 (para acero líquido), bario 140 (para escoria y refractario), fósforo 32, azufre 35 y lantano 140 (para inclusiones)^{25, 26}. La desventaja es que afectan al ambiente.

También se ha reportado un método para estimar el tiempo de mezclado a partir de la medición directa de la composición del metal fundido a diferentes tiempos. Por ejemplo, se ha determinado el tiempo de mezclado comparando la concentración de aluminio en un desgasificador RH a varios tiempos después de la adición de una aleación de aluminio, con respecto al contenido de aluminio final.

Existen dos métodos para introducir un trazador: 1) en el método estacionario (step) el trazador es introducido constantemente a la alimentación y se determina el perfil de concentración a la salida; y 2) en el método dinámico (pulse) la inyección de trazador es en paquete o señal en un punto y la detección de la concentración, como una función de tiempo, se lleva a cabo en otro punto flujo abajo²⁷. Para el método dinámico la forma en que el trazador se adiciona puede ser: pulso, etapa de cambio, rampa, parabólica, exponencial o sinusoidal. Con pulsos de función de Dirac a la entrada se obtiene la distribución característica de tiempos de residencia típicos de las fases gaseosas y líquidas en tipos comunes de reactores gas-líquido. Algunas formas de caracterizar el mezclado consisten en comparar: 1) señal de entrada, primera señal de salida del trazador y su varianza, segunda salida de señal del trazador y su varianza²⁷.

La variación del fluido se vuelve confusa en flujo tridimensional²⁸. Los remolinos se distorsionan pero los trazadores no están sujetos a este efecto, son

rechazados de regiones de intensificación de remolinos a las de disminución, oscureciendo la visualización. Además el patrón de remolino de movimiento está cambiando en si mismo.

Modelos físicos más importantes reportados en literatura

En la Tabla 1.3, se resumen las características geométricas y de operación de algunos modelos físicos utilizados anteriormente por otros grupos para investigar los fenómenos que ocurren dentro del Horno Olla.

Tabla 1.3.- Resumen de modelos físicos utilizados por algunos Investigadores.

Investigador	M. Zhou y J.K. Brimacombe ²⁸	A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe ²⁹	V. Sahajwalla, A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe ³⁰	P.E. Anagbo, J.K. Brimacombe y A.H. castillejos ³¹	A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe ³²
Investigación	Perfil axial de la fracción de gas, la frecuencia de burbuja, la velocidad de ascenso de la burbuja.	Mediciones de las características física de las burbujas en las plumas gas-líquido	Velocidad y altura del chorro, límites del chorro, perfil de frecuencia de la burbuja y perfil de velocidad de la burbuja axial	Representación de la dispersión del gas.	Características físicas del jet de gas inyectado verticalmente dentro del baño
Material de construcción	Plexiglás.	Plexiglás	Plexiglás	Plexiglás	Convertidor de acero inox.
Líquido	Agua des-ionizada	Agua des-ionizada	Agua des-ionizada.	Agua des-ionizada	Mercurio
D x H (m)	0.5 x 0.4	0.5 x 0.9	0.5 x 0.9mm	0.5 x 0.75	0.210 x 0.55
Flujo de gas (m ³ /s)	2x10 ⁻⁴ a 20x10 ⁻⁴	0.125x10 ⁻³	3.7x10 ⁻⁴ a 1.6x10 ⁻³	0.121x10 ⁻³ a 7.77x10 ⁻³	0.158x10 ⁻³ a 0.456x10 ⁻³
Diam. de boquilla. (mm)	6.35	6.35	6.35	1-2	1.85 y 4.0
Aparato de medición.	Velocímetro láser.	Pruebas de electroresistividad acoplado a una microcomputadora, cámara K2054E HYCAM	Pruebas de electroresistividad acoplado a una microcomputadora, cámara K2054E HYCAM	Pruebas de electroresistividad acoplado a una microcomputadora, cámara K2054E HYCAM	Pruebas de electroresistividad acoplado a una microcomputadora, cámara K2054E HYCAM

En la Figura 1.7 se muestra un diagrama esquemático representativo del modelo físico del Horno Olla agitado con gas usado por M. Zhou y J.K. Brimacombe²⁸.

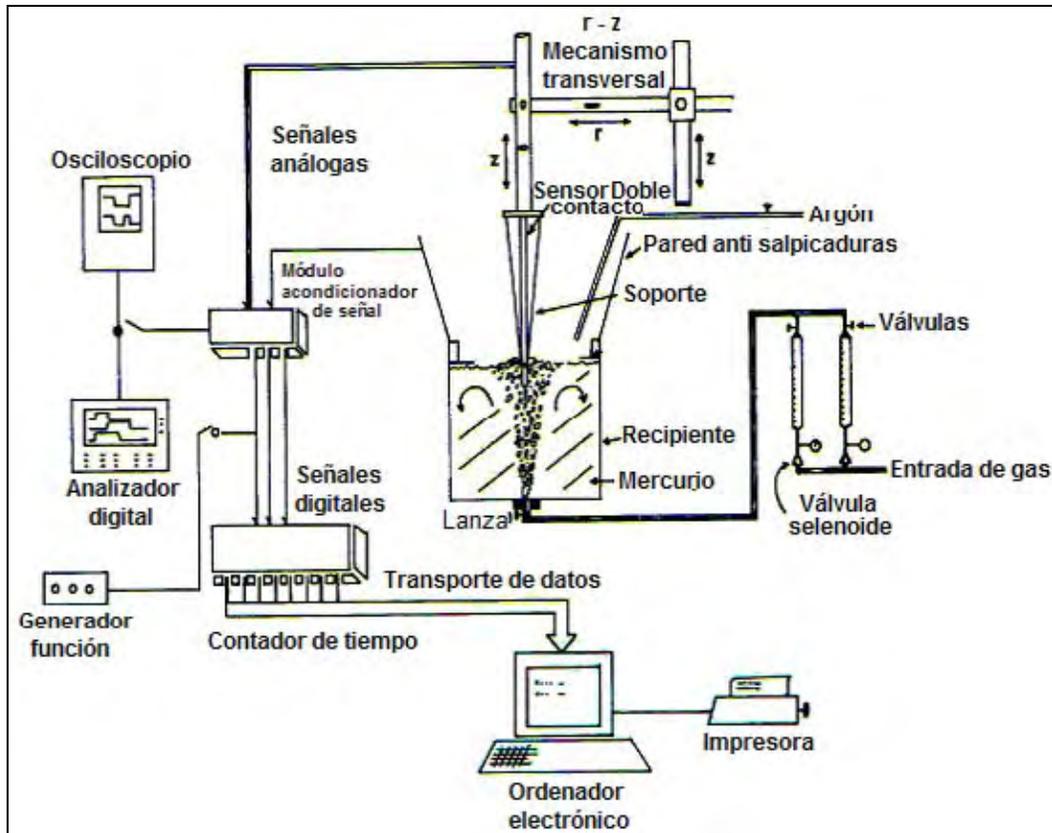


Figura 1.7 Esquema de la modelación física el Horno Olla.

Capítulo 2

MODELADO FÍSICO

Criterios de similitud

Similitud Geométrica

Estudios hidrodinámicos de flujos en ollas en modelos físicos no son generalmente relacionados o desarrollados en base a efectos de similitud química o térmica, ya que estos aspectos poco se han estudiado y son difíciles de representar. Consecuentemente, la equivalencia entre un modelo de olla y una olla real puede ser adecuadamente descrita vía similitud geométrica y dinámica cuando la fluidinámica es el fenómeno que se quiere entender. La similitud geométrica como su nombre lo indica se refiere a la similitud en la forma de los sistemas. Dos sistemas son geoméricamente similares si la relación entre la longitud de un sistema y su correspondiente longitud en el modelo es la misma en cualquier sitio. La relación se denomina factor de escala λ .

Similitud Dinámica

La similitud dinámica, se refiere a la equivalencia entre las fuerzas que actúan sobre el fluido en ambos sistemas, las cuales deben de mantener una relación fija.

La equivalencia adimensional para la ecuación de Navier Stokes²⁷ para una situación de flujo multidimensional en condiciones de estado estable es representada como:

$$\frac{1}{Eu} = f(Re, Fr) \quad (5)$$

Eu = Número de Euler.

Re = Número de Reynolds.

Fr = Número de Fraude

La ecuación (5) afirma que la relación de fuerzas de presión para la energía cinética contenida en el fluido en un sistema es función de fuerzas inerciales, viscosas y de cuerpo (gravitacional, boyante). Por lo tanto, para alcanzar una relación similar de fuerzas de presión para la energía cinética en el modelo y en el sistema de escala real la equivalencia del número de Reynolds (fuerzas inerciales / fuerzas viscosas) y del número de Froude (fuerzas inerciales / fuerzas boyantes) deben ser mantenida entre los dos sistemas. En modelos a escala con una similitud geométrica menor o igual a

$$\lambda = \frac{L_m}{L_{f.s.}} \leq 0.5 \quad (6)$$

se emplea un fluido de viscosidad cinemática similar que el del sistema real, por lo que el agua es el líquido natural para simular acero.

$$\frac{\eta_{agua}}{\rho_{agua}} = \frac{\eta_{acero}}{\rho_{acero}} \quad (7)$$

La esencia de un criterio de similitud dinámica entre un modelo de olla y una real puede ser derivada de la ecuación (5) de acuerdo a:

$$(Fr)_m = (Fr)_{f.s.} \quad (8)$$

La ecuación (8), es válida bajo las suposiciones ya mencionadas, y sugiere que para establecer una similitud dinámica entre el modelo y la olla real, la relación de fuerzas inerciales y fuerzas boyantes en estos sistemas debe de ser idéntica.

Esto último se desprende del hecho de que en ollas de acero agitadas con Ar, las fuerzas boyantes promovidas por las diferencias de densidades entre el argón y el acero, son las que dominan en la dinámica de fluidos en dichos sistemas. De esta forma, la fuerza boyante que actúa sobre los sistemas de ollas puede expresarse como:

$$F_{boyante} = \rho_L g \alpha (\pi r_e^2 L) \quad (9)$$

en donde r_e representa el radio de la pluma idealizada que ha sido deducida asumiendo una forma cilíndrica del modelo, teniendo una equivalencia de volumen igual al de la olla de geometría cónica, α , es la fracción de volumen de gas promedio en la pluma, y puede ser estimada convenientemente por principios de continuidad, L es la altura del líquido, ρ_L es la densidad del líquido y g es la aceleración debido a la gravedad.

La expresión requerida para la fuerza inercial puede ser derivada y representada como:

$$F_{inercial} = \rho_{mez} U_p^2 (\pi r_e^2) \quad (10)$$

donde U_p es la velocidad de ascenso de la pluma y ρ_{mez} es la densidad de la mezcla.

Sustituyendo las ecuaciones (9) y (10) en la ecuación (8), el criterio de similitud dinámica para sistemas de ollas agitadas con gas es expresado como:

$$\left(\rho_{mez} U_p^2 / \rho_L g L \alpha \right)_m = \left(\rho_{mez} U_p^2 / \rho_L g L \alpha \right)_{f.s.} \quad (11)$$

Sabiendo que la densidad de la mezcla en la región de la pluma bifásica es: $\rho_{mez} \cong \rho_L (1 - \alpha)$, y asumiendo que la fracción de volumen de gas debe de ser igual en el modelo y en el sistema real, la ecuación (11) es expresada como:

$$\left(\frac{U_p^2}{gL}\right)_m = \left(\frac{U_p^2}{gL}\right)_{f.s.} \quad (12)$$

La ecuación (12) derivada sobre las bases de que el número de Froude domina los fenómenos de flujo, es la clave para la modelación física de sistemas de inyección de gas en ollas, en donde, U_p es la velocidad de ascenso promedio del gas y L es la profundidad del líquido en el convertidor.

Una expresión macroscópica simple para estimar la velocidad de ascenso de la pluma, U_p , en un sistema de olla agitada con gas es:

$$U_p = 4.5Q^{1/3}L^{1/4} / R^{1/4} \quad (13)$$

La ecuación (13) proporciona la expresión requerida para relacionar el flujo de gas en el modelo con el real de acuerdo a:

$$Q_m = \lambda^{3/2}Q_{f.s.} \quad (14)$$

en donde, λ , es el factor de escala geométrico

$$\lambda = \frac{L_m}{L_{fs}} \quad (15)$$

Capítulo 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Desarrollo experimental

Como se mencionó anteriormente, una de las funciones del Horno Olla es agitar el metal líquido de tapones porosos colocados en el fondo del convertidor. La agitación ayudará a agilizar el mezclado, a la homogenización térmica y química del baño metálico, acelerando las reacciones químicas que se llevan a cabo dentro del horno además de remover inclusiones e impurezas.

Este desarrollo experimental se compone de tres etapas:

En nuestra primera etapa, cálculos de escalamiento y de parámetros de operación se realizaron para el diseño del reactor, en donde se estableció el arreglo de tapones y se ideó el arreglo experimental. Las ecuaciones del modelado se encuentran en el Capítulo 2 de esta tesis y los resultados del escalamiento están en la primera sección del capítulo de resultados (Capítulo 4).

En una segunda etapa se construyó el reactor de acrílico, se instaló la plomería y se fabricaron y montaron los tapones porosos.

En la última etapa se realizaron pruebas a cada uno de los tapones porosos evaluando su adecuado funcionamiento y se practicaron pruebas preliminares y

cualitativas de mezclado. Posteriormente en esta etapa se efectuó una prueba de mezclado semi-cuantitativa, con un solo tapón poroso elegido al azar. Se aplicó un colorante (rojo de metilo) a la olla que permita visualizar el movimiento del fluido al interior de la olla con respecto al tiempo.

Construcción del reactor e instalación de la plomería

Para el reactor, se compró el tanque cilíndrico de acrílico de 52 cm de diámetro por 63 cm de altura enchaquetado. El acrílico cuenta con 8 mm de espesor para soportar la presión del fluido contenido, y la chaqueta se colocó a media altura para reforzar al tanque y evitar deformaciones.

Se perforó el fondo en posiciones estratégicas (ver Figura 3.1) para colocar boquillas y montar en ellas tapones porosos.

El tamaño de la boquilla es de 6.35 mm, tomando en cuenta que son 13 boquillas en diferentes posiciones. Este tamaño es de 1/6 del tamaño real y además es el tamaño estándar que utilizan la mayoría de los investigadores en sus modelos. La Figura 3.1 muestra la posición de las entradas de aire que fueron elegidas en el modelo.

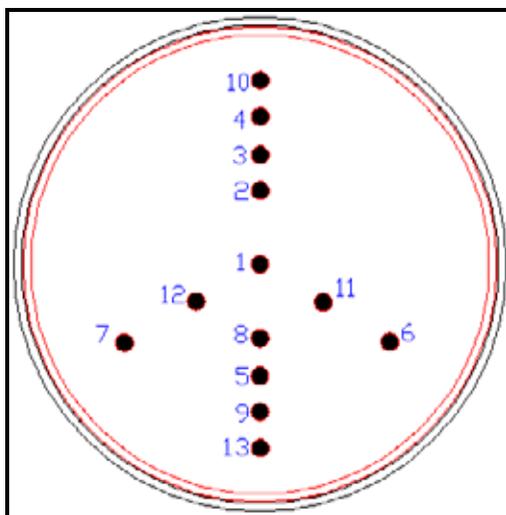


Figura 3.1 Posición de las entradas de aire para el modelo físico.

Esencialmente la instrumentación básica para el modelo consta de: (ver Figura 3.2)

13 Conexiones rápidas hembra de $\frac{1}{4}$ plg.

13 Conexiones rápidas macho de $\frac{1}{4}$ plg.

13 Conexiones de espiga roscadas de $\frac{1}{4}$ plg.

13 Conexiones hexagonales roscadas hembra de $\frac{1}{4}$ plg.

20 m de manguera para aire de $\frac{1}{4}$ plg.

De uno o tres flujómetros, los cuales pueden ser colocados en cada una de las entradas a la olla y así poder controlar el flujo de aire.

El flujo que debe manejar fue calculado en el Capítulo 4 ($Q_m=0.027 \text{ m}^3/\text{min}$). Note que este flujo debe ser corregido, debido a que se utilizará fueran de las condiciones estándar. *Ver corrección de flujo pp. 29.*

En la Figura 3.2 se muestra esquemáticamente el mecanismo de inyección de aire que va desde la compresora de aire hasta la boquilla del modelo, así como los accesorios en latón que fueron instalados.

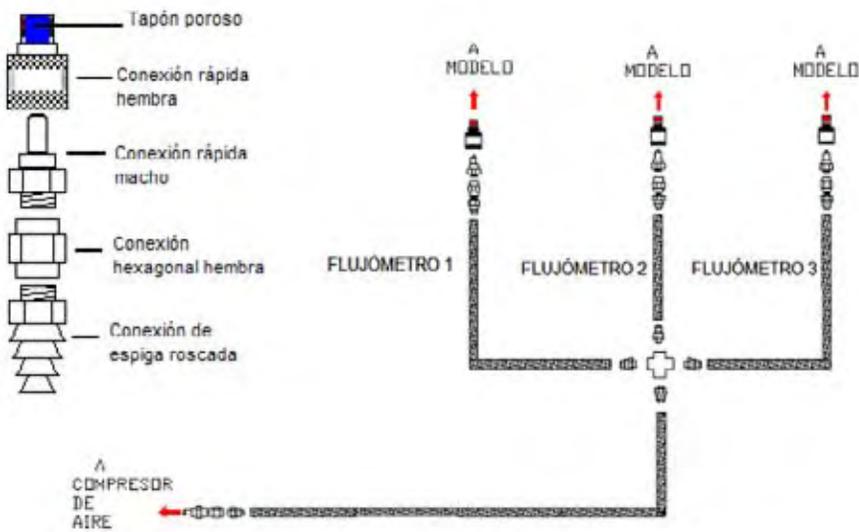


Figura 3.2 Esquema de conexiones para el sistema de inyección de aire.

Como se nota en la Figura 3.2 la inyección de aire es compleja, este mecanismo fue diseñado con la finalidad de aumentar la versatilidad en cuanto al número de sistemas de inyección de aire que se deseen estudiar, ya que permite insuflar aire con uno o hasta tres tapones de manera simultánea.

Corrección del flujo.

La presencia de tapones provoca un aumento en la presión en el gas de entrada, lo cual implica la necesidad de corregir el flujo de gas de las condiciones de presión estándar a las condiciones de presión reales, mediante la ecuación (16) Ref. 42 (que también considera cambio en la temperatura del gas respecto a la estándar):

$$G2 = G1 \sqrt{\frac{P1 \times T2}{P2 \times T1}} \quad (16)$$

Donde; G1: lectura actual en el flujómetro.

G2: lectura corregida

P1: presión actual (14.7 psia+presión a la salida en psig)

P2: presión estándar (14.7 psia)

T1: temperatura actual (460 R (grados rankine)) + temp °F)

T2: temperatura estándar (530 R [grados rankine])

Nota: las unidades de presión referidas, tienen unidades de lbf/plg^2 equivalente a un *psi*, el prefijo contiguo “a” o “g”, indican la base de la escala a la que se encuentra referido, es decir, absoluto o gravitacional respectivamente.

Como ejemplo, en un flujómetro para aire con escala de 10-100 unidades en condiciones estándar de flujo, es decir a 21.3° C \equiv 530 R y 1 atm \equiv 14.7 psi (SCFH por sus siglas en ingles) . El flotador marca 60 unidades en la escala del mismo. La presión actual medida a la salida es de 5 psi. La temperatura actual medida a la salida es de 85° F.

Sustituyendo en la ecuación 16, tenemos;

$$Q_2 = 60.0 \sqrt{\frac{(14.7 + 5) \times 530}{14.7 \times (460 + 85)}}$$

$$Q_2 = 68.5 \text{ Unidades SCFH de Aire}$$

Debido a que se necesitan mediciones de temperatura y presión a la salida, se necesita colocar un manómetro y un termómetro.

Además para el acondicionamiento del aire se necesita un regulador que controle la presión de entrada y proporcione la presión de salida de acuerdo con la aplicación que se requiera, además del regulador, es necesario poner un separador de agua (unidad de mantenimiento), porque el aire comprimido normalmente lleva una buena cantidad de agua.

Entonces el sistema quedó de la siguiente manera (ver Figura 3.3).

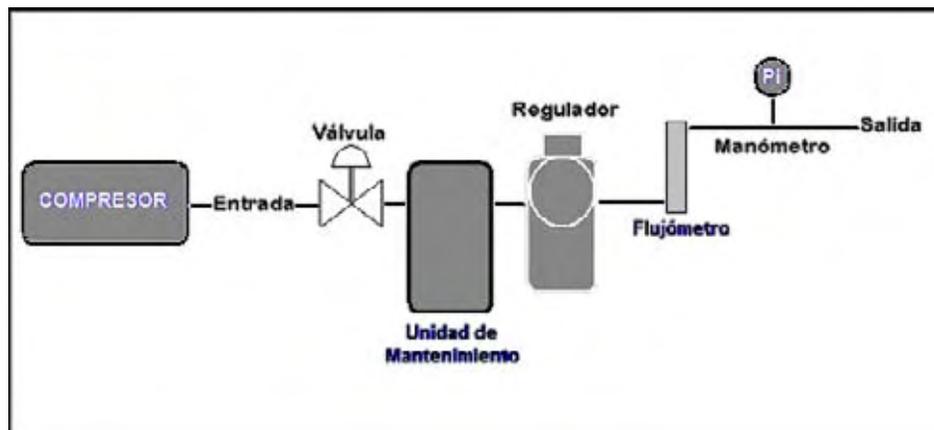


Figura 3.3 Esquema de equipos e instrumentos para el control y monitoreo del fluido.

Construcción de los tapones porosos.

La construcción de los tapones porosos requirió de su manufactura artesanal, ya que estos accesorios no son de origen comercial. Se partió de un tapón de forma cilíndrica de arena sílica de aproximadamente 1 cm de diámetro y 2 cm de longitud. Para poder montarlo en la *conexión rápida hembra* (CRH) requirió ser desbastado hasta conseguir las dimensiones de la parte interior de la CRH (6.35 mm Ø por 8.00 mm de longitud). Una vez montado en la CRH, es sellado con una mezcla de pegamento cola-loca® y bicarbonato de sodio. Este mismo procedimiento se realizó para cada uno de los trece tapones.

Montado de los tapones en el modelo.

Uno de los detalles obvios, es la impermeabilidad que debe tener el fondo del modelo, ya que al ser perforado, tendería a presentar problemas de goteo. Al respecto, con el fin de garantizar el hermetismo del tanque, la cuerda de las CRH, no debe presentar ningún tipo de abocardado, además de colocar cinta de teflón en cada una de las conexiones. En algunas ocasiones la cinta no contaba con el espacio suficiente entre la conexión y el orificio de la base, por lo que se optó por colocar silicón de aplicación en frío como sellador. Ver Figura 3.4

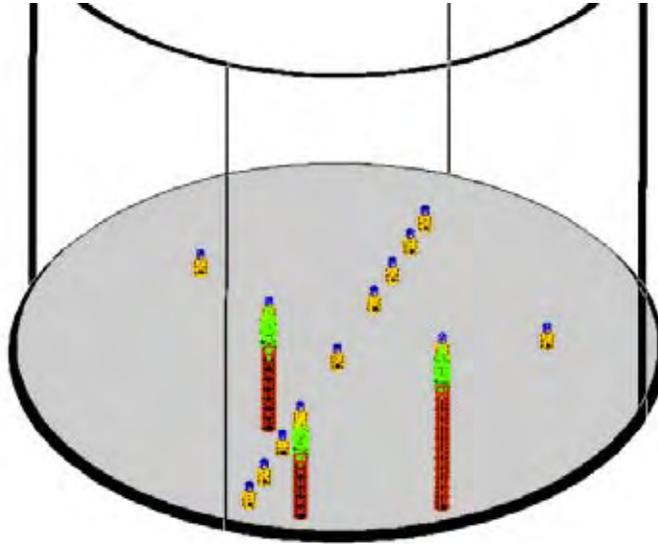


Figura 3.4 Esquema del montaje de los tapones en el modelo físico. AutoCAD 2004.

Una de los requerimientos principales durante el montaje de las CRH, fue colocarlas al nivel de la base de acrílico del modelo, es decir, no se permitió que los tapones o la CRH asomaran sus cuerpos en forma parcial al interior de la olla, lo anterior para no afectar el flujo de fluidos como razón primordial y poder garantizar la similitud dinámica y geométrica del mismo.

Pruebas preliminares

Las pruebas preliminares constan de dos etapas:

- i. Hermeticidad del modelo y operabilidad de cada una de las toberas instaladas.

Se realiza la operación de todos y cada uno de los tapones, en busca de posibles fugas y/u obstrucciones en los tapones porosos evaluando la funcionalidad del mismo.

ii. Pruebas semi-cuantitativa de mezclado.

La prueba semi-cuantitativa se llevó a cabo eligiendo al azar un tapón poroso. Se le aplicó un colorante (rojo de metilo) y se observó la disolución del mismo al interior del reactor.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de escalamiento

De acuerdo a las ecuaciones de escalamiento y comparando los modelos físicos de sistemas de ollas agitadas con gas utilizados por varios investigadores, en seguida se presenta el resultado del diseño propuesto para este proyecto. Como todo modelo físico su razón de ser toma sentido al buscar validar los modelos matemáticos que se están elaborando de manera conjunta, así mismo estudiar paralelamente algunos aspectos menos entendidos de la inyección de gases, tales como la separación de inclusiones y la transferencia de calor, aunque esto último requiere de mayor instrumentación, por lo que de inicio esta tesis únicamente plantea el escalamiento y la construcción del modelo físico.

En la Tabla 4.1 se aprecian las dimensiones y condiciones de operación de una olla industrial de la empresa TAMSA, la cual se tomó como el sistema sobre el cual se realizó el escalamiento del modelo con los parámetros de similitud ya señalados.

Tabla 4.1 Medidas reales de un Horno Olla utilizado en TAMSA.

$D_{f.s.}$ [m]	$H_{f.s.}$ [m]	$L_{f.s.}$ [m]	$Q_{f.s.}$ [m ³ /min]
3.226	3.736	2.802	0.2 - 0.6

Similitud geométrica

Se utilizó un factor de escala (λ) arbitrario de 1/6:

$$\lambda = \frac{1}{6} = 0.1666$$

con fines ecológicos al reducir el consumo de agua y además con fines prácticos al facilitar el manejo y construcción de un reactor pequeño.

Cálculo de las dimensiones para el modelo:

A través de la Tabla 4.1 se obtiene el dato $L_{f.s.}$ y de acuerdo a la ecuación (15) se calcula la altura del líquido en el modelo, L_m :

$$\lambda = \frac{L_m}{L_{f.s}}$$

$$L_m = \lambda L_{f.s}$$

$$L_m = (0.1666)(2.802m)$$

$$L_m = 0.467m$$

para calcular el valor del diámetros de la Olla, se considera una relación de diámetro-altura del fluido y diámetro-altura del horno, de la siguiente manera.

$$\frac{D_{fs}}{L_{fs}} = const(1)$$

$$\frac{D_{fs}}{L_{fs}} = \frac{3.226m}{2.802m} = 1.151$$

$$\frac{D_{fs}}{H_{fs}} = const(2)$$

$$\frac{D_{fs}}{H_{fs}} = \frac{3.226m}{3.736m} = 0.863$$

Constantes que deben ser idénticas en las mismas relaciones de diámetro altura para el modelo. Por lo tanto para calcular D_m y H_m , tenemos que:

$$\frac{D_m}{L_m} = 1.151$$

$$D_m = 1.151 \times 0.467m$$

$$D_m = 0.5376m$$

$$\frac{D_m}{H_m} = 0.863$$

$$H_m = \frac{D_m}{0.863} = \frac{0.5376m}{0.863}$$

$$H_m = 0.6226m$$

Cálculo del flujo de gas para el modelo (Q_m):

La ecuación (14), permite calcular el mínimo en el rango de flujo.

$$Q_m = \lambda^{3/2} Q_{f.s.}$$

$$Q_m = (0.1666)^{3/2} (0.2 \frac{m^3}{min})$$

$$Q_m = 0.0136 \frac{m^3}{min}$$

$$Q_m = 28.834 \frac{ft^3}{min}$$

Análogamente, se calcula el máximo en el rango de flujo. El rango de flujo para la experimentación en base al rango de TAMSA (ver Tabla 4.1) es:

$$Q_m \rightarrow 28.83 - 86.50 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Para efectos prácticos como una estimación más precisa, se realizaron los siguientes cálculos con el flujo de gas promedio.

$$\underline{Q_{m\text{PROM}} = Q_m = 57.66 \text{ ft}^3/\text{hr}}$$

$$Q_m = 0.02721 \text{ m}^3/\text{min}$$

Cálculo de la velocidad de ascenso de la pluma:

De acuerdo a la ecuación (13), aplicada al modelo tenemos que:

$$\begin{aligned} U_{p_m} &= 4.5 Q_m^{1/3} L_m^{1/4} / R_m^{1/4} \\ U_{p_m} &= \frac{4.5(0.0004536 \text{ m}^3 / \text{s})^{1/3} (0.467 \text{ m})^{1/4}}{(0.2688 \text{ m})^{1/4}} \\ U_{p_m} &= 0.3969 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{p_{fs}} &= 4.5 Q_m^{1/3} L_m^{1/4} / R_m^{1/4} \\ U_{p_{fs}} &= \frac{4.5(0.0066667 \text{ m}^3 / \text{s})^{1/3} (2.802 \text{ m})^{1/4}}{(1.613 \text{ m})^{1/4}} \\ U_{p_{fs}} &= 0.9723 \text{ m/s} \end{aligned}$$

que representan las velocidades de ascenso del modelo y de la olla respectivamente.

Similitud dinámica.

Con los flujos de gas y dimensiones del sistema en el modelo, se verifica la similitud dinámica de acuerdo con la ecuación (12), en donde los números de Froude deben ser idénticos en el modelo y en la olla, entonces:

$$\left(\frac{U_p^2}{gL} \right)_m = \left(\frac{U_p^2}{gL} \right)_{f.s}$$

$$\left(\frac{(0.3969\text{m/s})^2}{(9.81\text{m/s}^2)(0.467\text{m})} \right)_m = \left(\frac{(0.9723\text{m/s})^2}{(9.81\text{m/s}^2)(2.802\text{m})} \right)_{f.s}$$

$$0.03439 = 0.03439$$

La Tabla 4.2 resume los cálculos de similitud con los que se escaló la olla de TAMSA para construir nuestro modelo.

Tabla 4.2 Resumen de los condiciones de similitudes consideradas.

SIMILITUD	HORNO OLLA TAMSA	OLLA MODELO
Geométrica	D = 3.226 m L = 2.082 m Q = 0.4 m ³ /min	D = 0.5376 m L = 0.4669 m Q = 0.027 m ³ /min
Dinámica	U = 0.9719 m/seg Fr = 0.03439	U = 0.3967 m/seg Fr = 0.03439
Cinemática	v = 0.97 × 10 ⁻⁶ m ² /s (acero a 1600° C)	v = 1.0 × 10 ⁻⁶ m ² /s (agua a 20° C)

A partir de las dimensiones del Horno Olla industrial propiedad de Tenaris TAMSA. Se efectuaron cálculos pertinentes, considerando criterios de similitud geométrica, se obtuvieron las dimensiones a escala ($\lambda=1/6$) para el modelo físico reportadas en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Resumen de los valores en las dimensiones geométricas para Olla y el modelo.

	Altura del Horno H [m]	Altura del baño L [m]	Diámetro del Horno D [m]
Olla industrial (f.s)	3.736	2.802	3.226
Modelo físico (m)	0.622	0.467	0.537

Los cálculos para el flujo de inyección de gas que debe manejar el modelo arrojaron los resultado expuestos en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Resumen de los valores de flujo calculado.

	Flujo promedio de gas Q [m ³ /min]
Olla industrial (f.s)	0.400
Modelo físico (m)	0.027

Por otra parte, de acuerdo a criterios de similitud dinámica, el cálculo de la velocidad de ascenso de burbujas en la pluma y el número de Froude, se exponen en la Tabla 4.5

Tabla 4.5 Resumen de las condiciones dinámicas calculadas

	Velocidad de ascenso U [m/s]	Número de Froude Fr [adimensional]
Olla industrial (f.s)	0.9719	0.03439
Modelo físico (m)	0.0397	0.03439

Cabe mencionar, la importancia de la equivalencia del número de Froude para ambos sistemas, se sabe, el número de Froude representa el equilibrio entre las fuerzas inerciales y boyantes, responsables del movimiento del fluido y a su vez de la agitación del mismo.

Construcción del modelo físico.

Construcción de la Olla

El resultado del escalamiento, de la instalación y montaje de la plomería, accesorios, medidores y tapones porosos (descrito en el capítulo 3) se puede apreciar en la foto y esquema del modelo físico que se presenta en la Figura 4.1, basado en los cálculos de escalamiento realizados (Ver Tabla 4.2).

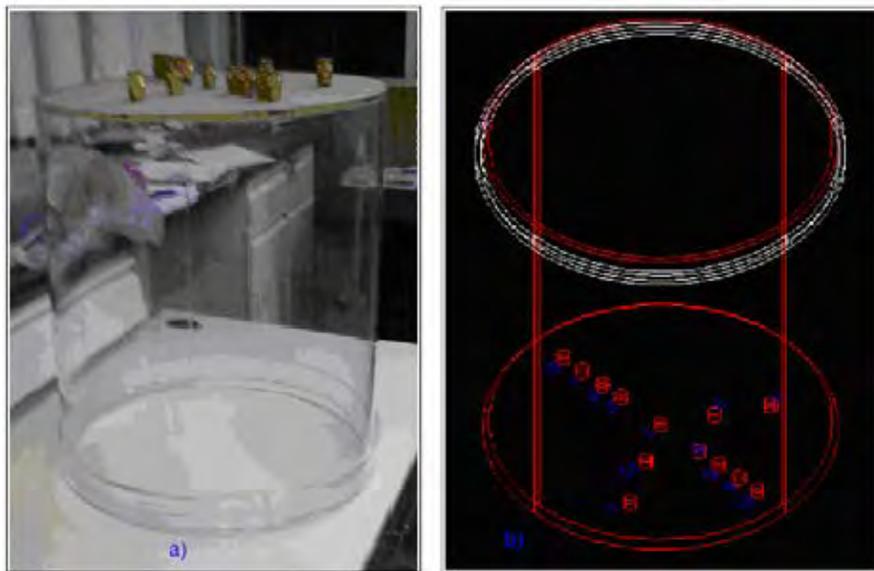


Figura 4.1 Modelo físico elaborado de acrílico de 8 mm de espesor (a). Esquema del modelo realizado en Auto Cad 2007 (b).

En la base del modelo de acrílico se trazaron diferentes arreglos para los tapones porosos, quedando acorde a la Tabla 4.6. También se puede visualizar en la Figura 4.2, como una vista superior del modelo.

Tabla 4.6 Localización e identificación de los tapones porosos en la base del modelo. no se estableció ningún criterio para determinar la posición de las boquillas, simplemente se buscó establecer la mayor cantidad de sistemas de mezclado.

Tapón	Localización	Ángulo (°)	Tapón	Localización	Ángulo (°)
1	R=0	0	8	1/3R	180
2	1/3R	0	9	2/3R	180
3	½ R	0	10	4/5R	0
4	2/3R	0	11	1/3R	240
5	½ R	180	12	1/3R	120
6	2/3R	240	13	4/5R	180
7	2/3R	120			

Instalación de sistemas de agitación

Como hemos mencionando anteriormente el modelo cuenta con varios sistemas de agitación. Mismos que se describen en la Tabla 4.7, y se ilustran en la Figura 4.2, en donde se muestra posibles combinaciones en las condiciones de agitación en la olla. Cabe mencionar que estos sistemas no son los únicos, pues está latente la posibilidad de efectuar combinaciones entre los mismos.

Para el caso de la operación con un solo tapón, se cuenta con 5 puntos de operación o sistemas de agitación (R=0,1/3,1/2,2/3,4/5) a lo largo de una línea recta, etiquetada como $\theta=0^\circ$, en donde se encuentran las tapones 1, 2, 3, 4, 10 respectivamente. También existen tapones con el mismo radio pero a diferente

ángulo, sin embargo, estos son redundantes ya que se encuentran representados por $\theta=0$,

Tabla 4.7 Sistemas de agitación sugeridos. Muestra la posición de los tapones dentro de los sistemas de agitación sugeridos, diferenciados por color.

R \	0°	120°	180°	240°
0				
1/3				
1/2				
2/3				
4/5				

Para sistemas de 2 o 3 tapones, el modelo es más versátil. La Figura 4.2 solo muestra algunas posibles combinaciones. Los tapones pueden ser operados o no a radios equidistantes, pero además también se puede variar el ángulo de operación de los mismos, lo cual da como resultado una gran variabilidad en las condiciones de agitación dentro del horno.

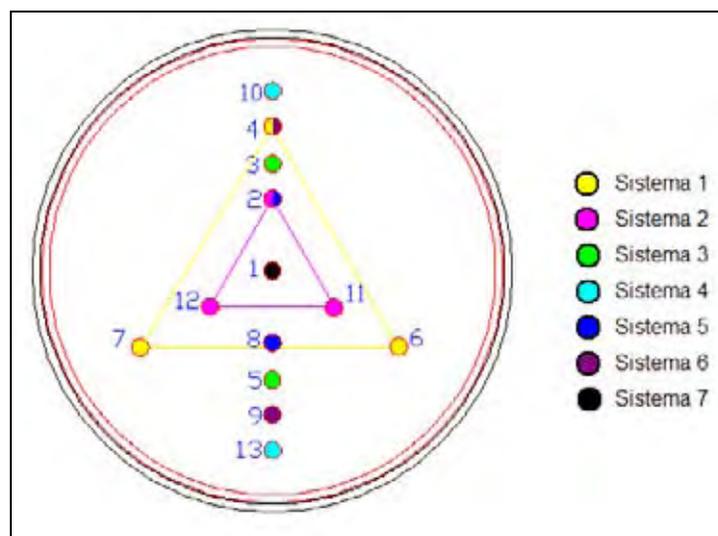


Figura 4.2 Esquema de los sistemas de agitación.

Pruebas preliminares

Prueba de funcionalidad para los tapones porosos.

Las pruebas de inyección que se realizaron en cada una de las boquillas. En todos los casos a excepción de las boquillas no. 6 y 10, se generan burbujas pequeñas y de tamaño uniforme.

Prueba de mezclado cualitativa.

La prueba de mezclado se realizó con la observación de la dilución del trazador, aplicado en la zona más distante al tapón en operación. Obteniendo una grafica semi-cualitativa del porcentaje de homogeneidad con respecto al tiempo en el reactor (ver Figura 4.3).

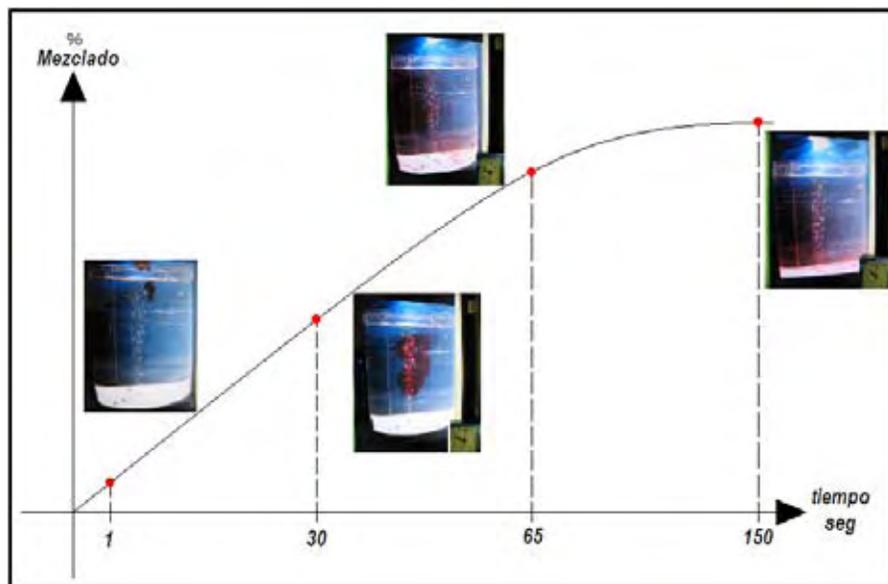


Figura 4.3 Prueba de mezclado semi-cuantitativa.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

Se construyó satisfactoriamente un modelo físico a escala ($\lambda=1/6$) de una olla industrial usando los criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática apropiados donde se llevarán a cabo los estudios de mezclado, transferencia de calor y dinámica de fluidos. El modelo físico se construyó en acrílico transparente con paredes de 8 mm de espesor enchaquetado con el fin de observar directamente los fenómenos que ocurren dentro de la olla, utilizando agua y aire simulando acero y argón respectivamente.

El número adimensional utilizado para la construcción del modelo físico, fue el número de Froude, recurriendo a las similitudes geométricas y dinámicas, determinados a partir de una relación de 0.16666 para la similitud geométrica y una relación de 0.03436 para la similitud dinámica, entre el modelo físico y el sistema real.

Trabajo futuro

Se colocaron 13 boquillas en la base del modelo, con el fin de proporcionar la mayor versatilidad posible en cuanto a los sistemas de agitación, esperando que

los futuros trabajos puedan contar con amplios márgenes de operación, tales como los arreglos de inyección, es decir, posición y número de tapones, así como la cantidad del flujo de gas, y se puedan determinar las condiciones operacionales óptimas recomendables.

Abreviaturas

ρ	Densidad
η	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
τ_m	Tiempo de mezclado
ε_m	Rapidez de disipación de energía
L	Altura del líquido en la olla
H	Altura de la olla
R	Radio interno
D	Diámetro interno de la olla
Q	Flujo de gas
λ	Factor de escala
Eu	Número de Euler.
Re	Número de Reynolds.
Fr	Número de Froude
F	Fuerza
g	Aceleración debido a la gravedad
α	Fracción de volumen de gas promedio en la pluma
r_e	Radio de la pluma idealizada
U	Velocidad de ascenso

Sub. o superíndices

m Escala modelo

fs Escala real

g Gas

p Pluma

mez Mezcla

L Líquido

Lista de figuras y tablas

FIGURAS

Figura 1.1	Tipos más comunes de hornos en los que se lleva a cabo la limpieza de los aceros mediante inyección de gases	3
Figura 1.2	Sistema de inyección tipo tobera, esta se usa generalmente en el tipo AOD e inclusive en el Alto Horno	4
Figura 1.3	Mecanismo de inyección del fluido a través de un tapón poroso	4
Figura 1.4	Esquema de inyección de gas céntrica A), y excéntrica B). AutoCad 2007	11
Figura 1.5	Esquema de la inyección de gas en una olla de acero	12
Figura 1.6	Ejemplo de la visualización del patrón de flujo utilizando hojuelas de aluminio como trazador. Ref. (Hsiao, ISIJ International, v. 35(1995), no. 5 pp. 472-479)	19
Figura 1.7	Esquema de la modelación física el Horno Olla	22
Figura 3.1	Posición de las entradas de aire para el modelo físico	30
Figura 3.2	Esquema de conexiones para el sistema de inyección de aire	31
Figura 3.3	Esquema de equipos e instrumentos para el control y monitoreo del fluido	33
Figura 3.4	Esquema del montaje de los tapones en el modelo físico, AutoCAD2004	35
Figura 4.1	Modelo físico elaborado de acrílico de 8 mm de espesor (a). Esquema del modelo realizado en Auto Cad 2007 (b)	44

Figura 4.2	Esquema de los sistemas de agitación	46
Figura 4.3	Prueba de mezclado semi-cuantitativa	47

TABLAS

Tabla 1.1	Datos de densidad y viscosidad, tanto dinámica como cinemática, reportados en la literatura	13
Tabla 1.2	Resumen de las correlaciones para obtener el tiempo de mezclado reportadas en la literatura	15
Tabla 1.3	Resumen de modelos físicos utilizados por algunos Investigadores	21
Tabla 4.1	Medidas reales de un Horno Olla utilizado en TAMSA.	38
Tabla 4.2	Resumen de los condiciones de similitudes consideradas	41
Tabla 4.3	Resumen de los valores en las dimensiones geométricas para Olla y el modelo	42
Tabla 4.4	Resumen de los valores de flujo calculado	42
Tabla 4.5	Resumen de las condiciones dinámicas calculadas	43
Tabla 4.6	Localización e identificación de los tapones porosos en la base del modelo. no se estableció ningún criterio para determinar la posición de las boquillas, simplemente se buscó establecer la mayor cantidad de sistemas de mezclado	45
Tabla 4.7	Sistemas de agitación sugeridos. Muestra la posición de los tapones dentro de los sistemas de agitación sugeridos, diferenciados por color	46

Referencias bibliográficas

1. R. J. Fruehan, Vacuum degassing of steel, ISS, 1990
2. J. K. Brimacombe, P. J. Machey, G. J. W. Kori, C. Bieckert, and M. G. Ranade, Eds., Memorias de "Savard/Lee International symposium on bath smelting", TMS, 1992.
3. P. J. Koros y G. R. St Pierre; Memorias de "Elliot Symposium on Chemical process metallurgy", ISSS, AIME, 1991.
4. F. Oeters. W. Pluschkell, Steinmetz y H. Wilhelmi: Steel Res., 59 (1988), 192.
5. P.E. Anagbo, J.K. Brimacombe y A.H. Castillejos: Can. Metall Q., 28(1989).323.
6. A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe: Metall. Trans., 18B (1987),649.
7. K.H. Tacke, H.G. Schubert, D.J. Weber y K. Schwerdtfeger: Metall. Trans., 16B(1985), 263.
8. A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe: Metall. Trans., 18B (1987),659.
9. G.G. Krishnamurthy, S.P. Mehrotra y A. Ghosh: : Metall. Trans., 19B (1988),885.
10. S.T. Johansen y T.A. Engh: Scand. J. Metall., 14(1985),214
11. C.T. Hsiao, T. Lehner y B. Kjellberg: : Scand. J. Metall., 9(1980),105.
12. S.T. Johansen, D.G. C. Robertson, K. Woje y T.A. Engh: Metall. Trans., 19B(1988), 745.
13. S.C. Korla y S. Singh: Steel Res., 60 (1989), 301.
14. S. Tanaka y R.L.I. Guthrie: Process Technology Proc., 6th Int. Iron Steel Cong., Vol.6, (1986),249.
15. D. Mazumdar, H. Nakajima y R.L.I. Guthrie: Metall. Trans., 19B(1988), 249.
16. K. Nakanishi, T. Fujii y J. Szekely: Ironmaking and steelmaking, 3(1975),193.
17. S. Asai, T. Okamoto, I. Muchi: Trans Iron Steel Inst. Jpn., 23 (1985),43.
18. U.P. Sinha y M.J. McNallan: Metall. Trans., 16B(1985), 850.

19. T. Stাপurewicz y N.j. Themelis: Can. Metall. Q., 26(1987), 123.
20. J. Mietz y F. Oeters: Steel Res., 60 (1989), 387.
21. D. Mazumdar, R. I. L. Guthrie: Metall. Trans., 17B (1986), 725.
22. G.G. Krishnamurthy, S.P. Mehrotra y A. Ghosh: : Metall. Trans., 19B (1988), 839.
23. O. Haida, T. Onoue: ISIJ Int., 29 (1989), 148.
24. M. Neifer, S. Rodi y D. Sucker: Steel Res., 64 (1993), 54.
25. O. Haida y J.K. Brimacombe: Scaninject III, (1983), 5.1.
26. S.H. Kim y R.L.I. Guthrie: Steelmaking Conf. Proc, 70(1987), 107.
27. S. Taniguchi y Y. Okada: Proc., 6th Int. Iron Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 394.
28. J. Mietz y F. Oeters: Steel Res., 62 (1991), 1.
29. K. Mori y M. Sano: Trans Iron Steel Inst Jpn., 27 (1987) 277.
30. R.B. Bird, W.E. Stewart y E.N. Lightfoot: Transport Phenomena, New York, 1960.
31. M. Zhou y J.K. Brimacombe: Critical Fluid-flow Phenomena in a gas-stirred ladle, 25B, 1994- 681.
32. A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe: Physical Characteristics of gas jets injection vertically upward into metal, 20B, 1989-595.
33. V. Sahajwalla, A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe: The Spout of Jets Upwardly injected into a water bath, 21B, 1990-71.
34. P.E. Anagbo, J.K. Brimacombe y A.H. Castillejos: A unified representation of gas dispersion in upwardly injected submerged gas jets, 28B, 1989-323.
35. A.H. Castillejos y J.K. Brimacombe: Measurement Physical Characteristics of Bubbles in gas-liquid plumes, 18B, 1987-656.
36. Gilbert W. Castellan: Físico-química. Person Educación. Pp.794

Páginas de internet

37. http://www.matter.org.uk/steelmatter/steelmaking/ladle_stirring/stirring_4.html

38. <http://taninos.tripod.com/viscosidad.htm>

39. <http://es.wikipedia.org/wiki/Viscosidad>

40. [http://es.wikipedia.org/wiki/Agua_\(mol%C3%A9cula\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Agua_(mol%C3%A9cula))

41. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=452>

42. www.dwyer-inst.com, Dwyer Instruments, Inc. P.O. box 373. Michigan City, Indiana 46361, U.S.A.