



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“MODELACIÓN FÍSICA DE LA AGITACIÓN DEL ACERO
LÍQUIDO DENTRO DEL HORNO OLLA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. RENATO GONZÁLEZ BERNAL

ASESOR:

DR. GILDARDO SOLORIO DIAZ

MORELIA, MICHOACAN AGOSTO DEL 2008



AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por todo lo que me ha brindado en mi vida.

A mi familia:

A mi madre por sus consejos que me ha dado en los momentos más difíciles y darme su apoyo en todo momento.

A mi padre por todo lo que me ha enseñado.

A mi esposa y a mi hija por el apoyo incondicional y amor que me han brindado.

A mi hermano y familia por su apoyo y cariño.

A mis amigos:

A Piña y Cirilo por tantas batallas que libramos juntos, a Rene el cuarto mosquetero.

A mi asesor y sus amigos (Héctor y Ángel) por su confianza, tiempo y apoyo en la elaboración de este trabajo.

Al maestro Hugo y al doc Crisanto por darme toda su confianza y su amistad.

A la UMSNH por darme el apoyo para realizar estos estudios que fue como mi casa durante todo este tiempo.

ÍNDICE

CAPITULO I

1.1 RESUMEN.....	1
1.2 ABSTRACT	2
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4 OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
1.5 INTRODUCCIÓN.....	4
1.6 ANTECEDENTES.....	7
1.7 JUSTIFICACIÓN.....	10

CAPITULO II. MARCO TEORICO.

2.1 COLADA CONTINÚA.....	11
2.2 METALURGIA SECUNDARIA.....	13
2.2.1 DESOXIDACIÓN.....	14
2.2.2 DESULFURACIÓN.....	14
2.2.3 RECALENTAMIENTO.....	15
2.2.4 HOMOGENIZACIÓN DE COMPOSICIÓN QUÍMICA Y TEMPERATURA.....	15
2.3 MEDIOS DE AGITACIÓN DEL METAL LÍQUIDO.....	15
2.3.1 INYECCIÓN DE GAS A TRAVÉS DE UNA LANZA.....	16
2.3.2 INYECCIÓN DE GAS A TRAVÉS DE UN TAPÓN POROSO.....	16
2.4 TIPOS DE TAPONES POROSOS.....	16
2.5 PATRONES DE DISPERSIÓN DE BURBUJAS.....	17
2.6 TIEMPO DE MEZCLADO EN EL HORNO OLLA.....	18
2.7 CLASIFICACIÓN DEL CAMPO DE FLUJO EN UN BAÑO CON INYECCIÓN INFERIOR DEL GAS.....	22
2.8 PRESIÓN.....	24
2.9 COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	25
2.10 COEFICIENTE DE ARRASTRE.....	25
2.11 FUERZAS DE NO ARRASTRE.....	26
2.12 CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA.....	27
2.13 TIPOS DE REACTORES.....	28

INDICE

2.13.1 REACTOR DISCONTINUO.....	29
2.13.2 REACTOR CONTINUO.....	29
2.13.2 REACTOR FLUJO PISTÓN.....	29
2.13.3 REACTOR DE MEZCLA COMPLETA.....	30
2.14 VELOCIMETRÍA DE PARTÍCULAS DE IMAGEN.....	30
2.15 VISUALIZACIÓN DE FLUJO.....	33
2.15.1 LÍNEAS DE CORRIENTE.....	33
2.15.2 LÍNEAS DE TRAYECTORIA.....	33
2.15.3 LÍNEAS DE TRAZA.....	34

CAPITULO III. MODELACIÓN FÍSICA

3.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO FÍSICO.....	35
3.2 NÚMEROS ADIMENSIONALES.....	37
3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA.....	40
3.3.1 DATOS DEL PROTOTIPO.....	42
3.3.2 DATOS DEL MODELO A ESCALA.....	43
3.4 ARREGLOS ESTUDIADOS.....	46
3.5 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	47
3.5.1 EQUIPO DE MEDICIÓN UTILIZADO.....	47
3.5.2 TIEMPO DE MEZCLADO.....	48
3.5.2.1CURVA DE CALIBRACIÓN.....	49
3.5.3 FLUIDINÁMICA.....	50
3.5.4 PRESIÓN DINÁMICA.....	51
3.5.5 MEDICIÓN CON EL PIV.....	52

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL TIEMPO DE MEZCLADO.....	54
4.1.1 TIEMPO DE MEZCLADO PARA UN FLUJO DE 4.9 LTS/MIN.....	54
4.1.2 TIEMPO DE MEZCLADO PARA UN FLUJO DE 3.0 LTS/MIN.....	58
4.1.3 COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE MEZCLADO.....	62
4.2 ANÁLISIS DE ESCORIA.....	71
4.2.1 PARA UN FLUJO DE 4.9 LTS/MIN.....	71
4.2.2 PARA UN FLUJO DE 3.0 LTS/MIN.....	73
4.3 ANÁLISIS DE PRESIÓN.....	74

CAPITULO V. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	77
5.2 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura 1. Proceso de colada continua.....	11
Figura 2. Horno olla o cuchara (LF).....	13
Figura 3. Inyección de gas argón.....	15
Figura 4. Tapones porosos.....	17
Figura 5. Burbujeo y jet.....	18
Figura 6. Definición del tiempo de mezclado.....	19
Figura 7 Clasificación del campo de flujo.....	22
Figura 8. Desplazamiento radial del jet de burbujas.....	23
Figura 9. Presiones medidas en la pared del modelo.....	24
Figura 10. a) Fuerza de arrastre, b) masa virtual, c) fuerza de ascensión, d) fuerza turbulenta dispersa.....	26
Figura 11. Esquema de magnitudes de fuerzas de no arrastre.....	27
Figura 13. Principios básicos de PIV.....	31
Figura 14. Áreas de análisis.....	32

CAPITULO III

Figura 15. a) Geometría del Prototipo, b) Geometría del modelo a escala de 1/7 del horno olla con las posiciones estudiadas.....	42
Figura 16 a) Geometría del modelo a escala de 1/7 del horno olla con las posiciones estudiadas, b) ubicación de los sensores de conductividad.....	43
Figura 17. Equipo de medición utilizado para el tiempo de mezclado.....	43

INDICE

Figura 18. Esquema del Modelo Físico para la medición del tiempo de mezclado.....	48
Figura 19. Curva de concentración.....	49
Figura 20. Esquema del modelo físico para la medición de presión.....	50
Figura 21. Plano medido con el PIV.....	53

CAPITULO IV

Figura 22. Tiempo de mezclado caso 1 con un flujo de 4.9 lts/ min.....	55
Figura 23. Tiempo de mezclado caso 2 con un flujo de 4.9 lts/ min.....	55
Figura 24. Tiempo de mezclado caso 3 con un flujo de 4.9 lts/ min.....	56
Figura 25. Tiempo de mezclado caso 4 con un flujo de 4.9 lts/ min.....	56
Figura 26. Fotografías de colorante caso 1 (4.9 lts/min).....	57
Figura 27. Fotografías de colorante caso 2 (4.9 lts/min).....	57
Figura 28. Fotografías de colorante caso 3 (4.9 lts/min).....	57
Figura 29. Fotografías de colorante caso 4 (4.9 lts/min).....	57
Figura 30. Tiempo de mezclado caso 1 con un flujo de 3.0 lts/ min.....	58
Figura 31. Tiempo de mezclado caso 2 con un flujo de 3.0 lts/ min.....	59
Figura 32. Tiempo de mezclado caso 3 con un flujo de 3.0 lts/ min.....	59
Figura 33. Tiempo de mezclado caso 4 con un flujo de 3.0 lts/ min.....	60
Figura 34. Tiempo de mezclado caso 5 con un flujo de 3.0 lts/ min.....	60
Figura 35. Fotografías de colorante caso 1 (3.0 lts/min).....	61
Figura 36. Fotografías de colorante caso 2 (3.0 lts/min).....	61
Figura 37. Fotografías de colorante caso 3 (3.0 lts/min).....	61
Figura 38. Fotografías de colorante caso 4 (3.0 lts/min).....	61
Figura 39. Fotografías de colorante caso 5 (3.0 lts/min).....	62
Figura 40. Comparación de los tiempos de mezclado.....	62

INDICE

Figura 41. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 1(3.0 lts/min.)..	63
Figura 42. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 1(4.9 lts/min.)..	64
Figura 43. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 2(3.0 lts/min.)..	65
Figura 44. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 2(4.9 lts/min.)..	66
Figura 45. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 3(3.0 lts/min.)..	67
Figura 46. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 3(4.9 lts/min.)..	68
Figura 47. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 4(3.0 lts/min.)..	69
Figura 48. Perfiles de velocidad y líneas de corriente del caso 4(4.9 lts/min.)..	70
Figura 49. Fotografía de la apertura de escoria del caso 1 (4.9 lts./min.).....	72
Figura 50. Fotografía de la apertura de escoria del caso 2 (4.9 lts./min.).....	72
Figura 51. Fotografía de la apertura de escoria del caso 3 (4.9 lts./min.).....	72
Figura 52. Fotografía de la apertura de escoria del caso 4 (4.9 lts./min.).....	73
Figura 53. Fotografía de la apertura de escoria del caso 1 (3.0 lts./min.).....	73
Figura 54. Fotografía de la apertura de escoria del caso 2 (3.0 lts./min.).....	73
Figura 55. Fotografía de la apertura de escoria del caso 3 (3.0 lts./min.).....	74
Figura 56. Fotografía de la apertura de escoria del caso 4 (3.0 lts./min.).....	74
Figura 57. Fotografía de la apertura de escoria del caso 5 (3.0 lts./min.).....	74
Figura 58. Comparación de datos obtenidos de presión.....	76

CAPITULO I

1.1 RESUMEN

En éste proyecto de investigación se realizó la simulación física de la inyección de gas Argón en el Horno Olla por el fondo, modificándole número y posición de los medios porosos con el fin de lograr una óptima localización de los tapones que garanticen, mínima estratificación de temperatura, una buena homogenización química y mínima erosión en las paredes. Para lo cual se construyó respetando los criterios de similitud un modelo físico en Acrílico, con la finalidad de representar en forma fielmente la dinámica del flujo de Acero en el Horno Olla, para los diferentes casos estudiados, donde se vario la posición, el número de tapones y el flujo de gas inyectado. Mediante técnicas de conductimetría se obtuvieron los tiempos de mezclado en dos diferentes posiciones una en la parte superior y otra en la parte inferior de la Olla. Para estudiar el patrón de flujo se tomaron videos empleando la técnica de colorimetría utilizando como trazador colorante vegetal, así mismo, se evaluó en forma cualitativa la turbulencia sobre la superficie del líquido, simulando la apertura de la capa de escoria con aceite vegetal. Se utilizó la técnica de Velocimetría de Imagen de Partícula (PIV) para medir la distribución de velocidad instantánea en un plano sobre el eje de simetría de la inyección de aire del modelo físico. Encontrando que los dos mejores casos fueron cuando se utilizó un solo tapón (caso 1) con un flujo de 3.0 lts /min., y cuando se utilizaron dos tapones a 2/3 del radio (caso 2) y un flujo de 4.9 lts/min., siendo mejor este último ya que la turbulencia sobre las paredes se reduce considerablemente.

1.2 ABSTRACT

In this research project was conducted physics simulation of the injection of Argon gas in the Ladle Furnace by the bottom, modifying number, position and gas flow injection to achieve an optimal location of the porous plug that guarantees: minimum thermal stratification, homogenization chemistry and minimal erosion on the walls. For that which we built a physical model in acrylic, respecting the criteria of similarity, in order to represent faithfully the dynamics flow of the steel in the ladle furnace, for different cases studied, where several positions, the number of plugs and the flow of gas injected. By conductivity techniques were obtained mixing time in two different positions one at the top and one on the bottom of the model. To study the path lines of flow were taken videos using the colorimetry technique of using as tracer red vegetal color, also was evaluated on a qualitative way the turbulence on the surface of the liquid, simulating the opening of the top slag with vegetable oil. We used the technique Particle Imaging Velocimetry (PIV) to measure the distribution of instantaneous speed in a plane on the axis of symmetry of the air injection of physical model. Finding that the best two cases were: when using a single porous plug (case 1) with a flow of 3.0 liters / min. and when using two plugs to 2/3 radius (case 2) and a flow of 4.9 liters / min. the latter being better because the turbulence on the walls is reduced significantly.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Realizar simulaciones físicas del patrón de agitación del Acero líquido al burbujear gas argón a través de un tapón poroso por el fondo de la olla utilizada en TERNIUM HYLSA.

1.3.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Estudiar el patrón de flujo que se presenta en el Horno Olla durante la inyección de aire con uno y dos tapones.
- Definir la localización optima y el número de tapones porosos para obtener mejores tiempos de mezclado y menor erosión en las paredes.
- Analizar cualitativamente la turbulencia sobre la superficie para los diferentes arreglos.

1.4 INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica mexicana a pesar de las últimas crisis en que se ha visto inmersa, es hoy en día un pilar importante en la economía de nuestro país, ya que en los últimos años ha llegado a representar hasta el 2.1% del PIB nacional (193,812 millones de pesos), 9.1% del industrial y 13.4% del sector manufacturero, además de generar más de 53,700 empleos directos y más de 550,000 indirectos, asimismo se ha verificado que se exporta Acero mexicano a más de 100 países, éste sector es el principal consumidor de energía eléctrica el 7.4% del total nacional y el 30.5 % del total nacional de gas natural sólo después de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es el segundo usuario del ferrocarril y ocupa el lugar 15 en producción de Acero a nivel mundial y el número 2 a nivel Latinoamericano. Así pues, la importancia de éste ramo de la industria salta a la vista con estas estadísticas dadas a conocer recientemente por la CANACERO ^[1,25].

En la metalurgia secundaria se lleva a cabo diferentes procesos de refinación en los cuales se pretende elevar la calidad del Acero y es empleada independientemente de la manera de obtención del Acero ya sea por Alto Horno (AH), Horno Básico de Oxígeno (BOF) u Horno de Arco Eléctrico como unidad de fusión primaria del mineral de hierro y/o chatarra. Los procesos antes mencionados tienen como función fundir la carga metálica y oxidar los elementos acompañantes hasta un cierto valor, lo cual se conoce como la metalurgia primaria.

El tratamiento de Acero en la Olla empezó aproximadamente hace 45 años, donde los procesos de desgasificado al vacío aparecieron con el fin de remover el hidrógeno en el Acero líquido. En los años 50's los procesos Dortmund-Hoerder (DH) y Ruhrstahl-Heraeus (RH) fueron muy populares. A mediados de los años 60's los procesos de desgasificación del Acero al vacío (VAD), el proceso ASEA-SKF y el proceso de decarburización con oxígeno al vacío

CAPITULO I

(VOD) aparecieron para fabricar Aceros al alto cromo, en los 70's el proceso de decarburización mediante la inyección de Oxígeno y Argón (AOD) fue introducido, y hasta la fecha es el proceso preferido para fabricar Aceros especiales y Aceros inoxidables.

La agitación del baño metálico por medio de un gas inerte, permite incrementar el rendimiento de las ferro – aleaciones, así como disminuir el tiempo total entre colada y colada, disminuir el contenido de Azufre hasta valores de 0.005 %, disminuir las inclusiones de sulfuro de manganeso no metálicas y disminuir la cantidad de gases disueltos como Hidrogeno y Nitrógeno. En general al obtener un Acero más limpio la consecuencia directa es obtener un producto con mejores propiedades mecánicas. Todos los fenómenos anteriores están estrechamente relacionados y son gobernados por los mecanismos de la convección y la difusión del transporte de momento, masa y energía, además, la turbulencia juega un papel muy importante en éste contexto y debe ser tomada en cuenta.

Recientemente ha venido creciendo el interés en la industria del Acero por entender la dinámica de fluidos, la transferencia de masa y los fenómenos de transferencia de calor que existen en la metalurgia de la olla, especialmente en los reactores agitados por la acción de plumas de gas inyectado por el fondo de los mismos con el fin de lograr una optimización del proceso. Para estudiar estos fenómenos se han utilizado modelos computacionales y experimentales.

La simulación matemática y física de los procesos de la fabricación del Acero ha sido muy importante en las dos últimas décadas ya que ha traído como resultado significativos avances en el procesamiento de materiales.

En éste estudio se pretende encontrar el número y la posición más adecuada de los tapones porosos con los siguientes objetivos: reducir las zonas estancadas, así como el tiempo de mezclado, homogenización de la temperatura y de la composición química, un menor desgaste en el refractario de las paredes, acelerar la cinética de las reacciones químicas y por tanto coadyuvar a obtener un producto de mejor calidad a un más bajo costo. Dadas

CAPITULO I

las limitaciones desde el punto de vista de costos y operacional para realizar experimentación en planta, se pretende hacer uso de la poderosa herramienta de la modelación física. Para lo cual se construyó un modelo en acrílico transparente a escala de 1/7 en donde los fluidos de trabajo que modelaron el Acero y el Argón fueron el Agua y el Aire.

1.5 ANTECEDENTES

Se han realizado numerosos esfuerzos durante las ultimas dos décadas para realizar investigaciones en las operaciones con agitación de gas en el Horno Olla. Estos estudios pueden clasificarse en tres categorías:

Modelos Físicos, Modelos Físicos y Matemáticos y Modelos Matemáticos^[2].

Debido a las dificultades en experimentar con el Acero desde el punto de vista operativo hasta el de los costos, la medición de las variables de proceso, como velocidades de ascenso de las burbujas, fracción volumétrica del gas, tamaño de la burbuja, etc., de ahí la necesidad de emplear los modelos físicos y matemáticos. En éste aspecto se han realizado bastantes contribuciones tal como la de Chakraborty^[3] en donde se construyó un modelo físico de Agua y Aire para estudiar el efecto del flujo de gas y la altura del baño líquido sobre el mezclado, donde se inyectó como soluto cloruro de potasio (KCL) a un baño de Agua destilada, para posteriormente poder utilizar la técnica de conductimetría y obtener los tiempos de mezclado al 99.5%, en éste trabajo se encontró que al disminuir la altura del baño líquido de Acero en el Horno Olla, disminuye tanto el tiempo de mezclado como el flujo de gas inyectado, cabe señalar que no se pueden comparar los tiempos de mezclado, pues ya que se vario la altura de baño. Oeters^[4] estudió el efecto del flujo de gas y la posición de la boquilla sobre el tiempo de mezclado mediante el uso de un modelo físico Aire-Agua, el afirma que cuando se inyecta con un solo tapón, la inyección debe realizarse en forma excéntrica para reducir las zonas muertas y por tanto el tiempo de mezclado. Más recientemente Pan^[5] realizó otro modelo físico Agua-Aire para estudiar el tiempo de mezclado, en éste trabajo se utilizó como trazador al cloruro de sodio (NaCl), en general como trazador se puede utilizar cualquier reactivo que modifique una propiedad medible en el fluido, pero que no interfiera con su patrón de flujo. Turkoglu y Farouk^[6] estudiaron el efecto de la relación de la altura del baño con el diámetro de la olla (H/D) y encontraron que una relación de 1.5 da un mezclado más eficiente y que en relaciones de menores de 1 se abre más fácilmente la capa de escoria con la inyección de

gas. Takatzuka e Iguchi^[7] estudiaron el movimiento angular de las burbujas empleando tres diferente modelos físicos cada uno con diámetro diferente y en cada uno trabajaron diferentes alturas, en estos trabajos se inyectó aire concéntricamente, en donde se determinó que el movimiento angular de las burbujas afecta las relaciones altura/diámetro entre 0.3-1.0, asimismo, se obtuvo una correlación para el tiempo de mezclado en donde se considera el movimiento angular de las burbujas. También dentro de los trabajo de investigación respecto ala inyección de gases a metales fundidos podemos encontrar algunas patentes, tal es el caso de la desarrollada por Aramaki^[8], en donde se diseño un sistema de inyección para la agitación vertical en la olla a través de un medio poroso.

M. Soder^[9] estudió la agitación en la olla y su influencia en la remoción de las inclusiones, en donde afirma que las colisiones turbulentas y la flotación de Stokes son los principales mecanismos de remoción cuando se agita el baño por inducción magnética, asimismo, menciona que cuando la inyección se realiza por el fondo con gas no hay concordancia entre los modelos reportados, y que se requiere mucho más estudio para poder entender éste mecanismo de remoción que es el más importante.

K.Ogawa^[10] y col. estudiaron el tiempo de mezclado y el coeficiente de transferencia de masa en la interfase Metal-Escoria en un sistema Aire-Agua. En éste trabajo se modelaron dos mecanismos de agitación, por burbujeo de gas y por inducción magnética, éste último se modelo mediante el efecto de una pequeña bomba inmersa en el fluido. Ellos encontraron que el tiempo de mezclado por inducción es menor que el obtenido por burbujeo, pero mayor el coeficiente de transferencia de masa para la agitación por burbujeo. Atribuyendo esto último a la alta velocidad fluctuante y alto valor de la turbulencia en la región de la interfase metal/escoria y al flujo de fluidos en el interior del baño. Miao^[11] y col. Estudiaron el fenómeno de tiempo de mezclado en un modelo físico utilizando seis diferentes arreglos de los tapones, y encontraron que la configuración de los tapones tiene una gran influencia en la eficiencia del mezclado recomendando un arreglo de dos tapones a $\frac{1}{2}$ del

CAPITULO I

diámetro de la Olla, ellos también propusieron una ecuación empírica en la que relacionan el tiempo de mezclado en función del número de tapones porosos encontrando buena concordancia con los datos obtenidos en forma experimental.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Es bien conocido que la Cuchara Metalúrgica, mejor conocida como Horno Olla o simplemente Olla de Refinación Secundaria es un reactor de gran importancia en cualquier proceso moderno de producción de Acero de alta calidad, puesto que justo ahí se afina la composición química deseada del Acero, además ahí se eliminan los gradientes de concentración de solutos, obteniéndose un baño metálico más homogéneo tanto química como térmicamente. Para lograr el objetivo principal de la olla de refinación secundaria, se pueden emplear varias técnicas de agitación, como puede ser el uso de la inyección de gas Argón por la parte superior a través de lanzas rotatorias, por medio agitación electromagnética aprovechando las propiedades magnéticas del Fe y por medio de inyección de una pluma de gas Argón por el fondo, de las mencionadas, esta última es la más empleada por su facilidad en operación y economía.

Existen bastantes variables que determinan la eficiencia de la agitación producida por la inyección de gas por el fondo del Horno Olla tales como: la posición y el número de los tapones, flujo de gas y geometría de la olla. Motivo por el cual un solo estudio no es aplicable para todos los casos; siendo necesario encontrar el flujo de gas y posición de inyección ideal para cada tipo de geometría del Horno Olla.

La empresa TERNIUM HYLSA utiliza un arreglo para inyectar gas por el fondo a través de un tapón poroso. Por lo que existe la necesidad de conocer su eficiencia en el mezclado del acero y los patrones de flujo que se originan en el interior de la olla, para después mejorar el proceso, variando posiciones, número de tapones y cantidad de gas inyectado con el fin de encontrar un arreglo más óptimo que mejore el tiempo de mezclado y disminuya la turbulencia en las paredes del Horno olla.

MARCO TEORICO

CAPITULO II

2.1 Colada Continúa

El proceso de colada continua se desarrolló en Europa en los años cincuenta para producir secciones de acero directamente a partir de acero líquido. Anteriormente se producían lingotes que, más tarde, se laminaban en rodillos para formar las palanquillas

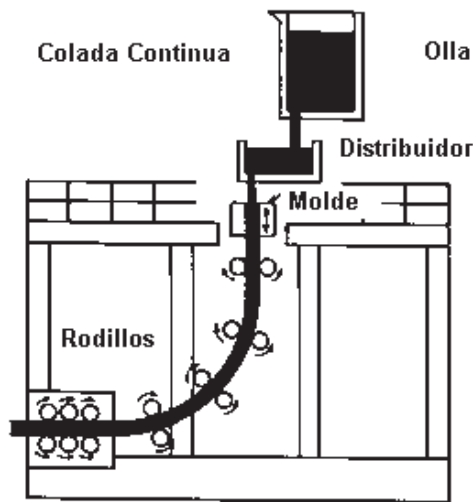


Figura 1. Proceso de Colada Continua.

Una breve descripción del proceso de colada continua es la siguiente ^[12]:

La chatarra de acero y el mineral son fundidos en un horno. El acero líquido es vertido del horno a la olla donde es sometido a diferentes procesos metalúrgicos antes de alcanzar la colada continua, por ejemplo el exceso de oxígeno y azufre son removidos del acero líquido, estas etapas son conocidas como metalurgia secundaria y el objetivo principal es ajustar la composición correcta del acero. El acero líquido es protegido del aire atmosférico por medio de una capa de escoria que se encuentra flotando en la superficie del baño, la cual debe ser de menor densidad y más bajo punto de fusión.

CAPITULO II

La olla que contiene metal líquido es llevada a la maquina de colada continua donde el acero es vaciado de la olla al distribuidor por medio de una boquilla cerámica llamada buza de alimentación. Esta buza es utilizada para cubrir al acero líquido del aire cuando éste es vaciado de la olla al distribuidor. Una válvula a la salida de la olla controla la velocidad de colada del acero. El acero en el distribuidor es nuevamente cubierto por una capa de escoria para evitar excesivas pérdidas de calor y la reoxidacion del mismo por medio del contacto con el aire.

El acero líquido que se encuentra en el distribuidor sale de éste a través de una buza sumergida (SEN) hacia el molde, el cual le da la forma final al semiproducto con lo que se obtiene planchón, tocho ó palanquilla. Las paredes del molde, que usualmente son fabricadas de cobre, son enfriadas por medio de agua, lo cual causa que él acero solidifique en estos lados. Estas partes usualmente están oscilando para prevenir la adherencia del acero sobre las caras, además de contar con polvo o lubricantes para tales efectos.

Una serie de rodillos de tracción se encuentran por debajo de la máquina de colada, los cuales tienen como función extraer el acero solidificado del molde de colada. La velocidad de los rodillos es ajustada para que el material que sale del molde iguale la velocidad con la cual entra el fluido al distribuidor. En el momento que el planchón abandona el molde éste es rociado con chorros de agua, lo que provoca que la capa solidificada de acero (shell) crezca de los lados hacia el centro del planchón. Se sabe que el punto donde el planchón se encuentra solidificado totalmente es generalmente a diez metros por debajo del molde de colada.

Al final de los rodillos de tracción y una vez que el planchón esta totalmente solidificado es cortado en secciones con ayuda de un soplete. Estas secciones son procesadas posteriormente, por ejemplo, estas son laminadas en caliente o frío para darles forma de láminas, barras, rieles y otras formas.

2.2 Metalurgia Secundaria.

Al finalizar la metalurgia primaria (ya sea en el Convertidor BOF o bien en el Horno de Arco Eléctrico), el acero líquido es vaciado en el Horno Olla o Cuchara figura 2.



Figura 2. Horno Olla o Cuchara (LF= Ladle Furnace).

El proceso de Refinación Secundaria se realiza mientras el acero líquido se encuentra en el horno olla (LF), antes de ser vaciado a la máquina de colada continua. En este proceso se lleva a cabo la desoxidación del acero, la desulfuración, recalentamiento, homogenización de temperatura y el ajuste final de su composición química, antes de vaciarlo al distribuidor. La producción de un acero limpio depende de la combinación de estos procesos. La agitación del acero líquido es indispensable para lograr la optimización de estos procesos ^[3].

2.2.1 Desoxidación.

La desoxidación se realiza a través de la adición de un elemento con gran afinidad al Oxígeno.

El aluminio es elemento con mayor afinidad al oxígeno y es usado cuando se requiere contenidos de Oxígeno muy bajos. La reacción es:



Dando como resultado inclusiones de alumina en el acero. Las inclusiones deben ser removidas de alguna forma. Por lo tanto, la agitación puede promover la colisión y aglomeración de inclusiones para lograr la flotación de estas, ya que las fuerzas de flotación aumentan. Se pueden emplear varias técnicas de agitación, como puede ser el uso de la inyección de gas argón por la parte superior a través de lanzas rotatorias o por medio de inyección a través de un tapón poroso de gas Argón por el fondo ^[9].

2.2.2 Desulfuración.

La concentración de azufre en el convertidor BOF y el horno de arco eléctrico (EAF) es generalmente de 0.01 – 0.02%, aunque hay aceros que demandan el 0.001%. A fin de satisfacer las especificaciones de una baja concentración de Azufre éste es eliminado mediante reacciones químicas entre la escoria y el metal líquido, bajo condiciones reductoras donde el azufre es transferido desde el acero a la escoria, a través de la interfaz del metal y escoria. Esta interacción depende esencialmente de la agitación creada por el argón.

La reacción química básica en la desulfuración es:



() en la escoria y [] en el acero ^[13].

2.2.3 Recalentamiento.

Un calentamiento de hasta 3°C por minuto se logra por un conjunto de electrodos de grafito que se bajan dentro de la capa de la escoria, justo por encima de la superficie del acero líquido ^[14].

2.2.4 Homogenización de Composición Química y Temperatura.

La inyección de gas Argón en el acero fundido en el horno olla se utiliza extensamente en la industria metalúrgica para homogenizar la composición química y la temperatura, además ayuda a la flotación de inclusiones no metálicas en el acero ^[05].

2.3 Medios de Agitación del Metal Líquido en el Horno Olla.

Se pueden emplear varias técnicas de agitación, como puede ser el uso de la inyección de gas argón por la parte superior a través de lanzas rotatorias o por medio de inyección a través de un tapón poroso de gas Argón por el fondo como se muestra en la figura 3 y la agitación electromagnética (EMS). El gas realiza el mezclado durante su recorrido hacia la superficie. Promueve las reacciones químicas, maximiza la homogenización de temperaturas y homogeniza la composición. Por otra parte a través de la generación de turbulencia puede esta ayudar también a la aglomeración de las inclusiones más pequeñas y su flotación hacia la escoria.

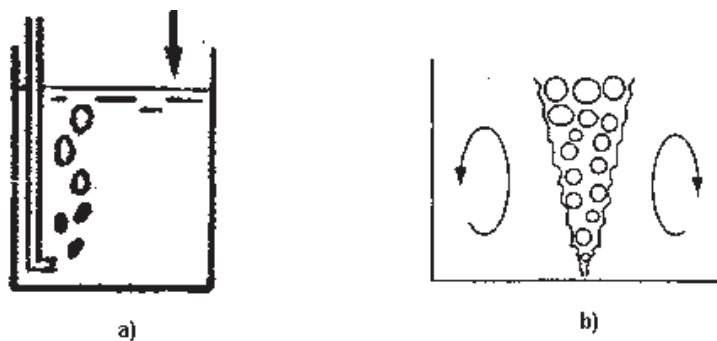


Figura 3. Inyección de gas argón a) a través de una lanza y b) a través de un tapón poroso ^[16].

2.3.1 Inyección de Gas Argón a través de una Lanza.

La inyección de gas a través de una lanza sumergida sobre el baño es la forma más simple de inyectarlo, nos promueve una buena eliminación de azufre (S) y fósforo (P), protege el revestimiento del horno olla y requiere poca inversión respecto a los otros métodos. Sin embargo, se tiene una mala eliminación del oxígeno y nitrógeno, la capa superficial se vuelve muy turbulenta y se crean importantes zonas muertas dentro del baño (zona muerta son las áreas del baño de acero donde la circulación es escasa o nula) ^[14,15].

2.3.2 Inyección de Gas Argón a través de un Tapón Poroso.

La inyección de gas a través de un tapón poroso por la parte inferior de la olla en el baño de acero nos proporciona pocas zonas muertas, una agitación uniforme, un acero muy limpio, la posibilidad de agitar el horno continuamente en cualquier parte, un efecto de presión ferroestática maximizado, bajos costos de inversión y operación. Sin embargo ocasiona un fuerte desgaste en el material refractario de las paredes, un tipo de construcción muy limitado y riesgos de fracturas ^[14,15].

2.4 Tipos de Tapones Porosos.

El tapón poroso es una tobera de material refractario por el cual se puede inyectar un gas dentro de la olla de acero líquido. Existen dos tipos de tapones porosos: a) toberas porosas y b) toberas porosas con canales direccionales de flujo (figura 4). El tapón poroso encuentra su aplicación en la producción de aceros de alta calidad.

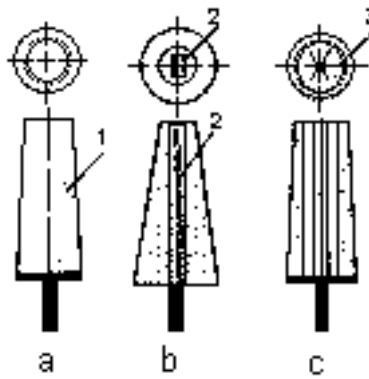


Figura 4. Tapones porosos: a) Tobera porosa, b) y c) Toberas porosas con canales direccionales ^[17].

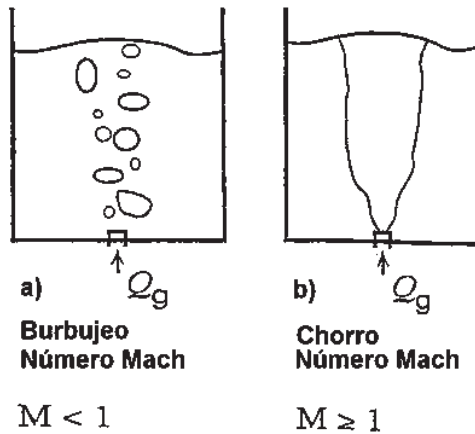
2.5 Patrones de Dispersión de Burbujas

Existen dos tipos de patrones de dispersión de burbujas en los sistemas agitados por el fondo, a) burbujeo y b) jet, como se muestra en la figura 5. La condición crítica entre los dos patrones puede describirse por:

$$M = u_n / c = 1 \quad (3)$$

$$u_n = Q_g / (\pi d_{ni}^2 / 4) \quad (4)$$

Donde M es el número de Mach a la salida del tapón, u_n es la velocidad del gas a la salida del tapón, c es la velocidad del sonido, Q_g es el flujo volumétrico del gas y d_{ni} es el diámetro interior del tapón.

Figura 5.a) Burbujeo y b) Chorro^[18].

El chorro es controlado principalmente por las fuerzas inerciales del gas, formando una columna de gas en el baño. Muchas burbujas pequeñas son formadas en la interfase gas líquido y el baño líquido es forzado a moverse debido a las fuerzas cortantes en la interfase. Bajo las condiciones de burbujeo, sin embargo, las burbujas son generadas sucesivamente a la salida del tapón, y el flujo líquido es afectado por las fuerzas inerciales del gas inyectado así como las fuerzas de flotación que actúan sobre las burbujas en el baño^[18].

2.6 Tiempo de Mezclado en el Horno Olla

La eficiencia de muchas operaciones químicas que se llevan a cabo en la metalurgia de la Olla ha requerido el estudio específico relacionado con el fenómeno de tiempo de mezclado.

El concepto de tiempo de mezclado ha sido empleado extensamente como uno de los indicadores del grado de homogenización del baño de acero líquido en el horno olla. Numerosas investigaciones se han realizado, usando un baño de agua desionizada y un sensor de conductividad eléctrica. Los modelos de agua son comúnmente usados como medios para representar el acero líquido ya que la viscosidad cinemática es aproximadamente la misma^[2, 4, 18, 19], mientras que soluciones de cloruro de potasio son usadas como trazadores. El tiempo de

CAPITULO II

mezclado puede ser determinado por la historia de la conductividad eléctrica en el baño líquido.

En algunos procesos de refinación secundaria tales como el proceso de desulfurización, existe una delgada capa superior de escoria que cubre el metal líquido. El mezclado en esta capa escoria juega un rol esencial en las reacciones metal escoria. Esto es, la eficiencia del proceso es controlada principalmente por la transferencia de masa en la interfase metal escoria. Aceites transparentes, tales como el aceite de silicón, son usados para modelar esta capa. Sin embargo, el tiempo de mezclado es difícil de medir con los métodos convencionales de conductimetría en el aceite ya que la solución de KCL es insoluble en el aceite ^[18].

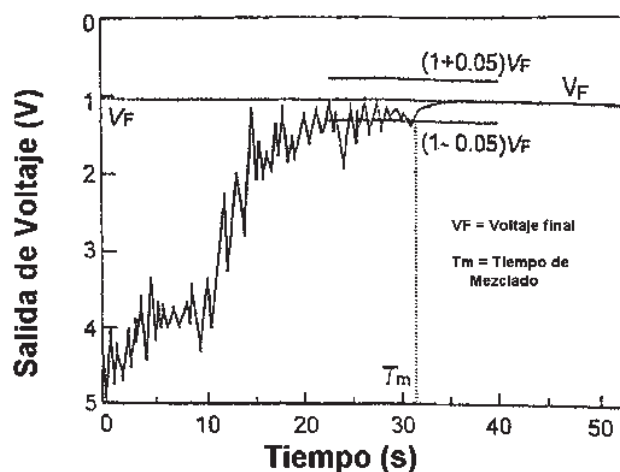


Figura 6. Definición del Tiempo de Mezclado ^[18].

El tiempo de mezclado es definido como el tiempo en el cual los cambios de concentración de iones tienen una desviación menor del $\pm 5\%$ en estado estacionario en un baño líquido como se muestra en la figura 6. Esta definición se refiere al criterio del tiempo en que tarda en mezclarse al 95 % ^[18]. El tiempo de mezclado se reduce con un incremento en el flujo de gas ^[19].

Frecuentemente el tiempo de mezclado, ha sido aplicado para representar el estado de agitación en reactores. Se han realizado muchos estudios para

CAPITULO II

cuantificar experimentalmente el tiempo de mezclado como una función de diversas variables de operación (ρ , g , d , H , Q , μ , etc), usando una escala apropiada para los modelos de agua ^[2].

Nakanishi ^[2] y colaboradores fueron los primeros en graficar experimentalmente los datos de tiempo de mezclado contra relaciones globales de disipación de energía específica para modelos de agua con agitación de gas. Estos autores proporcionaron la siguiente correlación entre tiempo de mezclado y relaciones de disipación de energía:

$$\tau_m = 12680 \varepsilon_m^{-0.4} \quad (5)$$

En estudios más recientes numerosos investigadores han proporcionado diversas correlaciones según las condiciones experimentales. En algunos experimentos y análisis, la energía cinética de la entrada de los gases la incluyen en las expresiones de disipación de energía mientras otros la desprecian. Haciendo un balance de energía, la contribución de energía cinética del gas inyectado es insignificante para todos los propósitos prácticos (menos del 5%). La energía potencial proporcionada por el ascenso de las burbujas de gas puede ser considerada como el modo de energía que abastece al sistema. Tomando en cuenta estas consideraciones se han formulado varias expresiones para estimar la energía potencial introducida por la inyección de gas. Algunas expresiones comunes aplicadas a estimar la relación de energía potencial introducida, ε_m , se muestran en la tabla 1. Las contribuciones del trabajo de expansión debidas a la presión y temperatura cerca de la tobera y la transferencia de energía cinética del gas cerca de la tobera son ignoradas por la poca relevancia que tienen ^[2].

Tabla 1. Varias expresiones de relaciones de energía potencial introducida en sistemas agitados por gas y sus estimaciones en un sistema de agua para una situación experimental típica ^[2].

Investigators	Expressions for total specific energy input rate	Value of total specific energy input rate (W/t)
Nakanishi <i>et al.</i> ^[47]	$\frac{0.0285 \cdot QT_L}{W} \log \left(1 + \frac{L}{148} \right)$ [<i>L</i> (cm); <i>Q</i> (Nl/min); <i>W</i> (t)]	14.54
Themelis and Stapurewicz ^[53]	$\frac{742 \cdot QT_L}{W} \ln \left(1 + \frac{L}{10.34} \right)$ [for water model only; <i>Q</i> (m ³ /s)]	2.5
Mazumdar and Guthrie ^[56]	$\frac{\rho_L g Q L}{\rho_L \pi R^2 L}$ [<i>Q</i> (m ² /s)]	1.13
Sinha and Mcnallan ^[58]	$\frac{854 \cdot QT_L}{W} \log \left(1 + \frac{\rho_L g L}{P_a} \right)$ [<i>Q</i> (m ³ /s)]	1.3
Krishnamurthy <i>et al.</i> ^[55]	$\frac{4QP_a T_L}{298.2\pi D^2 L} \ln \left(1 + \frac{\rho_L g L}{P_a} \right)$ [<i>Q</i> (Nm ³ /s)]	1.29

2.7 Clasificación del Campo de Flujo en un Baño con Inyección de Gas por el Fondo.

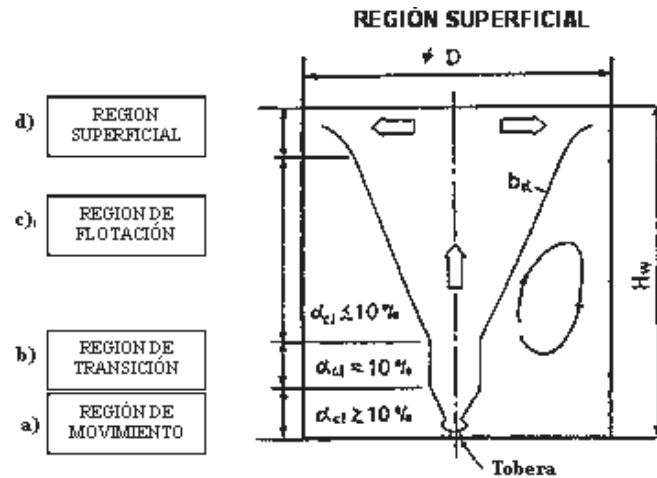


Figura 8. Clasificación del Campo de Flujo con Inyección Inferior del Gas en el Horno Olla ^[18].

El campo de flujo de un jet de burbujas vertical en un baño puede ser dividido en cuatro regiones con respecto a la distancia axial desde la salida de la tobera como se muestra en la figura 8. Estas son nombradas a) movimiento, b) transición, c) flotación y d) región superficial.

El flujo en la región de movimiento está principalmente gobernado por las fuerzas inerciales del gas inyectado, mientras que las fuerzas de flotación son mayores en la región de flotación tomando el papel principal. La razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación es conocida como el número modificado de Froude. Conforme el número F_{rm} es mayor, la región del movimiento aumenta ^[10].

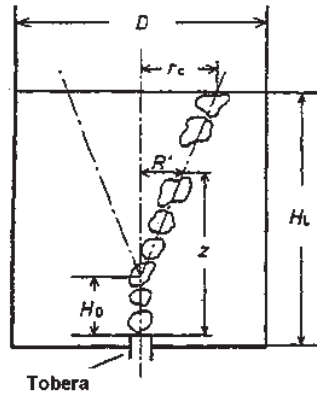


Figura 7. Desplazamiento radial del chorro de burbujas ^[18].

Un esquema del desplazamiento radial del chorro de burbujas se muestra en la figura 7. Cerca de la salida del tapón el jet de burbujas esta influenciado principalmente por las fuerzas inerciales hasta alcanzar una altura vertical H_0 . Conforme la influencia de las fuerzas inerciales se debilita el jet de burbujas comienza a desplazarse alrededor del eje de la olla. Éste desplazamiento radial se va incrementado conforme el chorro de burbujas se acerca a la superficie. De acuerdo a la propuesta de Ishibashi para calcular la altura de penetración del chorro de gas inyectado horizontalmente, H_0 es correlacionado como una función del número modificado de Froude. Éste representa la relación de las fuerzas inerciales del gas inyectado, y las fuerzas de flotación de las burbujas, de éste modo ^[18]:

$$H_0 / d_n = 2Fr_m^{0.25} \quad (6)$$

$$Fr_m = \rho_g Q_g^2 / \rho_l g d_{ni}^5 \quad (7)$$

Donde ρ_g es la densidad del gas y ρ_l es la densidad del líquido.

El desplazamiento radial del jet de burbujas esta dado por:

$$R' = (z - H_0)r_c / (H_L - H_0), \quad z \geq H_0 \quad (8)$$

$$r_c = 0.37R \quad (9)$$

Donde R es el radio de la Olla.

2.8 Presión

Se define presión como el cociente entre la componente normal de la fuerza sobre una superficie y el área de dicha superficie.

Existen dos categorías principales de presión de fluido: presión estática y presión dinámica.

La presión estática es aquella que se registra durante un proceso en régimen, es decir, cuyo valor permanece invariante en el tiempo (constante, figura 9). Presión dinámica es la presión de impacto o de choque. Se trata de una presión instantánea que normalmente se la asocia a un impacto o choque (figura 9). Esta presión es la que se ejerce sobre las paredes del refractario de la olla, por lo que una fluctuación mayor de esta trae consigo un desgaste rápido del refractario.

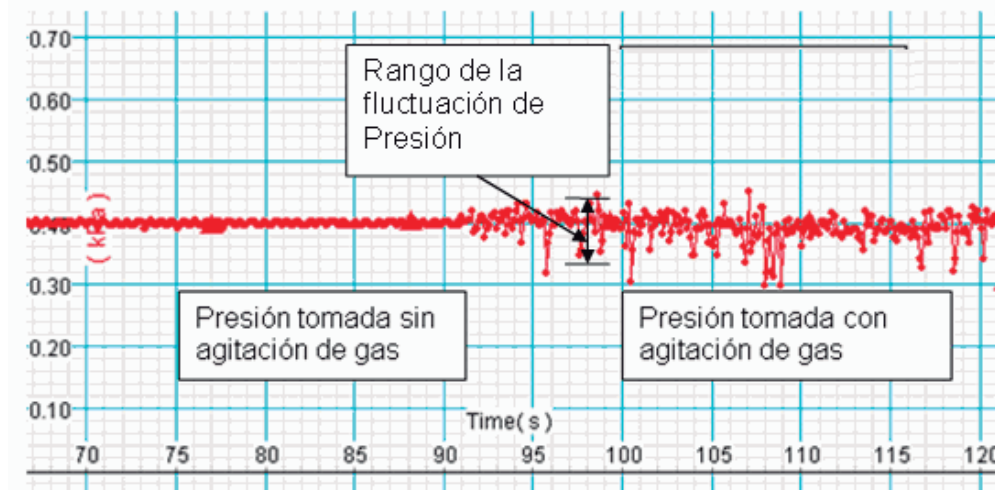


Figura 9. Presiones medidas experimentalmente en la pared del modelo de agua.

2.9 Coeficiente de Fricción (C_f).

El coeficiente de fricción es un parámetro adimensional definido como el cociente entre el esfuerzo cortante de las paredes y la presión dinámica de referencia.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2} \quad (10)$$

Donde τ_w es el esfuerzo cortante en las paredes, y ρ_{ref} v_{ref} son la densidad y velocidad de referencia respectivamente.

2.10 Coeficiente de Arrastre (C_d).

La manera en la cual el gas es disperso en la olla es gobernada por las fuerzas boyantes y por la interacción de las burbujas con la fase líquida. La interacción entre las fases es debida principalmente a las fuerzas de arrastre (figura 10). El arrastre es la componente paralela de la velocidad relativa de las burbujas del gas inyectado y es influenciado principalmente por las condiciones de flujo y la forma de las burbujas. Hay varias expresiones empíricas dadas por diferentes autores. Para una partícula de una forma dada que sufre el movimiento de fluidos incompresibles newtonianos, C_d sólo dependerá del número de Reynolds. En la región donde el flujo es turbulento el C_d , es independiente del número de Reynolds y tiene una gran dependencia con la forma de la partícula.

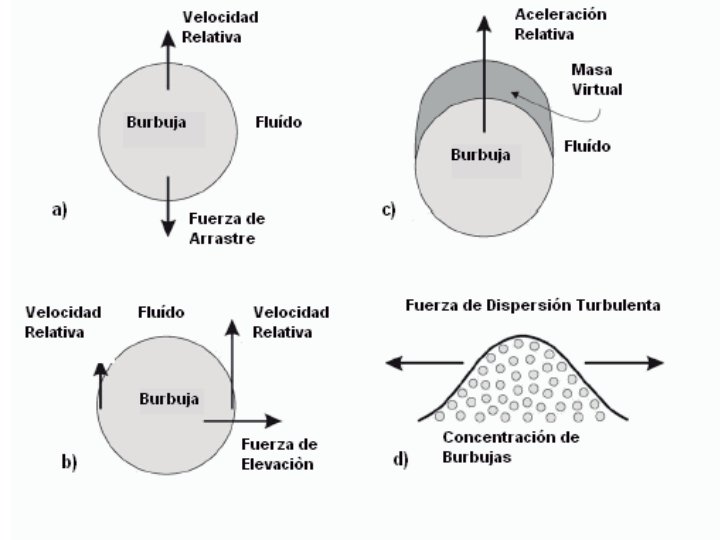


Figura 10. a) Fuerza de arrastre, b) masa virtual, c) fuerza de ascensión, d) fuerza de dispersión turbulenta ^[20].

2.11 Fuerzas de No Arrastre.

Cuando un cuerpo es acelerado a través de un fluido, hay una aceleración correspondiente del fluido que se encuentra desplazado por el trabajo realizado por el cuerpo. Éste trabajo adicional se refiere al efecto virtual de masa, por consiguiente hay una fuerza necesaria para acelerar el fluido circundante debido a la presencia de la fase dispersa. Esta fuerza se puede calcular por:

$$F_{\alpha}^{VM} = r_{\beta} \rho_{\alpha} C_{VM} \left(\frac{D_{\beta} U_{\beta}}{Dt} - \frac{D_{\alpha} U_{\alpha}}{Dt} \right) \quad (11)$$

El término dentro del paréntesis es la diferencia de aceleraciones entre ambas fases. Las fuerzas de elevación de la partícula se deben a la rotación de la partícula. Esta rotación puede ser importada por un gradiente de la velocidad de fase continua o se podrá importar de cualquier otra fuente, como el contacto y la recuperación de partículas de la superficie de una pared ^[29.].

Es posible definir el coeficiente de la fuerza de elevación como una compleja función de las propiedades del fluido (tamaño de burbuja y vorticidades de flujo) por medio de la ecuación siguiente:

CAPITULO II

$$F_{\alpha}^L = r_{\beta} \rho_{\alpha} C_L (U_{\beta} - U_{\alpha}) \times (\nabla \times U_{\alpha}) \quad (12)$$

El coeficiente de elevación C_L es 0.5 para flujo no viscoso alrededor de la esfera, pero puede tomar valores de 0.01 para flujo viscoso.

Las fuerzas de dispersión turbulenta surgen por el efecto del impulso transferido de la fase líquida a las burbujas y se da por:

$$F_{TD} = \rho_l k_l C_{TD} \nabla \alpha_l \quad (13)$$

Donde C_{TD} es un parámetro que esta en el rango de 0.1 – 1.0 ^[29].

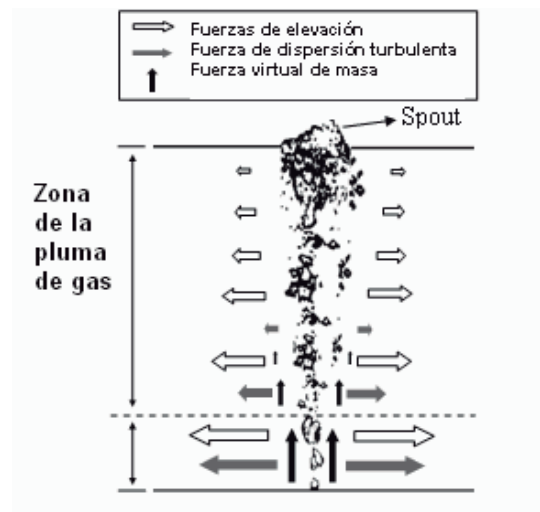


Figura 11. Esquema de magnitudes de fuerzas de no arrastre a lo largo del chorro de burbujas ^[2].

2.12 Conductividad Electrolítica.

La conductividad electrolítica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de

CAPITULO II

proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación ^[21].

La conducción de la corriente eléctrica en agua, puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos



Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico.

La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los conductores metálicos obedecen a la Ley de Ohm, excepto en voltajes muy elevados y corrientes de frecuencia muy alta.

La conductancia específica o conductividad σ es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y está definida por la relación: ^[21]

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (15)$$

Donde:

J = Es la densidad de corriente, y

E = Es la carga eléctrica.

2.13 Tipos de Reactores

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora esta constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y esta gobernado por un algoritmo de control.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

Existen infinidad de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

2.13.1 Reactor Discontinuo

En el reactor discontinuo los reactantes se introducen en el reactor, se mezclan, se deja que reaccionen un tiempo determinado, y finalmente se descarga la mezcla resultante ^[26, 27]. Es esta una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque en cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor. También es conocido como reactor tipo Batch.

2.13.2 Reactor Continuo

Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción ^[27].

2.13.3 Reactor Flujo Pistón

Se caracteriza por que el flujo del fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel; en realidad, en éste reactor puede haber mezcla lateral en el fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria

CAPITULO II

de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo pistón es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos de los fluidos ^[26, 27].

2.13.4 Reactor de Mezcla Completa.

Es el reactor en el cual su contenido esta perfectamente agitado, y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del reactor ^[26, 27].

2.14 Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV).

La Velocimetría de imagen de partícula (PIV, sus siglas en ingles) es una técnica de láser pulsátil doble que se usa para medir la distribución de velocidad instantánea en un plano de flujo cuando se determina fotográficamente el desplazamiento de las partículas en el plano durante un intervalo muy breve.

Un sistema PIV se puede visualizar como una cámara que puede tomar una instantánea de la distribución de velocidad en cualquier plano deseado del flujo. La visualización común del flujo proporciona un cuadro cualitativo de los detalles de flujo. La PIV también ofrece una descripción cuantitativa precisa de varias cantidades de flujo como el campo de velocidad, y por lo tanto la capacidad para analizar numéricamente el flujo con el uso de los datos de velocidad obtenidos. Debido a la capacidad de campo completo, la PIV también se usa para validar paquetes computacionales de dinámica de fluidos CFD.

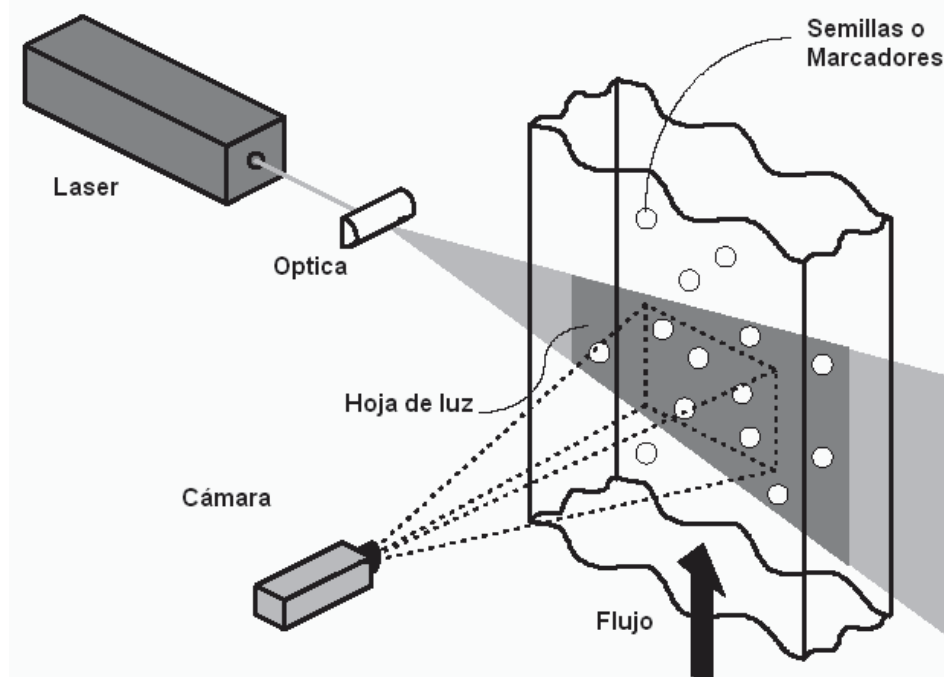


Figura 13. Principios básicos de PIV.

La técnica PIV se ha utilizado desde mediados de la década de los ochenta, y su uso y capacidades han aumentado en años recientes con las mejoras en las tecnologías de cámara de carga acoplada (CCD) y dispositivo de registro de imagen. La precisión, flexibilidad y versatilidad de los sistemas PIV con su capacidad de capturar imágenes de todo el campo con tiempo de exposición por debajo de los microsegundos, los ha convertido en herramientas extremadamente valiosas en el estudio de flujos supersónicos, las explosiones, la propagación de fuego, el crecimiento y colapso de burbujas, turbulencia y flujo no estacionario.

La técnica PIV para medición de velocidad consiste de dos pasos principales:

- Visualización.
- Procesamiento de imágenes.

El primer paso es sembrar el flujo de partículas adecuadas con la finalidad de indicar el movimiento del fluido. Luego un pulso de haz de luz de láser ilumina una delgada rebanada de campo de flujo en el plano deseado, y las posiciones de las

CAPITULO II

partículas en dicho plano se determinan cuando se detecta la luz dispersada por las partículas en un video digital o cámara fotográfica colocada en ángulos adecuados al plano iluminado. Después de un breve periodo Δt (usualmente en microsegundos), las partículas se iluminan de nuevo con un segundo pulso de haz de luz láser, y se registran sus nuevas posiciones. Con la información de estas dos imágenes de cámara sobrepuesta se determinan los desplazamientos Δs de partícula para todas las partículas, y la magnitud de la velocidad de las partículas en el plano iluminado por el haz de luz láser se determina a partir de $\Delta s/\Delta t$. La dirección del movimiento de las partículas también se determina a partir de las dos posiciones, de modo que se calculan las dos componentes de velocidad en el plano. Los algoritmos integrados de los sistemas PIV determinan las velocidades a miles de elementos de áreas llamados regiones de interrogación a través de todo el plano y muestran el campo de velocidad en el plano y muestran el campo de velocidad sobre el monitor de la computadora.

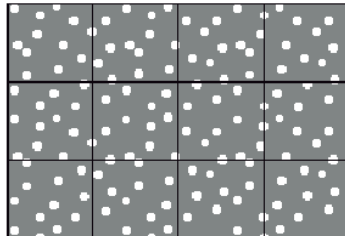


Figura 14. Áreas de análisis.

La técnica PIV se apoya en la luz láser dispersada por las partículas, y, si es necesario, el flujo se debe sembrar con partículas, también llamadas marcadores, con la finalidad de obtener una señal reflejada adecuada. Las partículas sembradas deben tener la capacidad de seguir las líneas de trayectoria en el flujo para que sus movimientos relativos al fluido sean representativos del flujo, y esto exige que la densidad de la partícula sea igual a la densidad del fluido (de modo que sean neutralmente flotantes) o las partículas serán tan pequeñas (del tamaño de μm) que sus movimientos relativos al fluido serán insignificantes. Para sembrar en un flujo de gas o de un líquido hay disposición de varias de estas partículas.

Con los sistemas PIV se pueden usar diversas fuentes de luz láser, como Argón, vapor de cobre y Nd:YAG, esto dependiendo de los requisitos para duración de pulso, potencia y tiempo entre pulsos.

Con la PIV también se pueden obtener otras propiedades del flujo, como la vorticidad y las razones de esfuerzo, y se pueden estudiar los detalles de la turbulencia. Los recientes avances en la tecnología PIV han hecho posible obtener perfiles de velocidad tridimensionales en una sección transversal de un flujo con el uso de dos cámaras^[23].

2.15 Visualización de flujo

El estudio cuantitativo de la dinámica de fluidos exige matemáticas muy avanzadas; sin embargo; se aprende mucho con la visualización de flujo: el examen visual de las características del campo de flujo. La visualización del flujo es útil no sólo en los experimentos físicos, sino también en las resoluciones numéricas. Por que la mente humana está diseñada para procesar con rapidez una cantidad increíble de información visual. existen numerosos tipos de patrones de flujo que se pueden visualizar, físicamente (experimentalmente) o en forma computacional^[23].

2.15.1 Líneas de corriente

Una línea de corriente es una curva que, en todas partes, es tangente al vector velocidad local instantáneo. Las líneas de corriente son útiles como indicadores de la dirección instantánea del movimiento del fluido en todo el campo de flujo. Las líneas de corriente no se pueden observar de manera experimental, excepto en los campos de flujo estacionario, en los cuales coinciden con las líneas de trayectoria^[23].

2.15.2 Líneas de trayectoria

Una línea de trayectoria es la trayectoria real recorrida por una partícula de fluidos durante algún periodo. Las líneas de trayectoria son los patrones de flujo más

CAPITULO II

fáciles de entender. Una línea de trayectoria es un concepto lagrangiano en el que sencillamente se sigue de una partícula de fluido conforme se desplaza en el campo de flujo.

En la técnica experimental de PIV descrita anteriormente se utilizan las líneas de trayectoria de partículas para medir el campo de velocidad sobre un plano en un flujo. Si el campo de velocidad es estacionario, cada una de las partículas del fluido seguirá líneas de corriente por lo tanto, para el flujo estacionario, las líneas de trayectoria son idénticas a las líneas de corriente ^[23].

2.15.3 Líneas de traza

Una línea de traza es el lugar geométrico de las partículas de fluido que han pasado de manera secuencial por un punto prescrito en el flujo. Las líneas de traza constituyen el patrón de flujo más común generado en un experimento físico. Si se inserta un tubo pequeño en un flujo y se introduce una corriente continua de fluido trazador (tinte en un flujo de agua o humo en flujo de aire) el patrón que se observa es una línea de traza.

Si el flujo es no estacionario, el campo de velocidad cambia y no se puede esperar que la línea de traza resultante se semeje a una de corriente o una de trayectoria en cualquier instante dado. Sin embargo, si el flujo es estacionario, las líneas de corriente, las de trayectoria y las de traza son idénticas ^[23].

MODELO FÍSICO

CAPITULO III

3.1 Introducción al modelo de físico

Las altas temperaturas junto con la nula visibilidad a través del acero líquido, hacen difícil y engorroso realizar mediciones en una forma directa, así como imposible observar el fenómeno, por lo que una de las herramientas que ha resultado de mucha utilidad es la modelación física, la cual permite simular el proceso de manera real con modelos contruidos de material transparente hechos a escala.

La similitud de los fenómenos de flujo no solo ocurre entre el prototipo y su modelo, sino que, también puede existir entre varios fenómenos naturales si satisfacen ciertas leyes de similitud. La similitud llega entonces a ser un medio de correlacionar los resultados aparentemente divergentes obtenidos a partir de fenómenos de fluidos similares y de este modo se torna en una valiosa herramienta ya que, la aplicación de las leyes de similitud conduce a resultados más comprensibles y, por lo tanto, a un mejor entendimiento de los fenómenos en los fluidos en general.

Rigurosamente, la construcción de modelos físicos debe satisfacer los criterios de similitud, los cuales son:

1.- Similitud Geométrica. Esto significa que el modelo físico debe tener una escala constante en todas sus dimensiones con respecto del sistema real.

2.- Similitud Cinemática. Las corrientes de un sistema deben ser geoméricamente similares a las corrientes de otro sistema. Las variables involucradas son la longitud y tiempo, las fuerzas no forman parte de esta. Este criterio abarca desplazamientos lineales y angulares, velocidades y aceleraciones.

3.- Similitud Dinámica. Esta requiere que las fuerzas que actúan en posiciones y tiempos correspondientes en cada sistema guarden una relación fija. Estas fuerzas incluyen fuerzas concentradas, distribuidas y momentos. De este modo, pueden ser consideradas fuerzas y momentos por:

- Aplicadas externamente (contacto de cuerpos).
- Efectos hidrostáticos (presión).
- Efectos internos.
- Efectos elásticos internos.
- Efectos gravitacionales.
- Tensión superficial.
- Efectos boyantes.
- Efectos de fricción y viscosos.

Si las razones de combinaciones de estas fuerzas son idénticas para los dos sistemas, se dice que los dos sistemas son dinámicamente similares respecto de las fuerzas involucradas. Algunas de estas razones son llamadas números adimensionales y son asociados con nombres de científicos famosos quienes contribuyeron significativamente en esta disciplina.

4.- Similitud Térmica.- Se refiere al efecto de la temperatura en el modelo y en el sistema real. Dos cuerpos son térmicamente similares si ellos tienen igual u homóloga temperatura en tiempo correspondiente. El significado de esta idea es, si los patrones de flujo de calor en los dos cuerpos son similares, entonces estos cuerpos pueden ser considerados térmicamente similares.

5.-Similitud Química.- Para lograr una adecuada similitud química entre el modelo y el prototipo, es necesario primero satisfacer la similitud dinámica y térmica. La transferencia de masa y las reacciones químicas usualmente ocurren por procesos conductivos y difusivos durante el movimiento del material reactante en el sistema ^[27, 28].

3.2 Números adimensionales

La similitud dinámica se puede asegurar de manera fácil satisfaciendo los números adimensionales ya que deberán ser iguales en el modelo físico y en el sistema real ^[10].

Por ejemplo para sistemas de una simple fase son fácilmente modelados por el número de Reynolds y el número de Froude.

El número de Reynolds representa la razón de las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\nu L \rho}{\mu} \quad (16)$$

El número de Froude representa la razón de las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales.

$$Fr = \frac{u^2}{gL} \quad (17)$$

En el caso de sistemas de dos fases líquido gas los números de Weber, Morton y el número modificado de Froude son parámetros importantes para su modelación.

El número de Weber representa la razón de las fuerzas inerciales con las fuerzas de tensión superficial.

$$We = \frac{\rho L u^2}{\sigma} \quad (18)$$

El número modificado de Froude representa la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación.

$$Frm = \frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} \quad (19)$$

Para el caso de transferencia de calor por convección natural los números de Prandtl y Grashof son los factores clave ^[9,18, 27, 28].

CAPITULO III

Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de flujo en los sistemas agitados por una inyección de gas en el fondo, es la ecuación de Navier Stokes en su forma turbulenta, donde están involucradas las fuerzas debido a la inercia, a la fricción, y a la tensión superficial, por lo tanto es requerida una equivalencia de fuerzas entre el modelo y el prototipo, tales que:

$$Re_m = Re_p \quad \text{ó} \quad \left(\frac{\rho UL}{\mu} \right)_m = \left(\frac{\rho UL}{\mu} \right)_p \quad (16)$$

Y

$$Fr_m = Fr_p \quad \text{ó} \quad \left(\frac{U^2}{gL} \right)_m = \left(\frac{U^2}{gL} \right)_p \quad (17)$$

Y

$$We_m = We_p \quad \text{ó} \quad \left(\frac{\rho U^2 L}{\sigma} \right)_m = \left(\frac{\rho U^2 L}{\sigma} \right)_p \quad (18)$$

Para que el modelo de agua satisfaga el criterio de Reynolds es necesario calcular la velocidad a la que es inyectado el flujo de aire.

$$U_m = \frac{U_p}{\lambda} = \frac{U_p}{0.14} \quad (20)$$

Donde λ es el factor de escala.

Sin embargo, si se satisface el criterio de Froude, se tiene que:

$$\left(\frac{U^2}{L} \right)_m = \left(\frac{U^2}{L} \right)_p \quad \text{ó} \quad U_m = \lambda^{1/2} U_p \quad (21)$$

Obviamente ambas condiciones no se pueden cumplir con una escala de 1/7.

Si se considera el valor numérico del número de Reynolds para el acero líquido en la olla de 2.6 m de diámetro y una velocidad de 2.6 m.s⁻¹, se tiene que:

$$Re_p = \frac{7000 \times 2.7 \times 2.6}{0.007} \approx 7 \times 10^6 \quad (16)$$

CAPITULO III

Donde $\rho = 7000 \text{ kg m}^{-3}$ y $\mu = 0.007 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Esto indica que la razón de las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas es enorme, y que el flujo es dominado por las fuerzas inerciales, en contraste el valor del número de Froude modificado:

$$Fr_p = \left(\frac{\rho_g U^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} \right) = \frac{1.69 \times 2.7^2}{(7000 - 1.69)9.81 \times 3.190} = 5.62 \times 10^{-5} \quad (19)$$

El resultado indica que las fuerzas de flotación son de mayor magnitud que las fuerzas inerciales. Finalmente, se debe considerar las fuerzas de tensión superficial las cuales aparecen en el numero de Weber como una relación de fuerzas inerciales/fuerzas de tensión superficial.

$$We = \frac{\rho U_0^2 L}{\sigma} = \frac{7000 \times 2.7^2 \times 3.190}{1.63} \approx 1 \times 10^5, \quad (18)$$

Analizando el valor numérico del número de Weber, las fuerzas inerciales son de mayor magnitud que las fuerzas de tensión superficial. Considerando que el estudio que se va a realizar no abarca el estudio de la superficie del líquido, se puede despreciar las fuerzas de tensión superficial, además la equivalencia del número de Reynolds se aplica solamente al flujo laminar y solo existe este tipo de flujo sobre las paredes de la olla, en el resto del sistema se observa un flujo turbulento, por esto no es necesario considerar el número de Reynolds a una escala reducida. Así, el número de Froude modificado es elegido como criterio de diseño ya que toma en cuenta las fuerzas inerciales y de flotación que son las de mayor importancia en el caso de estudio.

3.3 Construcción del Modelo a Escala

El modelado físico incluye la representación del acero líquido usando agua y esto es porque la viscosidad cinemática del acero líquido (1600°C) y el agua a temperatura ambiente (20°C) son esencialmente equivalentes $(\mu/\rho)_m = (\mu/\rho)_p$ como se puede observar en la tabla 2.

TABLA 2. Propiedades físicas del acero líquido, el agua, el aire y el argón^[5, 24].

PROPIEDADES	ACERO A 1600° C	AGUA A 20° C	AIRE A 20° C	ARGÓN A 20° C
DENSIDAD (ρ)	7000 Kg./ m ³	1000 Kg./m ³	1.29 kg / m ³	1.60 kg / m ³
VISCOSIDAD (μ)	0.062 g / cm s	0.0089 g / cm. s	1.8 x10 ⁻⁶ g / cm s	2.1x10 ⁻⁶ g / cm s
VISCOSIDAD CINEMATICA(ν)	0.886 cm ² / s	0.890 cm ² / s	0.146 cm ² /s	0.131 cm ² /s

La similitud geométrica entre los sistemas reales y el modelo fue obtenida utilizando un factor de escala de 1/7 en todas las dimensiones geométricas involucradas, ya que la literatura recomienda factores de escala desde 1/1 hasta 1/8^[2, 18].

La similitud cinemática entre el sistema real y el modelo se asegura automáticamente si se satisfacen las similitudes geométricas y dinámicas.

La similitud dinámica fue obtenida usando el número de Froude modificado, que es la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas de flotación.

$$Frm = \frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} \quad (19)$$

CAPITULO III

Para N tapones porosos del mismo diámetro d, la velocidad V esta dada por:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2 N} \quad (22)$$

Donde Q es el flujo del gas. Sustituyendo la ecuación (22) en (19), se obtiene:

$$Fr_m = \frac{1.621 \rho_g Q^2}{\rho_l d^4 N^2 g H} \quad (23)$$

Si se asume que el modelo a escala en agua tiene el mismo número de boquillas, entonces la siguiente ecuación es usada para determinar el flujo de gas en el modelo de agua ^[9]:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p} \right)^2 = \left(\frac{\rho_{gas(p)}}{\rho_{gas(m)}} \right) \left(\frac{\rho_{liquido(m)}}{\rho_{liquido(p)}} \right) \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^4 \left(\frac{H_m}{H_p} \right) \quad (24)$$

Donde el subíndice p es para el prototipo y subíndice m es para el modelo.

Para modelos de agua a una escala de 1/7 se tiene que:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p} \right)^2 = 8.5 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho_{gas(p)}}{\rho_{gas(m)}} \right) \quad (25)$$

El prototipo tiene una capacidad de 135 ton. de acero y el flujo de argón inyectado por el fondo de la olla es de 1.5 m³/min. El diámetro de salida del tapón es de 109 mm. Estos datos se muestran en la figura 15 y tabla 3.



3.3.2 Datos del Modelo a Escala

Se construyó un modelo físico a escala 1/7 de la olla de refinación secundaria de Ternium Monterrey, en acrílico transparente de 4.5 mm de espesor con el fin de observar los fenómenos que ocurren dentro de la olla. En la figura 16 se muestran las dimensiones del modelo físico; para la similitud geométrica se usó una relación de 1/7 entre el modelo físico y el sistema real. Se estudiaron 5 casos los cuales se presentan en la tabla 5.

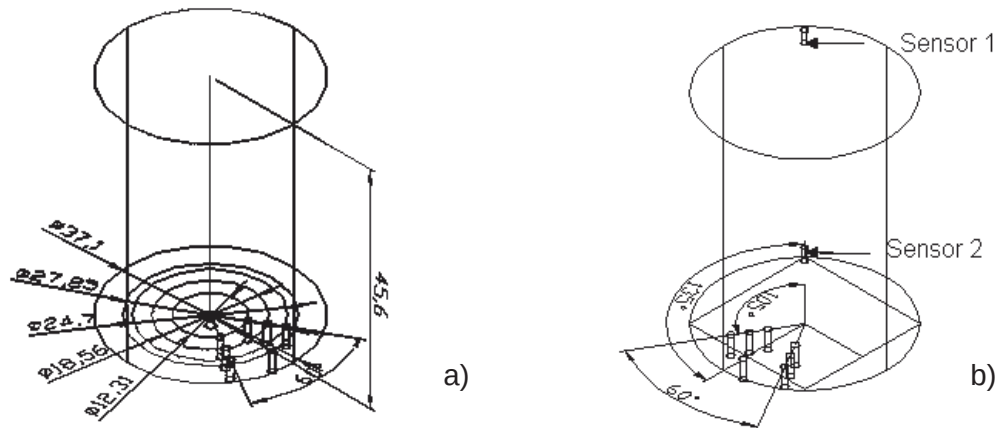


Figura 16 a) Geometría del modelo a escala de 1/7 del horno olla con las posiciones estudiadas, b) ubicación de los sensores de conductividad.

Tabla 3. Dimensiones del Modelo Experimental y el Modelo Real.

	MODELO (mm)	PROTOTIPO (mm)
DIAMETRO INTERNO (D)	371	2600
ALTURA DEL BAÑO LIQUIDO (H)	456	3190
DIAMETRO DEL TAPON POROSO(d)	15.6	109

CAPITULO III

El flujo del gas inerte inyectado se escaló con el número de Froude modificado, los flujos se muestran en la tabla 4, de la siguiente manera:

Primero se determina la velocidad para el modelo real con el flujo que proporciono la empresa de $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ y el cual se muestra en la figura 15; con la ecuación 24.

$$u_p = \frac{4Q_p}{\pi d^2 N} = \frac{4(1.5 \text{ m}^3/\text{min})(1 \text{ min})}{\pi(0.109 \text{ m})^2(1)(60 \text{ seg})} = 2.7 \text{ m/s}$$

Con la velocidad, se calcula el número de Froude modificado Ec. 21

$$Fr_m \frac{\rho_g u_p^2}{(\rho_l - \rho_g)gL} = \frac{(1.6 \text{ kg/m}^3)(2.7 \text{ m/s})^2}{(7000 - 1.6)(\text{kg/m}^3)9.81 \text{ m/s}^2(3.190 \text{ m})} = 5.3 \times 10^{-5}$$

Se iguala el número de Froude y se encuentra la velocidad para el modelo a escala

$$u_m^2 = \frac{5.3 \times 10^{-5}(9.81 \text{ m/s}^2)(0.456 \text{ m})(1000 - 1.29) \text{ kg/m}^3}{1.29 \text{ kg/m}^3} = 0.429 \text{ m/s}$$

Con la velocidad despejamos el caudal de 25 y obtenemos:

$$Q_m = \frac{u \pi d^2}{4} = \frac{\pi(0.429 \text{ m/s})(0.0156 \text{ m})^2(1000 \text{ lts})(60 \text{ s})}{4(1 \text{ m}^3)(1 \text{ min})} = 4.9 \text{ lts/min}$$

Comprobación con la ecuación 26

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)^2 = \left(\frac{\rho_{\text{gas}(p)}}{\rho_{\text{gas}(1m)}}\right) \left(\frac{\rho_{\text{liquido}(m)}}{\rho_{\text{liquido}(p)}}\right) \left(\frac{d_m}{d_p}\right)^4 \left(\frac{H_m}{H_p}\right) = \left(\frac{1.6}{1.29}\right) \left(\frac{1000}{7000}\right) \left(\frac{15.6}{109}\right)^4 \left(\frac{456}{3190}\right)$$
$$Q_m = 0.003249432 \frac{1.5 \text{ m}^3/\text{min}}{1 \text{ m}^3} 1000 \text{ lts} = 4.87 \text{ lts/min} \approx 4.9 \text{ lts/min}$$

Para dos tapones el flujo se divide a la mitad.

$$Q_m = \frac{4.9 \text{ lts/min}}{2} = 2.45 \text{ lts/min}.$$

CAPITULO III

Para conocer si el flujo de aire utilizado es el más adecuado, se eligió probar con un flujo menor, el cual fue de 3.0 lt/min.

Tabla 4. Flujos volumétricos de la inyección de aire por cada tapón.

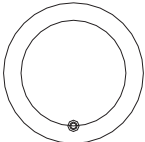
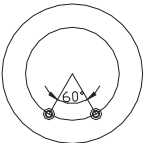
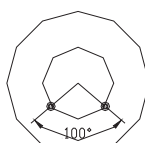
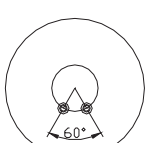
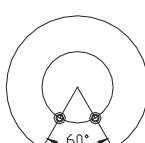
Q_m (lt/min) Un tapón	Q_m (lt/min) Dos tapones	Q_p (lt/min) Un tapón
4.90	2.45	1,500.00
3.00	1.50	923.23

CAPITULO III

3.4 Arreglos Estudiados.

Se estudiaron cinco diferentes posiciones para la inyección de gas por el fondo de la olla, las cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Casos Estudiados.

CASO	NÚMERO TAPONES	UBICACIÓN	FLUJO DE GAS POR TAPÓN	UBICACIÓN DE TAPONES
1	1		a) 4.90 lts/min. b) 3.00 lts/min.	Tres cuartos del radio.
2	2		a) 2.45 lts/min. b) 1.50 lts/min.	Dos tercios del radio y 60° de separación entre los tapones.
3	2		a) 2.45 lts/min. b) 1.50 lts/min.	Un medio del radio y 100° de separación entre los tapones.
4	2		a) 2.45 lts/min. b) 1.50 lts/min.	Un tercio del radio y 60° de separación entre los tapones.
5	2		1.50 lts/min	Un medio del radio y 60° de separación entre los tapones.

3.5 Metodología de la Experimentación.

3.5.1 Equipo de Medición Utilizado

- 2 Flujómetros Cole Palmer con una capacidad de 0.0 a 5.0 lt/min. y una exactitud de 0.1 lts/min (Con estos se estuvo monitoreando el flujo de aire de agitación de la olla previamente calibrados).
- Balanza de precisión con una capacidad de 0.01 gr. a 1.00 Kg. con la cual se midió la cantidad de KCl que se añadía a la solución. También se utilizó para medir la cantidad de colorante en polvo del trazador.
- Matraz aforado de 100ml, el cual se utilizó para medir el agua destilada.
- Matraz de 250 ml, el cual se utilizó para realizar el mezclado del agua destilada con el KCl.
- Pipeta de 150 ml se utilizó para inyectar el trazador de KCl y el trazador del colorante.
- Sensor de conductividad.
- Conductímetro marca OAKTON de las series 1000, el cual recibía la señal del sensor y enviaba datos a una tarjeta de adquisición.
- Tarjeta de adquisición de datos marca KEITHLEY modelo KNM-TC42-RS232-C, la cual enviaba los datos de conductividad cada segundo a una PC.
- Sensor de Presión el cual enviaba información a la interfase.
- Interfase 750 I marca PASCO. Cuya función fue enviar los datos obtenidos de presión a una PC cada 0.001 seg.
- PC Compaq Presario en la cual se capturaron todos los datos de la experimentación.
- Cámara de video digital marca Panasonic, con el cual se tomaron los videos de trazador de colorante y el movimiento de la capa de escoria.
- Equipo **PIV**, láser, cámara rápida, procesador (UNAM, Instituto de Materiales).



Figura 17. Equipo de medición utilizado para el tiempo de mezclado.

3.5.2 Tiempo de mezclado

Para las mediciones de tiempo de mezclado se uso como trazador una mezcla de KCL con agua a una concentración molar de 3.35 M (100ml de agua por 25 gr. de KCL).

1. Se inyectó el aire a presión constante, dentro del baño líquido durante cierto tiempo para crear la agitación del reactor.
2. Después de cierto tiempo en el que la olla alcanzaba un movimiento estacionario se inyectó el trazador por el centro del fondo de la olla a través de una manguera de 1/8 de plástico, la cual era alimentada por una pipeta y por diferencia de presiones entre el líquido de la olla y la presión de la pipeta se introducía el trazador a una baja velocidad favoreciendo que el arrastre del trazador se llevara a cabo por las fuerzas inerciales que se originan al inyectar aire.
3. Se midió la conductividad en dos puntos diferentes, que fueron determinados mediante técnicas de colorimetría cuidando que estos puntos estuvieran donde tardara más en llegar el colorante para evitar las fluctuaciones de concentración en las graficas, como se muestra en la figura 18, para lo cual se utilizó un conductivimetro y una tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta de adquisición de datos envía cada segundo el valor de la conductividad medida a una PC.

CAPITULO III

4. Para cambiar las mediciones de conductividad a valores de concentración se construyó una curva de calibración.
5. Para cada uno de los casos se realizaron 5 repeticiones para cada posición del sensor.
6. Se realizó un promedio de los experimentos para cada uno de los casos y posición del sensor.
7. Con estos datos se obtuvieron las curvas de mezclado.

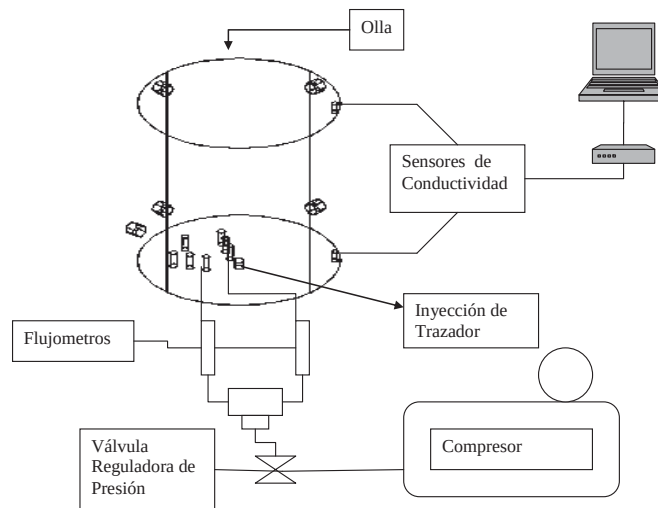


Figura 18. Esquema del Modelo Físico para la medición del tiempo de mezclado.

3.5.2.1 Curva de Calibración

Se realizó un tratamiento de los datos obtenidos, para lo cual se elaboró una curva de calibración, con la ecuación de esta curva y los datos obtenidos por el sensor de conductividad se convirtieron los datos de conductividad a concentración y así se obtuvieron las curvas con las cuales se calcularon los tiempos de mezclado dentro del reactor, para cada uno de los casos.

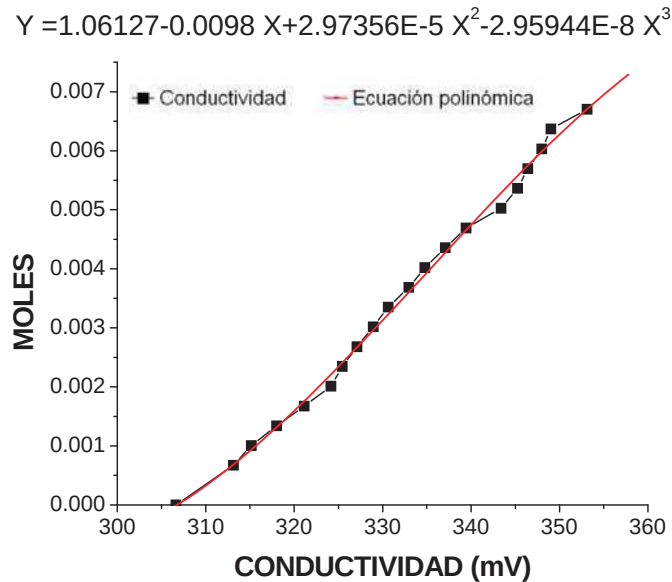


Figura 19. Curva de concentración y Ecuación Polinómica de ajuste de datos para convertir los datos de conductividad a concentración.

3.5.3 Fluido dinámica

Para caracterizar la fluido dinámica se hizo una mezcla a base de colorante vegetal con una concentración de 35 gr/l. Se utilizó 35ml de este trazador para cada prueba que se hizo.

1. Se inyectó el aire a presión constante dentro del baño líquido durante cierto tiempo para crear la agitación del reactor.
2. Se inyectó el trazador por el centro del fondo de la olla a través de una manguera, la cual era alimentada por una pipeta y por diferencia de presiones se inyectaba para que el trazador no llevara energía de movimiento y no afectara el patrón de flujo de la olla con agitación.
3. Se tomó video y fotografía para cada uno de los casos anteriores.
4. Con el fin de medir cualitativamente la turbulencia sobre la superficie de la olla se usó aceite comestible para simular la escoria y se evaluó la apertura de la misma para cada uno de los casos.

5. Se tomo video y fotografía para cada uno de los casos anteriores

3.5.4 Presión Dinámica

Se midió la presión en la parte baja y alta de los dos casos que obtuvieron mejores tiempos de mezclado.

1. Para la medición de la presión en las paredes se utilizó un sensor de presión en las paredes y una interfase la cual mandaba mediciones de presión cada 0.1 s a la computadora.
2. Se midió la presión sin agitación de gas para cada una de las posiciones del sensor, siendo la misma para ambos casos estudiados.
3. Se midió la presión con agitación para cada una de las posiciones del sensor, y se tomó como dato de comparación para cada uno de los casos únicamente el rango de fluctuación de la medición de presión recordando que una mayor fluctuación trae consigo un desgaste mayor del refractario.
4. Se obtuvieron las fluctuaciones de presión, las cuales pueden ser consideradas como presión dinámica sobre las paredes.

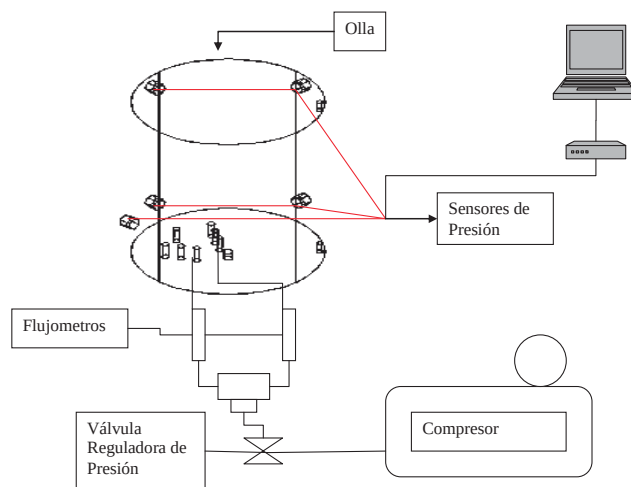


Figura 20. Esquema del modelo físico para la medición de presión.

3.5.5 Medición con el PIV

1. Para las mediciones del campo de velocidad se utilizó la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), se seleccionó un plano dentro de la olla sobre el eje de simetría de los tapones como se indica en la figura 21.
2. Previamente se fabricó en el modelo de la olla un cubo alrededor del cilindro en acrílico transparente de 6 mm para poder tomar las fotografías, ya que es necesario que la cámara este perpendicular a un plano.
3. Se utilizaron partículas de poliamida las cuales previamente se pintaron con rodamina tipo B de $20\mu\text{m}$ por tener una densidad similar a la del agua, las cuales fueron introducidas en el agua.
4. El agua utilizada para llenar la cavidad generada por el cubo fue previamente tratada con una bomba de vacío.
5. Se dividió el plano de estudio en cuatro partes iguales; se manejo un mallado de 62×62 por cada cuadrante lo que nos da 3844 vectores de velocidad.
6. Se tomaron fotografías con la cámara rápida cada dos segundos un lapso de tiempo de 2 minutos obteniendo 250 fotografías para cada cuadrante.
7. Se hizo la calibración para cada uno de los experimentos tomando y se tomó la nueva escala.
8. Se utilizó una correlación adaptativa la cual esta instalada en el software del PIV para analizar cada una de las fotografías y se filtraron los datos obtenidos.
9. Se hizo un estudio estadístico y se obtuvieron vectores de velocidad y líneas de patrón de flujo.

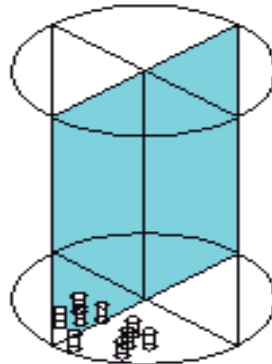


Figura 21.Plano medido con el PIV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO IV

4.1 Análisis de Resultados del Tiempo de Mezclado

De acuerdo a todos los casos estudiados se confirman que existen ciertos factores que afectan el tiempo de mezclado, entre los cuales están: la posición de los tapones, el flujo de gas y el número de tapones.

4.1.1 Tiempo de mezclado para un flujo de 4.90 lt/min.

El caso 1 (figura 22) presenta el menor tiempo de mezclado al concentrar todo el flujo por un solo tapón se introduce mayor energía cinética teniendo una recirculación que empieza en la inyección del gas y llega con suficiente fuerza al otro extremo, ayudando a que descienda rápidamente y regrese al lugar de la inyección tal como se observa en la figura 26, este fenómeno se puede observar en la figura 41 donde se observa que se forma una sola vorticidad, tanto con flujo bajo como alto.

El caso 2 presenta un tiempo de mezclado casi idéntico al caso 1 al variar por un segundo y esto se puede atribuir a que tiene una recirculación muy parecida al caso 1, sin embargo se puede observar en las figuras de vectores de velocidad y líneas de corriente que existe una pequeña vorticidad adicional por lo tanto el tiempo de mezclado se incrementa un poco (figura 23 y 27).

El caso 3 y 4 presentaron los peores tiempos de mezclado debido principalmente a que se crean dos vorticidades grandes generándose dos recirculaciones del fluido y atrapándolo (figura 46 y 47).

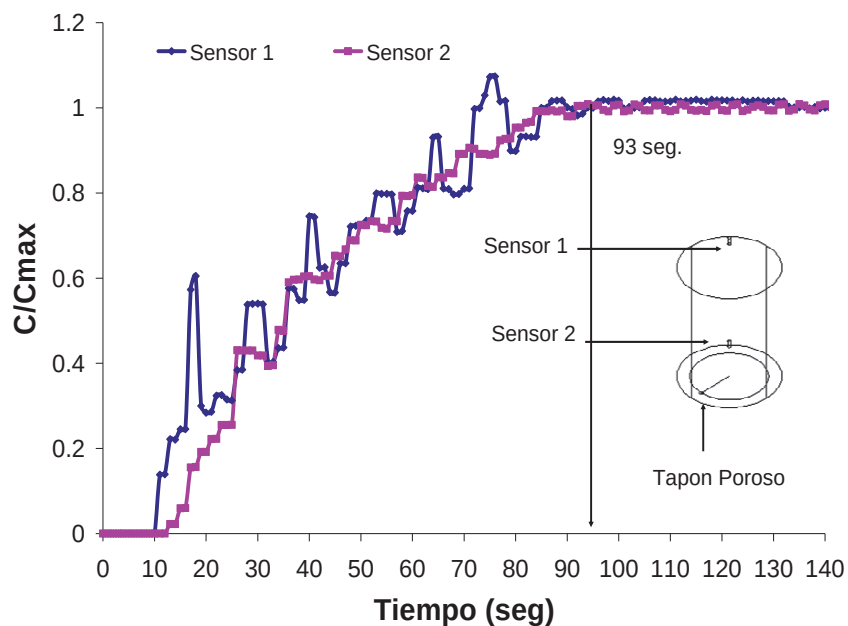


Figura 22. Tiempo de mezclado para el caso 1 con un flujo de aire de 4.90 lt/min.

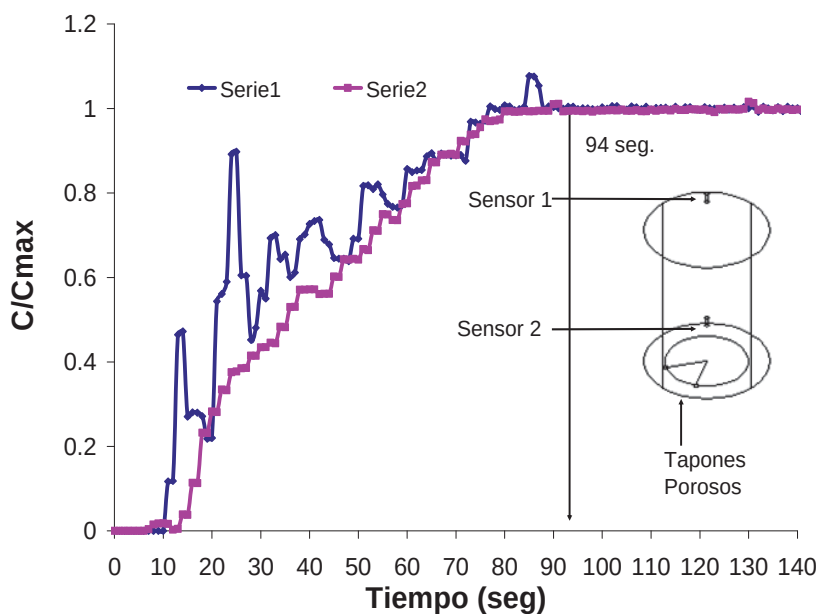


Figura 23. Tiempo de mezclado para el caso 2 con un flujo de aire de 2.45 lt/min por cada tapón.

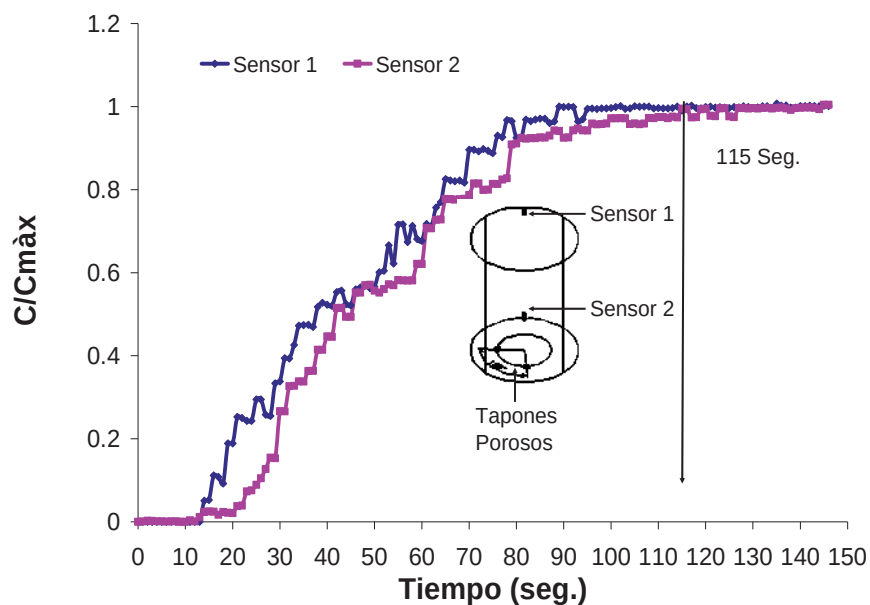


Figura 24. Tiempo de mezclado para el caso 3 con un flujo de aire de 2.45 lt/min por cada tapón.

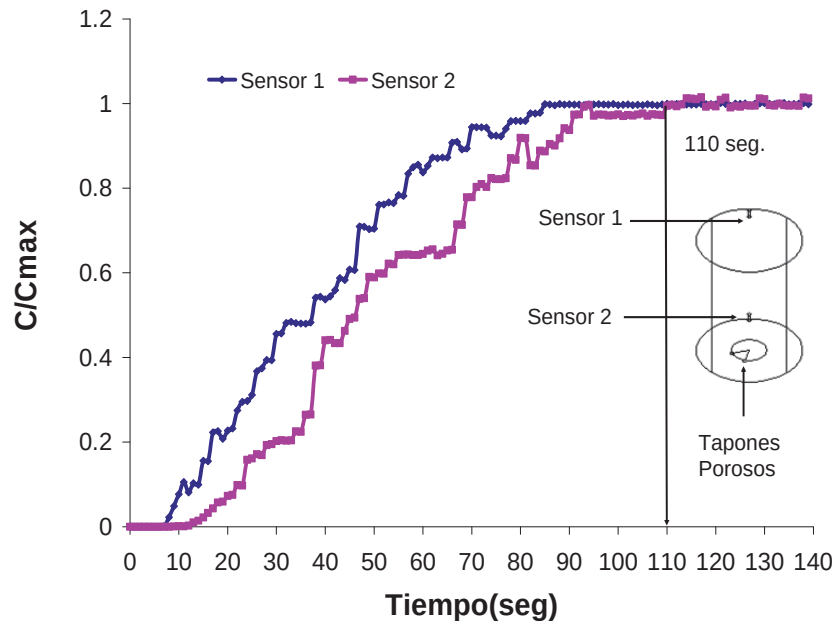


Figura 25. Tiempo de mezclado para el caso 2 con un flujo de aire de 2.45 lt/min por cada tapón.



Figura 26. Fotografía tomada a los 4,6, 8, 10 y 16 segundos después de la inyección del trazador del caso 1 con un flujo de 4.90 lts / min.



Figura 27. Fotografía tomada a los 4,6, 8, 10 y 16 segundos después de la inyección del trazador del caso 2 con un flujo de 2.45 lts / min. por cada tapón.



Figura 28. Fotografía tomada a los 4-6-8-10-16 segundos después de la inyección del trazador del caso 3 con un flujo de 2.45 lts / min. por cada tapón.

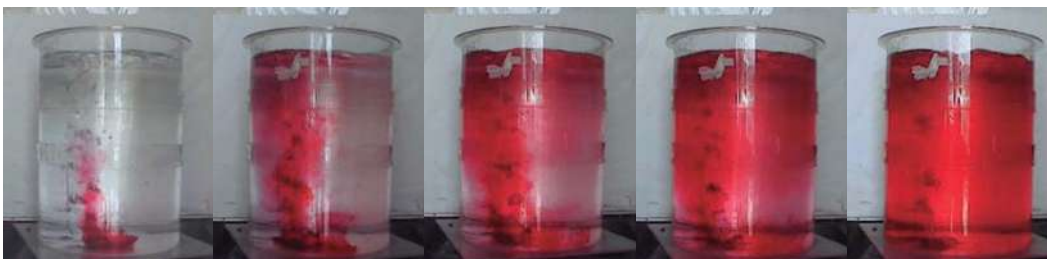


Figura 29. Fotografía tomada a los 4-6-8-10-16 segundos después de la inyección del trazador del caso 4 con un flujo de 2.45 lts / min. por cada tapón.

4.1.2 Tiempo de mezclado para un flujo de 3.0lts/min.

Los tiempos de mezclado se comportaron de manera muy semejante al anterior, sin embargo el mejor tiempo de todos los casos fue el primer caso (figura 30) con un flujo bajo esto podría ser por que el aire se inyecta con la suficiente fuerza para poder lograr una recirculación completa como se puede observar en la figura 37.

En los casos 2 y 4 aumenta el tiempo de mezclado al disminuir el flujo de gas, se puede observar en las figuras 39, 40, 43 y 44 que las dos recirculaciones pequeñas de estos casos disminuyen de tamaño cuando el flujo de gas es alto por lo que existe una reducción del tiempo de mezclado.

El caso 3 solo varía 1 segundo al disminuir el flujo de aire inyectado por lo que se puede considerar idéntico.

En el caso 5 se obtuvo un tiempo de mezclado intermedio pero debido a la configuración de la olla (prototipo), la empresa manifestó que es imposible que la planta lo pueda instalar por lo que no se realizaron mayores estudios.

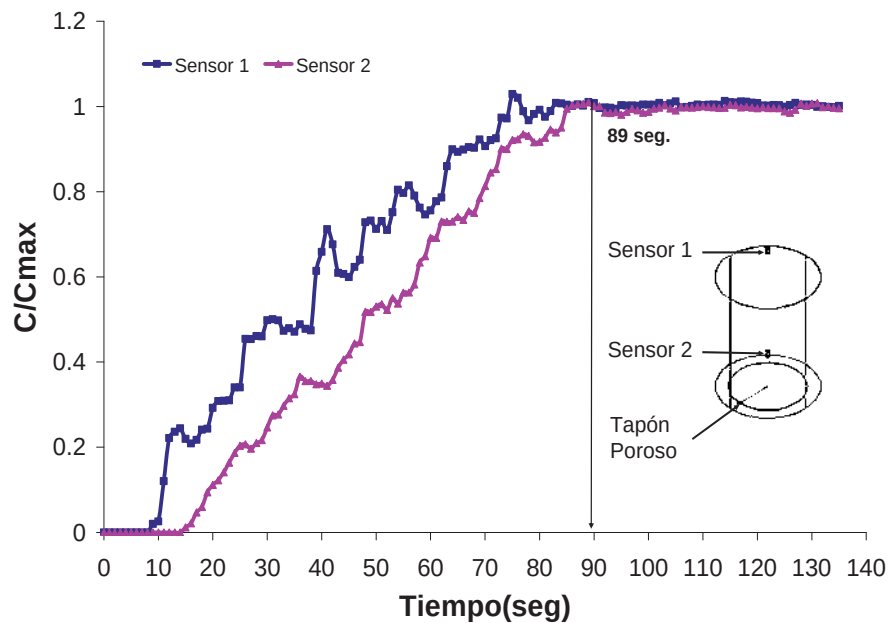


Figura 30. Tiempo de mezclado para el caso 1 con un flujo de aire de 3.0 lts/min.

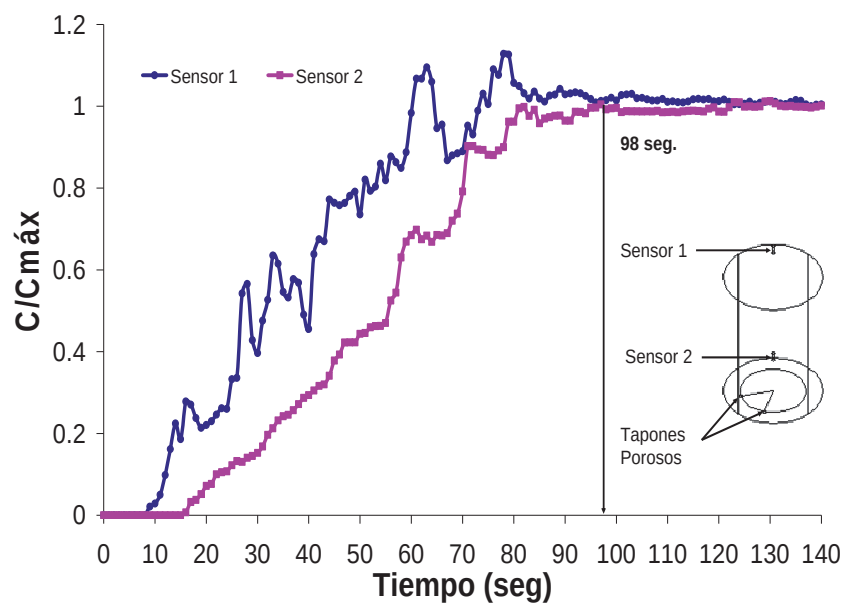


Figura 31. Tiempo de mezclado para el caso 2 con un flujo de aire de 1.50 lt/min por cada tapón.

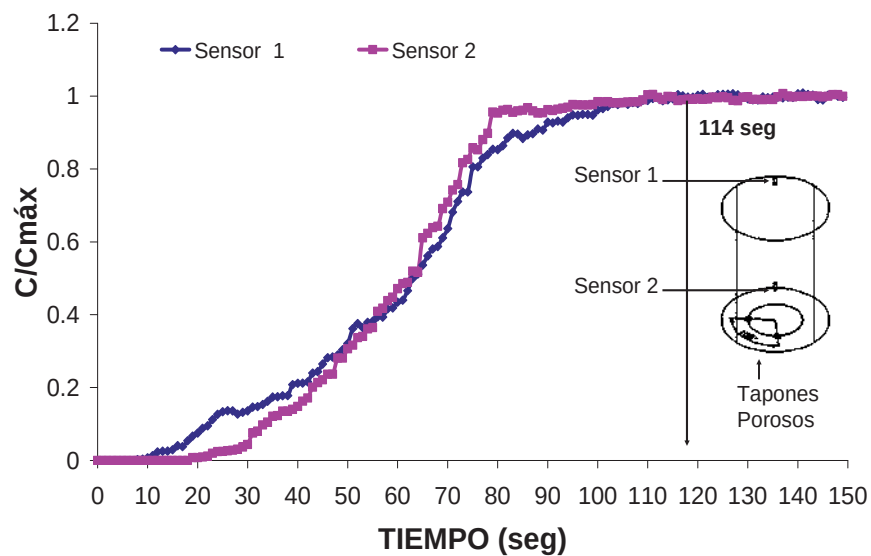


Figura 32. Tiempo de mezclado para el caso 3 con un flujo de aire de 1.50 lt/min por cada tapón.

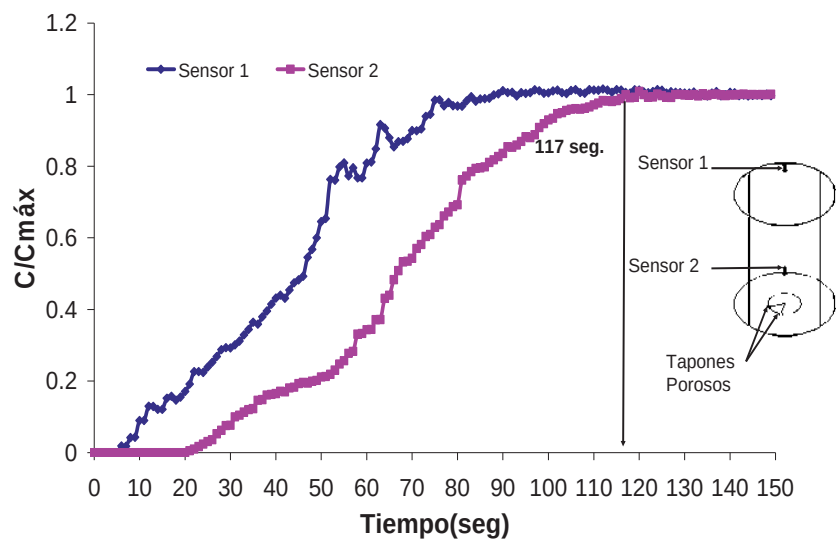


Figura 33. Tiempo de mezclado para el caso 4 con un flujo de aire de 1.50 lt/min por cada tapón.

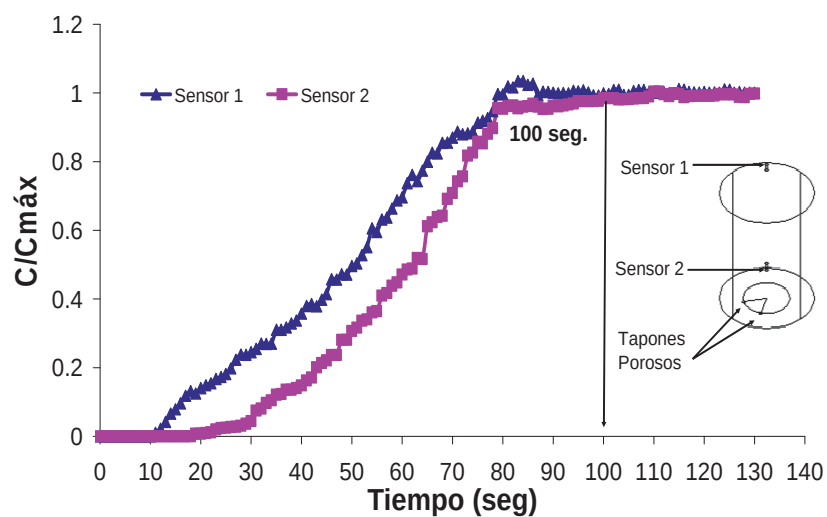


Figura 34. Tiempo de mezclado para el caso 5 con un flujo de aire de 1.50 lt/min por cada tapón.



Figura 35. Fotografía tomada a los 4,6, 8, 10 y 16 segundos después de la inyección del trazador del caso 1 con un flujo de 3.0 lts / min.



Figura 36. Fotografía tomada a los 4,6, 8, 10 y 16 segundos después de la inyección del trazador del caso 2 con un flujo de 1.50 lts / min. por cada tapón.



Figura 37. Fotografía tomada a los 4-6-8-10-16 segundos después de la inyección del trazador del caso 3 con un flujo de 1.50 lts / min. por cada tapón.



Figura 38. Fotografía tomada a los 4-6-8-10-16 segundos después de la inyección del trazador del caso 4 con un flujo de 1.50 lts / min. por cada tapón.



Figura 39. Fotografía tomada a los 4, 6, 8, 10 y 16 segundos después de la inyección del trazador del caso 5 con un flujo de 1.50 lts / min. por cada tapón.

4.1.3 Comparación de los Tiempos de mezclado

Al disminuir el flujo de aire el patrón de flujo en el interior de la olla, no varía considerablemente, como se puede observar de la figura 41 a la 48, sin embargo, se observa que existen ciertas vorticidades que aumentan o disminuyen de tamaño. Por ejemplo para el caso 1 la vorticidad indicada con el número 1, al reducir el flujo a 3.0 lts/min. el área que abarca la vorticidad es menor provocando que el tiempo de mezclado sea menor a pesar de que el flujo es menor comparado con el flujo de 4.9 lts/min. Algo similar sucede para el caso 2 al cambiar el flujo de aire de 3 a 4.9 lts/min la vorticidad indicada con el número 2 disminuye su tamaño viéndose reflejado al disminuir el tiempo de mezclado para el flujo mayor. Para el caso 4 se presenta algo similar cuando aumentamos el flujo de aire la vorticidad marcada con el número 4 disminuye de tamaño lo que ocasiona que se reduzca considerablemente el tiempo de mezclado.

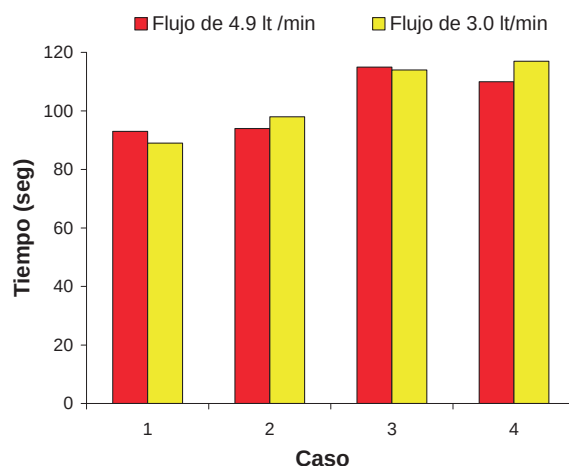


Figura 40. Comparación de los Tiempos de mezclado.

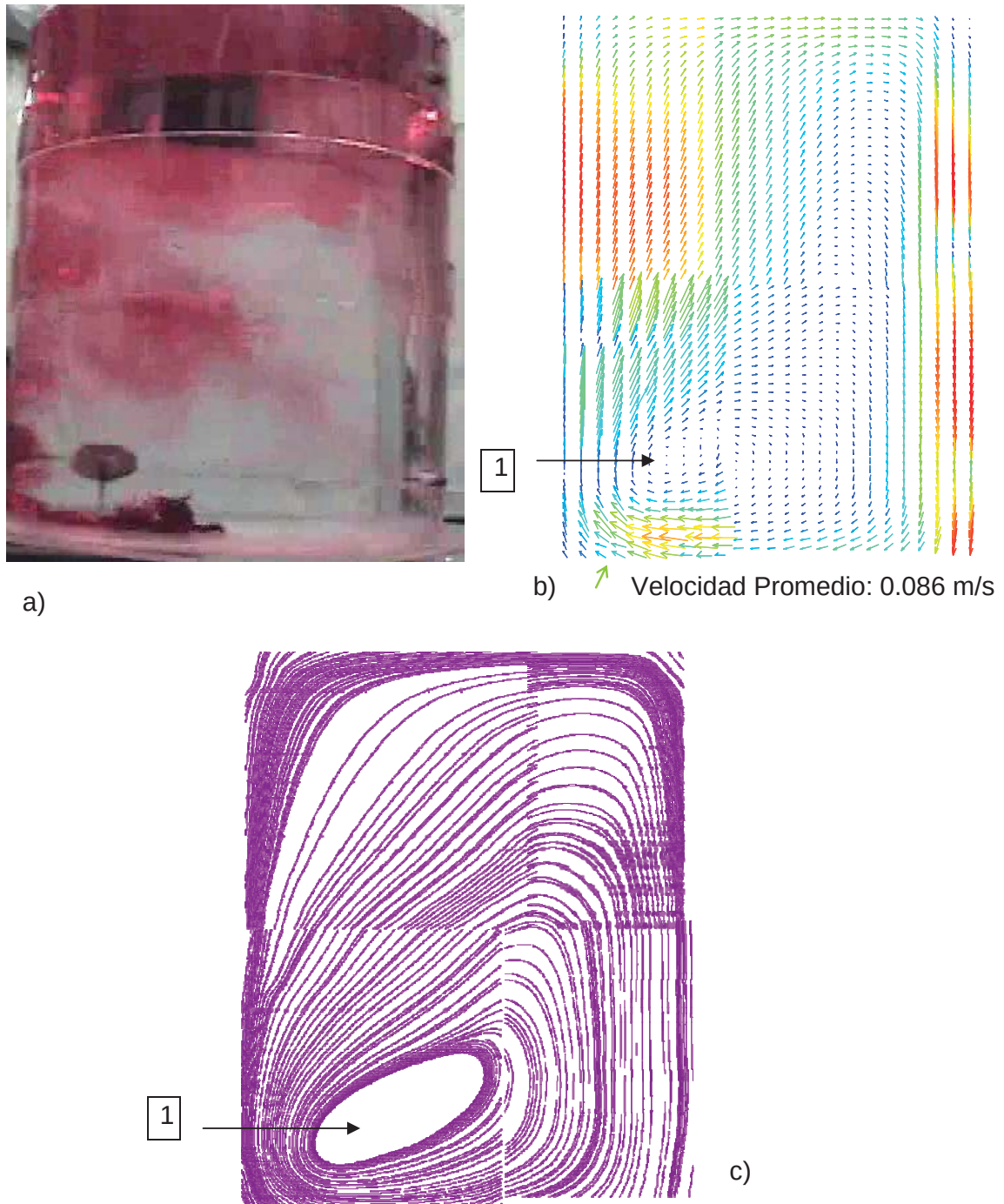


Figura 41. Patrón de flujo del caso 1 con un flujo de aire de 3.0 lts/min a) Imagen de video del trazador a 8 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

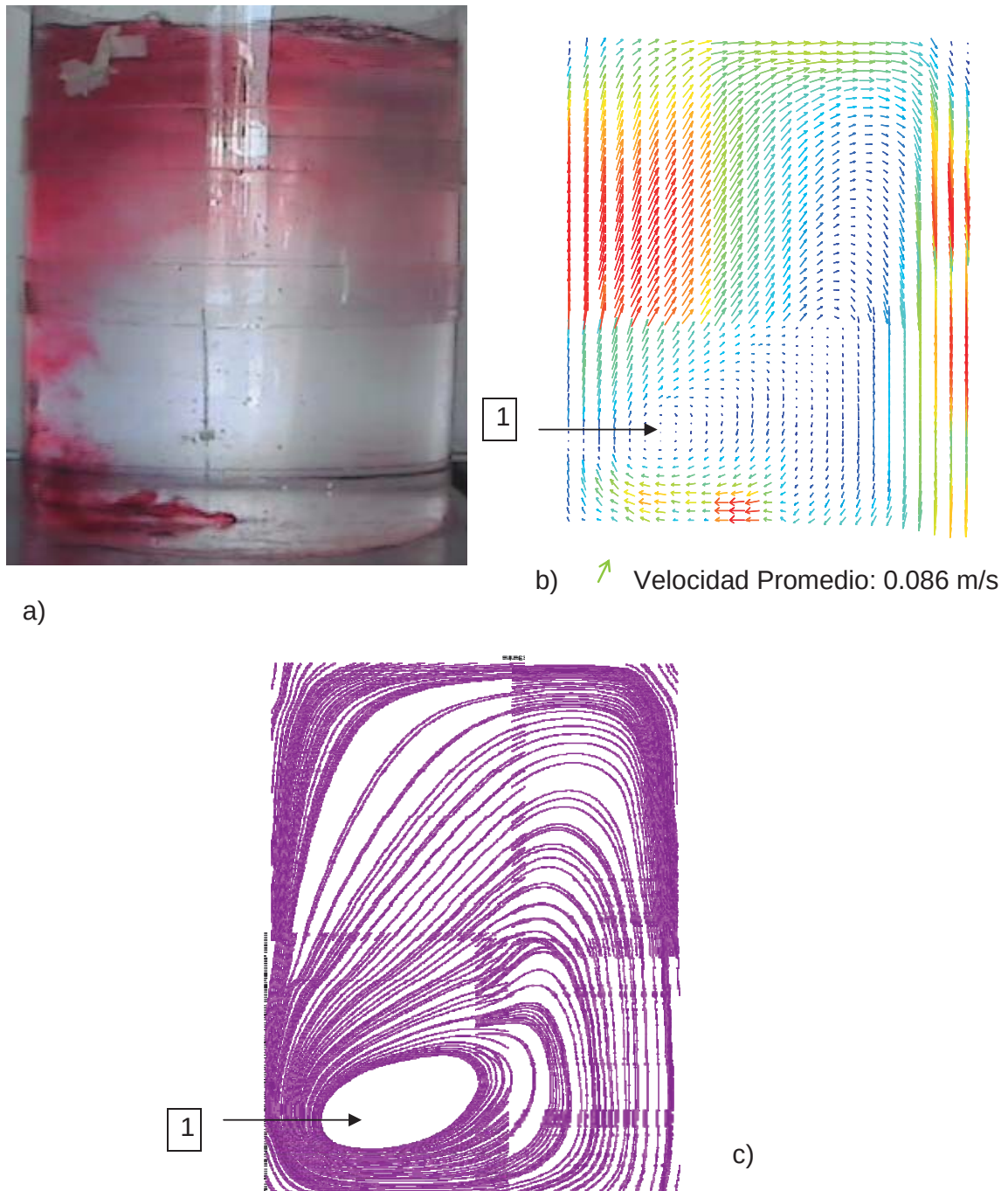


Figura 42. Patrón de flujo del caso 1 con un flujo de aire de 4.9 lts/min a) Imagen de video del trazador a 8 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

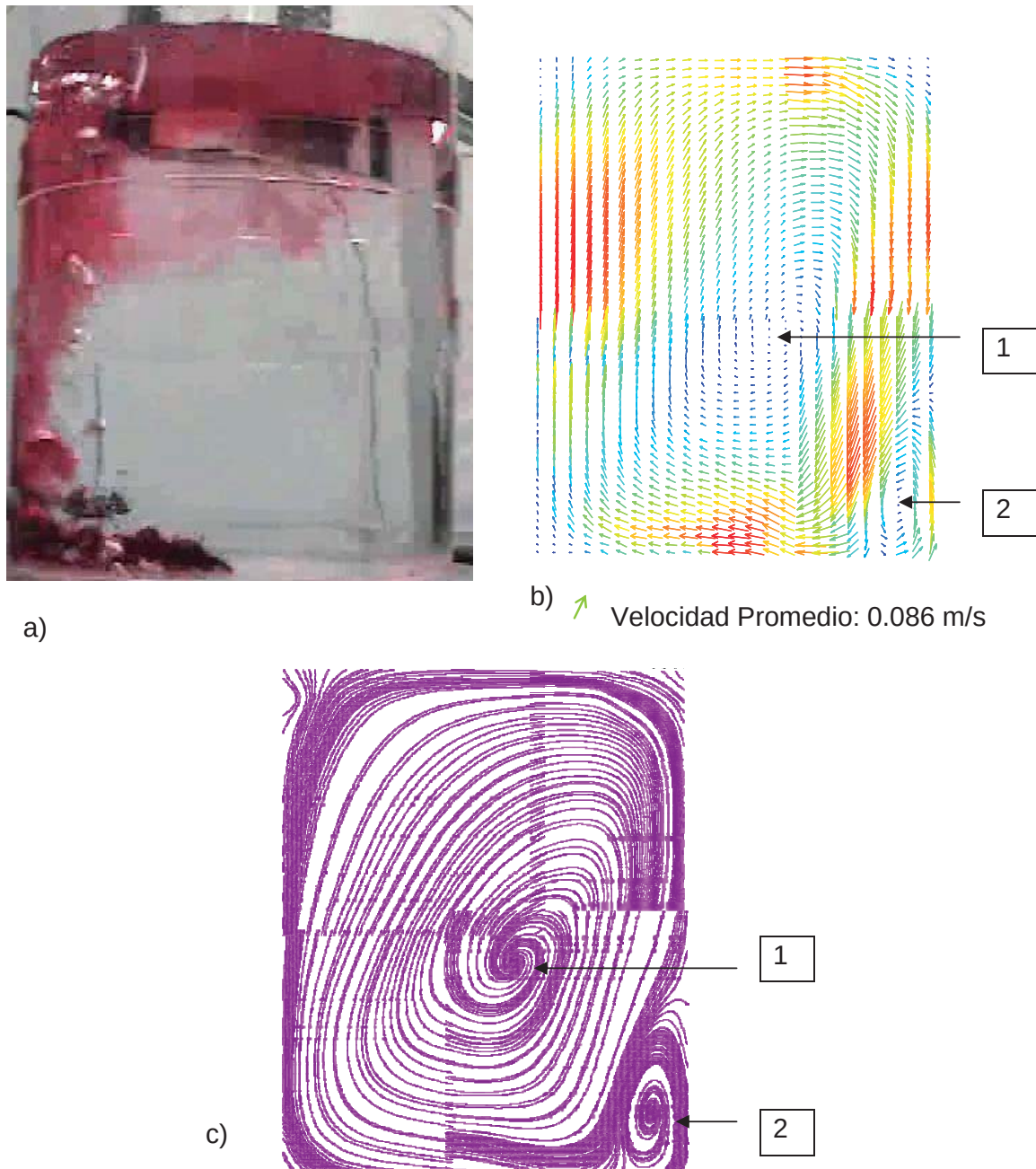


Figura 43. Patrón de flujo del caso 2 con un flujo de aire de 3.0 lts/min a) Imagen de video del trazador a 6 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

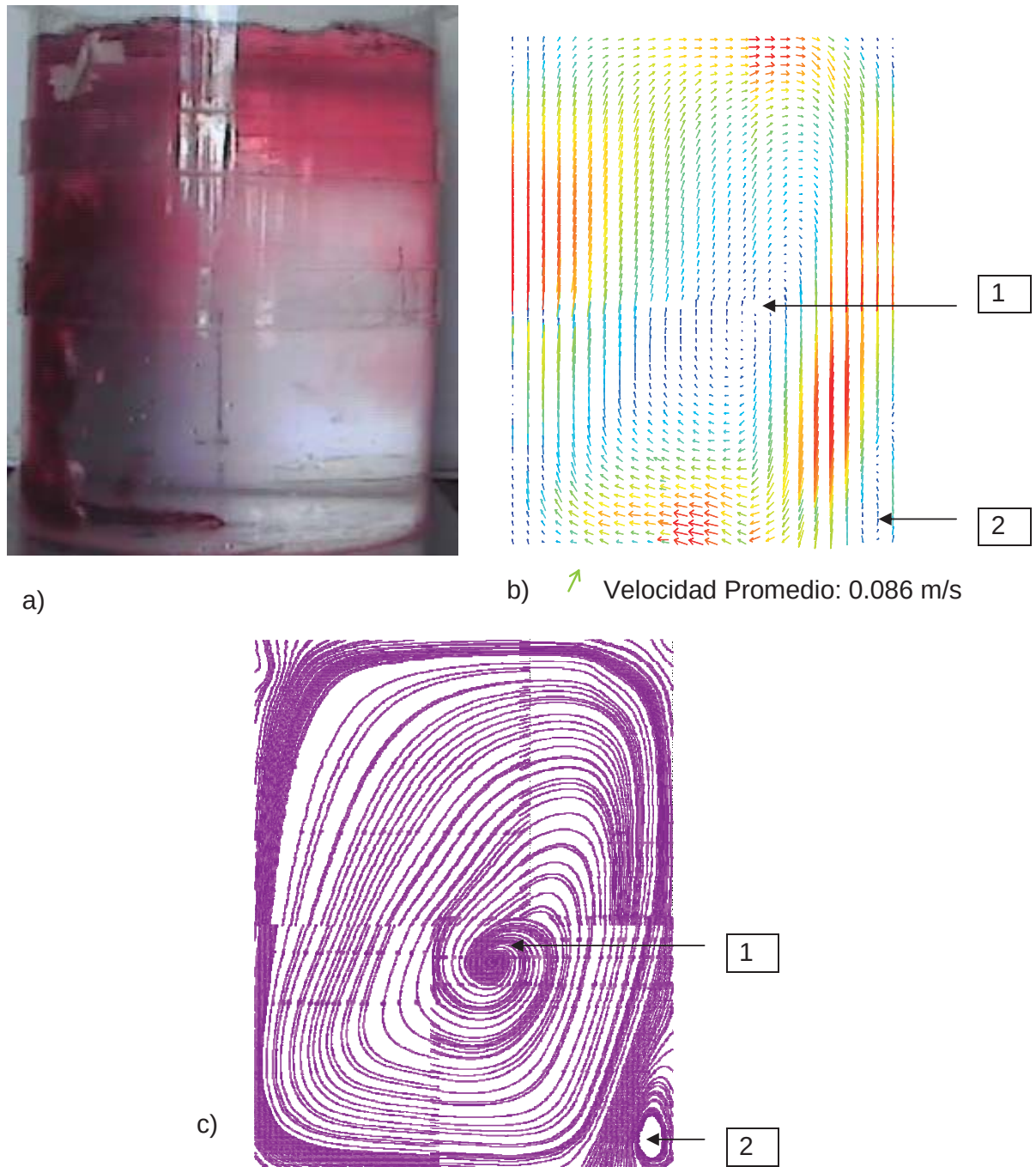


Figura 44. Patrón de flujo del caso 2 con un flujo de aire de 4.9lts/min a) Imagen de video del trazador a 6 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

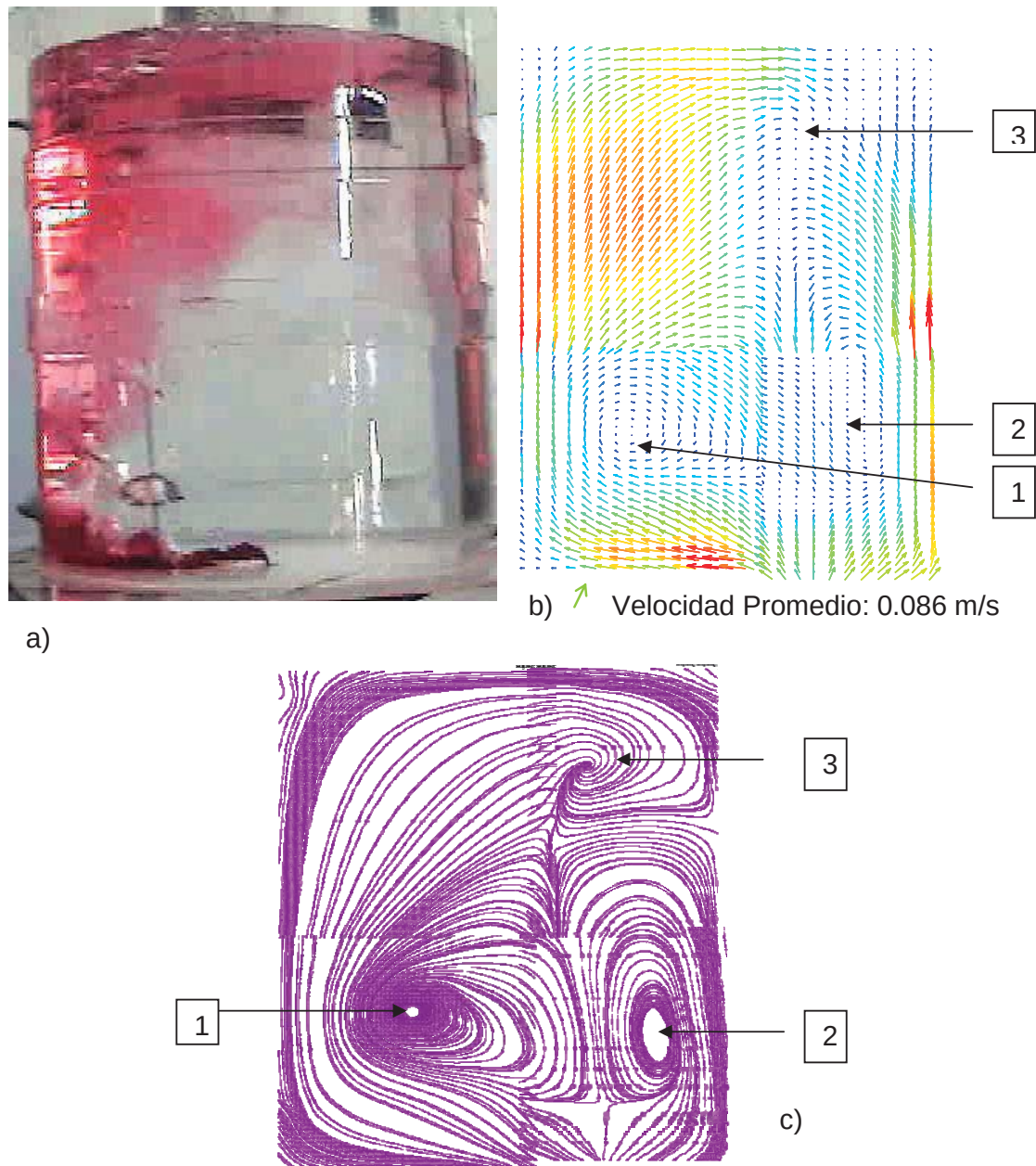


Figura 45. Patrón de flujo del caso 3 con un flujo de aire de 3.0 lts/min a) Imagen de video del trazador a 8 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

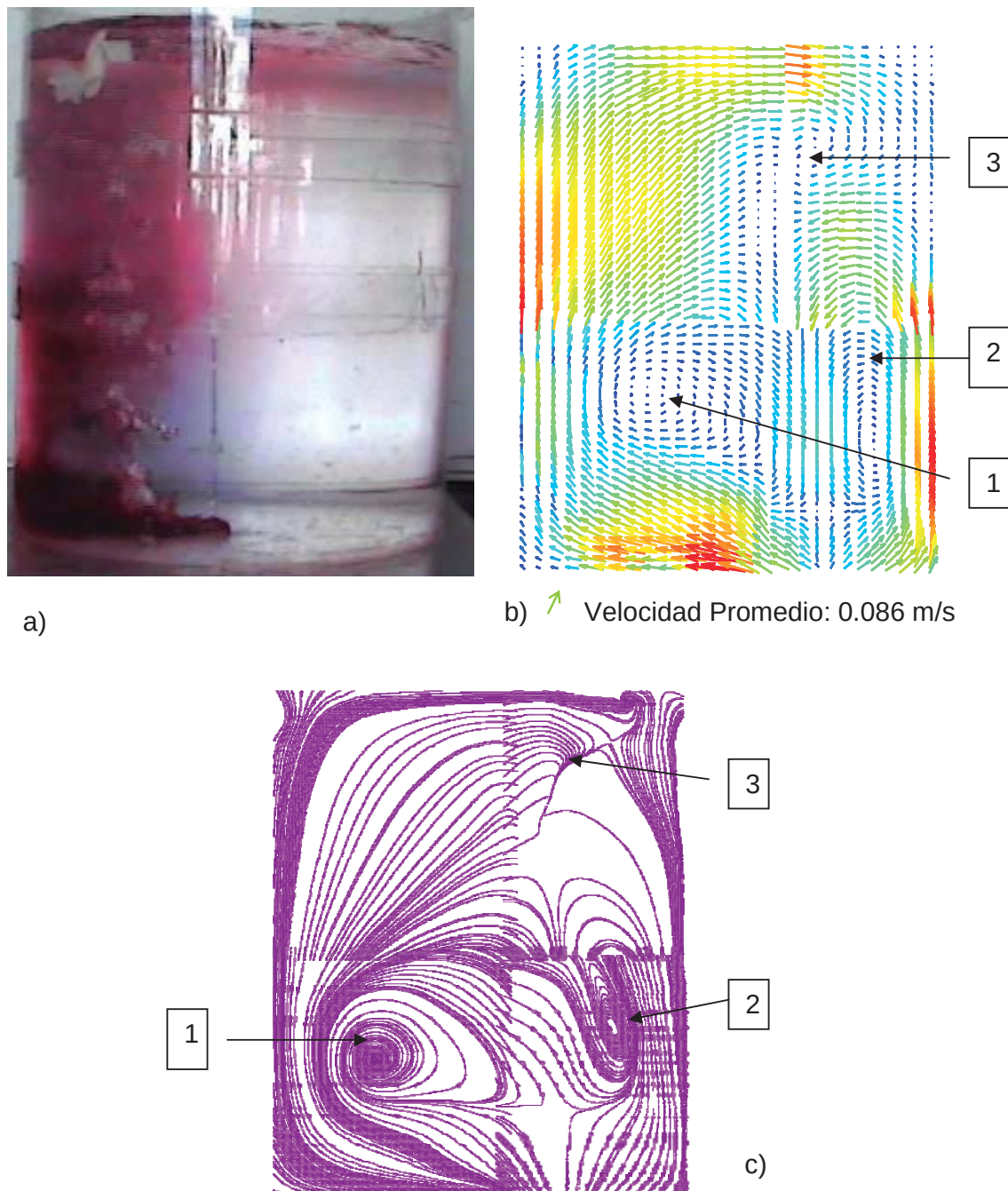


Figura 46. Patrón de flujo del caso 3 con un flujo de aire de 4.9lts/min a) Imagen de video del trazador a 8 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

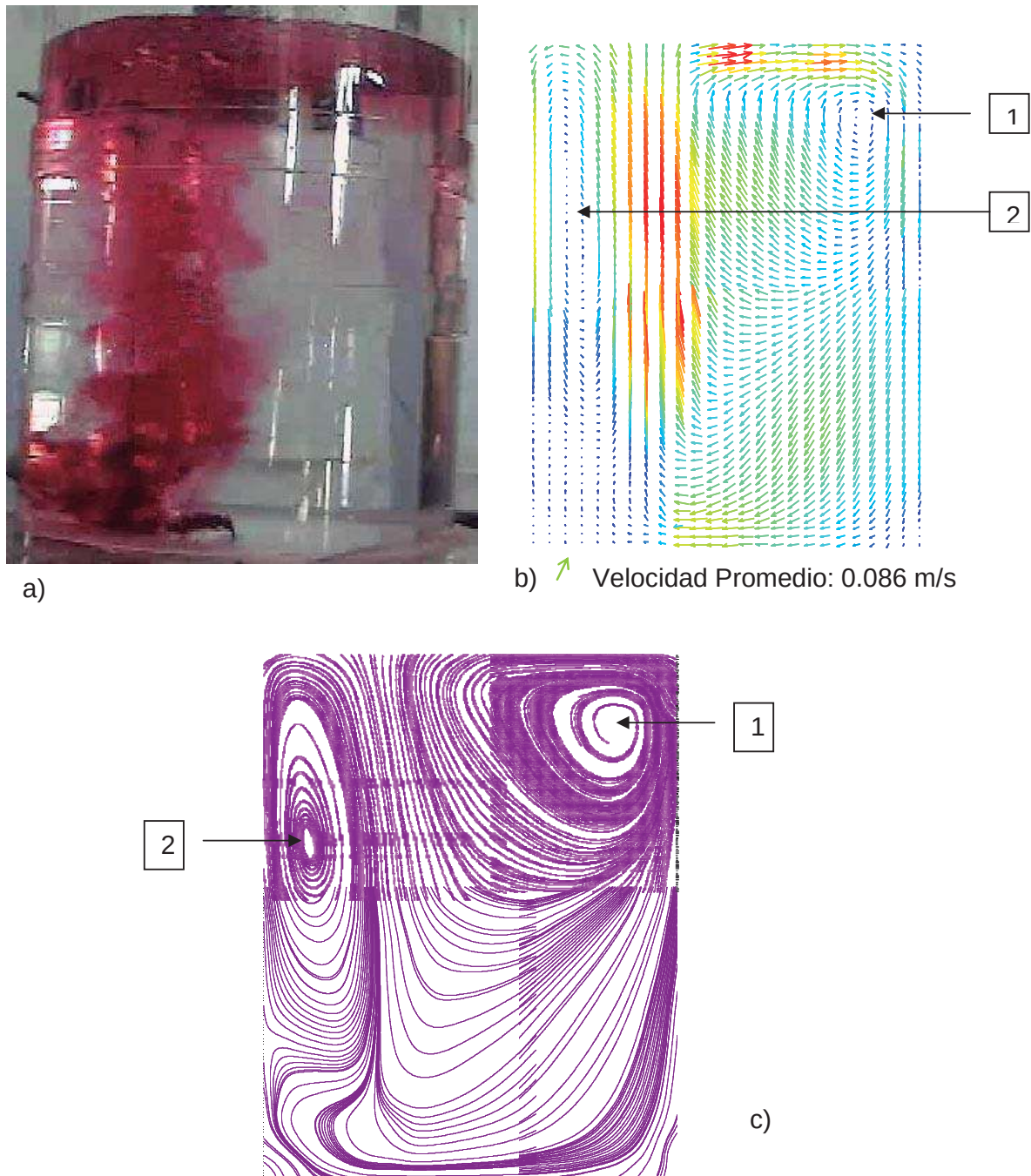


Figura 47. Patrón de flujo del caso 4 con un flujo de aire de 3.0 lts/min a) Imagen de video del trazador a 6 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

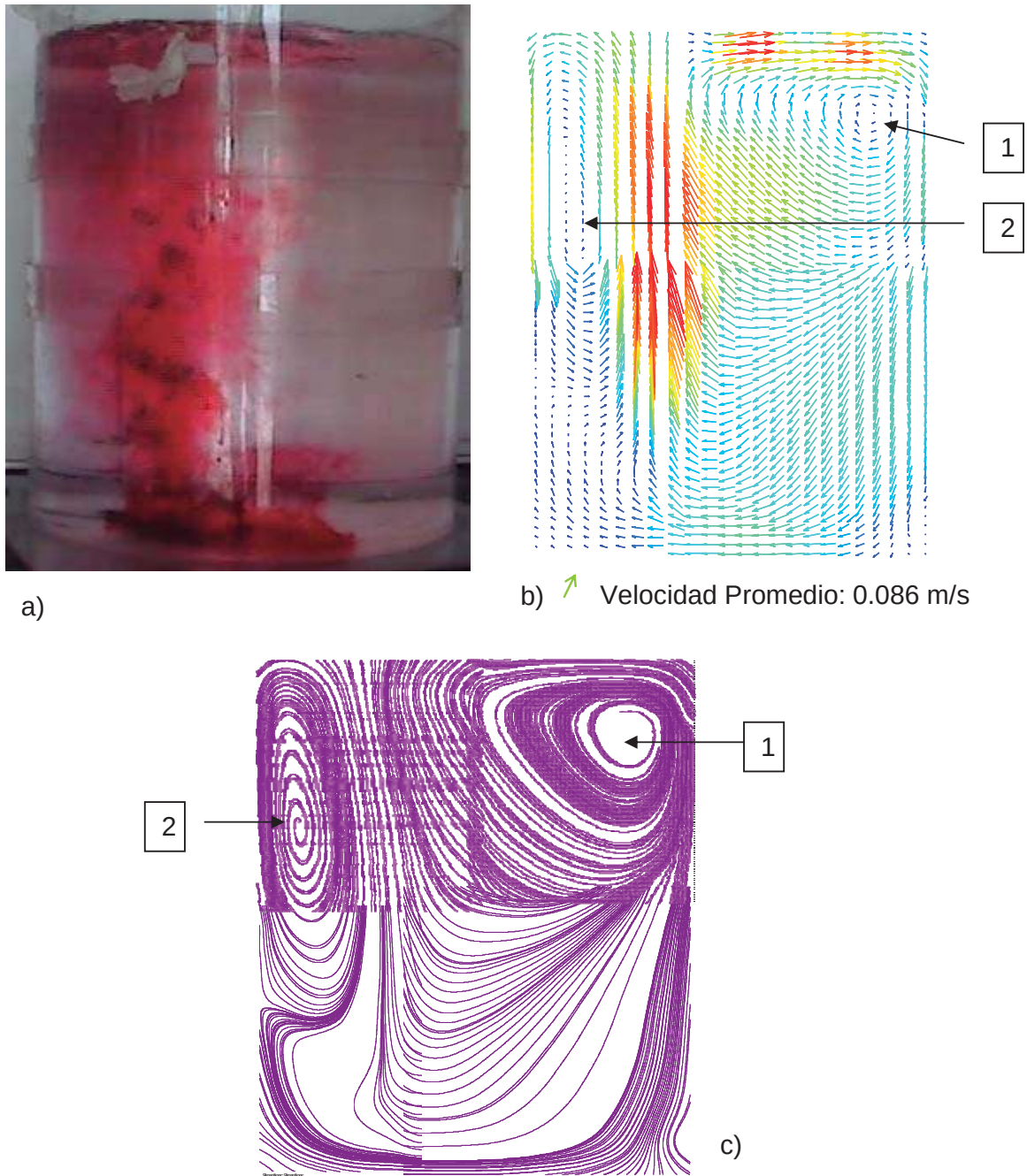


Figura 48. Patrón de flujo del caso 4 con un flujo de aire de 4.9 lts/min a) Imagen de video del trazador a 6 seg después de haber sido inyectado, b) Vectores de velocidad promedio obtenidos por el PIV y c) Líneas de corriente promedio obtenidos por PIV.

4.2 Análisis de Escoria

En las siguientes fotografías se puede observar que en la apertura de la capa de aceite intervienen dos factores principales:

- a) La posición de la inyección del gas.
- b) El flujo de gas que se este inyectando.

4.2.1 Para Flujo de 4.9 lt/min.

La peor posición de inyección de gas que se obtuvo debido a que no deja ninguna película de aceite en la interfase pared – superficie del lado donde se inyecta el gas es el caso 1 (figura 49). Después de que el flujo de gas se impacta contra la pared parte de este es desviado en forma angular y alta velocidad rompiendo una mayor área de la capa de aceite, lo que hace suponer mayor turbulencia en la superficie lo cual se confirma con el sensor de conductividad en la superficie donde la curva de tiempo de mezclado es muy irregular indicando fuertes variaciones de velocidad.

En el caso 2 el área de apertura es un poco menor (figura 50) la velocidad de gas en las paredes no es tan grande como para despegar la capa de aceite en la pared dejando una pequeña película en la interfase pared – superficie. Lo que hace suponer menor erosión en ellas lo cual se confirma con los datos obtenidos de presión (tabla 6).

El caso tres es el mejor respecto al área de apertura de escoria (figura 51) ya que el área de apertura es menor que los otros casos, formándose dos ojos separados, sin embargo en este caso en particular se generan tres vorticidades como se observa en la figura 46 por lo que su tiempo de mezclado aumenta considerablemente.

El cuarto caso donde los tapones están cerca del centro, se abre un solo ojo en el centro de la olla de área pequeña (figura 52) pero ya que la inyección de aire esta muy cerca del centro geométrico de la olla se forman dos vorticidades de dimensiones grandes a cada lado de la inyección, (figura 48) por lo que el tiempo de mezclado aumenta.

En estos dos últimos se puede suponer que no existe tanta turbulencia en la superficie lo cual se confirma con el sensor de conductividad en la superficie donde la curva de tiempo de mezclado no es tan irregular como en los dos primeros casos.

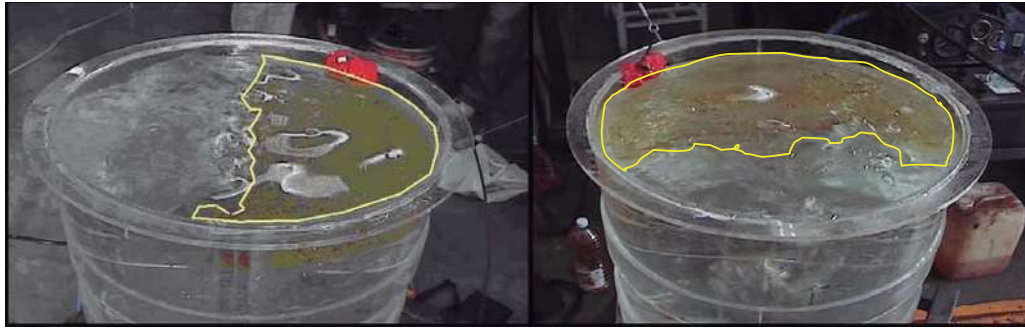


Figura 49. Fotografía de la apertura de escoria del caso 1 con un flujo de 4.9 lts./min.



Figura 50. Fotografía de la apertura de escoria del caso 2 con un flujo de 4.9 lts./min.



Figura 51. Fotografía de la apertura de escoria del caso 3 con un flujo de 4.9 lts./min.

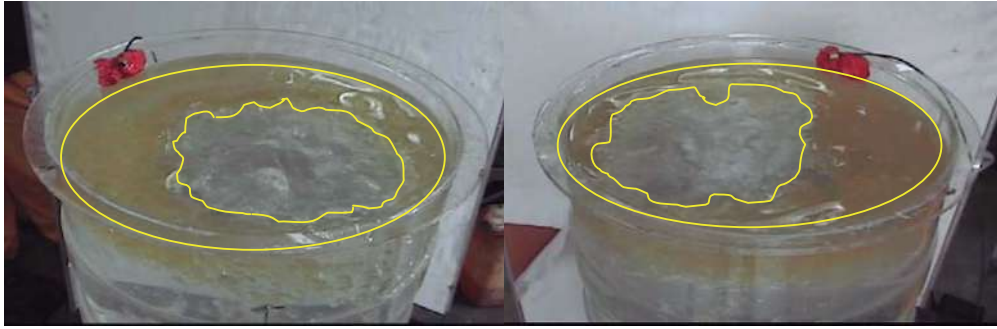


Figura 52. Fotografía de la apertura de escoria del caso 4 con un flujo de 4.9 lts./min.

4.2.2 Para un Flujo de 3.0 lts/min.

Para menor flujo el patrón de apertura de la capa de escoria no cambia de forma, reduciéndose considerablemente el área de apertura de esta para cada uno de los casos. El caso 5 solo se estudio con flujo pequeño y la apertura es muy parecida al caso 2 solo que deja un poco mayor la capa de aceite que existe entre la interfase pared -superficie.



Figura 53. Fotografía de la apertura de escoria del caso 1 con un flujo de 3.0 lts. /min.

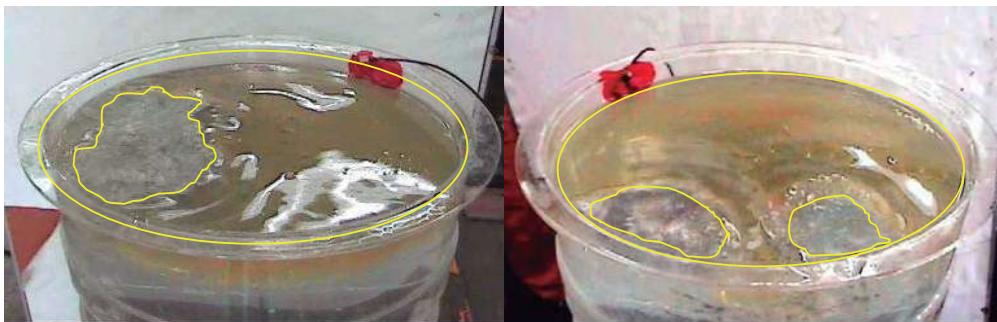


Figura 54. Fotografía de la apertura de escoria del caso 2 con un flujo de 3.0 lts. /min.



Figura 55. Fotografía de la apertura de escoria del caso 3 con un flujo de 3.0 lts. /min.



Figura 56. Fotografía de la apertura de escoria del caso 4 con un flujo de 3.0 lts. /min.



Figura 57. Fotografía de la apertura de escoria del caso 5 con un flujo de 3.0 lts. /min.

4.3 Análisis de Presión

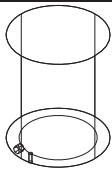
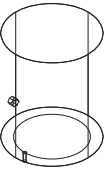
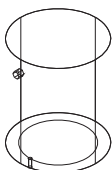
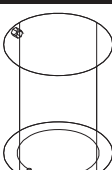
De acuerdo a los datos obtenidos el caso 1 presenta mayor presión en las paredes, tabla 6, debido a que todo el flujo de aire se inyecta por un solo tapón además esta mas cercano a la pared, esto se puede comprobar con las figuras de patrón de flujo donde se puede ver que la fuerza de inyección es tan grande que hace que la pluma se desplace hacia la pared provocando el choque de la

pluma de aire contra la pared lo que generaría como consecuencia un mayor desgaste del refractario de la pared.

El caso 2 tiene un rango de fluctuación mucho menor esto debido a que el flujo de aire se divide en dos tapones además de que estos están mas alejados a la pared por lo tanto el desgaste del refractario de la pared es menor.

Se estudiaron solo estos dos casos ya que se consideraron los mejores, y son los que presentaron los tiempos de mezclado mas cortos.

Tabla 6. Datos obtenidos de presión para los casos 1 y 2.

Posición del Sensor de Presión	Rango de fluctuación de presión (Kpa)	Rango de fluctuación de presión (Kpa)
	Caso1	Caso2
	0.25	0.09
	0.11	0.07
	0.07	0.04
	0.06	0.03

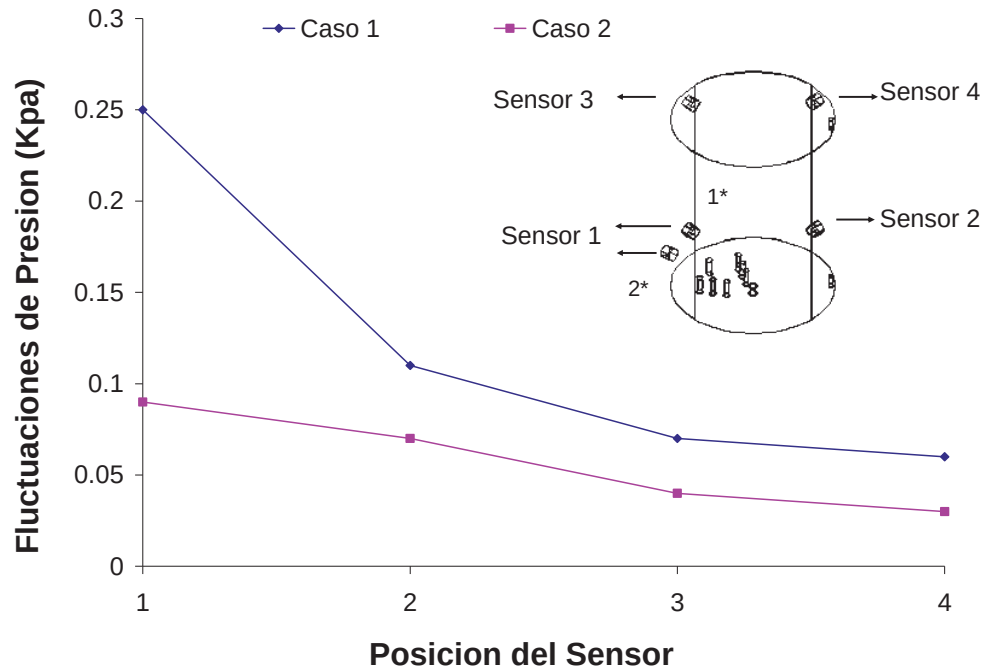


Figura 58.Comparación de los datos obtenidos de presión (1* sensor 1 para el caso 1 y 2* sensor 1 para el caso 2).

En la figura 58 se observa que el caso 2 en todas las posiciones del sensor de presión se obtuvieron valores menores pero donde existe mayor diferencia de presión es en el fondo donde se encuentra la pluma de inyección de aire, el caso 2 presenta valores mucho menores lo que podría prolongar la vida útil del refractario de la pared de la olla.

Conclusiones

Capitulo V

5.1 Conclusiones

En esta investigación se realizó la simulación física de la inyección de gas argon por el fondo en un modelo a escala de 1/7 de una olla de dimensiones comunes en la industria siderurgica, así como los flujos utilizados en la misma, llegando a las siguientes conclusiones:

- Entre más cerca de la pared se localiza la inyección de aire, para un mismo flujo mejor será el tiempo de mezclado, ya que esto favorece el obtener un patrón de flujo en donde predomina una sola vorticidad que abarca todo el ancho y alto de la olla; favoreciendo con esto a un transporte de masa más eficiente. Sin embargo, esto produce un mayor desgaste del refractario de la pared, aumentando la probabilidad de una mayor generación de inclusiones no metálicas lo que podría implicar un acero de mala calidad.
- Entre mayor es la velocidad de inyección de aire, mayor será la apertura de escoria.
- Las líneas de corriente se mantienen casi constantes para dos flujos diferentes de aire utilizados en el mismo caso.
- El tiempo de mezclado no es inversamente proporcional al aumento de flujo de aire de inyección, lo que hace pensar que existe un flujo de aire ideal para cada posición de inyección.
- Al utilizar dos tapones, la velocidad de inyección de aire disminuye, reflejándose en menores valores de presión sobre las paredes de la olla.

- El tiempo de mezclado es independiente de la posición donde se inyecta el trazador.
- El tener varias vorticidades en la olla aumenta el tiempo de mezclado.
- El caso 2 es el mejor para los dos flujos ya que presenta el segundo mejor tiempo de mezclado para los dos flujos y tanto la capa de apertura de capa de aceite como las presiones medidas en las paredes son menores comparándolas con el caso actual.
- A pesar que los casos 3 y 4 presentan poca apertura de la capa de aceite, los tiempos de mezclado son los peores, además de que presenta varias vorticidades grandes, las cuales favorecen el atrapamiento de inclusiones pequeñas en el seno del fluido.

5.2 Sugerencias para trabajos futuros

Los trabajos futuros que se pueden realizar son los siguientes.

- Realizar más experimentos con un mayor número de flujos de aire para todos los casos para comprobar si existe un flujo ideal de aire para cada caso.
- Hacer la simulación matemática para tener mayor información de las campos de velocidad así como poder hacer un estudio de eficiencia de remoción de inclusiones.

BIBLIOGRAFÍAS CONSULTADAS

1. J. A. Gómez: *Memorias del XXII Simposio Nacional de Siderurgia*, Realizado en Morelia, 2001, pp. 19-1.
2. Dipak Mazumdar and Roderick I. L. Guthrie, "The physical and mathematical Modelling of gas stirred systems", *ISIJ International*, Vol. 35 (1995), No. 1, pp. 1 - 20.
3. S. Chakraborty S., Sahai Y., *Metal Trans B* 1992:23B:135-151.
4. Mietz, J. y F. Oeters, *Model experiments on mixing phenomena in gas-stirred melts*. *Steel Research*, 1988. 59(52), p. 52-59.
5. Yuhua Pan and Bo Björkman, "Physical and Mathematical Modelling of Thermal Stratification Phenomena in Steel Ladles" *ISIJ International*, Vol. 42 (2002), No. 6, pp. 614 - 623.
6. Hasmet Turkoglu and Bakhtier Farouk "Mixing time and liquid circulation rate in steelmaking ladles with gas injection", *ISIJ International*, Vol. 31 (1991), No.12, pp. 1371 - 1380.
7. Y. Takatzuka y M.Iguchi, *ISIJ International*, 2001, Vol.41, No.2, pp.124-127.
8. Keizo Aramaki, *Bottom Blown Gas Blowing Apparatus for Molten Metal Ladle*, Num. Pat. 5945063, fecha pat. Aug.31, 1999, Unites States Patent.
9. Mats Söder, Thesis, "Growth and Removal of Inclusions During Ladle Stirring", *Royal Institute of Technology Sweden* 2001.
10. Kanehiro Ogawa and Toshio Onoue, "Mixing and Mass Transfer in Ladle Refining Process" *ISIJ International*, Vol. 29 (1989), No. 2, pp. 148 - 153.
11. Miao – Yong Zhu, Ikuo Sawada, Norimasa Yamasaki and Tse – Chiang Hsiao, "Numerical Simulation of three dimensional fluid flow and mixing process in gas stirred ladles " *ISIJ International*, Vol. 36 (1996), No. 5, pp. 503 – 511.
12. Alfonso Nájera Bastida, Tesis de Doctorado, "Efecto de la Geometría de Inhibidores de Turbulencia Sobre El Patrón de Flujo en un Distribuidor de Colada Continua", IPN, 2007.
13. Turkdogan, ET, "Fundamentals of Steelmaking", *The Institute of Materials*, October of 1996.
14. AISE, *The Making, Shaping and Treating of Steel - Steelmaking and Refining Volume*, The AISE Steel Foundation.

BIBLIOGRAFIA

15. Anu Jauhiainen, Lage Jonsson and Dong-Yuan Sheng, "Modelling of Alloy mixing into Steel" *Scandinavian Journal of Metallurgy* 2001, 30: 242 - 253.
16. J. I. Xia, T. Ahokainen and L. Holappa, "Analysis of Flows in a Ladle with Gas-Stirred melts" *Scandinavian Journal of Metallurgy* 2001, 30: 69 - 76.
17. S.P. Lobanov, V.G. Ovsyannikov and A. V. Sarychev "Bottom blowing tuyeres for 175- ton steel Ladles in service at an open hearth furnace shop" *Refractories and industrial ceramics*, 11 january 2005.
18. Olusegun J. Ilegbusi, Manabu Iguchi and Walter Wahnsiedler "Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations" Chapman and Hall/CRC.
19. Miao - Yong Zhu, Takeo Inomoto, Ikuo Sawada and Tse - Chiang Hsiao, "Fluid Flow and Mixing Phenomena in the Ladle Stirred by Argon Through Multi-Tuyere" *ISIJ International*, Vol. 35 (1995), No. 5, pp. 472 - 479.
20. R. S. Sicroski, L. B. Trindade, A.C. Vilela, R. D. Morales, "Influence of non Drag Forces on Inertia-Gravity Dominated Stirring Flows in Steel Ladles", *ISIJ Internacional*, January of 2007.
21. Carlos O. Ayala, Tesis de Maestría, ITM, "Análisis de flujo de fluido en un distribuidor delta mediante modelación física" Junio del 2007. pp 35-38.
22. Iguchi, M., K. Nakamura, y R. Tsujino, Mixing time and fluid flow phenomena in liquids of varying kinematic viscosities agitated by bottom gas injection. *Metallurgical and Materials Transaction B*, 1998. 29B(June): p. 569-575.
23. Yunus Cengel, John Cimbala "Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones" Mc Graw Hill, 2006, pp 129-132 y 380-383
24. Dong Yuan Sheng, Mats Söder, Pär Jonsson, "Modeling micro inclusion growth and separation in gas stirred ladles" *Scandinavian Journal of Metallurgy* 2002, 31:134-147.
25. Documento Informativo "Perfil de la Industria Siderúrgica Mexicana" CANACERO. Febrero del 2008. pp 2-10.
26. Octave Levenspiel, "Ingeniería de las Reacciones Químicas" Ed. Repla Universidad del Estado de Oregon, 1987.
27. R.I.L.Guthrie "Engineering in Process Metallurgy" Oxford Science Publications 1992 pp 158-170.

BIBLIOGRAFIA

28. Thomas Szirtes "Applied Dimensional Analysis and Modeling", Mc Graw Hill 1988 pp 468-472.