



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

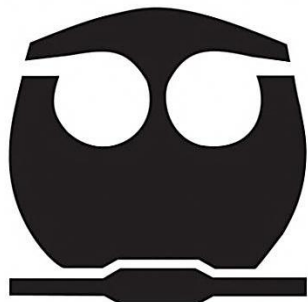
FACULTAD DE QUÍMICA

**TRANSFERENCIA DE MASA SÓLIDO-LÍQUIDO
EN UN MODELO FÍSICO DE UN CONVERTIDOR
PEIRCE-SMITH**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:
ERICK ESLAVA SANDOVAL**



MÉXICO, D.F.

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. ALBERTO INGALLS CRUZ

Vocal: Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Secretario: Prof. BENJAMÍN BELTRÁN FRAGOSO

1er Suplente: Prof. GERARDO SANJUAN SANJUAN

2do Suplente: Prof. ROBERTO CRUCES RESÉNDEZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química, U.N.A.M., Edificio D, Laboratorio 005.

Asesor del tema:

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

Erick Eslava Sandoval

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIAS

Contenido

Resumen.....	1
1 Introducción.....	3
1.1 Justificación.....	4
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivo.....	5
1.4 Metas.....	5
2 Antecedentes.....	6
2.1 Convertidor Peirce-Smith.....	7
2.2 Modelado físico del convertidor Peirce-Smith.....	11
2.2.1 Tiempo de mezclado en modelos físicos.....	13
2.2.2 Transferencia de masa.....	14
3 Procedimiento experimental.....	16
3.1 Dispositivo experimental.....	16
.....	18
3.2 Experimentos de gravimetría.....	18
3.3 Experimentos de tiempo de mezclado.....	20
4 Resultados.....	21
4.1 Tiempo de mezclado.....	21
4.2 Gravimetría.....	26
5 Discusión.....	33
5.1 Tiempo de mezclado.....	33
5.2 Gravimetría.....	38
5.3 Coeficiente de transferencia de masa.....	40
5.5 Diseño de experimentos: Método factorial de dos niveles.....	54
6 Conclusiones.....	57
7 Referencias bibliográficas.....	58
APENDICE I Ficha de seguridad del ácido benzoico.....	61

Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de flujo de los procesos de obtención de cobre [6].	7
Figura 2.2 Esquema del convertidor Peirce-Smith [7].	8
Figura 3.1 Esquema del equipo experimental empleado para las mediciones en el laboratorio; A) modelo físico, B) lanza de inyección de aire, C) rotámetro, D) mangueras para paso de aire, E) filtros de aceite y de agua y partículas sólidas, F) compresora de aire.	17
Figura 3.2 Esquema de la vista superior y frontal del modelo físico para el experimento de gravimetría: G) soporte de aluminio para sujetar la lanza, H) lanza, I) cople para sujeción del compacto, J) compacto de ácido benzoico (posición 3).	17
Figura 3.3 Esquema de las tres posiciones de los compactos de ácido benzoico dentro del modelo físico: Posición 1 (5 cm); Posición 2 (10 cm) y Posición 3 (20 cm). Las distancias están medidas a partir de la pluma formada por la inyección de aire lateral.	18
Figura 3.4 A) cilindro sólido de ácido benzoico compactado por medio de sujeción de abrazaderas metálicas y tubo de PVC cortado por la mitad; B) cilindro de ácido benzoico después del sinterizado durante 45 min en una estufa a 75 °C en presencia de aire.	19
Figura 4.1 . Cambio de pH vs tiempo de inyección para un flujo de 15 LPM y la posición 1 para tres pruebas independientes.	22
Figura 4.2 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 1.	23
Figura 4.3 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 2.	24
Figura 4.4 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 3.	25
Figura 4.5 Tiempo de mezclado en función del flujo volumétrico en las Posiciones 1, 2 y 3.	26

Figura 4.6 Cambio de peso en función del tiempo en las tres posiciones seleccionadas, flujo de 0 LPM.....	27
Figura 4.7 Cambio de peso en función del tiempo en las tres posiciones seleccionadas, flujo de 20 LPM.....	28
Figura 4.8 Fotografías de compactos de ácido benzoico. A) fotografía de compacto de ácido benzoico sumergido en el modelo físico en uno de los 4 ciclos a los que fue sometido; B) fotografía de compactos de ácido benzoico listos para su uso; C) fotografía de los compactos de ácido benzoico después de haberse sometido a los 4 ciclos en el modelo físico.	29
Figura 4.9 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 1 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	30
Figura 4.10 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 2 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	31
Figura 4.11 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 3 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	32
Figura 5.1 Variación del cambio pH para los diferentes flujos volumétricos de trabajo en la Posición 2.....	34
Figura 5.2 Evolución del cambio de pH para flujo volumétrico de 20 LPM en la Posición 2.....	35
Figura 5.3 Fotografías de las plumas formadas por la inyección de aire para los flujos de (a) 0 LPM, (b) 2 LPM, (c) 5 LPM, (d) 10 LPM, (e) 15 LPM y (f) 20 LPM [22].	39
Figura 5.4 Campo de velocidad para flujos de: A) 2 LPM y B) 20 LPM; la magnitud de las flechas es proporcional a la magnitud del vector de velocidad en cada punto de la malla de medición. Se muestra también una representación esquemática del compacto de ácido benzoico en la Posición 1(rectángulo con línea negra) [22].	40

Figura 5.5 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 1 y los flujos volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM para cada uno de los ciclos de una prueba de 4 ciclos.....	42
Figura 5.6 Coeficiente de transferencia de masa promedio y su desviación estándar para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	43
Figura 5.7 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 1 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	44
Figura 5.8 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 2 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	45
Figura 5.9 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 3 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	46
Figura 5.10 Coeficiente de transferencia de masa estimado para el flujo volumétrico de 20 LPM en las Posiciones 1, 2 y 3.....	47
Figura 5.11 Coeficiente de transferencia de masa estimado para el flujo volumétrico de 0 LPM en las posiciones 1, 2 y 3.	48
Figura 5.12 Delta peso en función del tiempo en la Posición 1 para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM 15 LPM y 20 LPM. Las líneas representan una regresión lineal (forzada al origen).....	49
Figura 5.13 Delta peso en función del tiempo en la Posición 3 para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM 15 LPM y 20 LPM. Las líneas representan una regresión lineal (forzada al origen).....	50
Figura 5.14 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 1 y los flujos de volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	51
Figura 5.15 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 3 y los flujos de volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.....	52
Figura 5.16 Coeficiente de transferencia de masa para tres posiciones distintas con un flujo constante [20]; PC posición cercana, PM posición media y PA posición alejada de la tobera. La profundidad a la que se colocaron los compactos se mantuvo constante.....	53
Figura 5.17 Factores de estudio del modelo factorial.....	56

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Distribución de impurezas en las diferentes corrientes del convertidor durante la conversión de mata de cobre de alta y baja pureza [8].	9
Tabla 2.2 Números adimensionales e interpretación física.	12
Tabla 3.1 Condiciones de trabajo para determinar el tiempo de mezclado.	20
Tabla 5.1 Evolución de campo de color en tres posiciones para el flujo de 2 LPM. Los tiempos están referidos al tiempo de inyección.	36
Tabla 5.2 Evolución del campo de color en tres posiciones para el flujo de 20 LPM. Los tiempos están referidos al tiempo de inyección.	37
Tabla 5.3 Valores estimados de pendiente (m) y coeficiente de correlación (R^2) para los 5 flujos de trabajo a partir de la regresión lineal para la Posición 1.	49
Tabla 5.4 Valores estimados de pendiente (m) y coeficiente de correlación (R^2) para los 5 flujos de trabajo a partir de la regresión lineal para la Posición 3.	50
Tabla 5.5 Matriz experimental del modelo factorial e información estadística para un intervalo de confianza del 95%.	54
Tabla 5.6 Resultados del modelo factorial.	55

Listado de símbolos

Símbolo	Cantidad	Unidades
K	Coeficiente de transferencia de masa	cms^{-1}
t	Tiempo	s
A	Área	cm^2
C_s^*	Concentración de saturación de ácido benzoico	gL^{-1}
C_b	Concentración instantánea	gL^{-1}
M	Masa de la muestra	g
pH	Potencial de Hidrogeno	pH
LPM	Flujo de aire volumínico	$Lmin^{-1}$
Fr	Número de Froude	—
Fr^*	Número de Froude modificado	—
Re	Número de Reynolds	—
Pe	Número de Peclet	—
Mo	Número de Morton	—
Sc	Número de Schmidt	—
Sh	Número de Sherwood	—
Gr	Número de Grashof	—
L	Longitud del compacto de ácido benzoico	cm
D	Diámetro del compacto de ácido benzoico	cm
N_A	Flux molar de la especie "A"	$gmolA m^{-2}s^{-1}$
v	Velocidad	ms^{-1}
g	Aceleración de la gravedad	ms^{-2}

L	Longitud característica	m
ρ_g	Densidad del gas	kgm^{-3}
ρ_L	Densidad del liquido	kgm^{-3}
ρ	Densidad	kgm^{-3}
μ	Viscosidad	Nsm^{-2}
C_p	Calor especifico a presión constante	$Jkg^{-1}K^{-1}$
k	Conductividad térmica	$Jm^{-1}K^{-1}s^{-1}$
α	Difusividad térmica	m^2s^{-1}

Resumen

Es importante cuantificar la transferencia de masa sólido-líquido en un convertidor Peirce-Smith debido a que la disolución de los sólidos que se agregan durante la operación está al menos parcialmente controlada por el transporte de masa. Sin embargo, esta cuantificación es complicada de estimar a partir de las ecuaciones fundamentales debido a los fenómenos que interactúan durante la conversión de mata de cobre dentro del reactor.

Por ese motivo, en este trabajo se empleó un modelo físico para estimar el coeficiente de transferencia de masa sólido-líquido mediante la medición de la pérdida de peso de cilindros de ácido benzoico sinterizados. Los cilindros estaban sumergidos dentro del modelo en tres distintas posiciones y a una profundidad constante. Además se estimó el tiempo de mezclado local y total con la ayuda de un trazador ácido colorido agregado en pulso. Las variables estudiadas fueron el flujo volumínico de aire inyectado y la posición de los cilindros. Se trabajó, con 5 flujos volumínicos de aire (2 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM) a una presión constante de 40 psia y tres posiciones al interior de modelo físico.

Con los datos obtenidos durante las pruebas de medición de pH se estimó el tiempo de mezclado local con un criterio de $\pm 5\%$ del cambio de pH final. Por otra parte, con los datos de pérdida de peso se propuso estimar el coeficiente de transferencia de masa.

Los valores obtenidos de tiempo de mezclado para el flujo volumínico de 20 LPM fueron de 28.33 s hasta 37.33 s (dependiendo de la posición de trabajo) y de 68 s hasta 88 s para el flujo volumínico de 2 LPM. El tiempo de mezclado para el flujo de 2 LPM se aparta del comportamiento global observado con los otros valores de flujo volumínico, por lo que se descartó para los experimentos de gravimetría, siendo substituido por un flujo de 0 LPM, es decir, fluido en

reposo. El coeficiente de transferencia de masa estimado es aproximadamente el cuádruple para el flujo de 20 LPM con respecto a los resultados para 0 LPM, para la Posición 1.

A partir de un estudio estadístico, usando un modelo factorial de dos niveles, el factor que más influye es el flujo volumínico, seguido de la Posición y en último lugar la combinación de ambos factores.

1 Introducción

El convertidor de cobre Peirce-Smith es un reactor cilíndrico, horizontal, con toberas a los costados, en el que se lleva a cabo la transformación de la mata líquida (concentrado de mineral compuesto de Cu-Fe-S fundido) a cobre blíster (99% Cu), mediante la inyección de aire enriquecido con oxígeno. Las principales reacciones químicas son la desulfuración del baño líquido y la oxidación del hierro.

Debido a que las reacciones son exotérmicas, se acostumbra agregar fundente sólido, así como retornos del mismo proceso (también en forma sólida), para controlar la temperatura del baño.

Los procesos de obtención de materiales metálicos y de manufactura de los componentes ingenieriles derivados de éstos, han acompañado a la humanidad desde tiempos ancestrales. Sin embargo, es solo hasta tiempos relativamente recientes que se ha dejado de lado la metodología de ensayo y error, en favor del uso de un conjunto de herramientas que permiten incorporar el conocimiento fundamental para diseñar, controlar y optimizar estos procesos. A esta metodología se le conoce como Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y se basa en estudiar a los procesos utilizando cinco herramientas principalmente [1], [2]:

- Mediciones en planta
- Mediciones en planta piloto
- Modelos físicos
- Modelos matemáticos
- Mediciones en el laboratorio

1.1 Justificación

La disolución de la carga sólida en un convertidor Peirce-Smith está controlada por transporte de masa, por lo que es importante caracterizar el coeficiente de transporte de masa. Para esto, es común recurrir al uso de modelos físicos debido, principalmente, a las dificultades para realizar mediciones en un sistema real, además de aislar y por tanto simplificar el problema de interés.

Es así que en este proyecto se estimó el coeficiente de transporte de masa sólido-líquido a partir de mediciones de gravimetría en un modelo físico, para el cual ya se contaba con mediciones del campo de velocidad y de la geometría de la pluma.

Para ello es necesario elaborar cilindros compactos y sinterizados de ácido benzoico para simular las cargas sólidas que entran al convertidor Peirce-Smith; para simular la mata y el flujo de oxígeno se recurrió al uso de agua y aire a temperatura ambiente.

Para conocer la respuesta del sistema, y así definir las condiciones de estudio, primero se requiere conocer el tiempo de mezclado local. Esto se realiza mediante la adición de un trazador ácido cuyo color cambie con el pH y el registro del cambio local de pH y de color.

1.2 Hipótesis

El coeficiente de transporte de masa sólido-líquido dentro de un modelo físico del convertidor Peirce-Smith aumentará a medida que se aumente el flujo de aire y la posición de medición sea cercana a la pluma.

1.3 Objetivo

El presente trabajo tiene como finalidad:

- Determinar la distribución del coeficiente de transferencia de masa sólido-líquido al interior de un modelo físico del convertidor Pierce-Smith en función del flujo volumínico de aire insuflado.

1.4 Metas

- Determinar la distribución del tiempo de mezclado local en función del flujo volumínico de aire insuflado.
- Caracterizar la evolución del campo de color de un trazador agregado al modelo físico.
- Diseñar y fabricar cilindros sólidos de ácido benzoico que se disolverán en el baño líquido.
- Medir la pérdida de peso de los cilindros de ácido benzoico como función de la posición en el modelo físico para los distintos valores de flujo volumínico de aire insuflado.
- Estimar el coeficiente de transporte de masa para cada condición experimental.

2 Antecedentes

Después del hierro, el cobre es uno de los metales más utilizados debido a: 1) su abundancia, 2) su alta conductividad eléctrica y 3) las propiedades eléctricas y mecánicas de sus aleaciones [3]. Sus principales aleaciones industriales son los latones y los bronce. El latón es la aleación no ferrosa más importante; hoy en día ocupa el segundo lugar en producción de todas las aleaciones, solo por detrás del acero [4].

El cobre se obtiene a partir de sus minerales mediante procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos, siendo el primero utilizado para cobre nativo, minerales sulfurados y minerales altamente oxidados; mientras que el segundo proceso se utiliza principalmente para minerales poco oxidados y de baja ley. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo para la obtención de cobre a partir de sus minerales. La etapa de la conversión se realiza usualmente en el convertidor Peirce-Smith.

En la década de los 80's se generaron profundos cambios tecnológicos en el campo de la producción de metales y materiales, impulsados por las fuertes presiones competitivas. Debido a esto, se desarrolló el uso de modelos matemáticos y físicos para representar las operaciones de procesamiento de metales primarios. Estas técnicas demostraron ser eficaces para la resolución de problemas, mejora de procesos, la optimización de procesos y en el desarrollo de nuevas tecnologías [5]. Por lo que en este trabajo se usó un modelo físico para estimar el coeficiente de transporte de masa sólido-líquido para el convertidor Peirce-Smith.

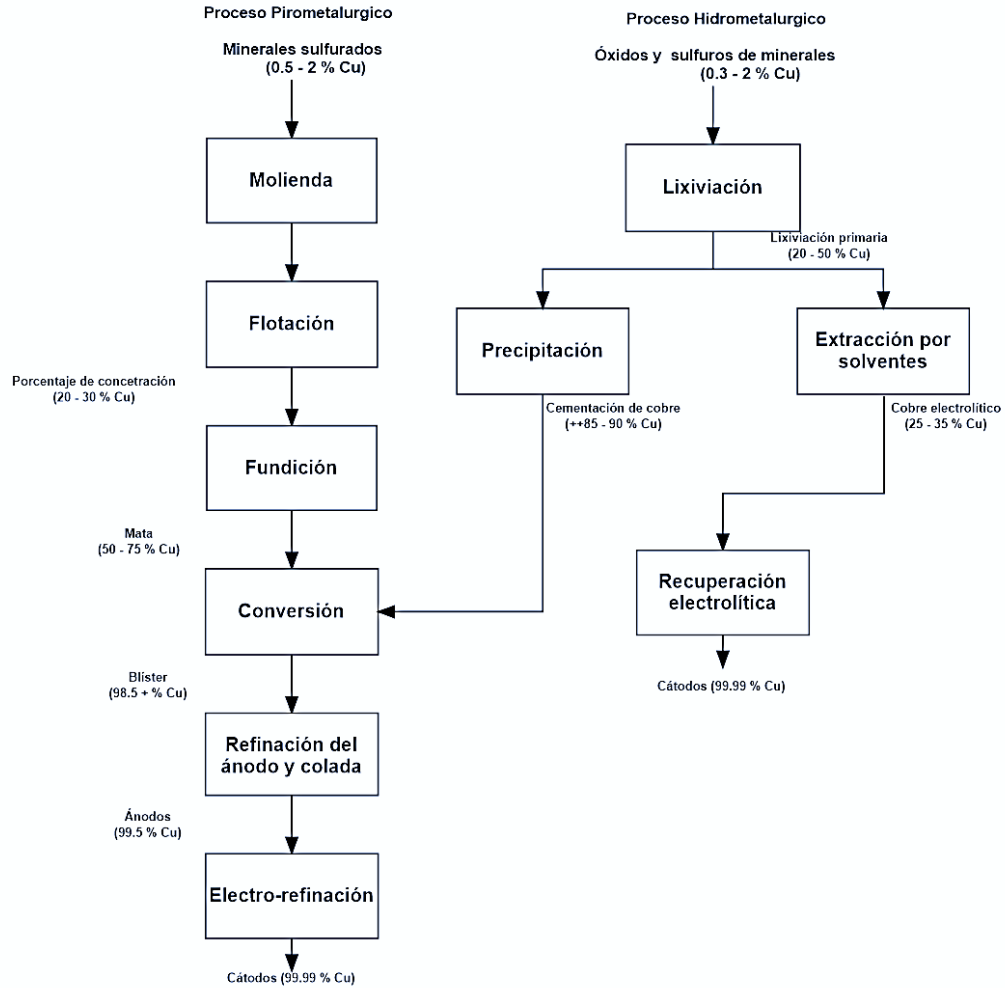


Figura 2.1 Diagrama de flujo de los procesos de obtención de cobre [6].

2.1 Convertidor Peirce-Smith

La conversión de cobre (referirse a la Figura 2.1) consiste en la oxidación de mata de cobre (Cu - Fe - S; 50-75% Cu) fundida, proveniente de la fundición de concentrado de para formar cobre blíster (>98.5 % de Cu). Esta operación implica la oxidación del Fe y del S de la mata con aire, en ocasiones enriquecido con O₂. Se realiza usualmente en un reactor giratorio conocido como convertidor Peirce - Smith, en el que insufla aire o aire enriquecido con

O₂, a la mata fundida a través de una hilera de toberas sumergidas, como se muestra en la Figura 2.2. Durante el proceso el baño está entre 1100 y 1300 °C.

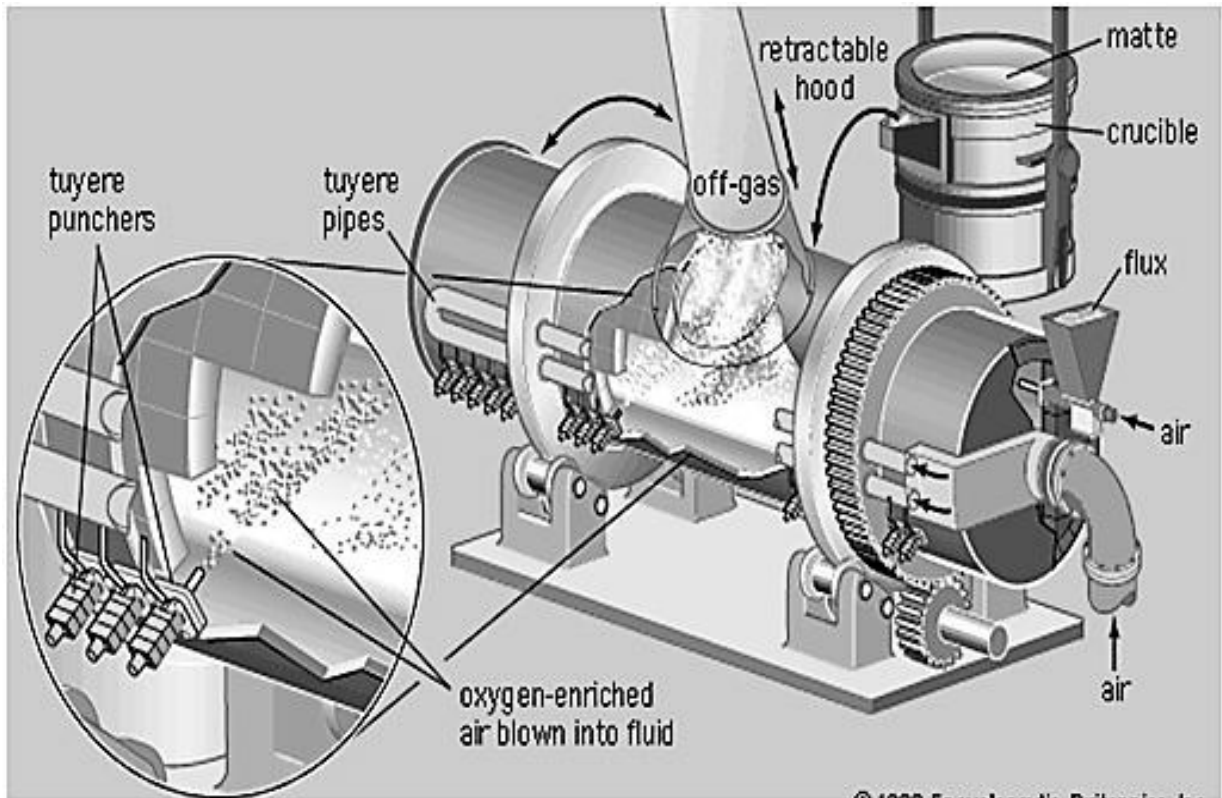
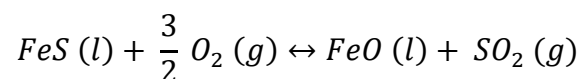


Figura 2.2 Esquema del convertidor Peirce-Smith [7].

La conversión de mata de cobre a cobre blíster se lleva a cabo en dos etapas [8].

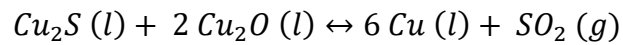
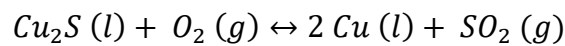
La primera etapa se le denomina “formación de escoria”; en esta ocurre la oxidación del sulfuro de hierro para formar óxido de hierro de acuerdo a la reacción siguiente:



El óxido de hierro se combina con la sílice para formar una escoria. Después de la primera etapa de insuflado de aire enriquecido con O₂, la mata se compone

esencialmente de Cu₂S llamado "metal blanco". Una pequeña concentración de Cu₂O (del orden del 1%) se forma en la escoria durante esta primera etapa.

La segunda etapa es conocida como "formación de blíster" y consiste en insuflar aire y oxígeno en el baño, lo que crea una mezcla de Cu₂S y cobre impuro. Los productos de la oxidación en esta mezcla son SO₂, cobre impuro fundido y óxido de cobre (presente en la escoria) de acuerdo a la siguiente reacción [8][9]:



El cobre fundido es denso y fluido, por lo que se hunde rápidamente por debajo de las toberas. Los principales elementos eliminados de la mata durante la conversión son el Fe y el S. Sin embargo, muchas otras impurezas son eliminadas parcialmente en forma de vapor o en la escoria, como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1 Distribución de impurezas en las diferentes corrientes del convertidor durante la conversión de mata de cobre de alta y baja pureza [8].

Elemento	30% Mata de Cu			70 % Mata de Cu		
	Distribución %			Distribución %		
	Cobre blíster	Escoria	Gases de salida	Cobre blíster	Escoria	Gases de salida
As	10	40	50	50	32	18
Bi	6	16	78	55	23	22
Cd	1	6	93	7	2	91
Ni	48	48	4	66	31	3
Pb	1	44	55	5	49	46
Sb	3	31	66	59	26	15
Sc	60	10	30	70	5	25
Zn	0	89	11	8	79	13

Las dimensiones de un convertidor Peirce-Smith industrial [8] son típicamente 4 m de diámetro y 9-11 m de longitud, medidos al interior de la carcasa. Se compone de una carcasa de acero de 5 cm de espesor, y se forran con ~ 0.5 m de ladrillos refractarios de cromo - magnésita. Durante la operación se insufla aire enriquecido con O₂ o aire puro a través de una línea de entre 40 a 50 toberas por convertidor (cada una de 4-6 cm de diámetro). Los convertidores de estas dimensiones tratan de 300 a 600 Ton de mata por día para producir 100 a 400 Ton de cobre diario. Una fundición típica tiene de dos a cinco convertidores en función de su capacidad total de producción.

El aire entra en la mata de 0.5 a 1 m por debajo de la superficie, casi horizontalmente [8][10]. El flujo volumínico por tobera es del orden de 10 a 15 Nm³ / min, a una velocidad de 80-120 m/s. El insuflar aire a flujos por encima de aproximadamente 17 Nm³ / min / tobera puede causar el derrame de mata y escoria del convertidor.

Para su operación [11], el convertidor Peirce-Smith se carga con la mata de cobre y el fundente (sílice); luego se inicia el flujo de aire y empieza a girar el convertidor; a medida que el hierro se oxida y la escoria se acumula, la escoria se derrama y se añade más mata y sílice. Este proceso cíclico continúa hasta que la carga consiste esencialmente en metal blanco.

Dependiendo de la pureza de la mata de cobre que se alimente al convertidor será la distribución de las impurezas en las corrientes de salida (ver Tabla 1.2).

Todo el calor para el mantenimiento de los líquidos del convertidor a las temperaturas especificadas proviene de la reacción de oxidación (exotérmica) del Fe y el S. La temperatura del convertidor se controla de tres formas posibles: 1) subir o bajar el flujo volumínico de aire enriquecido con O₂, lo que aumenta o disminuye la rapidez a la que el N₂ entra al convertidor, 2) el aumento o disminución de la rapidez de soplado, que modifica la rapidez a la que se oxidan el Fe y S y, por lo tanto, la rapidez a la que se produce calor y 3) el ajuste por la adición de los desechos de cobre.

El límite superior de la temperatura de trabajo oscila alrededor de 1250 °C y se ajusta para evitar un desgaste excesivo de las paredes del refractario [8].

2.2 Modelado físico del convertidor Peirce-Smith

Este tipo de horno no ha experimentado mejoras tecnológicas significativas en más de un siglo de funcionamiento, lo que abre la puerta para actualizarlo (Navarra and Kapusta, 2009) mediante el uso de modelado matemático y/o modelado físico [10] .

En el diseño del modelo físico de un proceso se busca representar o simplificar el sistema real, cambiando los materiales que se manejan y con frecuencia la escala de operación, de tal manera que se puedan efectuar mediciones convenientemente.

Los modelos físicos pueden clasificarse en tres grupos principales [2]:

1. **Modelos físicos rigurosos.** Se construyen siguiendo ciertas reglas estrictas llamadas criterios de similitud. En estas condiciones, las mediciones cuantitativas realizadas en el curso de los experimentos en el modelo (por ejemplo, campos de velocidad, perfiles de temperatura y rapidez de reacción) pueden traducirse directamente, a través de la escala apropiada, para describir el comportamiento del sistema real (prototipo).
2. **Modelos físicos semi-rigurosos.** Un enfoque alternativo es el estudio de los fenómenos físicos relevantes con el objetivo de proporcionar información para la construcción de un modelo matemático. En este caso ya no es posible escalar los resultados obtenidos en el modelo físico directamente al sistema industrial.

3. **Modelos *ad hoc*.** Un tercer tipo de modelo físico se basa en llevar a cabo experimentos *ad hoc* a fin de adquirir una respuesta preliminar del sistema.

Una de las consideraciones más importantes en la construcción de modelos físicos es decidir la escala adecuada. Bajo ciertas condiciones, los criterios de similitud geométrica especifican que grupos de números adimensionales son idénticos; usualmente, el criterio de similitud geométrica se combina con el criterio de similitud dinámica para diseñar al modelo físico [12].

La similitud dinámica representa la similitud de las fuerzas, las principales fuerzas que se presentan en sistemas dinámicos son las fuerzas inerciales, de presión, viscosas, gravedad, tensión superficial, fuerzas elásticas y electromagnéticas. Para el caso de modelos físicos del convertidor Peirce-Smith los números adimensionales que se han usado en el modelado físico son: el número de Froude (Fr), el número de Froude modificado (Fr*), el número de Reynolds (Re), el número de Peclet (Pe), y el número de Morton (Mo). La definición de cada uno de estos números adimensionales se muestra en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Números adimensionales e interpretación física.

Número adimensional	Interpretación física	Aplicación
$N_{Fr} = \frac{u^2}{gL}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza gravitacional}}$	Ondas y comportamiento de la superficie.
$N_{Fr}^* = \frac{\rho_g u^2}{(\rho_l - \rho_g)gL}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza gravitacional}}$	Comportamiento del fluido en sistemas gas-líquido.
$N_{Re} = \frac{Lu\rho}{\mu}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza viscosa}}$	Flujo de fluidos.
$N_{Pe} = \frac{Lu\rho C_p}{k} = \frac{Lu}{\alpha}$	$\frac{\text{Transferencia de calor por movimiento de vol}}{\text{Transferencia de calor por conducción}}$	Convección forzada.
$N_{Mo} = \frac{g\mu_l^4}{\rho_l(L\sigma)^3}$	$\frac{(\text{Gravedad}) * (\text{Viscosidad})}{\text{Fuerzas de tensión superficial}}$	Velocidad de la burbuja en líquidos.

2.2.1 Tiempo de mezclado en modelos físicos

El estudio de los fenómenos de mezclado ha recibido considerable atención a lo largo de los años; muy a menudo el concepto de tiempo de mezclado se ha utilizado para representar el estado de agitación en un reactor [[13]]. Se han hecho esfuerzos para cuantificar experimentalmente el tiempo de mezclado en función de las variables de operación. Se han aplicado diferentes técnicas experimentales, aunque las más utilizadas son los métodos basados en la medición de pH o de la conductividad eléctrica [14].

El tiempo de mezclado local, puede determinarse experimentalmente mediante la adición de un pulso de un trazador físico, cuya concentración se mide en puntos de interés dentro del reactor como función del tiempo. En el sistema de interés en esta investigación, por tratarse de un proceso *batch*, solo es posible realizar mediciones al interior del reactor [15].

Chibwe *et al.* [16] estudiaron el patrón de flujo y mezclado de un convertidor Peirce-Smith industrial experimentalmente y numéricamente. El modelo para simulaciones físicas era un recipiente cilíndrico horizontal 1:5 con siete toberas en un lado del cilindro que tipifica un convertidor Peirce-Smith diseñado con los números de Froude modificado y de Morton. El aire se sopló en el cilindro a través de las toberas, para la simulación de aire o de inyección de aire enriquecido con oxígeno en el PSC. Las fases de mata y escoria se simularon con agua y queroseno, respectivamente. En particular se estudió la influencia de la variación de las condiciones de soplado y las cantidades de escoria en la mezcla con cinco velocidades de flujo volumétrico de aire y cinco niveles de espesor de la escoria. Los resultados de tiempo de mezclado fueron evaluados en términos de potencia total de mezclado y se propusieron dos correlaciones de tiempo de mezclado para la estimación de los tiempos de mezclado en el modelo del convertidor (para espesores de baja escoria y alta escoria).

Sheikhzadeh *et al.* [13] estudiaron los fenómenos de mezcla y la fluidinámica en un modelo físico 1:5 del convertidor Peirce-Smith (utilizando los números adimensionales de Froude modificado y de Morton), midiendo el tiempo de mezclado usando la técnica de adición de un trazador ácido para 4 velocidades de flujo y 4 posiciones de inmersión de la lanza. Sus resultados mostraron que el tiempo de mezclado disminuyó con el aumento de la velocidad de flujo y la posición de inmersión de la lanza.

2.2.2 Transferencia de masa

La transferencia de masa entre el sólido y el líquido es una característica esencial de muchas operaciones pirometalúrgicas llevada a cabo en hornos, cucharas de colada, reactores, etc. A continuación se muestra una revisión bibliográfica de la transferencia de masa en convertidores Peirce-Smith.

Vaarno *et al.* [17] construyeron un modelo físico de una rebanada del convertidor Peirce-Smith (con 2 boquillas de aire) para verificar la aplicabilidad del modelo Euleriano de dos fases que utilizaron para modelar matemáticamente a este tipo de reactores. La rebanada fue escalada a $\frac{1}{4}$ de la escala real de un convertidor industrial Peirce-Smith; las dimensiones de la rebanada del convertidor fueron calculadas mediante los números de Froude modificado y el número de Reynolds basados en la inyección del gas. A pesar de las simplificaciones el modelo matemático, los resultados de éste fueron similares a los obtenidos experimentalmente.

Almaraz [18] realizó un estudio de la transferencia de momentum y masa en un modelo físico del convertidor Peirce-Smith. Para el cálculo de la transferencia de masa utilizó el número de Sherwood (Sh) en función del número de Reynolds (Re) y del número de Schmidt (Sc) en un análisis de la capa límite en la región aire-líquido durante el ascenso de una burbuja de aire. Observó que, en las regiones más cercanas a las toberas, la magnitud de la velocidad es

mayor, dando como resultado valores mayores del coeficiente de transferencia de masa.

Adjei [11] estudió la transferencia de masa de SO_2 en un modelo físico de un convertidor Peirce- Smith. Para determinar la transferencia de masa en la interfase líquido-gas fue necesario desarrollar una ecuación en función de la velocidad de inyección del gas entre el jet y el caudal formado considerando un elemento diferencial a lo largo de la trayectoria del chorro e igualo la disminución del gas inyectado. Graficó los valores del coeficiente de masa estimado con respecto al número de Reynolds, observando que al aumentar el número de Reynolds aumentaba el coeficiente de transferencia de masa.

Roselló *et al.* [19] obtuvieron el índice de desulfuración en un convertidor Peirce-Smith en un reactor industrial en función del tiempo durante los dos pasos de conversión a partir de datos obtenidos en una planta donde muestran que la variación de la temperatura de la mata no influyo en el transporte de masa, por lo que la resistencia química se consideró mínima. A partir de la variación del coeficiente volumétrico global dedujeron que la transferencia de masa tiene dos resistencias: una del lado del gas (constante) y otra del lado del líquido que aumenta cuando la concentración de azufre disminuye.

Chibwe *et al.* [20] caracterizaron la transferencia de masa mediante la técnica de gravimetría en un modelo físico de un convertidor Peirce-Smith escalado mediante el flujo de aire insuflado con el número de Froude modificado; a partir de la disolución de sólidos compactos de ácido benzoico colocados en múltiples posiciones y alturas, estimaron el valor del coeficiente de transferencia de masa sólido-líquido a partir de la pérdida de peso.

3 Procedimiento experimental

En este Capítulo se describe la metodología utilizada para obtener información gravimétrica para estimar el coeficiente de transferencia de masa sólido-líquido en tres posiciones al interior de un modelo físico ya existente en el Depto. de Ingeniería Metalúrgica [21].

3.1 Dispositivo experimental

El modelo físico (ver Figuras 3.1 y 3.2) representa a una rebanada de un convertidor de cobre Pierce-Smith, por lo que generará información considerando solo a una de las toberas a lo largo del reactor industrial; sus dimensiones son: 60.8 cm de diámetro, 41.8 cm de altura y 29.0 cm de profundidad. Los fluidos de trabajo fueron agua (para simular a la mata) y aire, ambos a temperatura ambiente; la altura del agua se mantuvo constante a un valor de 33.0 cm. El flujo de aire se produjo con una compresora marca EVANS de 235 L y 3 HP; se reguló con un rotámetro marca COLE PRAMER (con un rango de operación de 0 a 25 LPM de aire) y un controlador de presión (marca TRUPER, con un rango de operación de 0 a 140 psi). En la línea de aire (entre la compresora y el rotámetro) había dos filtros: uno de agua y partículas sólidas, y otro de aceite.

Las variables independientes fueron el flujo volumínico de aire insuflado y la posición de medición al interior del modelo físico. Se estudiaron cinco valores de flujo volumínico: 2, 5, 10, 15 y 20 LPM (a 40 psi en la línea de alimentación del aire) y tres posiciones al interior del modelo físico ("1", "2", "3", ver Figura 3.3); estas posiciones se tomaron a partir de revisar los patrones de flujo y la forma de la pluma reportados previamente [22]. Los experimentos se realizaron por triplicado.

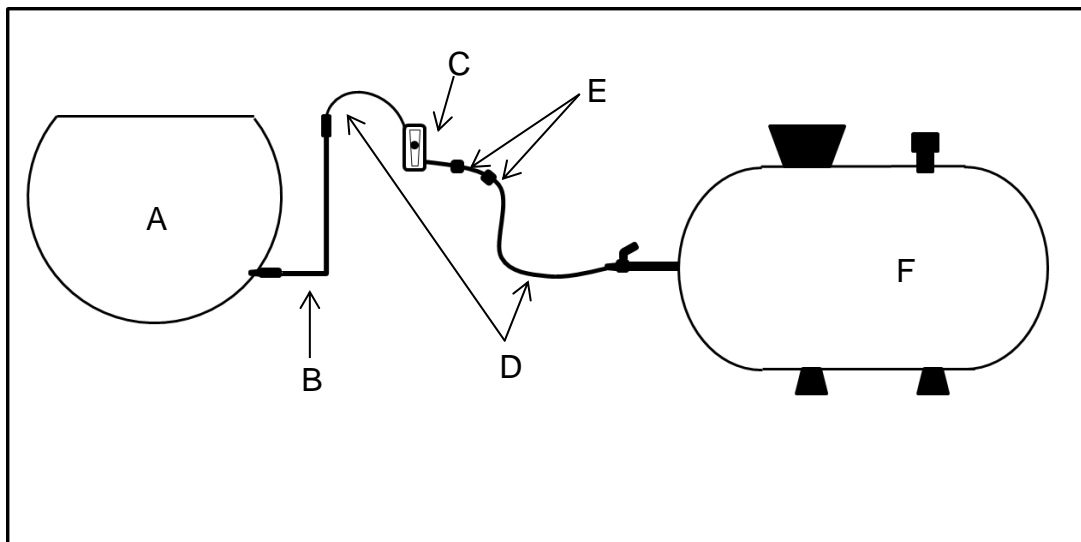


Figura 3.1 Esquema del equipo experimental empleado para las mediciones en el laboratorio; A) modelo físico, B) lanza de inyección de aire, C) rotámetro, D) mangueras para paso de aire, E) filtros de aceite y de agua y partículas sólidas, F) compresora de aire.

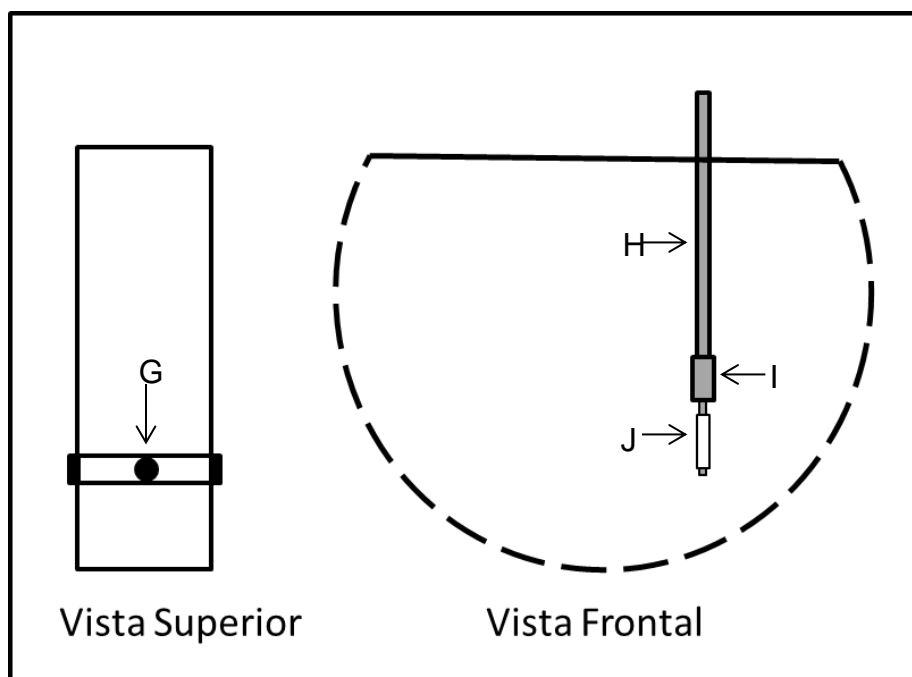


Figura 3.2 Esquema de la vista superior y frontal del modelo físico para el experimento de gravimetría: G) soporte de aluminio para sujetar la lanza, H) lanza, I) cople para sujeción del compacto, J) compacto de ácido benzoico (posición 3).

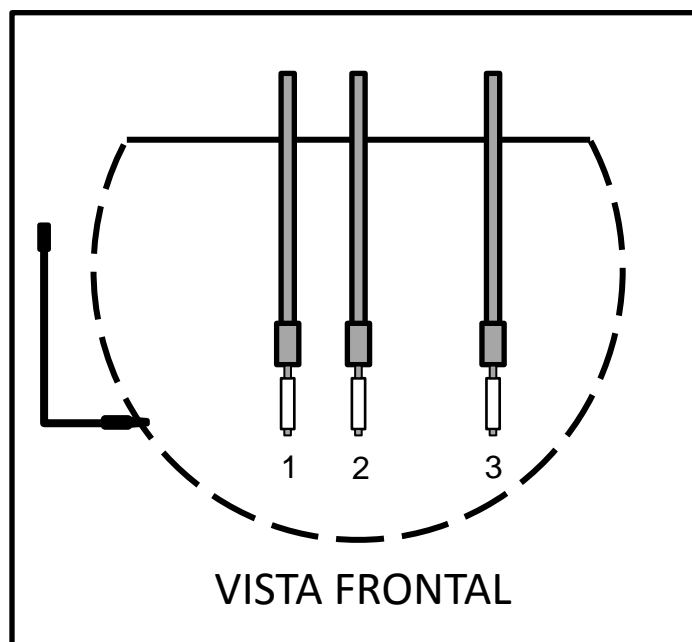


Figura 3.3 Esquema de las tres posiciones de los compactos de ácido benzoico dentro del modelo físico: Posición 1 (5 cm); Posición 2 (10 cm) y Posición 3 (20 cm). Las distancias están medidas a partir de la pluma formada por la inyección de aire lateral.

3.2 Experimentos de gravimetría.

Los cilindros de ácido benzoico fueron colocados en cada una de las posiciones seleccionadas una vez que el modelo físico había alcanzado condiciones de operación de estado estable. Al momento de sumergir los cilindros se iniciaba el cronometro (900 s por ciclo). Después de cada ciclo, los cilindros se sometieron a secado en una estufa marca FISHER SCIENTIFIC a 75 °C durante dos horas para evaporar el agua remanente. Posteriormente, los cilindros se sacaban de la estufa y se pesaban en una balanza analítica marca PIONEER OHAUS modelo PA153 (con una capacidad de hasta 151 g y una incertidumbre de 0.001g) para luego iniciar un nuevo ciclo de ensayo, (de 900 s), dentro del modelo físico hasta completar los cuatro ciclos.

Los cilindros se diseñaron de tal manera que se favorezca su disolución a través de su área lateral, esto es, transporte de materia 1D (radial); las

dimensiones son, entonces, 6.52 cm de longitud y 2.58 cm de diámetro. Los cilindros se fabricaron por sinterizado a 75 °C, para lo cual las hojuelas de ácido benzoico [23] (ver Apéndice I) se colocaron dentro de un molde cilíndrico de PVC cortado en dos mitades que se sujetaron con 4 abrazaderas metálicas para favorecer la compresión del ácido benzoico. En la Figura 3.4 se muestra una fotografía de un cilindro ya sinterizado.

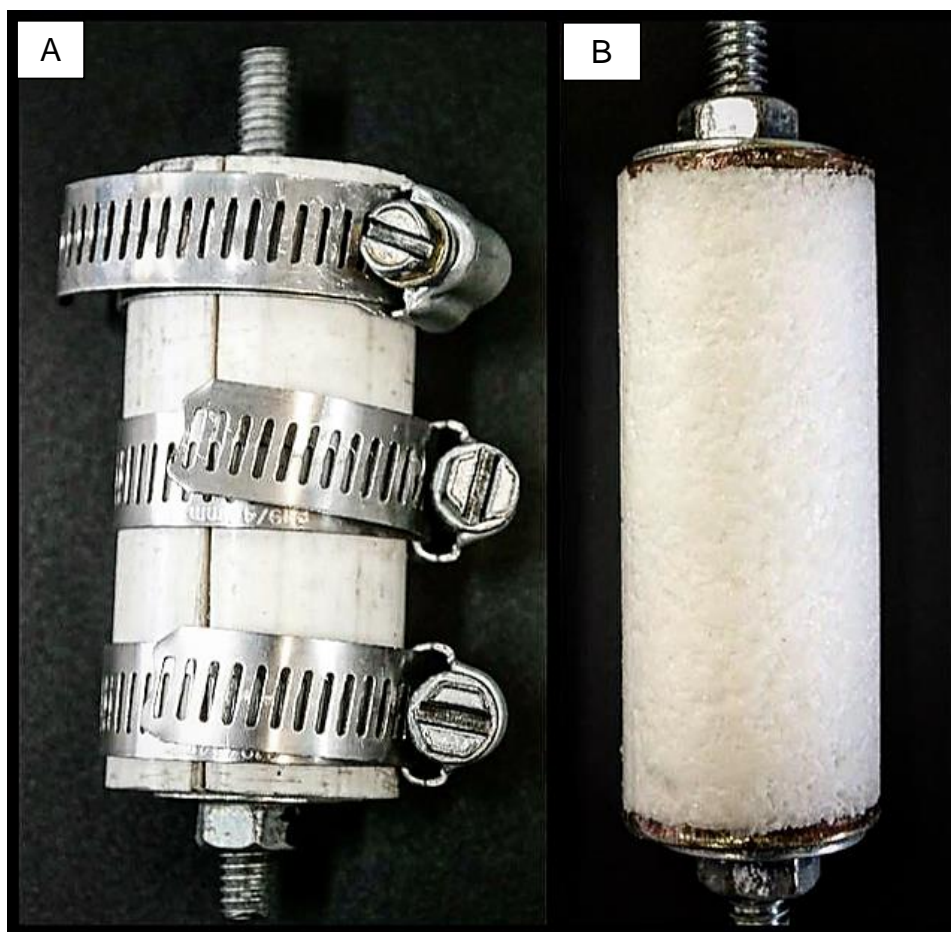


Figura 3.4 A) cilindro sólido de ácido benzoico compactado por medio de sujeción de abrazaderas metálicas y tubo de PVC cortado por la mitad; B) cilindro de ácido benzoico después del sinterizado durante 45 min en una estufa a 75 °C en presencia de aire.

3.3 Experimentos de tiempo de mezclado

Adicionalmente a las pruebas de gravimetría, se determinó el tiempo de mezclado local (en experimentos independientes a los descritos anteriormente) en las mismas posiciones (ver figura 3.3), colocando un electrodo sumergido a 16 cm de la base del modelo. Para conocer la respuesta del sistema, se agregó (en pulso) una disolución acuosa (ácida y colorida) y se registró la evolución del pH con un potenciómetro marca OAKTON conectado a una laptop y controlado con el *software* Smartlogger II de IQ Instrument; la frecuencia de adquisición de datos fue de un dato por segundo. Al mismo tiempo se colocó una cámara marca NIKON (modelo D5200) en una posición perpendicular al modelo físico para grabar la evolución del campo de color en el baño líquido. El trazador era una mezcla 1:1 de una disolución acuosa de anilina (60 g/L) con una disolución acuosa de ácido sulfúrico 1:1.

Tabla 3.1 Condiciones de trabajo para determinar el tiempo de mezclado.

Flujo Volumétrico (LPM)	Posición		
2	1	2	3
5	1	2	3
10	1	2	3
15	1	2	3
20	1	2	3

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos de tiempo de mezclado y gravimetría obtenidos siguiendo la metodología en el Capítulo 3.

4.1 Tiempo de mezclado

A partir de los datos obtenidos mediante el *software* de adquisición de datos se construyeron las curvas correspondientes de cambio de pH vs tiempo (ver Figura 4.1). La cantidad de cambio de pH se define como la diferencia entre el pH instantáneo y el pH inicial para cada prueba, y sirve para que las curvas comiencen siempre en un mismo valor lo que ayuda a comprarlas visualmente. Como se observa en la figura, el cambio de pH se mantiene constante e igual a cero durante los segundos iniciales de cada prueba posteriormente el electrodo registra una disminución de cambio de pH hasta alcanzar un valor mínimo, para luego aumentar y finalmente estabilizarse a tiempos relativamente largos, lo que señala que el proceso local de mezclado ha concluido.

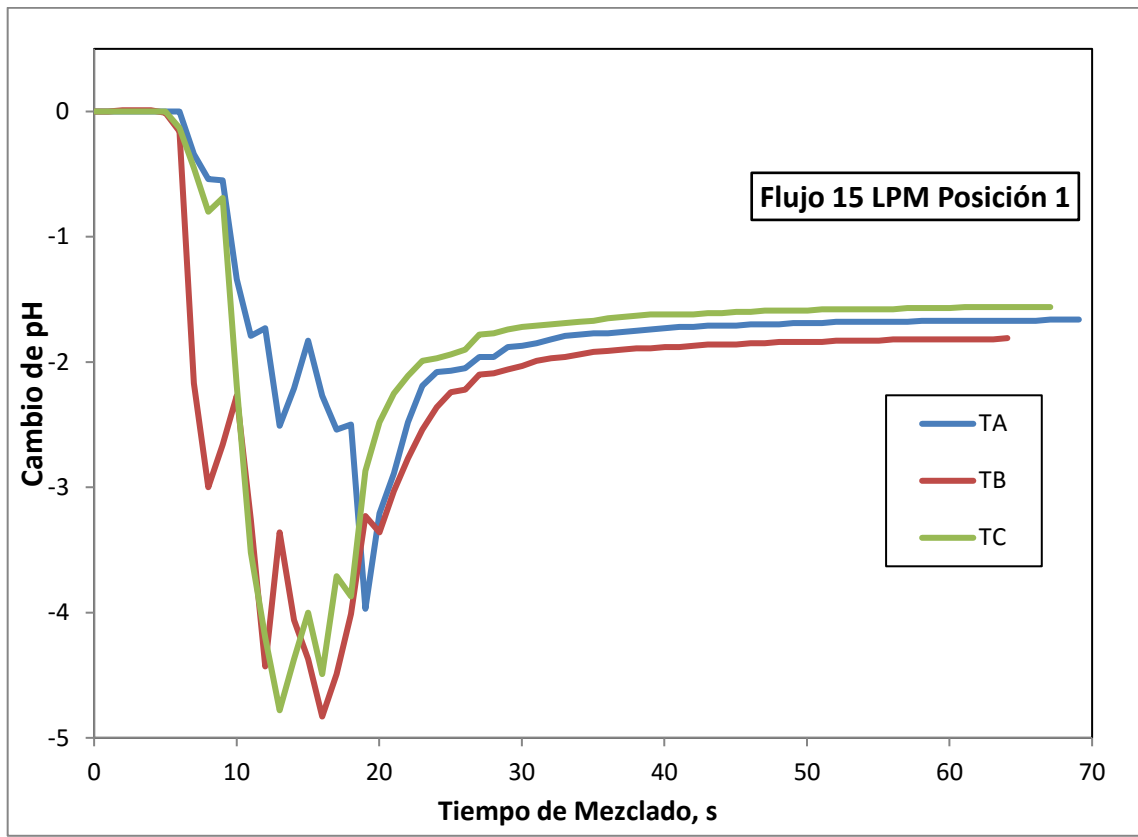


Figura 4.1 . Cambio de pH vs tiempo de inyección para un flujo de 15 LPM y la posición 1 para tres pruebas independientes.

A partir de curvas como las mostradas en la Figura 4.1 se determinó el tiempo de mezclado, tomando en cuenta el criterio de $\pm 5\%$ [16] (dependiendo de la forma de cada curva) del valor final de cambio de pH; después se promediaron los valores de tiempo de mezclado para cada flujo volumétrico y posición. La Figura 4.2 muestra una gráfica de barras del tiempo de mezclado (promedio de tres pruebas independientes) en función del flujo volumétrico junto con la desviación estándar correspondiente para la Posición 1. En esta grafica se observa que el tiempo de mezclado disminuye al aumentar el flujo volumétrico; el rango de valores de tiempo de mezclado va de 73 a 37.7 s. En las Figuras 4.3 y 4.4 se grafican resultados similares pero para las Posiciones 2 y 3, respectivamente; la tendencia en el comportamiento del tiempo de mezclado es similar en las tres figuras.

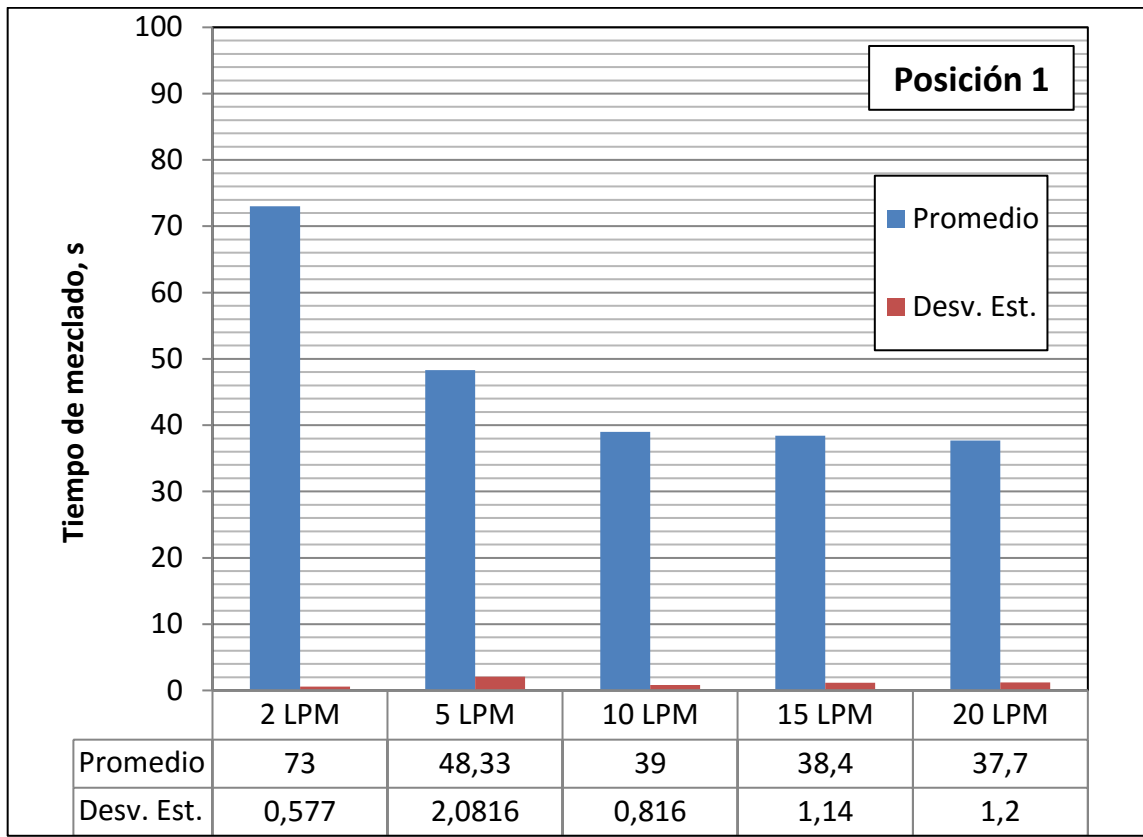


Figura 4.2 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 1.

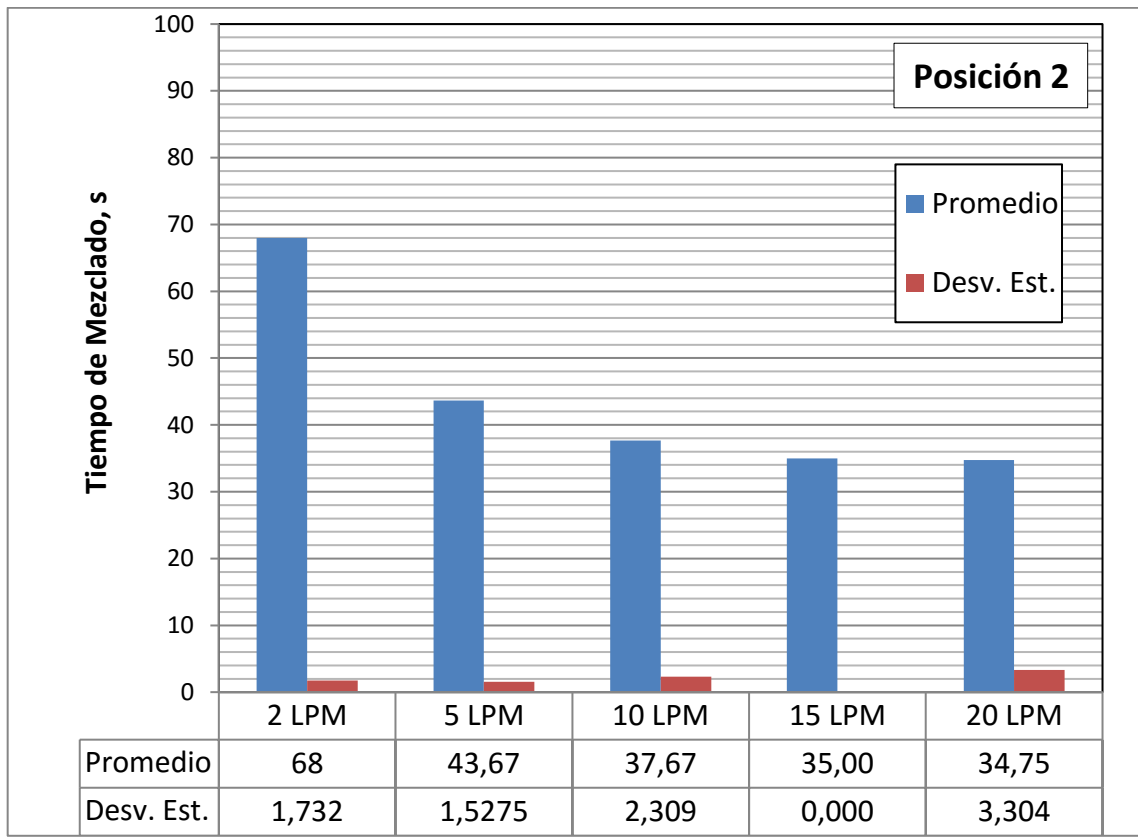


Figura 4.3 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 2.

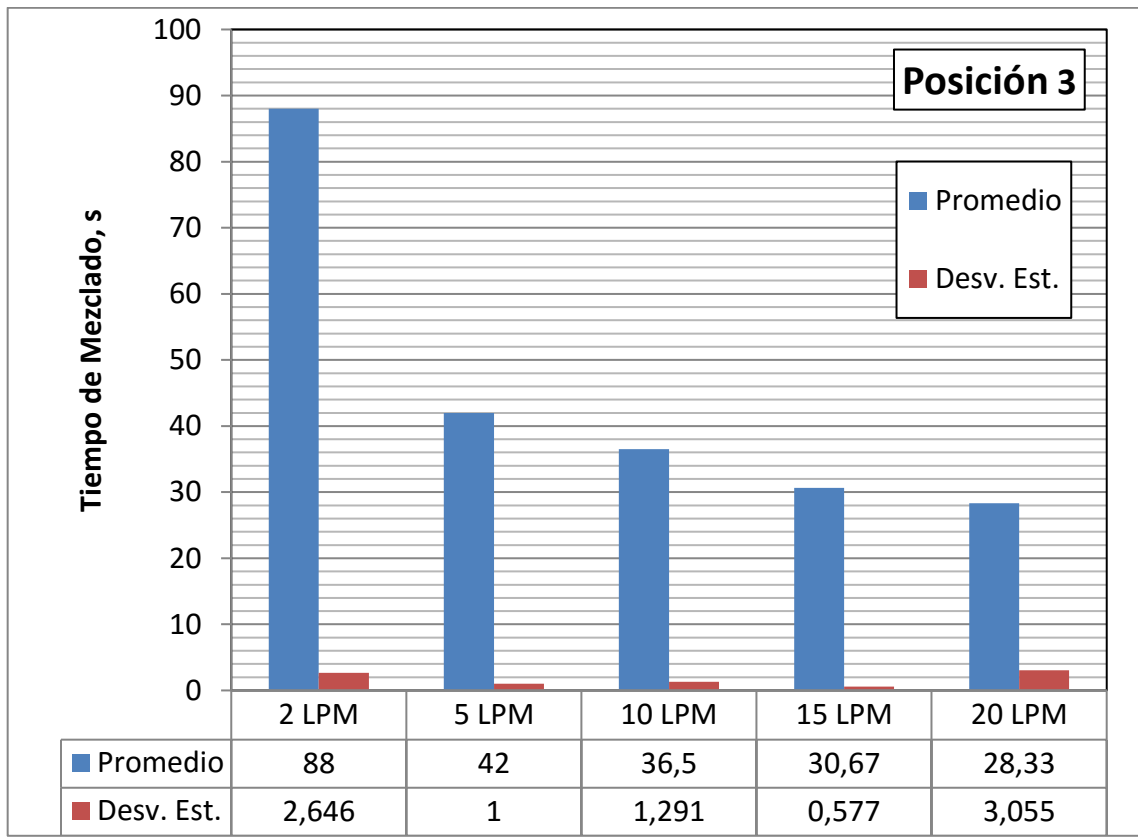


Figura 4.4 Tiempo de mezclado (promedio y su desviación estándar) en función del flujo de trabajo para la Posición 3.

En la Figura 4.5 se grafican las curvas de tiempo de mezclado en función del flujo volumétrico para las Posiciones 1, 2 y 3. Se observa una tendencia de decaimiento exponencial para las tres posiciones, siendo el orden de los valores de tiempo de mezclado: Posición 1 > Posición 2 > Posición 3 para valores de flujo volumétrico mayores o iguales a 5 LPM. Sin embargo, para el flujo de 2 LPM el orden es: Posición 3 > Posición 1 > Posición 2.

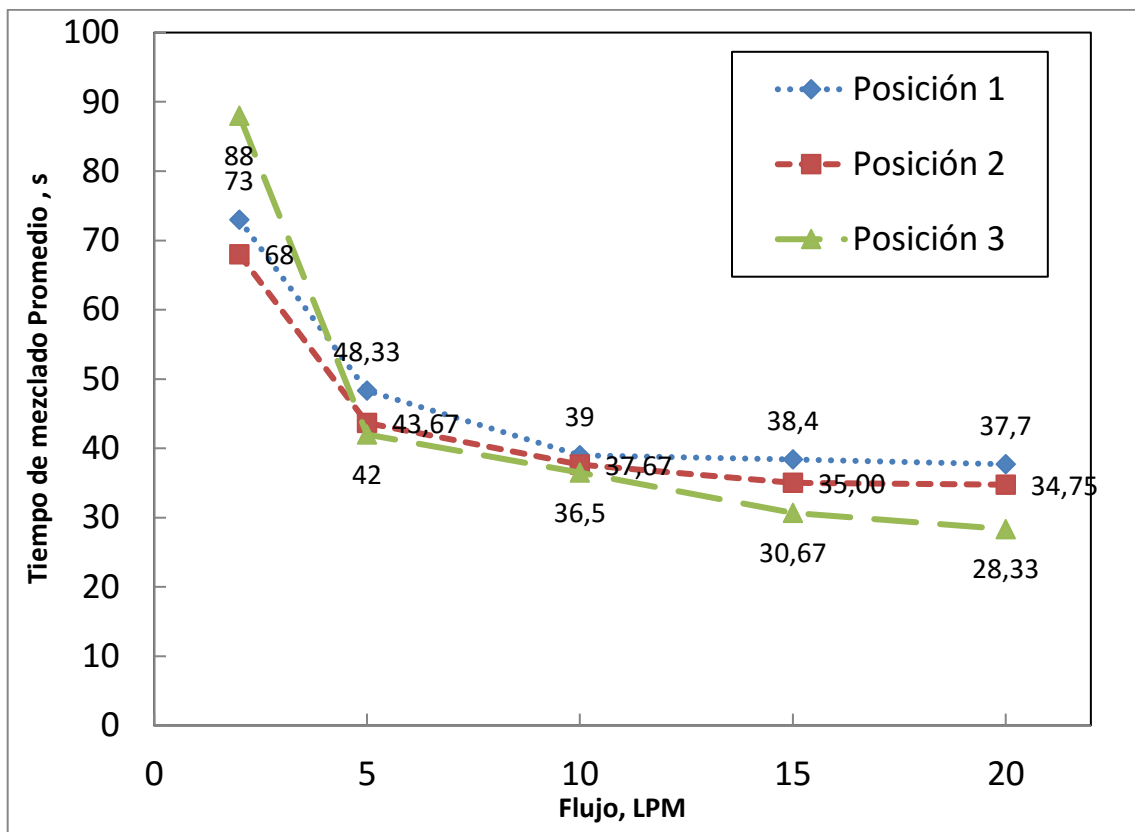


Figura 4.5 Tiempo de mezclado en función del flujo volumétrico en las Posiciones 1, 2 y 3.

4.2 Gravimetría

Como se mencionó, en cada prueba de gravimetría se pesó el cilindro de ácido benzoico después de cada bloque de 900 s de ensayo. De manera similar a lo que se hizo para las pruebas de evolución de pH, se tomó como referencia el peso del cilindro al inicio de la prueba de gravimetría para calcular el cambio de peso. En las Figuras 4.6 y 4.7 se presentan las gráficas de cambio de peso para los flujos de trabajo de 0 LPM y 20 LPM (los valores extremos) y las tres posiciones. Se observa que para el flujo de 20 LPM la pérdida de peso de los compactos de ácido benzoico es mucho mayor (de -1.06 g a -1.207 g) que para el flujo de 0 LPM (de -0.09 g a -0.098 g).

En la Figura 4.8 se muestran fotografías de los compactos de ácido benzoico utilizados durante las pruebas de gravimetría. En la primera imagen se observa el compacto sumergido en el modelo físico durante uno de los 4 ciclos a los que fue sometido; en la fotografía de la parte inferior izquierda se observa la forma final de los compactos después del proceso de compactación y sinterizado para su uso en el modelo físico, la fotografía de la parte inferior derecha muestra 3 compactos utilizados para un flujo de trabajo en las 3 diferentes posiciones seleccionadas. Al finalizar las pruebas de gravimetría se observó evidencia de erosión en la superficie de los compactos de ácido benzoico en la posición cercana a la pluma de aire cuando se usaron los flujos mayores.

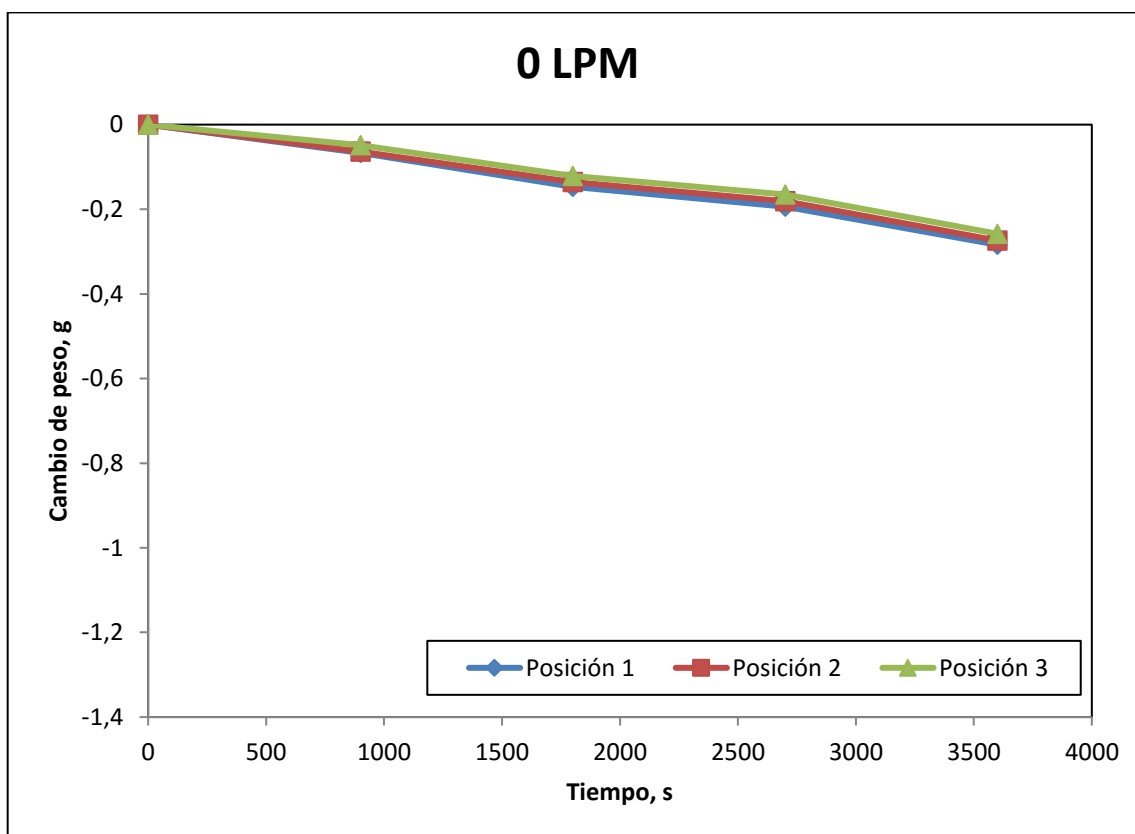


Figura 4.6 Cambio de peso en función del tiempo en las tres posiciones seleccionadas, flujo de 0 LPM.

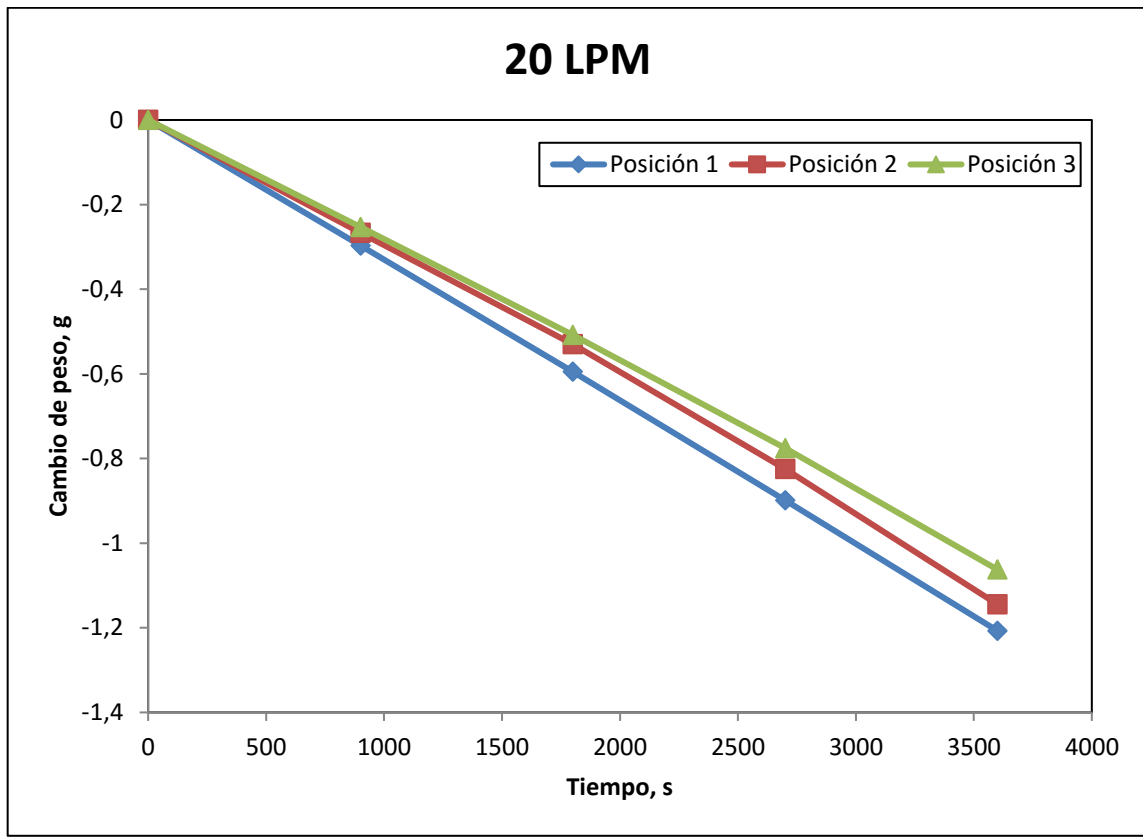


Figura 4.7 Cambio de peso en función del tiempo en las tres posiciones seleccionadas, flujo de 20 LPM.

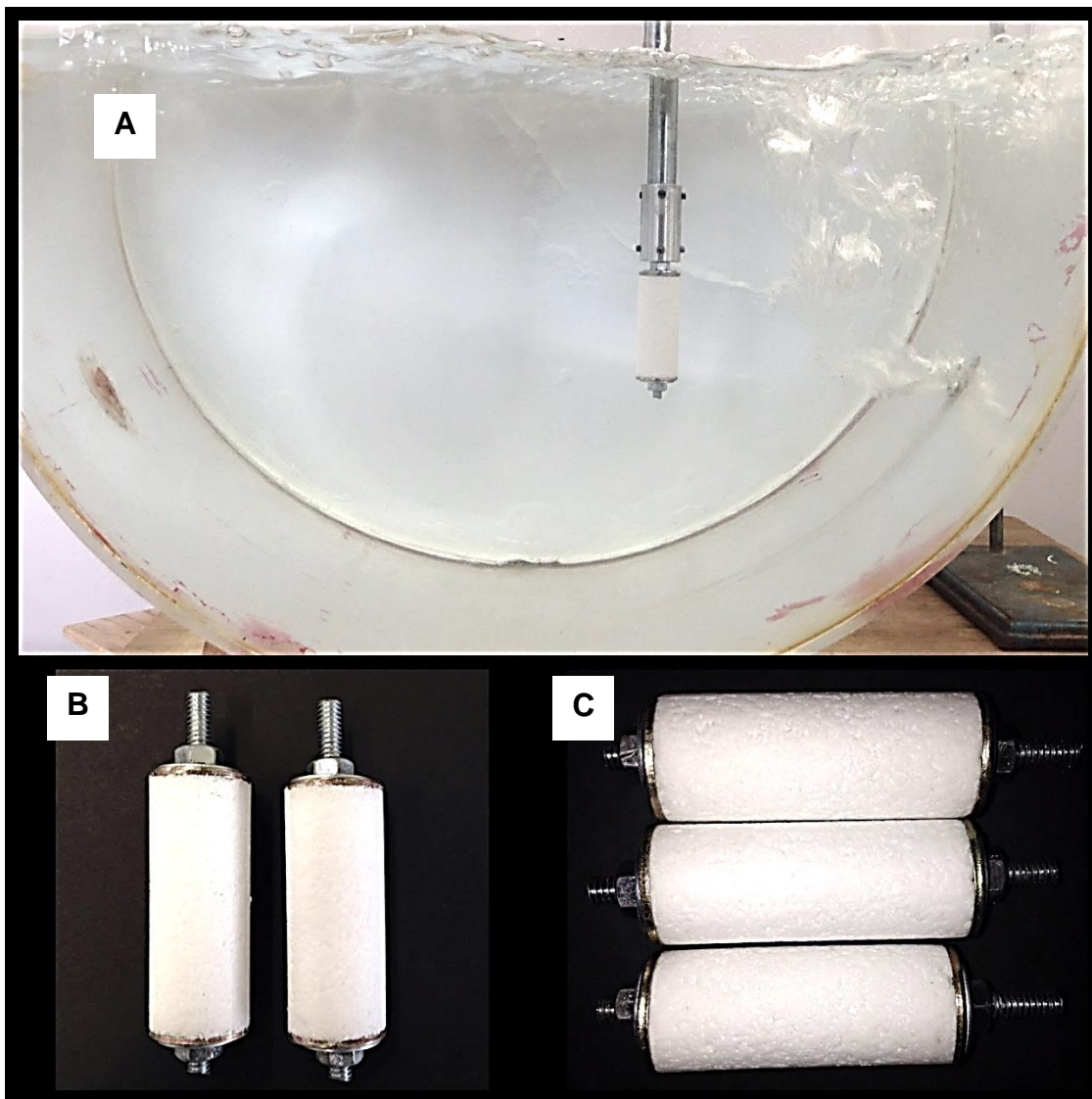


Figura 4.8 Fotografías de compactos de ácido benzoico. A) fotografía de compacto de ácido benzoico sumergido en el modelo físico en uno de los 4 ciclos a los que fue sometido; B) fotografía de compactos de ácido benzoico listos para su uso; C) fotografía de los compactos de ácido benzoico después de haberse sometido a los 4 ciclos en el modelo físico.

La Figura 4.9 muestra las curvas de pérdida de peso en función del tiempo para la Posición 1 y los 5 flujos de trabajo: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM. Se observa que al aumentar el flujo volumínico insuflado aumenta la pérdida de peso significativamente. Esto se aprecia también en las Figuras 4.10

y 4.11 (correspondientes a las Posiciones 2 y 3 respectivamente, para los mismos flujos de trabajo).

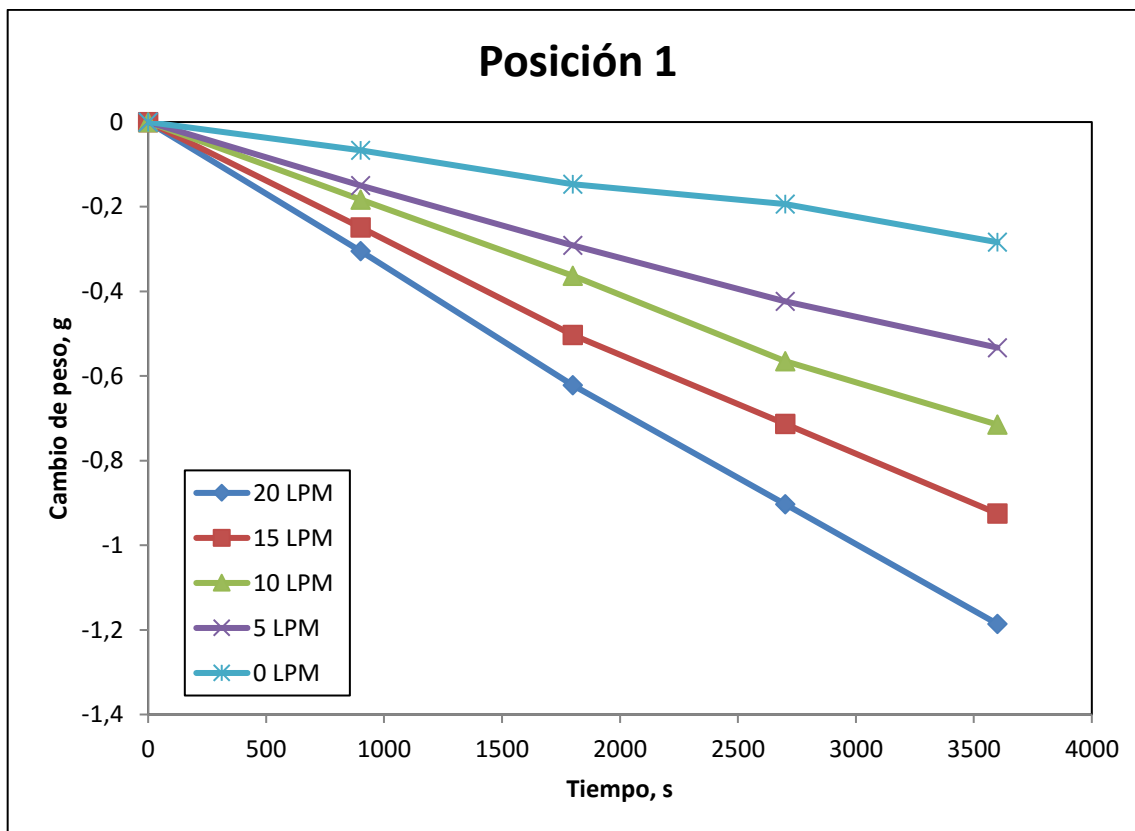


Figura 4.9 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 1 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

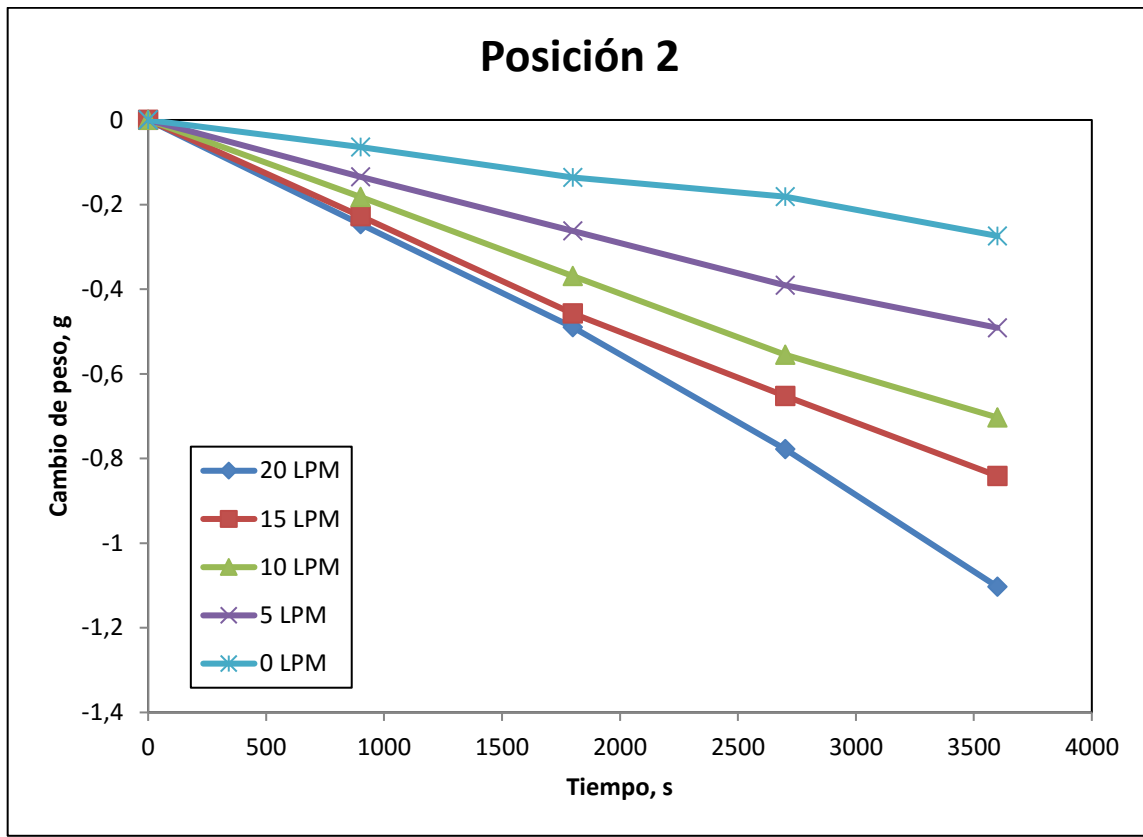


Figura 4.10 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 2 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

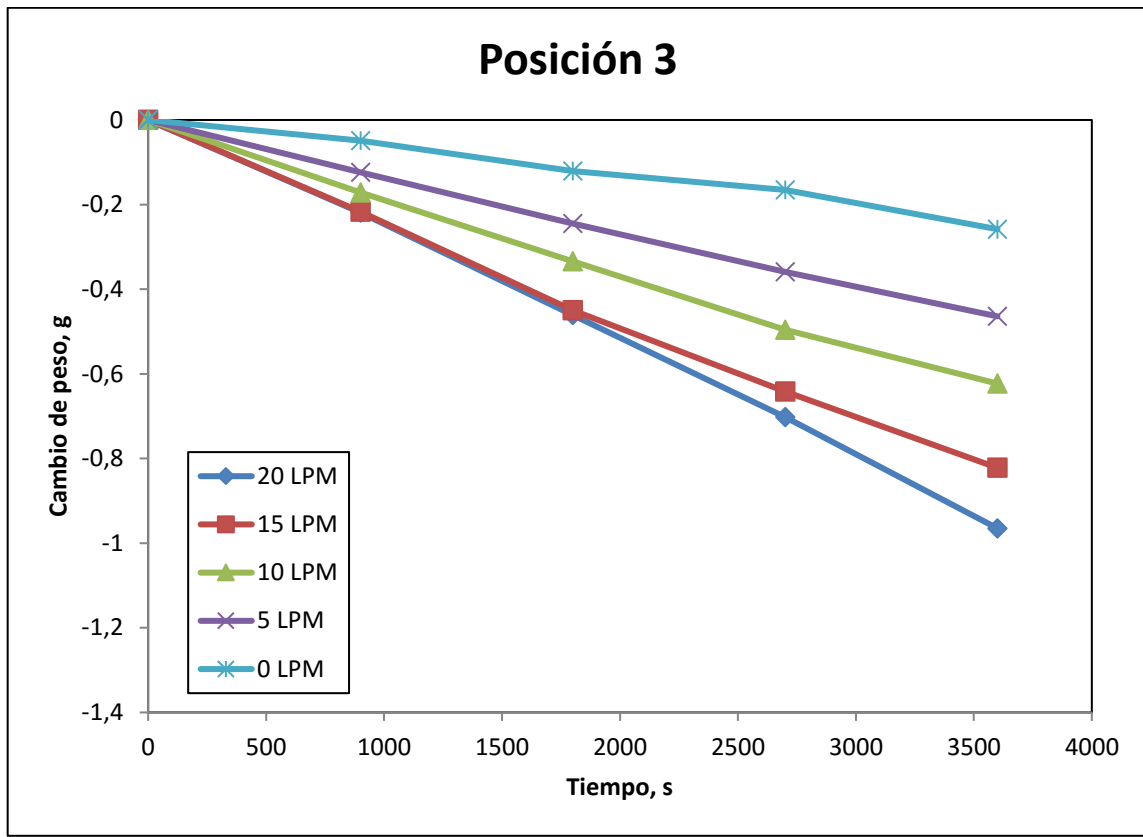


Figura 4.11 Cambio de peso durante cuatro ciclos de tiempo de 900 s cada uno en la Posición 3 para valores de flujo volumétrico de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

5 Discusión

En esta sección se presenta la discusión de los resultados presentados en el Capítulo 4.

5.1 Tiempo de mezclado

Como se observa en la Figura 5.1, la variación del cambio de pH con respecto al tiempo presenta una curva distinta para el flujo de 2 LPM, presentando una variación muy lenta del cambio de pH sin llegar alcanzar un valor constante (para el rango de tiempo graficado), respecto a los flujos de 5, 10, 15 y 20 LPM para los que se observan curvas que llegan a un valor mínimo de cambio de pH y después suben hasta llegar a un valor constante. El caso de 5 LPM tiene un comportamiento intermedio. El valor final de cambio de pH para todas las curvas es cercano a -1.5 unidades de pH.

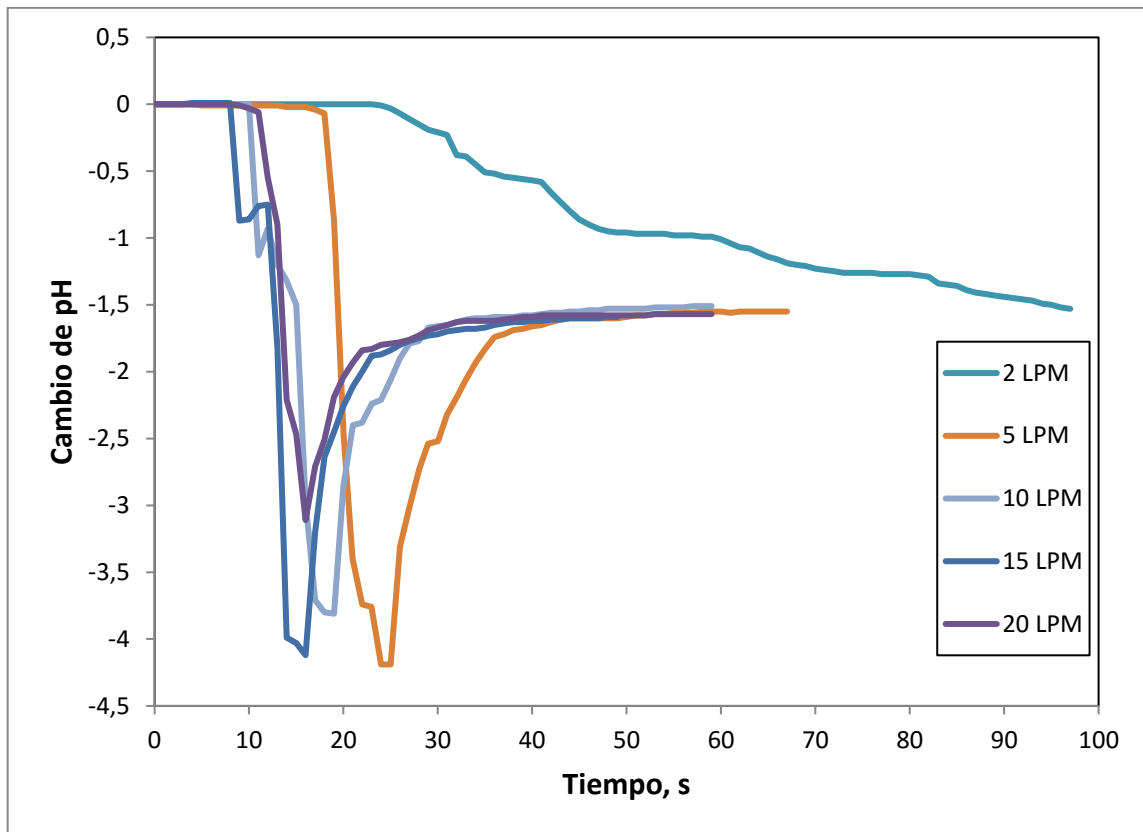


Figura 5.1 Variación del cambio pH para los diferentes flujos volumétricos de trabajo en la Posición 2.

Para completar la información obtenida de las curvas de evolución local de cambio de pH, se extrajeron imágenes (de una zona por debajo de la punta del electrodo de pH) de los videos obtenidos durante los experimentos de tiempo de mezclado. Así la Figura 5.2 muestra la curva de evolución del cambio de pH resultante de la inyección de trazador durante una prueba con flujo volumétrico de 20 LPM junto con imágenes extraídas de la videograbación correspondiente; el electrodo estaba en la Posición 2. Como puede apreciarse, el color de un volumen localizado por debajo de la punta del electrodo cambia a medida que transcurre el tiempo, lo que está asociado con el cambio local de pH. Así, valores de pH cercanos a 7 resultan en colores claros mientras que aquellos con valores bajos de pH producen tonos de azul oscuro.

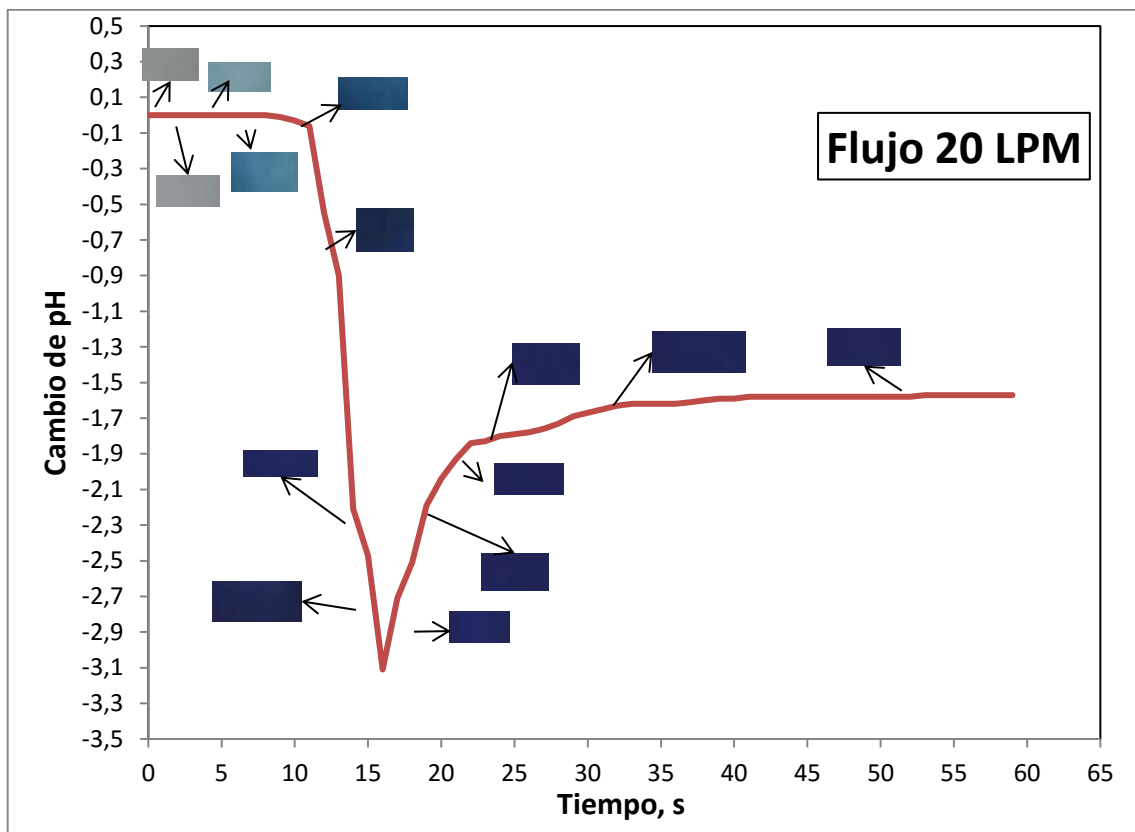


Figura 5.2 Evolución del cambio de pH para flujo volumétrico de 20 LPM en la Posición 2.

De todos los videos se extrajeron imágenes como las de la Figura 5.2 para compararlas entre sí para distintas posiciones y los dos valores extremos (2 y 20 LPM) de flujo volumétrico. En la Tabla 5.1, se muestra una secuencia de fotografías de la evolución del trazador ácido colorido dentro del modelo físico para el flujo de 2 LPM y las tres posiciones de interés. Se observa que el colorante en la Posición 3 tarda más en llegar lo que se refleja en un mayor valor del tiempo de mezclado (ver Figura 4.5) con respecto a las otras dos posiciones. Con respecto a la evolución de color en las Posiciones 1 y 2, ésta es similar para ambas posiciones, lo que es consistente con los valores de tiempo de mezclado reportados en la Figura 4.5 para flujo de 2 LPM.


































Tabla 5.1 Evolución de campo de color en tres posiciones para el flujo de 2 LPM.
Los tiempos están referidos al tiempo de inyección.

Tiempo , s	Posición 1	Posición 2	Posición 3
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			

En la Tabla 5.2 se muestran los resultados correspondientes para el flujo de 20 LPM. En este caso se aprecia que la evolución del trazador es similar entre posición y posición, lo que explica que los valores de tiempo de mezclado local sean muy cercanos entre sí para las tres posiciones de trabajo seleccionadas. Cabe mencionar que el tono más oscuro se obtiene para tiempos intermedios, lo que es consistente con la curva correspondiente de evolución de cambio de pH (ver Figura 5.2), en la que se observa que se alcanza el valor máximo (en valor absoluto) de cambio de pH a un tiempo anterior al necesario para alcanzar un valor constante de cambio de pH en el sistema.

En esta tabla solamente se muestran imágenes hasta un tiempo de 25 segundos después de la inyección debido a que es difícil percibir a simple vista el cambio de color que ocurre después de este tiempo; sin embargo, el electrodo de pH sí puede detectar cambios a tiempos mayores.

Tabla 5.2 Evolución del campo de color en tres posiciones para el flujo de 20 LPM. Los tiempos están referidos al tiempo de inyección.

Tiempo , s	Posición 1	Posición 2	Posición 3
0			
2.5			
5			
7.5			
10			
12.5			
15			
17.5			
20			
22.5			
25			

Debido a que el flujo de 2 LPM no forma una pluma uniforme son que solo genera burbujas de tamaños diferentes (lo cual es muy distinto a lo que ocurre cuando se utiliza el flujo de 20 LPM), los paquetes de trazador se distribuyen de manera aleatoria en el modelo físico; esta variación es más evidente en los resultados de la Posición 3.

Adicionalmente, durante la prueba con 20 LPM se observó que, al momento de inyectar el trazador, éste seguía un patrón que se “abría” en forma de abanico por detrás de la pluma y empezaba a mezclarse simétricamente (vista lateral del modelo físico); para el flujo de 2 LPM no se observó este patrón durante las pruebas realizadas, lo que contribuye a la diferencia en comportamiento entre las pruebas con flujo de 2 LPM y los otros valores de flujo.

5.2 Gravimetría

Con base en la discusión del apartado anterior, se descato el flujo de 2 LPM para las pruebas de gravimetría y se sustituyo por un flujo cero (0 LPM) para mostrar el efecto de la convección en la respuesta del sistema.

Para explicar los resultados de las pruebas gravimétricas se recurrió a información de un trabajo de investigación previo []. En la Figura 5.3, se muestran imágenes de las plumas (regiones de mezcla burbuja de aire/agua) formadas durante la inyección de aire para los flujos de trabajo de 0, 2, 5, 10, 15 y 20 LPM; estas imágenes se obtuvieron mediante la técnica de fotografía de exposicion largo. Como puede observarse, en la fotografía (a) pertenece a un flujo de 0 LPM, la fotografía (b) es para 2 LPM y se observa una pequeña pluma de aire formandose; para las fotografías (c), (d), (e) y (f) (flujos de 5, 10, 15 y 20 LPM, respectivamente) se forma una pluma que es más abundante conforme se aumenta el flujo.

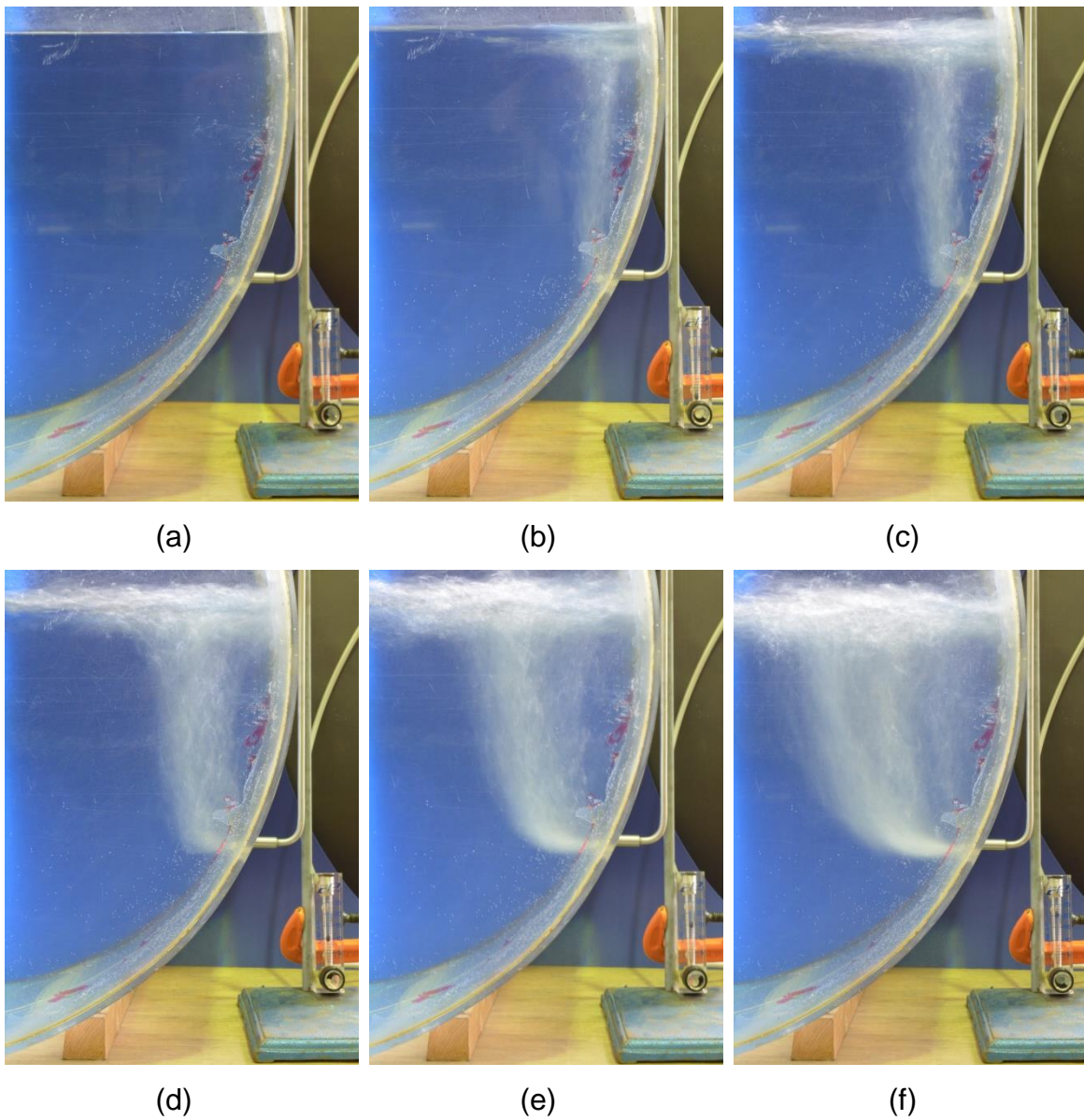


Figura 5.3 Fotografías de las plumas formadas por la inyección de aire para los flujos de (a) 0 LPM, (b) 2 LPM, (c) 5 LPM, (d) 10 LPM, (e) 15 LPM y (f) 20 LPM [22].

Por otra parte, en la Figura 5.4 se grafican los vectores de velocidad dentro del modelo físico para el flujo de 2 LPM y 20 LPM, , obtenidos con la técnica de *PIV* (*Particle Image velocimetry*) [22]. En la figura se ha incorporado un rectángulo, que representa a la Posición 1 del compacto de ácido benzoico. Como puede apreciarse, el campo de velocidad en la Posición 1 es más intenso para el flujo

de 20 LPM, lo que explica la mayor pérdida de peso cuando se usó ese valor del flujo volumétrico en los experimentos de gravimetría.

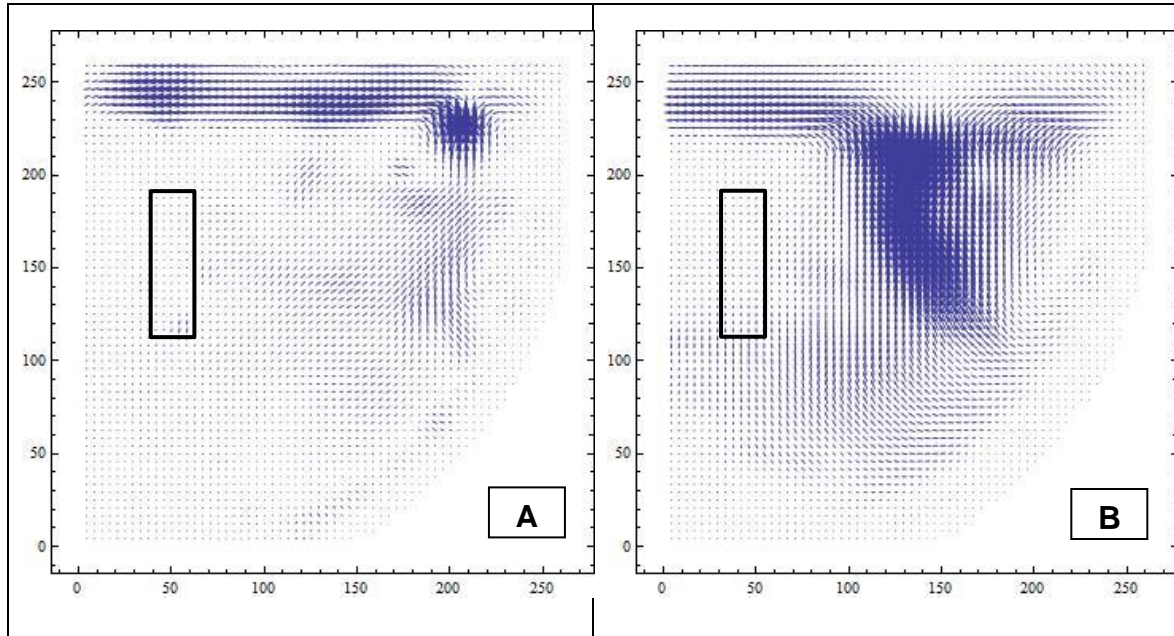


Figura 5.4 Campo de velocidad para flujos de: A) 2 LPM y B) 20 LPM; la magnitud de las flechas es proporcional a la magnitud del vector de velocidad en cada punto de la malla de medición. Se muestra también una representación esquemática del compacto de ácido benzoico en la Posición 1 (rectángulo con línea negra) [22].

5.3 Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa constituye un medio conveniente para presentar datos experimentales para diseño [24], cuando la transferencia de masa ocurre por el mecanismo convectivo.

Considerando un sólido en contacto con un fluido, la ecuación que se plantea para la estimación del coeficiente de transferencia de masa está dada por [20]:

$$-\frac{dM}{dt} = KA(C_s^* - C_b) \quad (5.1)$$

Donde

A es el área de transferencia (cm^2)

M es la masa de la muestra (g)

t es el tiempo (s)

C_s^* es la concentración de saturación (g soluto/100 g disolvente)

C_b es la concentración del soluto en el seno del fluido (g/L)

La derivada del lado izquierdo de la Ec. 5.1 se estimó con la pérdida de peso medida durante los experimentos y el área expuesta es solamente el área lateral del compacto (50.25 cm^2). Los valores de C_s^* y C_b utilizados en los cálculos fueron de 0.00345 g/cm^3 y de 0 g/cm^3 , respectivamente (esto debido a la baja concentración en el seno del baño para los cálculos de transferencia de masa). La Figura 5.5, muestra los valores estimados del coeficiente de transferencia de masa para cada ciclo de trabajo y flujos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM para la Posición 1. Se observa que el flujo de 20 LPM produce el mayor coeficiente de transferencia de masa durante los 4 ciclos de trabajo. Esto es una consecuencia directa de la observación que se hizo en el apartado anterior, donde se señalaba la diferencia en el campo de velocidad en la Posición 1 cuando se usa un flujo de 2 LPM en comparación con un flujo de 20 LPM. No hay diferencia significativa en el valor del coeficiente de transferencia de masa de ciclo a ciclo (excepto para el 3er ciclo del flujo de 15 LPM), lo cual es una indicación que el sistema tiene un comportamiento estable durante los experimentos de gravimetría y que la medición es reproducible.

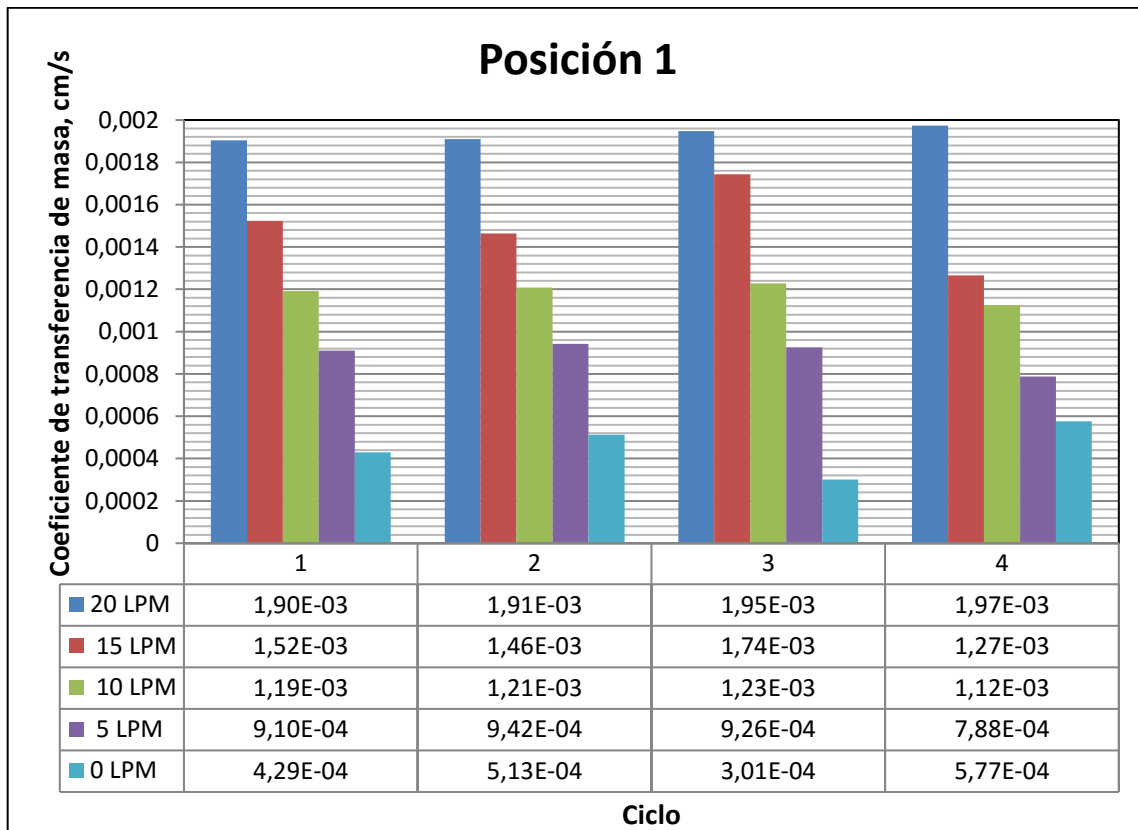


Figura 5.5 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 1 y los flujos volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM para cada uno de los ciclos de una prueba de 4 ciclos.

La Figura 5.6 presenta un gráfico de barras con la estimación del coeficiente de transferencia de masa promedio (y la desviación estándar correspondiente) en la Posición 1 que se obtuvo durante los 4 ciclos de trabajo para los flujos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM; se puede observar una caída exponencial del coeficiente de transferencia de masa conforme se va disminuyendo la intensidad de insuflación de aire dentro del modelo físico. En cuanto a los valores de desviación estándar, la mayor variación (1.19×10^{-4} cm/s, lo que representa aproximadamente un 26%) se obtuvo para el flujo de 0 LPM, seguido del flujo de 15 LPM (1.96×10^{-4} cm/s lo que representa aproximadamente un 13%), los flujos restantes presentan una variación menor (en %) y similar entre ellos.

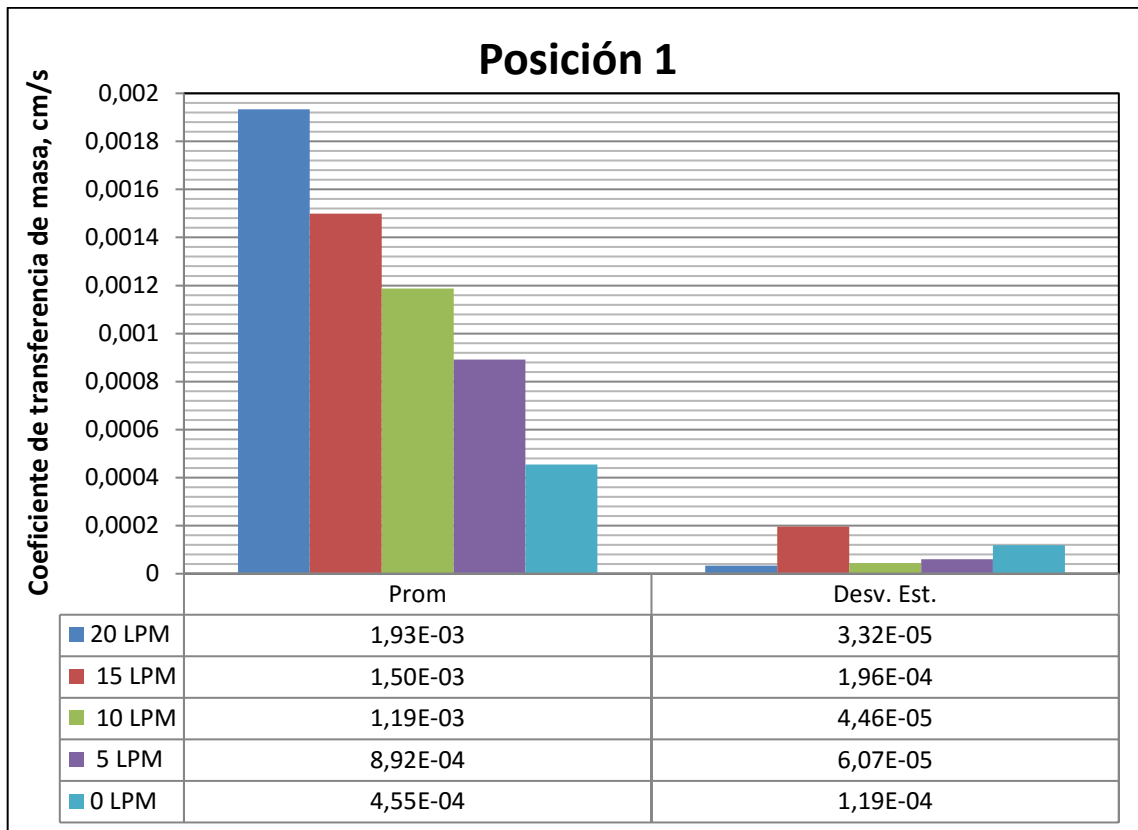


Figura 5.6 Coeficiente de transferencia de masa promedio y su desviación estándar para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

La estimación del coeficiente de transferencia de masa se hizo a partir del promedio de las pendientes (rapidez de pérdida de peso) de las cuatro secciones de cada una de las curvas en las Figuras 5.7 a 5.9; el valor promedio se utilizó en la Ecuación 5.1 [20] para calcular el coeficiente de transferencia de masa. En la Figura 5.7 se muestra el coeficiente de transferencia de masa para la Posición 1 y los cinco valores de flujo volumínico de. Se observa que el coeficiente de transporte de masa es mayor para el flujo de 20 LPM (1.93×10^{-3} cm/s vs. 4.55×10^{-4} cm/s). En las Figuras 5.8 y 5.9 se muestran las gráficas correspondientes para las posiciones 2 y 3, respectivamente. En ambos casos se aprecia un comportamiento análogo al observado en la Figura 5.7.

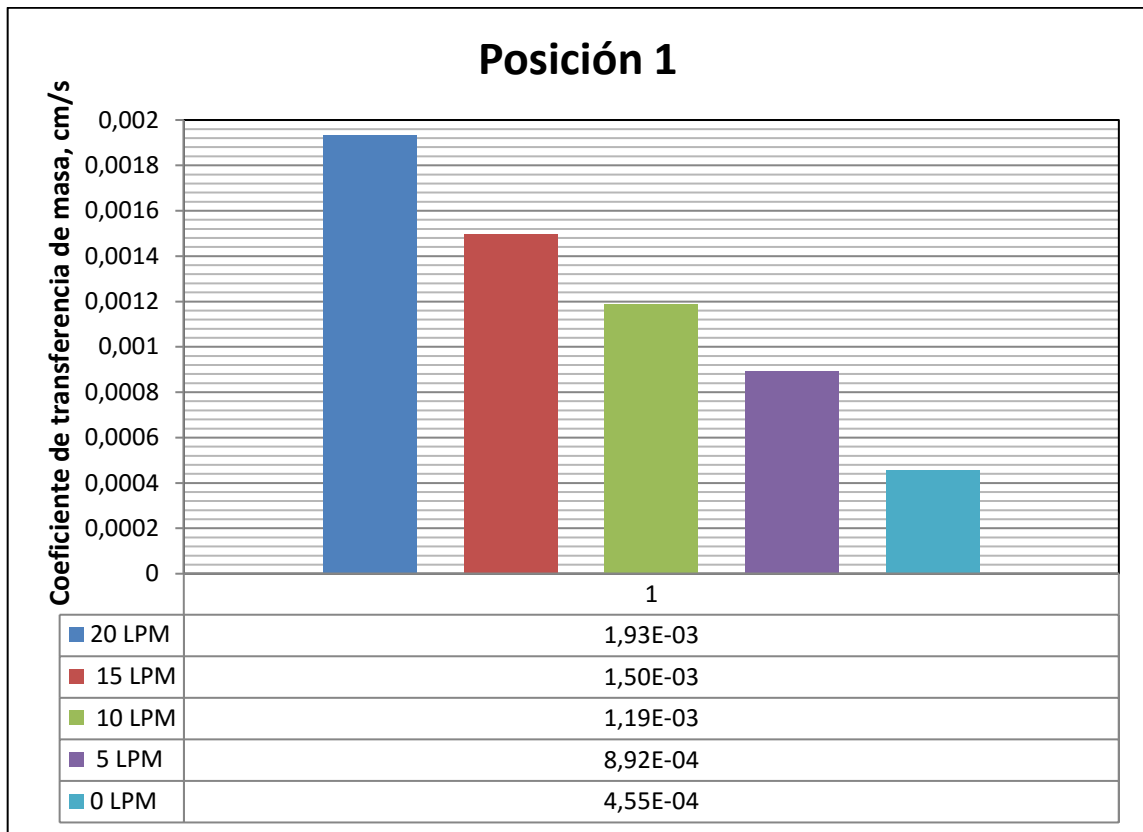


Figura 5.7 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 1 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

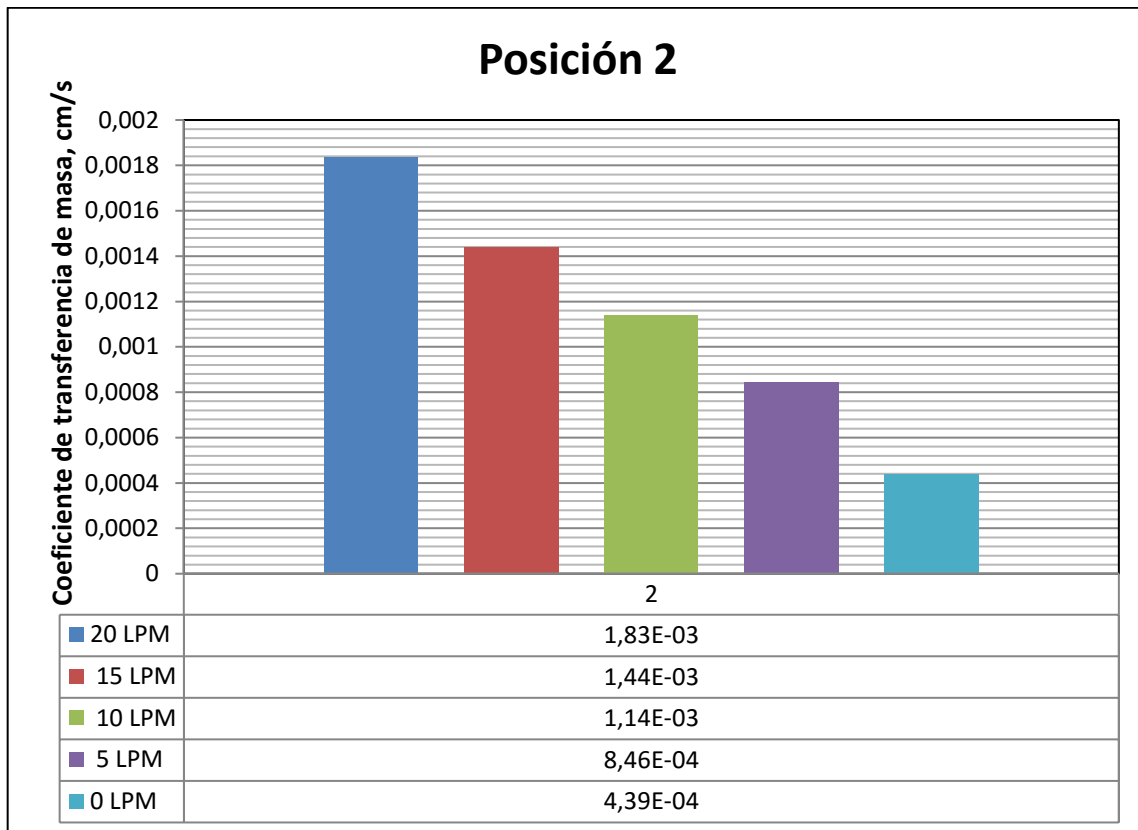


Figura 5.8 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 2 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

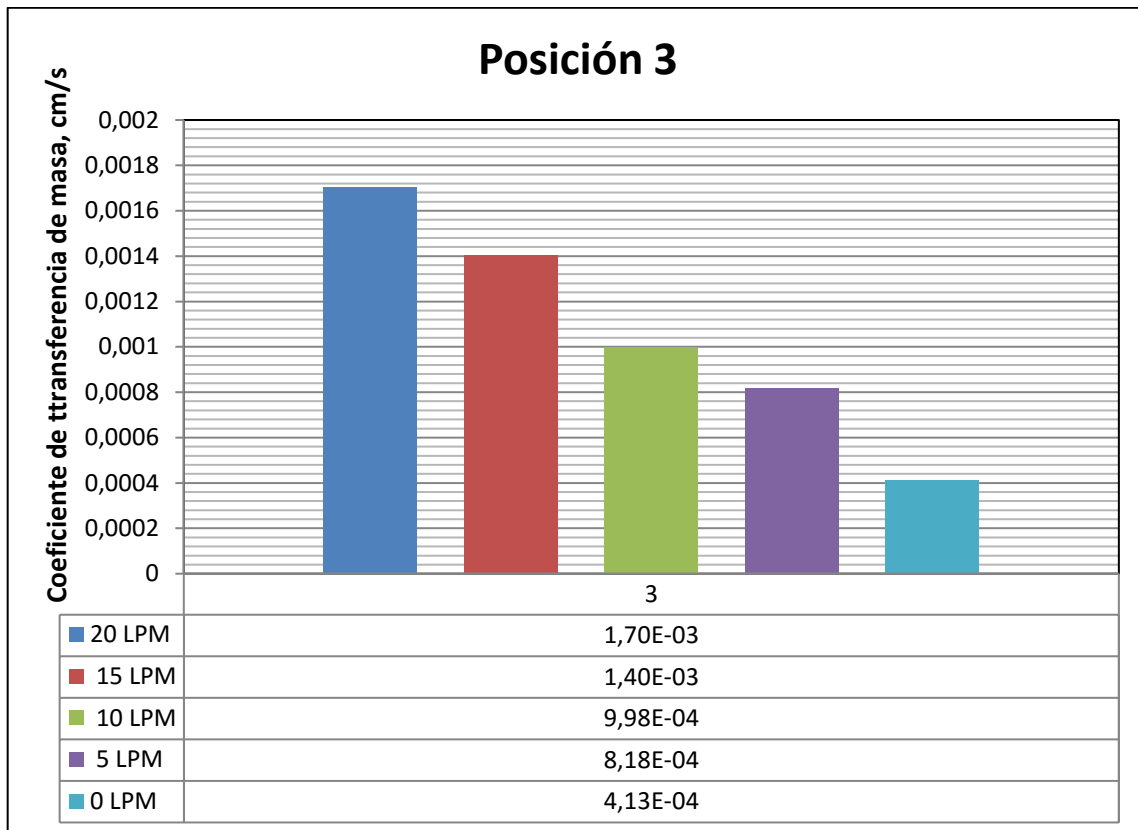


Figura 5.9 Coeficiente de transferencia de masa estimado para la Posición 3 y flujos de trabajo de: 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

En la Figura 5.10 se puede observar una gráfica de barras de los coeficientes de transferencia de masa estimados para el flujo de 20 LPM para las tres diferentes posiciones de trabajo seleccionadas. Se observa que el mayor valor del coeficiente de transferencia de masa corresponde a la Posición 1, mientras que el menor valor ocurre en la Posición 3. En la Figura 5.11 se presenta una gráfica similar para el flujo de 0 LPM; en este caso el coeficiente de transporte de masa en las 3 Posiciones varía muy poco y es mucho menor.

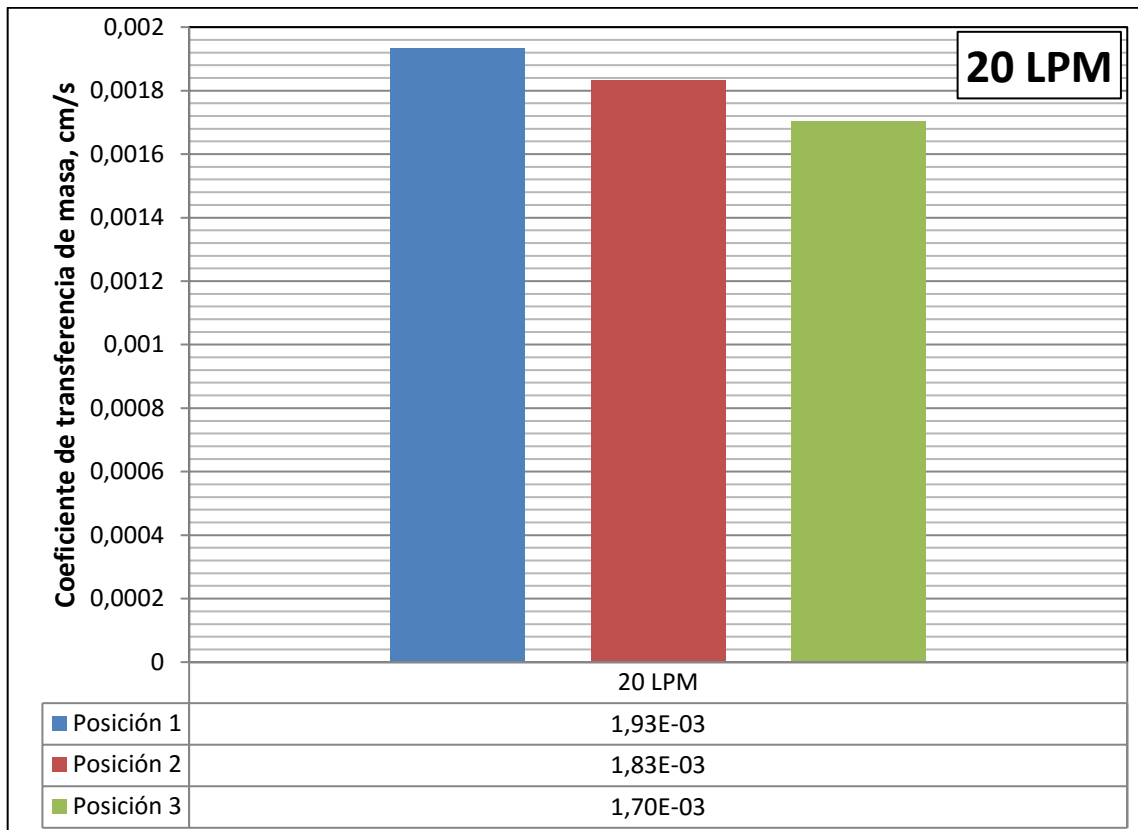


Figura 5.10 Coeficiente de transferencia de masa estimado para el flujo volumétrico de 20 LPM en las Posiciones 1, 2 y 3.

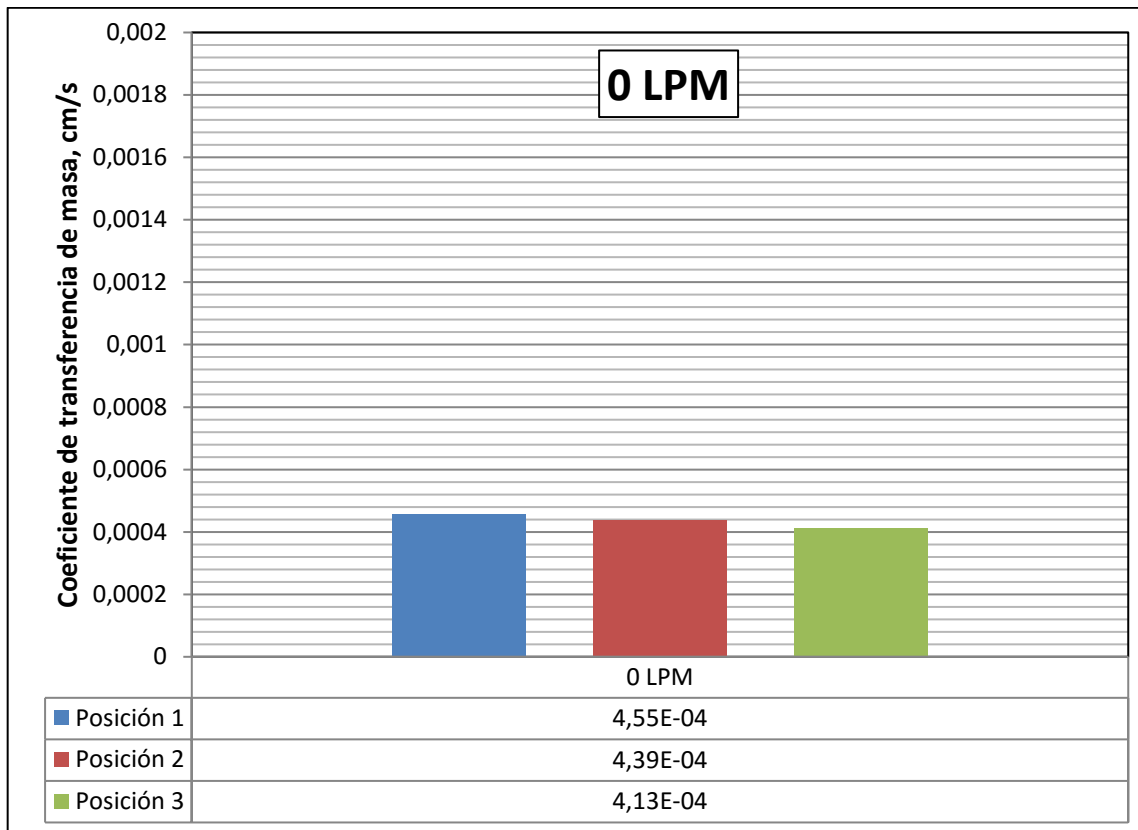


Figura 5.11 Coeficiente de transferencia de masa estimado para el flujo volumétrico de 0 LPM en las posiciones 1, 2 y 3.

Además de los cálculos que ya se presentaron para estimar el coeficiente de transferencia de masa, región por región de medición en los experimentos de gravimetría, también se calcularon valores del coeficiente de transferencia de masa usando todos los datos de cada experimento de gravimetría. En la Figura 5.12 se presenta un gráfico de puntos para cada ciclo de trabajo en la Posición 1 para los flujos volumétricos de 0, 5, 10, 15 y 20 LPM; a cada curva se le añadió una regresión lineal (con su origen forzado en [0,0]) y se calculó el valor de la pendiente y el coeficiente de correlación (R^2) para cada flujo; los valores obtenidos de la pendiente se utilizaron para poder determinar el coeficiente de transferencia de masa en la Posición 1 para los cinco valores de flujo volumétrico de trabajo. En la Figura 5.13 se muestra la gráfica correspondiente para la Posición 3.

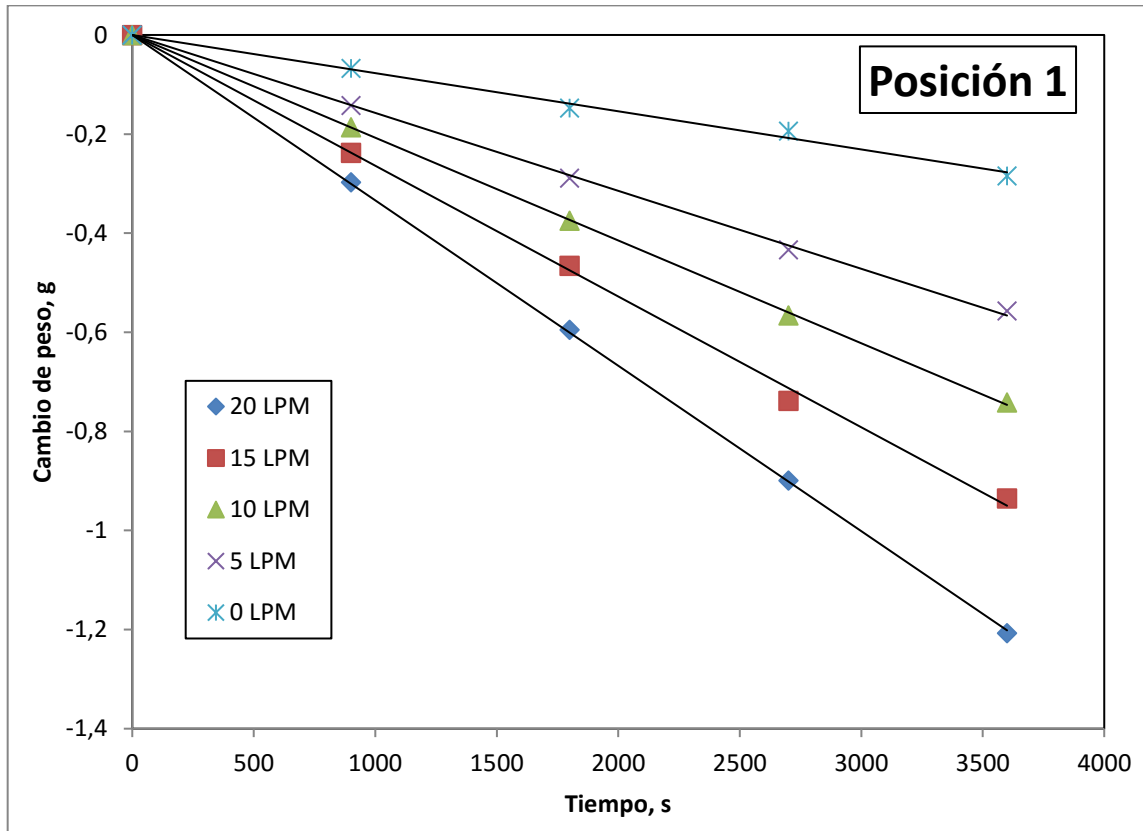


Figura 5.12 Delta peso en función del tiempo en la Posición 1 para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM 15 LPM y 20 LPM. Las líneas representan una regresión lineal (forzada al origen).

Tabla 5.3 Valores estimados de pendiente (m) y coeficiente de correlación (R^2) para los 5 flujos de trabajo a partir de la regresión lineal para la Posición 1.

	0 LPM	5 LPM	10 LPM	15 LPM	20 LPM
m	-8 E-05	-0.00016	-0.00021	-0.00026	-0.00033
R^2	0.9935	0.99895	0.99981	0.99833	0.99991

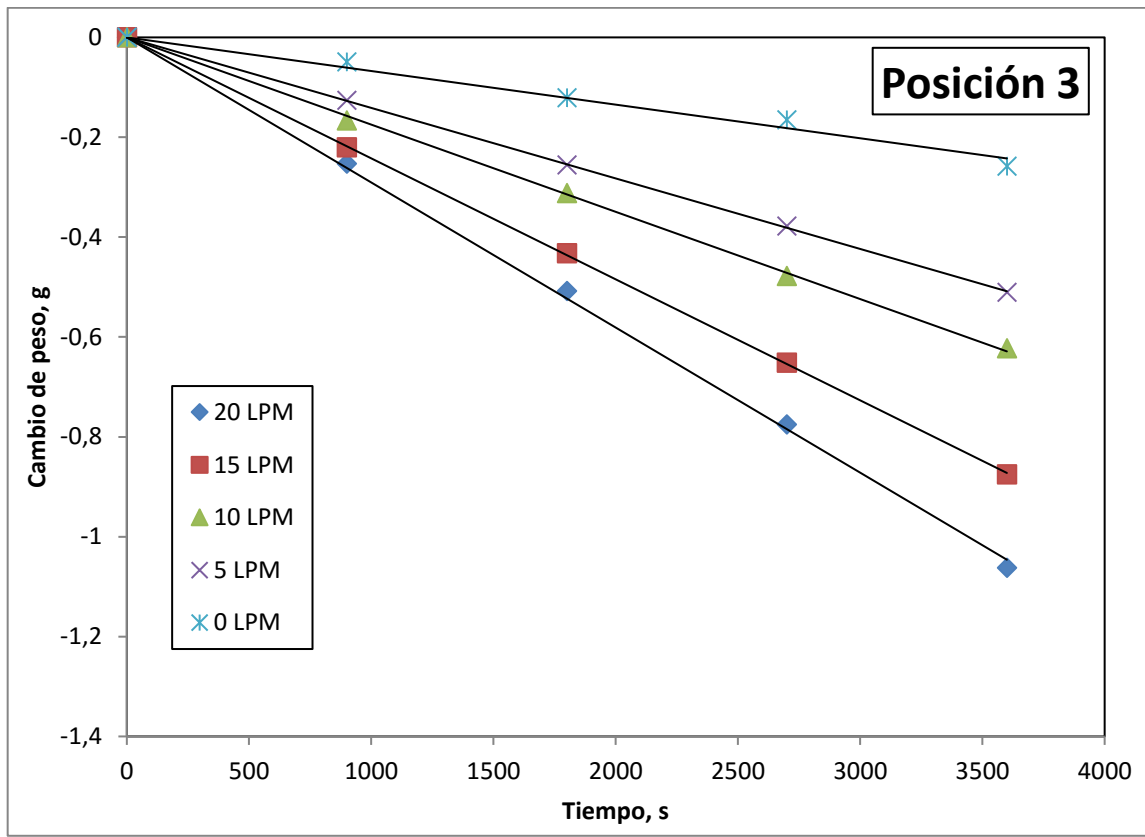


Figura 5.13 Delta peso en función del tiempo en la Posición 3 para los flujos de trabajo de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM 15 LPM y 20 LPM. Las líneas representan una regresión lineal (forzada al origen).

Tabla 5.4 Valores estimados de pendiente (m) y coeficiente de correlación (R^2) para los 5 flujos de trabajo a partir de la regresión lineal para la Posición 3.

	0 LPM	5 LPM	10 LPM	15 LPM	20 LPM
m	-7 E-05	-0.00014	-0.00017	-0.00024	-0.00029
R^2	0.9837	0.99989	0.99931	0.99992	0.99907

Como se observa en la Tabla 5.4 el valor de R^2 para el flujo de 0 LPM es menor que los valores obtenidos para los flujos de 5, 10, 15 y 20 LPM, esto debido a la convección forzada para estos flujos de aire.

En la Figura 5.14, se muestra un gráfico de barras con los valores del coeficiente de masa para la Posición 1, calculados con los resultados de las regresiones lineales de la Figura 5.12 y valores de flujo volumétrico de 0, 5, 10,

15 y 20 LPM. El valor obtenido para el flujo de 20 LPM (1.90×10^{-3} cm/s) es aproximadamente el cuádruple del valor para el flujo de 0 LPM (4.61×10^{-4} cm/s) en la Posición 1. Como se mencionó, este resultado es consecuencia de un campo de velocidad de mayor magnitud, para una posición fija dentro del modelo, que resulta al aumentar el flujo de aire insuflado. En la Figura 5.15 se muestran los resultados de la Posición 3. El comportamiento es similar, pero los valores son menores, lo que concuerda con el hecho de que el compacto estaba más alejado de la pluma.

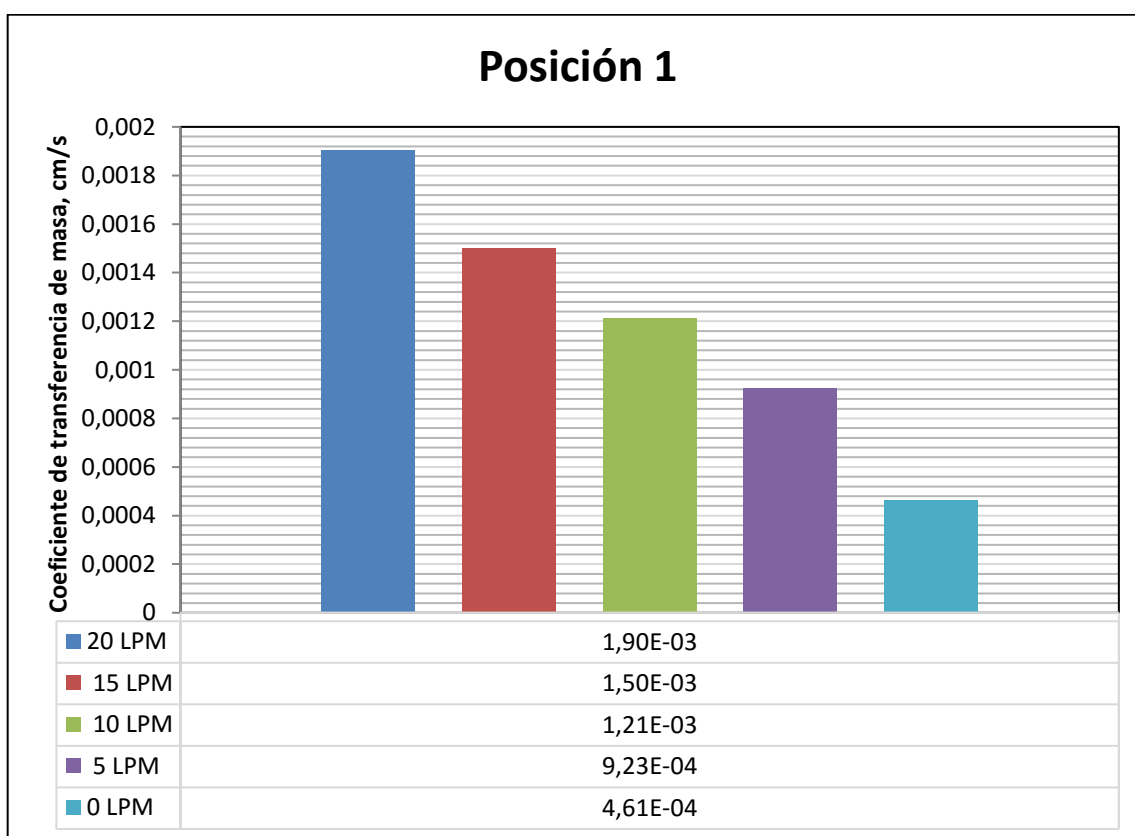


Figura 5.14 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 1 y los flujos de volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

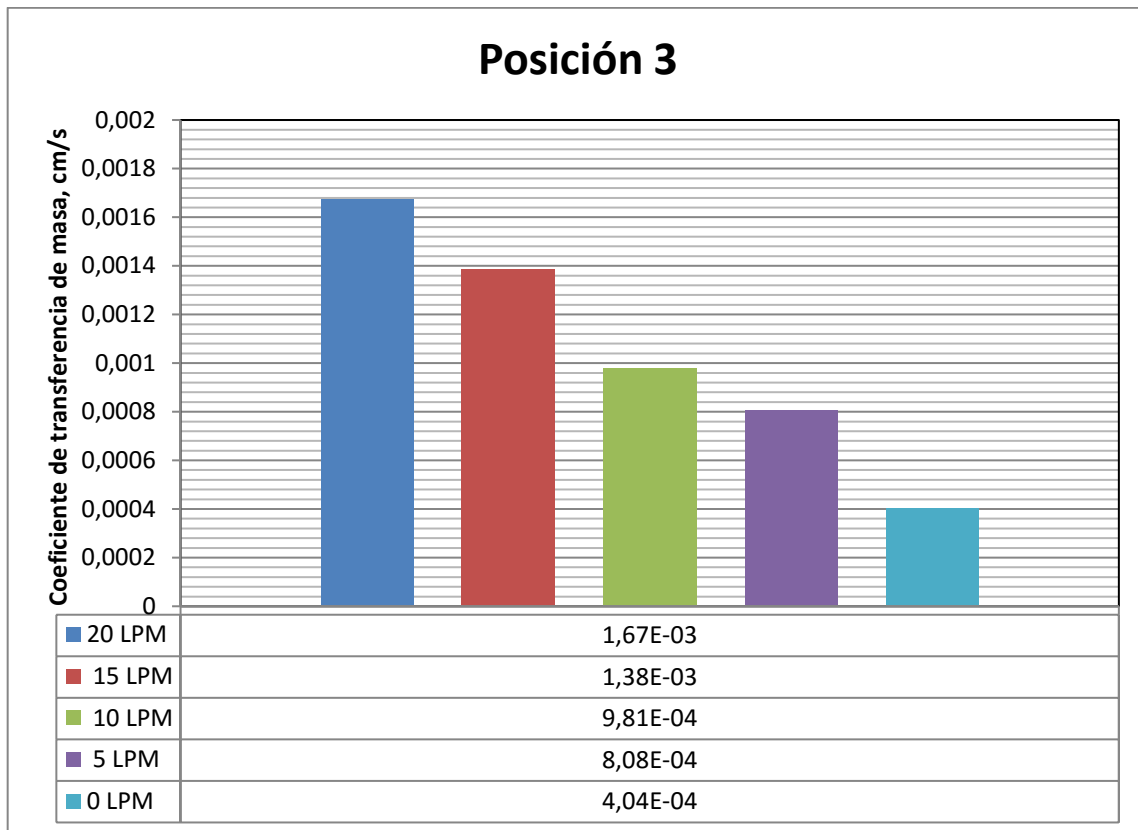


Figura 5.15 Coeficiente de transferencia de masa para la Posición 3 y los flujos de volumínicos de 0 LPM, 5 LPM, 10 LPM, 15 LPM y 20 LPM.

En la Figura 5.16, se muestra un gráfico de barras con los valores de coeficiente de transferencia de masa reportados en la literatura []. En ese trabajo se estimó el coeficiente de transferencia de masa sólido-líquido con un flujo volumínico de aire insuflado en el modelo físico constante y con la posición y la altura de los cilindros compactos de ácido benzoico variable. Se observa que el máximo valor de coeficiente de transferencia de masa se obtuvo para la posición cercana (PC) a la tobera y este se va reduciendo con forme la medición se aleja de la tobera de inyección de aire. Cabe mencionar que estos valores son para compactos de ácido benzoico que están a una misma profundidad del baño (a la altura de la tobera).

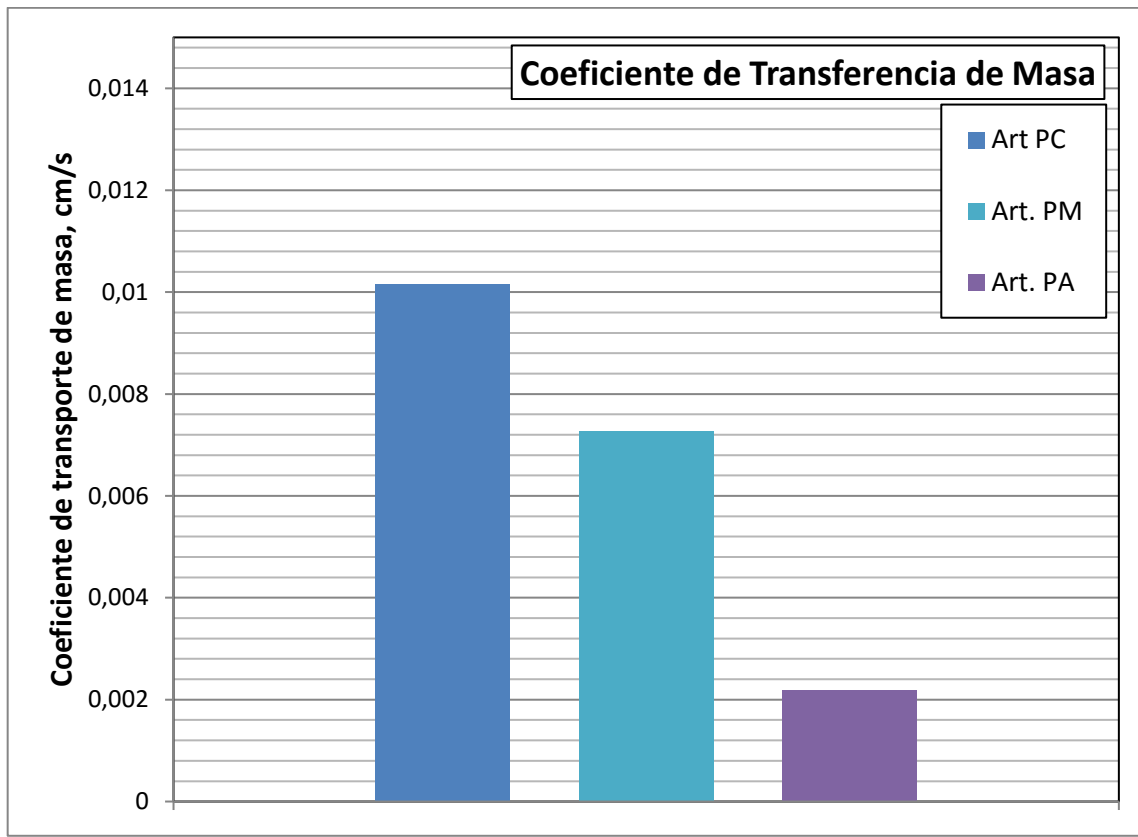


Figura 5.16 Coeficiente de transferencia de masa para tres posiciones distintas con un flujo constante [20]; PC posición cercana, PM posición media y PA posición alejada de la tobera. La profundidad a la que se colocaron los compactos se mantuvo constante.

Al comparar las Figuras 5.14 y 5.16 se observa que los valores del coeficiente de transferencia de masa reportados en [20] son mayores a los calculados en este trabajo. Esta diferencia puede deberse a que en el artículo citado usaron múltiples toberas de inyección de aire a lo largo de modelo físico, además de que el tipo de compactación y sinterizado del ácido benzoico puede ser distinto (no reportan detalles en [20]).

5.5 Diseño de experimentos: Método factorial de dos niveles

El diseño factorial completo 2^n permite diseñar experimentos para conocer simultáneamente qué efecto tienen n factores sobre una respuesta y descubrir si interactúan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian). El diseño de experimentos encuentra numerosas aplicaciones en el campo de la Química [25].

La Tabla 5.5 muestra la matriz experimental del modelo factorial desarrollada para el análisis de los resultados obtenidos mediante 2 factores y la combinación de estos; los factores que se propusieron estudiar fue la posición y el flujo de aire insuflado, en ambos casos se seleccionaron resultados de los valores extremos (Posiciones 1 y 3, Flujos 0 LPM y 20 LPM) de la estimación del coeficiente de transferencia de masa obtenida con la regresión lineal de los datos de cambio de peso en función del tiempo. En la Tabla 5.5 se presentan los datos estadísticos utilizados para obtener un intervalo de confianza de la prueba del 95 % de efectividad.

Tabla 5.5 Matriz experimental del modelo factorial e información estadística para un intervalo de confianza del 95%.

Muestra	Posición	Flujo	F*P	Gravimetría
1	-	-	+	-0.258
2	+	-	-	-0.284
3	-	+	-	-1.0625
4	+	+	+	-1.207

Valor estadístico	
s	0.5022
t de Student 95%	2.776
N	4
v	4
Promedio	-0.7028

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados de los factores que se analizaron del modelo factorial y valor del intervalo de confianza del 95%; estos factores se grafican en la Figura 5.17 para comparar sus valores y determinar el factor que más influye en el modelo factorial del experimento propuesto. El orden de los factores después de haber desarrollado el modelo factorial fue el siguiente: Flujo > Posición > F*P; para el 95 % de validez del experimento.

Tabla 5.6 Resultados del modelo factorial.

Posición	Flujo	F*P	Intervalo de Confianza
0.08525	0.86375	0.05925	± 0.98593

En la Figura 5.17 se graficó el cambio de peso con un intervalo de confianza al 95% (± 0.98593) y los factores de estudio para observar cuáles de ellos son los que tienen una mayor influencia en el experimento propuesto. Se puede observar que el factor que influye en la respuesta del sistema es el flujo volumínico de aire insuflado (con un valor de 0.86375) seguido de la Posición donde se colocó el compacto de ácido benzoico (0.08525) y en tercer lugar el factor de la combinación del flujo volumínico con la Posición (con un valor de 0.05925). Claramente, el flujo volumínico domina la respuesta del sistema para el rango de valores de las variables independientes estudiados.

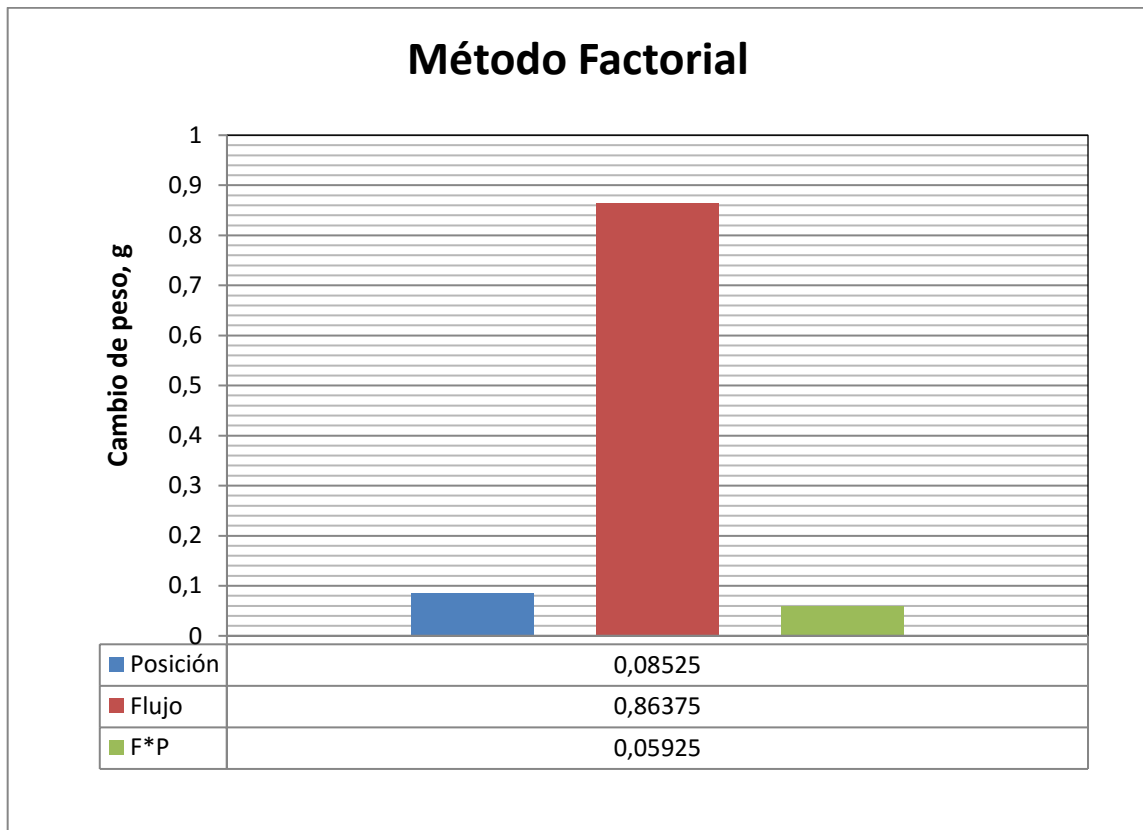


Figura 5.17 Factores de estudio del modelo factorial.

6 Conclusiones

Los valores de tiempo de mezclado para flujo volumínico de 20 LPM son relativamente cortos (de 28.33 s hasta 37.33 segundos dependiendo la posición de trabajo) con respecto a los valores para flujos de 2 LPM (de 68 s hasta 88 s). Este comportamiento está relacionado con los patrones de flujo generados por la inyección del gas y puede explicarse analizando las imágenes obtenidas de las videograbaciones.

El tiempo de mezclado para el flujo de 2 LPM tiene una variación significativa de prueba a prueba y se aparta del comportamiento global observado con los otros valores de flujo volumínico.

El coeficiente de transferencia de masa es aproximadamente el cuádruple (1.9×10^{-3} hasta 4.61×10^{-4}) para el flujo de 20 LPM con respecto a los resultados para 0 LPM, para la Posición 1. Esto concuerda con los mapas de distribución de velocidad obtenidos mediante la técnica de PIV, reportados en un trabajo previo.

El factor que influye en el estudio estadístico a partir del método factorial 2^n es el flujo volumínico, seguido de la Posición y en último lugar la combinación de ambos.

La distribución del coeficiente de transporte de masa aumenta conforme aumenta el flujo volumínico de aire y la posición de estimación.

7 Referencias bibliográficas

- [1] J. K. Brimacombe, "The Extractive Metallurgist in a Emerging World of Materials," *Metall. Trans. B*, vol. 20B, pp. 291–313, 1989.
- [2] J. Szekely, J. W. Evans, y J. Brimacombe, *The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 1988.
- [3] http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_3.html. Consultada: 16-ago-2016.
- [4] J. Newton y C. L. Wilson, *Metallurgy of Copper*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 1942.
- [5] J. Szekely y N. J. Themelis, *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [6] "Diagrama de flujo de procesos de extracción de cobre". <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8808/880808.pdf>. Consultada: 16-ago-2016.
- [7] "Esquema del Convertidor Peirce-Smith", <http://www.hellotrade.com/dundee-precious-metals-usa/pierce-smith-converter-furnace.html>. Consultada: 24-May-2016.
- [8] A. K. Biswas y W. G. Davenport, *Extractive Metallurgy of Copper*, 3ª ed. Oxford, Elsevier: Pergamon, 1994.
- [9] D. K. Chibwe, "Flow behavior , mixing and mass transfer in a peirce-smith converter using physical model and computational fluid dynamics", Tesis de Maestría, Stellenbosch University, 2011.
- [10] A. Almaraz, C. López, I. Arellano, M. A. Barrón, D. Jaramillo, F. Reyes, and G. Plascencia, "CFD modelling of fluid flow in a Peirce – Smith

- converter with more than one injection point”, *Miner. Eng.*, vol. 56, pp. 102–108, 2014.
- [11] E. Adjei, “Physical modelling of mass transfer in a peirce-smith converter”, Tesis de Maestría, University of British Columbia, 1989.
- [12] D. K. Chibwe, G. Akdogan, C. Aldrich y P. Taskinen, “Characterisation of phase distribution in a Peirce–Smith converter using water model experiments and numerical simulation”, *Miner. Process. Extr. Metall.*, vol. 120, no. 3, pp. 162–171, 2011.
- [13] G. A. Sheikhzadeh, R. D. Yazdeli y M. S. Kashani, “Fluid Dynamics in a Copper Converter: an Investigation on Mixing Phenomena in an Experimental Model”, *Int. J. of Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 118–126, 2016.
- [14] M. Nyoka, G. Akdogan, R. H. Eric y N. Sutcliffe, “Mixing and solid-liquid mass-transfer rates in a creusot-loire uddeholm vessel: A water model case study,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 34, no. December, pp. 833–842, 2003.
- [15] J. B. Hernández M., A. Ingalls C. y J. A. Barrera G., *Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos. Guiones de trabajo experimental*, México, 2013. ISBN:978-607-02-4550-3.
- [16] D. K. Chibwe, G. Akdogan, C. Aldrich y R. H. Eric, “CFD Modelling of Global Mixing Parameters in a Peirce-Smith Converter with Comparison to Physical Modelling”, *Chem. Prod. Process Model.*, vol. 6, no. 1, 2011.
- [17] J. Vaarno y J. Pitk, “Modelling gas injection of a Peirce - Smith converter,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 22, pp. 907–920, 1998.
- [18] A. A. Gómez, “Análisis de transferencia de momentum y masa en un convertidor Peirce-Smith”, Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional, 2009.

- [19] A. Roselló, J. Martínez, P. Barrios y F. Carrillo, “Desulfurization rate during the copper blow in a peirce-smith converter”, *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 16–22, 2008.
- [20] D. K. Chibwe, G. Akdogan y J. Eksteen, “Solid-liquid mass transfer in a Peirce-Smith converter : A physical modelling study”, *Metall. Min. Ind.*, vol. 3, no. 5, pp. 202–210, 2011.
- [21] C. A. Martínez Fernández y J. M. Hernández Soto, “Caracterización del campo de velocidad en un modelo físico de una rebanada del convertidor Peirce-Smith”, Reporte de Estancia Corta Intersemestral, Facultad de Química, UNAM, 2013.
- [22] J. C. Contreras Guzmán, “Modelación física de la hidrodinámica en un modelo físico de una rebanada del Convertidro Peirce-Smith”, Tesis de Maestría, Programa de Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [23] ACOFARMA, “Hoja de seguridad ácido benzoico”.
<http://www.acofarma.com/admin/uploads/descarga/1492-b9948c7f5b47929b8bf65cd45c83229b4891970e/main/files/AcidoBenzoico.pdf>. Consultada: 22-Aug-2016.
- [24] R. B. Bird, W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, *Fenómenos de Transporte*, 2nd ed. México: Reverté, 2002.
- [25] J. Ferré, “El diseño factorial completo 2 2”.
<http://www.quimica.urv.es/quimio/general/disfact.pdf>. Consultada: 06-Jul-2016.

APENDICE I Ficha de seguridad del ácido benzoico

Ficha de Datos de Seguridad

ACOFARMA

Conforme al Reglamento (CE) N° 1907/2006 (REACH)

1.- Identificación de la sustancia o del preparado y de la sociedad o empresa

Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación: Ácido Benzoico Ph.Eur.

Identificación de la sociedad o empresa: Acofarma Distribución S.A.
Llobregat, 20
08223-Terrassa. España.
Tel: 93 736 00 88 / Fax: 93 785 93 62

Teléfono de urgencias: Instituto Nacional de Toxicología. Madrid. Tel: 91 562 04 20

2. Identificación de los peligros

Clasificación de la sustancia o mezcla

De acuerdo al Reglamento (EC) No1272/2008

Toxicidad aguda, Oral (Categoría 4)

Irritación ocular (Categoría 2)

De acuerdo con la Directiva Europea 67/548/CEE, y sus enmiendas.

Nocivo por inhalación y por ingestión.

Irrita los ojos.

Elementos de la etiqueta

Pictograma



Palabra de advertencia **Atención**

Indicación(es) de peligro

H302

Nocivo en caso de ingestión.

H319

Provoca irritación ocular grave.

Declaración(es) de prudencia

P305 + P351 + P338

EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando

Símbolo(s) de peligrosidad

Xn

Nocivo

Frase(s) - R

R20/22

ingestión. R36

Nocivo por inhalación y por Irrita los ojos.

Frase(s) - S

S26

En caso de contacto con los ojos, lá vense inmediata y abundantemente con agua y acúdase a un médico.

Otros Peligros - ninguno(a)