

# *Instituto Politécnico Nacional*

*Escuela Superior de Ingeniería Química  
e Industrias Extractivas*

*MODELADO FISICO DE LA DECARBURACION  
DE ACEROS INOXIDABLES POR INYECCION  
SUMERGIDA DE OXIGENO/ARGON EN UN  
HORNO ELECTRICO DE ARCO.*

## *Tesis Profesional*

*Que para obtener el Titulo de:  
INGENIERO METALURGICO*

*presentan*

*Andrés Aguilar Espinosa  
Jesús Salvador Meza Espinoza*

*México, D. F.*

1986





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DIVISION DE SISTEMAS DE TITULACION

México, D. F. 24 de febrero 1986.

ANDRES AGUILAR ESPINOSA  
C. JESUS SALVADOR MEZA ESPINOZA  
Pasante de Ingeniero METALURGICO  
Presente

El tema de trabajo y el tema para el examen profesional en la opción TESIS COLECTIVA  
a presentarse en el Instituto Politécnico Nacional es el tema "MODELADO FISICO DE LA DECARBURACION DE ACEROS  
DE ALTA CALIDAD POR INYCCION SUMERGIDA DE OXIGENO/ARGON EN UN HORNO ELECTRICO DE ARCO".  
de la calidad de trabajo que usted presente referida al tema " MODELADO FISICO DE LA DECARBURACION DE ACEROS  
DE ALTA CALIDAD POR INYCCION SUMERGIDA DE OXIGENO/ARGON EN UN HORNO ELECTRICO DE ARCO".  
de la calidad de trabajo que usted presente referida al tema " MODELADO FISICO DE LA DECARBURACION DE ACEROS  
DE ALTA CALIDAD POR INYCCION SUMERGIDA DE OXIGENO/ARGON EN UN HORNO ELECTRICO DE ARCO".

RESUMEN

- I - INTRODUCCION
- II.- FUNDAMENTOS TEORICOS
- III.- OBJETIVOS
- IV.- EQUIPO Y EXPERIMENTACION
- V.- RESULTADOS
- VI.- DISCUSION DE RESULTADOS
- VII.- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA
- APENDICES

ING. IRMA FIGUEROA ESPINOZA

El Jefe del Departamento de Opcion

DR. GUILLERMO J. ROMAN MOGUEL

El Profesor Orientador

ING. RUBEN LEMUS BARRON

El Jefe de la Division de  
Sistemas de Titulacion

DR. GUILLERMO MARTIN SUAREZ

El Director de la Escuela

ash.



SECRETARÍA  
DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA

## INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

MEXICO, D F, 28 de febrero de 1986

ANDRES AGUILAR ESPINOSA.  
JESUS SALVADOR MEZA ESPINOZA.  
C

Pasante de Ingeniero METALURGICO.

Presente

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted que, habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente, denominado MODELADO FÍSICO DE LA DECARBURACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES POR INYECCIÓN SUMERGIDA DE OXÍGENO/ARGÓN EN UN HORNO -- ELÉCTRICO DE ARCO."

encontramos que el estado trabajo y/o proyecto de tesis, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y proceder a su impresión según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente  
JURADO

C. DR. GUILLERMO J. ROMAN MOGUEL.

C. DR. RÓDOLFO MORALES DAVILA.

C. DR. JORGE PÉREZ.

mrg'

c c p —Expediente.

QUE NUESTROS ERRORES NOS DEN  
LA PAUTA A SEGUIR PARA LOGRAR  
NUESTROS TRIUNFOS.

SOLO LECTURA

Con amor a mis padres

Miguel Aguilar Martínez  
Evelia Espinosa Sandoval

Ya que con sus desvelos y sacrificios hicieron posible  
mi anhelo, légame la mejor de las herencias.....

A mis hermanos, con cariño

Oscar  
Marisol  
Karina  
y Miguel

Porque logren realizar sus mas puros ideales.....

Con respeto a todos mis familiares.....

ANDRES

A mis abuelos

Francisco Espinosa  
Hermelinda Sandoval

Alfonso Aguilar (in memoriam)  
Elvira Martínez

Porque sientan esto como algo suyo.

A mis amigos

Renato y Enrique

por todo lo que nos ha unido y hemos compartido.

A

Amalia Espinosa y Celia Rojas  
Por su hospitalidad ..... gracias

ANDRES

A mi esposa:

Laura Perez V.

con profundo amor

por impulsarme a lograr mis anhelos

y porque en las situaciones difíciles

me alienta a seguir siempre adelante.

A mi hijo.

Raudel Salvador

con orgullo y cariño

porque con sus travesuras

y sonrisas lo llenan todo

y motivan mi superación.

A mis padres:

Ma. del Refugio Espinoza H.

José Meza L.

con amor, respeto y admiración

porque siempre han luchado

con entereza por brindarme

lo mejor.

JESUS SALVADOR

A mis hermanos:

Ramón, Hilario, Elvira,

Alberto, Javier y Santiago

con agradecimiento y estimación

por su gran apoyo y confianza.

A mi tío:

José Espinoza H.

con respeto y estimación

porque gran parte de mi formación

es gracias a su apoyo moral.

Con respeto a mis cuñados

y a todos mis familiares,

a la memoria de mis abuelos.

A mis suegros:

Ma. Trinidad Valencia

Pedro Perez M.

con respeto y estimación

por su bondad.

JESUS SALVADOR



En especial a los Dres:

Elizabeth Rivera R.

Carlos Castro A. (in memoriam)

Luis Wagner M.

Alberto Espindola M.

y a sus hijos: Carlos, Luis, Alberto y Alfonso W.

con profundo agradecimiento y estimación

por su gran apoyo e interés en mi superación.

JESUS SALVADOR

A tí, institución de enseñanza,  
en donde logre la mayor de  
mis metas.

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

¡ SOY POLITECNICO ¡  
Huelum, huelum ¡ Gloria ¡  
A là cachi, cachi porra,  
a la cachi, cachi porra.  
Pin pon porra,  
pin pon porra.  
Politécnico, Politécnico.  
¡ Gloria ¡

A tí, porque de todas,  
tu fuiste la que me abrió  
las puertas del saber.

E.S.I.Q.I.E.

¡ SOY METALURGICO ¡  
Coque, arrabio y escoria,  
coque, arrabio y escoria.  
Metalurgicos,  
Metalurgicos.  
¡ Gloria ¡

A la Division de Ingenieria Metalurgica.

A todos nuestros maestros, los cuales contribuyeron  
a nuestra formación profesional y en especial a :

Dr. Guillermo J. Román Moguel

Por sus ilustres consejos en la elaboración de este trabajo

A nuestros amigos y compañeros, por todo lo que nos ha unido

MODELADO FISICO DE LA DECARBURACION DE ACEROS  
INOXIDABLES POR INYECCION SUMERGIDA DE OXIGE-  
NO/ARGON EN UN HORNO ELECTRICO DE ARCO.

SOLA LECTURA

## CONTENIDO

### RESUMEN

#### I. INTRODUCCION

#### II. FUNDAMENTOS TEORICOS

##### 2.1. DECARBURACION DEL ACERO

##### 2.2. INYECCION SUMERGIDA DE GAS EN LIQUIDOS

2.2.1. Formación de burbujas durante la inyección sumergida

##### 2.3. MODELADO FISICO

2.3.1. Criterio de similitud

2.3.2. Análisis dimensional

#### III. OBJETIVOS

#### IV. EQUIPO Y EXPERIMENTACION

##### 4.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO

4.1.1. Introducción

4.1.2. Modelo físico

4.1.3. Sistema de inyección

4.1.4. Sistema de muestreo

##### 4.2. MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELADO FISICO

##### 4.3. EXPERIMENTOS DE REACCION

4.3.1. Cálculos para evaluar los parámetros que controlan la  
experimentación

4.3.2. Selección de variables

4.3.3. Desarrollo experimental

4.4. EXPERIMENTOS CINEMATOGRAFICOS.

V. RESULTADOS.

5.1. EXPERIMENTOS DE REACCION

5.2. EXPERIMENTOS CINEMATOGRAFICOS

VI. DISCUSION DE RESULTADOS.

6.1. EFECTO DEL  $N'_{Fr}$

6.2. EFECTO DEL DIAMETRO DE LA LANZA

6.3. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION

6.4. EFECTO DEL ANGULO DE INCLINACION

6.5. EFECTO DEL  $N'_{Fr}$  SOBRE LA PENETRACION Y EL ANGULO DE EXPANSION  
DEL CHORRO

VII. CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA

Apéndice A. Calibración de los rotámetros

Apéndice B. Nomenclatura

Apéndice C. Preparación de soluciones

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio del proceso de inyección de helio/dióxido de azufre en una solución concentrada de peróxido de hidrógeno/agua para simular la inyección de argón/oxígeno en acero líquido, mediante un modelo físico que representa un horno eléctrico de arco de dos toneladas de capacidad, cuyo diseño y operación se basan en el establecimiento de criterios de similitud geométrica, cinemática y química, y de la relación de densidades y viscosidades gas-líquido. Se determinó el efecto sobre el coeficiente de transferencia de masa,  $K_{SO_2}$ , y por lo tanto la rapidez de la reacción, del número modificado de Froude que va desde 14.699 hasta 0.029; del diámetro de la lanza de 0.1587 y 0.3175 cm; de la profundidad de inyección de 8.5 y 17 cm; y del ángulo de inclinación de la lanza de 30 y 45 grados.

El valor del coeficiente de transferencia de masa fue mayor en la parte cercana a la superficie, que en el fondo del baño. A mayor número modificado de Froude, fue mayor el valor del coeficiente. Y para cuando se tiene un diámetro de lanza más grande, el valor del coeficiente de transferencia de masa fue mayor. Mientras que cuando se varía la profundidad de inyección, el valor del coeficiente se incrementó para una mayor profundidad. Y con respecto al ángulo de inclinación de lanza, el valor del coeficiente fue menor para cuando el ángulo aumenta.

## I. INTRODUCCION.

En la fabricación de aceros inoxidable, el proceso de decarburación es de gran importancia debido a que el contenido de carbono debe ser disminuido hasta donde sea necesario para obtener las propiedades físicas y mecánicas deseadas, ya que de lo contrario altos contenidos afectaría la calidad del acero. Para ello el proceso efectivo se lleva a cabo en un convertidor AOD (Argon, Oxygen, Decarburization) en el que se utiliza la inyección de argón para diluir el oxígeno y abatir la presión parcial del monóxido de carbono (CO) y evitar que se oxide el cromo. Sin embargo en nuestro país sólo se cuenta con un convertidor de este tipo, que no deja de ser una fuerte inversión que para muchas empresas no sería costeable, por lo que es necesario desarrollar nuevos procesos que cumplan el mismo objetivo. Es por ello que el presente trabajo introduce la técnicas de modelado físico y la inyección sumergida de gas en un horno eléctrico de arco.

En donde las técnicas de modelado físico se desarrollaron para representar operaciones de procesamiento de metales, aunque han resultado ser muy efectivas para evaluar procesos de optimización. El objetivo principal del modelado es lograr una representación realista del sistema, para describir, predecir y visualizar el comportamiento del mismo. Por su parte la inyección sumergida de gas en metales líquidos es una técnica que ha sido aplicada en muchos procesos metalúrgicos, ya sea para desgasificar, desulfurar o remover impurezas.

El principio de dicha técnica se basa en la formación de burbujas mediante un chorro de gas inyectado a cierta velocidad, cuyo objetivo es penetrar en el



líquido para transferir masa y arrastrar hacia la superficie elementos no deseables. Es por ello que el proceso forzosamente involucra aspectos de hidrodinámica, transferencia de masa y de reacción, y que la trayectoria y penetración son una función del número modificado de Froude, además de la relación de densidades gas-líquido.

En este trabajo se describen aspectos generales de la decarburación del acero, inyección sumergida de gas en líquidos, modelado físico que contempla criterios de similitud y análisis dimensional. Herramientas que ayudan a plantear los objetivos que determinan el curso de la experimentación en un equipo diseñado bajo criterios preestablecidos, en el que se obtuvieron resultados que se discuten bajo intervalos de aceptación logrados por otros estudios semejantes<sup>2</sup> lo que conlleva a las conclusiones de este trabajo.

## II. FUNDAMENTOS TEORICOS.

### 2.1. DECARBURACION DEL ACERO.

La reacción más importante en el proceso de obtención del acero en el horno eléctrico de arco, es la oxidación del carbono. El producto de esta reacción es el monóxido de carbono (CO), el cual sobrepasa las cantidades normales del carbono que se oxida en toda la fusión, y el volumen del gas que se produce supera al del metal en casi mil veces. Al desprenderse una cantidad considerable de gas (CO), ocurre un fuerte mezclado entre el metal y la escoria, lo que facilita el calentamiento de éste al ponerse en contacto con la escoria; además, homogeniza la composición química, permite la extracción de gases (H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>) y el desprendimiento de las inclusiones no metálicas de la masa metálica.

La reacción del carbono en el metal se plantea de la siguiente forma:

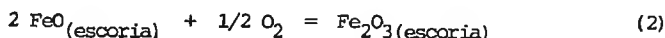


El sistema dado es de tres componentes debido a que se tiene que considerar al solvente (hierro), por lo que para tenerlo en equilibrio se tendrían que tener constantes las tres magnitudes (temperatura, presión y concentración). La oxidación del carbono en el metal es un proceso complejo y se considera que se realiza de la siguiente manera<sup>5</sup>:

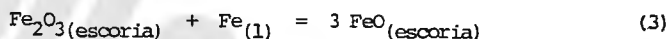
Primera etapa; paso del oxígeno de la atmósfera a la escoria y de la escoria al metal, esta etapa está formada por:

- 1) Difusión del oxígeno de la atmósfera del horno hacia el límite de separación gas-escoria.

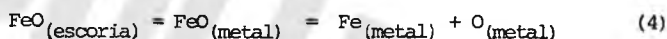
- 2) Absorción química del gas sobre la superficie de la escoria, con oxidación simultánea del óxido ferroso hasta el óxido férrico:



- 3) Difusión del óxido férrico en la masa de la escoria hacia el límite de separación escoria-metal.
- 4) Reducción del óxido ferroso en la capa superficial escoria-metal, hasta el óxido férrico:



- 5) Paso del óxido ferroso de la escoria al metal:



- 6) Difusión del oxígeno en la masa del metal hacia el lugar donde reacciona con el carbono, que es la superficie del revestimiento y la fase metálica.

Segunda etapa; intercambio químico del carbono con el oxígeno, formado por:

- 1) Localización del carbono y el oxígeno, es decir la acumulación de ambos en aquellas áreas de la masa metálica donde existen posibilidades para que reaccionen (poros de revestimiento refractario).

- 2) El intercambio químico:



Tercera etapa; formación de la burbuja de CO, su ascenso y eliminación en la superficie del metal, o sea:

- 1) Formación de la burbuja gaseosa en la fase metal-revestimiento:



- 2) Crecimiento y traslado de las burbujas a la fase gaseosa de la atmósfera del horno, con reacción final de CO hasta CO<sub>2</sub>.

El paso importante del proceso es aquél que se realiza con la menor velocidad, ya que determina la velocidad de todo el proceso. Se ha demostrado que la velocidad de oxidación del carbono se determina por la intensidad del paso de oxígeno de la masa metálica al lugar de la reacción, ya que por ser este paso el más lento, determina la velocidad de todo el proceso, siempre que el contenido de carbono en el metal sea mayor del 0.2 %. Para cantidades menores de carbono el paso más lento es la difusión del carbono al lugar donde se produce la reacción.

La formación de burbujas gaseosas tiene lugar en las áreas de la superficie sólida, donde existen poros fundamentalmente sobre la superficie de la solera. La eliminación (desprendimiento) de las burbujas de monóxido de carbono es posible en el caso de que la presión del monóxido de carbono ( $P_{CO}$ ) sobrepase la presión total del sistema, es decir, la presión de la atmósfera del horno, la del metal, la de la escoria, así como las presiones de la columna del líquido sobre la burbuja (presión capilar).

## 2.2. INYECCION SUMERGIDA DE GAS EN LIQUIDOS.

La inyección sumergida de gas fué utilizada primeramente en la fabricación de aceros en el año 1860, en el proceso Bessemer ácido, donde el soplo fué por el fondo. El soplado por el fondo para la fabricación de aceros es cada vez más empleado hoy en día debido al desarrollo de las boquillas concéntricas. Estas permiten inyectar oxígeno por estar protegido por un hidrocarbón o por vapor, eliminando así temperaturas extremadamente altas cerca del refractario

del piso del horno. Procesos tales como Q-BOP, LWS y SIP se basan en este principio. Otros procesos de fabricación de acero que se basan en la inyección sumergida de gas son el AOD y el CLU<sup>4</sup>. En la metalurgia no ferrosa se utilizan poco este tipo de procesos en operaciones tales como la fusión de concentrados de sulfuros, el tratamiento de escorias de estaño y la producción de cobre y níquel, aunque la aplicación más importante de la inyección sumergida de gas en la industria no ferrosa es el convertizaje de matas de cobre, para producir cobre metálico líquido en forma de cobre blister crudo, que es procesado por oxidación de la mata fundida con aire.

Existen dos principales planteamientos usados para describir el proceso de la inyección de gas en líquidos. Uno se basa sobre la similitud entre el comportamiento del chorro (jet) y su estado o condición en un tiempo promedio; el otro es relacionado con el desarrollo, separación y desintegración de la capa de gas que se forma en la lanza. Cuando un fluido es descargado en otro, se crea una superficie tangencial de separación inestable entre el fluido inyectado y su medio circundante. La inestabilidad de esta superficie conduce al arrastre del medio circundante y causa la expansión del chorro, formando un cono característico del mismo. Themelis<sup>4</sup> encontró para un sistema aire-agua que la trayectoria del chorro inyectado puede ser descrita por ecuaciones dimensionales derivadas sobre las bases de balance de masa y movimiento. Además, usando una técnica fotográfica, la forma y trayectoria del chorro pueden ser medidas y se ha encontrado que el ángulo del cono es una función de las propiedades fluidas del chorro, y que la penetración del gas en el líquido es limitada por las propiedades del mismo, siendo la interacción entre ambos fluidos de carácter pulsante según Spesivtsev<sup>4</sup>. Mientras que Oryall y Brimacombe<sup>4</sup> encon-

traron que la inyección de un gas inerte en mercurio, el chorro expande rápidamente con un ángulo de  $155^\circ$  en lugar de  $20^\circ$  que encontró Themelis para el sistema aire-agua. Y que cuya expansión esta confinada a la región horizontal de la trayectoria, la sección vertical no muestra una expansión apreciable. La forma general del chorro es semejante a una columna vertical más que a un cono, penetrando solamente 5 mm en el fluido.

También Hoefelle y Brimacombe<sup>4</sup> estudiaron la inyección sumergida de diferentes gases en agua, solución cloruro de zinc y en un baño de mercurio, bajo condiciones de soplado a baja y a alta presión. Encontraron que se distinguen dos regímenes de flujo, donde a bajas velocidades de flujo predomina un régimen de burbujeo y a altas velocidades de flujo predomina un régimen estable de chorro, Y que el comportamiento del chorro y el burbujeo son una función del número modificado de Froude y de la relación de densidades y viscosidades de los fluidos. Por su parte Fruen y Martonick<sup>4</sup> inyectaron aire en agua-glicerina y encontraron que el chorro no expande en ángulo constante y que cuya forma demostró ser dependiente de las propiedades físicas del líquido. También encontraron que el aire inyectado horizontalmente no penetra en el líquido según se creía previamente. La aplicabilidad de los modelos desarrollados por Themelis, Engh y Berthussen<sup>4</sup> han sido también desde el punto de vista matemático.

#### 2.2.1. Formación de burbujas durante la inyección sumergida.

La formación de burbujas durante la inyección sumergida es de fundamental importancia, cuyo volumen y frecuencia es dependiente de la densidad del líquido. Cuando un gas es inyectado en un fluido de gran densidad, tres diferentes regímenes de flujo son identificados como una función de la velocidad de flujo

de gas. A muy bajas velocidades de flujo de gas del orden de un cc/seg existe sólo una burbuja en el proceso, la frecuencia del burbujeo es proporcional a la velocidad del flujo del gas y el tamaño de la burbuja es casi constante. Para altas velocidades de flujo de gas, alrededor de 500 cc/seg, el gas emerge como una serie de burbujas, así el volumen de burbujeo se incrementa con la velocidad del flujo del gas, mientras que la frecuencia de formación permanece casi constante. A muy altas velocidades de flujo de gas se logra un régimen de chorro en el cual un canal continuo de gas es formado a través del líquido.

Clift, Kumar y Kuloor<sup>4</sup> propusieron modelos para describir la formación de burbujas, los cuales son modelos mecánicos y dependen de alguna forma del balance de fuerzas para predecir una o más etapas en el desarrollo de burbujas. Los modelos propuestos resultan de una relación entre el volumen de burbujas y el flujo de gas de la forma:

$$V = \beta Q^{6/5} g^{-3/5} \quad (7)$$

donde el factor de burbujeo  $\beta$  depende de las condiciones esféricas del proceso de inyección del gas. Aunque se encontró que el volumen de burbujeo es proporcional a  $do^{0.44}$  para diámetros pequeños de lanza.

### 2.3. MODELADO FISICO.

El modelado físico no es otra cosa más que la simulación de un proceso y para ello existen tres tipos de modelos: 1) modelos matemáticos, 2) modelos físicos y 3) planta piloto. Un modelo matemático consiste en una serie de ecuaciones algebraicas o diferenciales las cuales representan cuantitativamente un

proceso. Mientras que una planta piloto es una exacta réplica de una instalación a gran escala excepto que operan sobre escalas pequeñas<sup>1</sup>. Sin embargo lo concerniente a este trabajo es la construcción de un modelo físico del proceso de decarburación, que busca representar o modelar el sistema cambiando los materiales que sean manipulables y también frecuentemente la escala de las operaciones.

Con el modelado físico se logra tener una representación realista del sistema usando materiales y equipo tal que las mediciones puedan hacerse lo mas convenientemente y a un bajo costo. El criterio para la representación realista, más propiamente establecido es el criterio de similaridad, que es discutido en la sección 3.2.1.

Los modelos físicos fincan su importancia y utilidad en tres razones principales:

- 1) Las medidas cuantitativas tomadas en el curso del experimento modelo pueden ser trasladadas directamente por medio de escalas apropiadas para describir el comportamiento del sistema real.
- 2) Puede predecirse el comportamiento del sistema real industrial a partir del modelo físico.
- 3) Visualización del flujo y de la contribución cinética del proceso.

Los modelos físicos se clasifican en:

- 1) Modelos físicos rigurosos, que son construidos siguiendo ciertas reglas estrictas ó criterios de similaridad.
- 2) Modelos físicos semirigurosos, en el que se estudian los fenomenos físicos relevantes, con el objeto de proveer información para la construcción de modelos matemáticos.



- 3) Experimentos de ensaye para adquirir una sensibilidad sobre el sistema como un estudio preliminar al modelado matemático.

El desarrollo de modelos rigurosos es a menudo imposible, porque es difícil satisfacer todos los criterios de similaridad. Por otra parte, el desarrollo de modelos semirigurosos ó el estudio detallado de fenomenos físicos clave podría requerir de un tiempo largo y de muchos recursos. En algunos casos puede ser útil para conducir una investigación preliminar. Mientras que las mediciones apropiadas pueden ser particularmente útiles, como un ensaye anterior al desarrollo de modelos matemáticos cuando no se tiene una buena representación física del sistema.

#### 2.3.1. Criterio de similaridad.

La representación realista de un sistema se logra introduciendo el criterio de similaridad, cuyo principio establece que la configuración de un sistema puede ser definida por relaciones entre las magnitudes dentro del sistema, las cuales no dependen de las unidades de medida. La aplicabilidad del criterio de similaridad provee un discernimiento dentro del sistema y puede ser usado para minimizar la experimentación necesaria para relacionar las variables más importantes del proceso. Así el criterio de similaridad puede derivarse por varios métodos, una técnica excelente que puede ser aplicada en muchos casos está basada en el estudio de ecuaciones que describen el comportamiento del sistema. Por lo que las condiciones de similaridad de un sistema se definen por una serie de grupos adimensionales (tabla I) que se refieren al estudio de transferencia de masa y de calor, de movimiento y reacción química, que una vez establecidos, puede construirse el modelo completo del sistema manteniendo igualdad

de dichos grupos adimensionales entre el modelo y el prototipo.

Los principales estados de similaridad son los siguientes:

- . similaridad geométrica
- . similaridad cinemática
- . similaridad dinámica
- . similaridad térmica
- . similaridad química

La similaridad geométrica es la similaridad de forma, en donde los sistemas son geoméricamente similares cuando la relación de cualquier dimensión en un sistema a la correspondiente dimensión en el otro sistema es en todas las formas igual. Esta relación es usualmente denominada el factor escala. Por lo que la similaridad geométrica es el requerimiento más obvio del modelado, sin embargo a menudo es imposible lograr una perfecta similaridad geométrica. Bajo estas condiciones, ciertas dimensiones críticas del modelo son escaladas del prototipo, mientras que otras no lo son. Este procedimiento es llamado el uso de un modelo distorsionado. Por su parte la similaridad cinemática representa la similaridad de movimiento del gas a través del líquido. Mientras que la similaridad dinámica representa la similaridad de fuerzas que son; inerciales, de presión, de viscosidad, gravitacionales, de tensión superficial, elásticas y electromagnéticas. La similaridad térmica representa los mecanismos de transferencia de calor que son el de conducción, convección y de radiación. Finalmente la similaridad química le corresponde la rapidez de las reacciones químicas que se generan en el sistema. En la práctica la simulación química de un proceso presenta muchos problemas porque requiere la proporcionalidad de tiempo, temperatura y concentración entre el modelo y el prototipo.

### 2.3.2. Análisis dimensional.

El análisis dimensional es una herramienta complementaria del criterio de similitud para describir el comportamiento de un sistema. Así el análisis dimensional se utiliza para establecer el número mínimo de variables independientes controlando el comportamiento de un sistema y el arreglo en la forma de grupos adimensionales. El análisis dimensional se basa en el hecho de que las unidades de medición de las diferentes cantidades físicas de un sistema están interrelacionadas. Por ejemplo una unidad de densidad está relacionada con las unidades de masa y volumen, la unidad de velocidad con las unidades de tiempo y longitud, etc. En cualquier sistema se pueden seleccionar las dimensiones primarias, las cuáles pueden ser usadas para expresar todas las otras dimensiones en el sistema. El número requerido de dimensiones primarias depende del sistema físico a medir. En sistemas dinámicos, las dimensiones independientes seleccionadas son masa, longitud y tiempo (M,L,T) ó fuerza, longitud y tiempo (F,L,T). Para sistemas que envuelven transferencia de calor, la temperatura se toma como la cuarta dimensión independiente ( $\theta$ ); en suma, el calor (Q) puede también ser incluido por conveniencia como una dimensión primaria, no obstante el hecho que puede ser expresada en términos de otras dimensiones.

La técnica del análisis dimensional se basa en el método de índices, un procedimiento algebraico el cuál fué usado primeramente por Raleigh<sup>3</sup>. En este método se asume que las relaciones entre las diferentes cantidades físicas de un sistema pueden ser expresadas como el producto de funciones potencia o exponenciales. El método de índices asume que la relación entre una variable dependiente  $V_0$  y las variables independientes  $V_1, V_2, V_3, \dots$  puede expresarse como:

$$V_0 = C V_1^a V_2^b V_3^c \quad (8)$$

donde C es la constante dimensional y a,b,c, son también constantes. El siguiente paso consiste en convertir la ecuación anterior (8) en una ecuación equivalente donde las variables independientes han sido rearrregladas en grupos adimensionales  $D_0, D_1, D_2$  como sigue:

$$D_0 = C D_1^d D_2^e D_3^f \quad (9)$$

Sin embargo cualquier discusión de análisis dimensional no puede estar completa si no se introduce el teorema P1 de Buckingham que consiste de:

- 1) Recopilar una lista de las cantidades "q" importantes y sus unidades fundamentales respectivas.
- 2) Seleccionar las cantidades primarias ( $q_s$  primarias), el número de éstas debe ser igual a "U" que es el número de unidades fundamentales.
- 3) Formar cada término  $P_i$ , dividiendo cada una de las  $q_s$  restantes entre el producto de las  $q_s$  primarias cada una elevada a una potencia.

En la tabla I se mencionan algunos de los grupos adimensionales más útiles e importantes que se manejan en procesos metalúrgicos<sup>3</sup>. Así también se puede observar que la inyección sumergida de gas tiene una marcada relación con el proceso de decarburación ya que en ambos se logra tener una agitación homogénea y la producción de burbujas en el primero, tienen como objeto penetrar en el líquido y arrastrar hacia la superficie la masa transferida; mientras que en el segundo se arrastra hacia la superficie el carbono en forma de monóxido de carbono y además inclusiones no metálicas. Por lo que corresponde al modelo físico es la herramienta con la cual logra su cometido la inyección, comparativamente representa el horno eléctrico de arco en el que es posible se lleve a cabo el proceso de decarburación. Por último todo lo anterior tiene una gran relación y es de fundamental importancia para cumplir con el cometido de este trabajo.

### III. OBJETIVOS.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

1. Diseñar y construir un modelo físico de un horno eléctrico de arco que representará el proceso de decarburación de un acero inoxidable con inyección de argón/oxígeno, utilizando helio/dióxido de azufre en agua.
2. Determinar la influencia del número modificado de Froude, diámetro de la lanza, profundidad de inyección, y ángulo de inclinación de la lanza, sobre el coeficiente de transferencia de masa y la fracción absorbida de dióxido de azufre ( $f_j$ ) que tiene lugar en el sistema  $\text{He}/\text{SO}_2 - \text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ .
3. Determinar las variables óptimas que controlan el proceso y sugerir extrapolación de resultados hacia el proceso real.

TABLA I. GRUPOS ADIMENSIONALES UTILES EN PROCESOS METALURGICOS.

GRUPO	FORMULA	NOMENCLATURA	APLICACION
		(a) Fluidos	
Número de Froude	$N_{Fr} = \frac{u^2}{gL}$	<p>u = velocidad relativa                      g = aceleración de la gravedad                      L = dimensión característica de longitud del sistema</p>	comportamiento de agitación en la superficie.
Número modificado de Froude	$N'_{Fr} = \frac{\rho_g u^2}{(\rho_l - \rho_g)gL}$	<p><math>\rho_g</math> = densidad del gas  <math>\rho_l</math> = densidad del líquido</p>	comportamiento fluido en sistemas líquido-gas.
Número de Morton	$N_{Mo} = \frac{g \mu_l^4}{\rho_l (g_c \sigma)^3}$	<p><math>\mu_l</math> = viscosidad del líquido  <math>g_c</math> = constante de conversión  <math>\sigma</math> = tensión superficial</p>	velocidad de burbujas en líquidos.
Número de Reynolds	$N_{Re} = \frac{L u \rho}{\mu}$	<p><math>\rho</math> = densidad del fluido  <math>\mu</math> = viscosidad del fluido</p>	flujo de fluidos.
Número de Weber	$N_{We} = \frac{\rho L u^2}{g_c}$		formación de burbujas atomización de chorros líquidos.
Número de Galileo	$N_{Ga} = \frac{g \rho^2 L^3}{\mu^2}$		flujo de baños líquidos.

continúa tabla I.

GRUPO	FORMULA	NOMENCLATURA	APLICACION
		(b) Transferencia de calor	
Número de Fourier	$N_{Fo} = \frac{k t}{\rho C_p r_m^2}$	k = conductividad térmica t = tiempo de calentamiento $C_p$ = calor específico del material $\rho$ = densidad del material	estado estable de - - conducción de calor.
Número de Grashof	$N_{Gr} = \frac{g \rho^2 L^3 \beta \Delta T}{\mu^2}$	$\rho$ = densidad del fluido $\beta$ = coeficiente de expansión térmica $\Delta T$ = diferencia de temperatura	convección libre
Número de Nusselt	$N_{Nu} = \frac{h L}{k}$	h = coeficiente de transferencia calor k = conductividad térmica	convección forzada
Número de Prandtl	$N_{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$	$C_p$ = calor específico del fluido = viscosidad k = conductividad térmica	convección libre y - forzada.
Grupo Thring de Radiación	$\frac{\rho C_p u}{\epsilon \sigma T^4}$	$\epsilon$ = emisividad de la superficie $\sigma$ = constante Stefan-Boltzman de radiación T = temperatura absoluta de la superficie (°K)	radiación.

continúa tabla I.

GRUPO	FORMULA	NOMENCLATURA	APLICACION
		(c) Transferencia de masa	
Número de Lewis	$N_{Le} = \frac{\rho C_p D_{A-B}}{k}$	$C_p$ = calor específico $D_{A-B}$ = difusión molecular $k$ = conductividad térmica	transferencia de calor y de masa, combinados
Número de Peclet	$N'_{Pe} = \frac{L u}{D'_v}$	$D'_v$ = coeficiente característico de difusión	transferencia de masa - en reactores.
Número de Schmidt	$N_{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{A-B}}$	$\mu$ = viscosidad del fluido $\rho$ = densidad del fluido	convección libre y forzada.
Número de Sherwood	$N_{Sh} = \frac{kd L}{D_{A-B}}$	$kd$ = coeficiente de transferencia de masa	convección libre y forzada.
		(d) Reacción Química	
Grupo Arrhenius	$E/RT$	$E$ = energía de activación $R$ = constante universal de los gases $T$ = temperatura absoluta (°K)	velocidad de reacción
Grupo Damkohler I	$\frac{v_x L}{u C_a}$	$C_a$ = concentración de especies $v_x$ = velocidad de reacción $u$ = velocidad del fluido	reacción química combinada con movimiento y calor



#### IV. EQUIPO Y EXPERIMENTACION.

##### 4.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO.

###### 4.1.1. Introducción.

Como se menciona en la sección 2.3.1., los criterios bajo los cuales se diseña y opera el modelo físico para representar un horno eléctrico de arco de dos toneladas, puede decirse, que se mantiene similaridad geométrica al guardar la misma relación de diámetro a profundidad (D/L) que en el horno, a una escala de 05 : 1. La similaridad cinemática se obtiene al operar el modelo con números modificados de Froude ( $N'_{Fr}$ ) del mismo intervalo de magnitud que en el horno; asimismo se utiliza helio como gas diluyente para mantener la misma relación de densidades y viscosidades con respecto al agua, que la del sistema real argón-a-cero líquido. Finalmente, la similaridad química se logra utilizando la reacción de oxidación del bióxido de azufre ( $SO_2$ ) por peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) que tiene un orden de reacción igual al de la oxidación del carbono por oxígeno<sup>2</sup>.

Después de pruebas preliminares se introducen dos modificaciones, la primera con respecto a la profundidad del baño. Para poder mantener la relación  $D/L = 4.48$  que es la correspondiente al horno, el modelo debió de tener una profundidad L de 12.5 cm, lo que no permitiría visualizar la diferencia en rapidez de reacción a distintas profundidades. Consecuentemente, se opta por una profundidad de 25 cm con el correspondiente efecto favorable al principio de similaridad al tener una mayor carga hidrostática. La segunda modificación se realiza con respecto a los puntos de muestreo. Ya que al no encontrarse diferencia apre

ciable entre los puntos a distintos radios, se muestrea solamente con dos tubos situados frente a la lanza de inyección, a dos diferentes profundidades.

#### 4.1.2. Modelo físico.

Como se muestra en la fig. 1, el modelo consiste de un tanque cilíndrico de acrílico con un diámetro de 56 cm y una altura de 52 cm, cuyo interior contiene un volumen de 62,609 litros de agua con una solución 0.3 % de peróxido de hidrógeno alcanzando una profundidad de 25.1 cm. Además tiene montada una lanza cambiabile de acero inoxidable en la parte superior con un cierto ángulo de inclinación con respecto a la horizontal y que está introducida una determinada profundidad (8.5 y 17 cm). También tiene montados dos muestreadores de acero inoxidable de 0.1587 cm de diámetro situados frente a la lanza de inyección a 4 y 21 cm de profundidad. El modelo se encuentra bajo una campana extractora con el objeto de expulsar los gases producidos durante el experimento.

#### 4.1.3. Sistema de inyección.

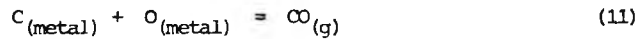
El sistema de inyección está construido por medio de un modelo frío<sup>2</sup> en el cual un chorro de 1 % SO<sub>2</sub> en He son inyectados con una lanza cambiabile en una solución concentrada de peróxido de hidrógeno en agua. La mezcla He/SO<sub>2</sub> es controlada por rotámetros y mezclada previamente en una cámara de mezclado, como se muestra en la fig.2.

El dióxido de azufre reacciona con el peróxido de hidrógeno de acuerdo a la reacción:



la cual se supone se transforma completamente a ácido sulfúrico. Mientras que

en el horno eléctrico de arco la reacción que tiene lugar es :



que como ya se mencionó tienen el mismo orden de reacción.

Cabe mencionar que se utilizan dos lanzas con diferentes diámetros: 0.1587\_ y 0.3175 cm , asimismo previo a la inyección de la mezcla se realizó la cali- bración de los rotámetros, operación que se describe en el apéndice A.

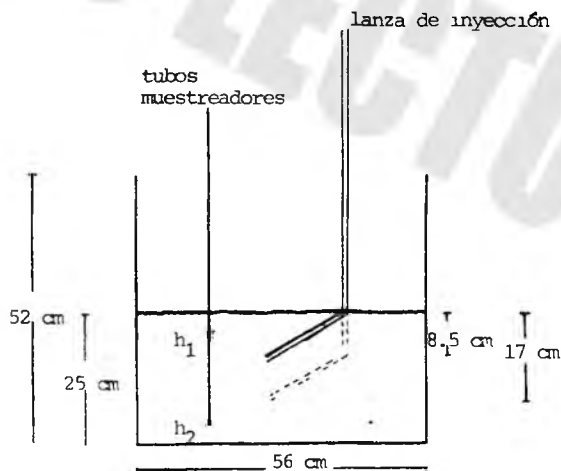


Fig. 1 Reactor utilizado en los experimentos de reacción y cinematográficos.

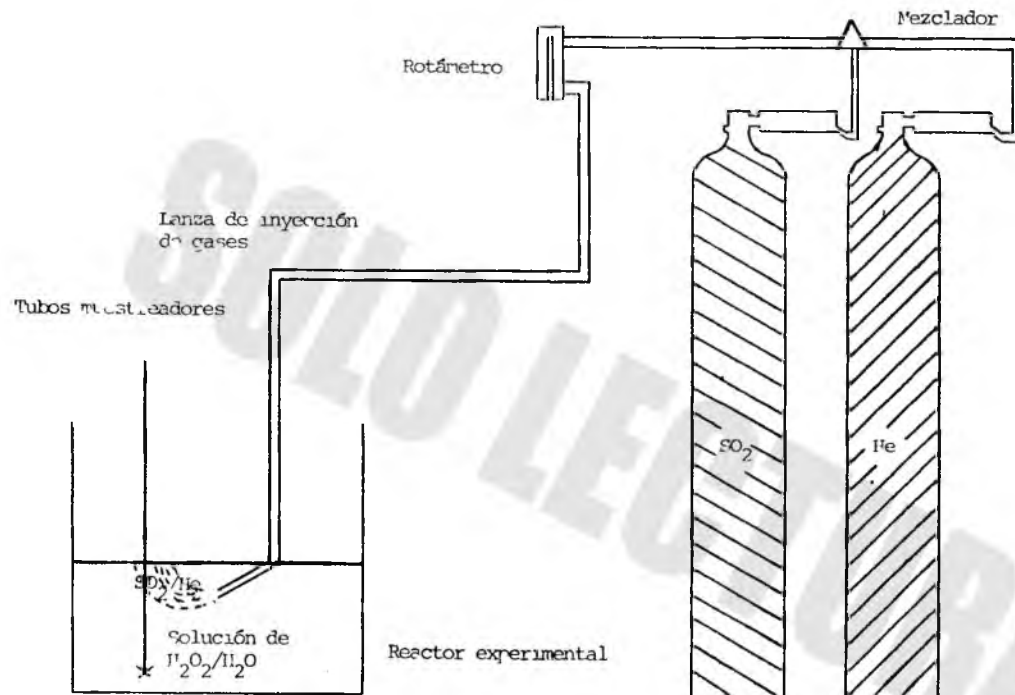


Fig. 2 Sistema experimental para estudios de mezclado

#### 4.1.4. Sistema de muestreo.

El sistema de muestreo consiste de 2 tubos de acero inoxidable de igual -- diámetro, de 0,1587 cm, situados frente a la lanza de inyección e introducidos en el baño a una profundidad de 4 y 21 cm respectivamente. Como su nombre lo indica tiene la función de tomar muestras mediante la acción de perillas propias durante el transcurso del experimento a diferentes tiempos de soplado. La toma de muestras se lleva a cabo en un par de segundos e inmediatamente se vierten en tubos de ensaye para posteriormente analizarse para ácido sulfúrico por el método volumétrico, dichas muestras contienen un volumen de 3 ml.

#### 4.2. MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELADO FISICO.

Los principales materiales que se utilizan en el modelo son: agua destilada y peróxido de hidrógeno al 30 % en volumen para simular la masa metálica del acero y su contenido de carbono. Helio y dióxido de azufre en su forma industrial para llevar a cabo la simulación de la inyección argón/oxígeno del proceso real. Así como para determinar la formación de ácido sulfúrico se utilizan soluciones titulantes como son: solución 0.02 molar de hidróxido de sodio al 97 % en peso, solución 20 % en peso de sulfocianuro de amonio, y una solución de 5 % en peso de yoduro de potasio. La formación de ácido sulfúrico en el modelo comparativamente simula la formación de monóxido de carbono en el proceso real al llevar a efecto la decarburación del acero. Ver apéndice C para la -- preparación de soluciones.

#### 4.3. EXPERIMENTOS DE REACCION.

4.3.1. Cálculos útiles para seleccionar las variables que controlan todo el desarrollo experimental de este trabajo.

La secuencia de cálculos se muestra a continuación, proporcionándose los resultados obtenidos en las tablas respectivas.

- 1) Se calcula el requerimiento total de oxígeno para oxidar en el acero el carbono, de 2.5 % a 0.4 %.
- 2) Se calculan los gastos de oxígeno para la cantidad obtenida, suponiendo que se tiene que oxidar el carbono en 10, 20, 30 y 40 minutos de inyección, tabla II.
- 3) Con los gastos calculados se obtienen los números modificados de Froude (N'Fr) correspondientes a tres distintos diámetros de tubería (lanza) : 1.27, 1.905 y 2.54 cm., tabla II.
- 4) Con los N'Fr obtenidos, que corresponden al proceso real, se calculan los gastos de helio en agua para distintos diámetros de tubería : 0.158, 0.3175, 0.635 y 0.952 cm., tabla III.

A continuación se ejemplifica lo anterior :

- 1) Carbono en el acero = (1000 kg) (2.1/100) = 21 kg de carbono.



$$X_{\text{kg O}_2} = (21 \text{ kg C}) (16 \text{ kg O}_2) / (12 \text{ kg C}) = 28 \text{ kg O}_2$$

$$V_{\text{O}_2} = W_{\text{O}_2} / \rho_{\text{O}_2} = 28000 \text{ gr O}_2 / 1.4289 \text{ gr/l} = 19595 \text{ litros O}_2$$

- 2) Flujos de oxígeno.

$$Q_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2} / t_{\text{inyección}} = 19595 \text{ l} / 10 \text{ min} = 1959.5 \text{ l/min}$$

3) Número modificado de Froude ( $N'_{Fr}$ ).

$$N'_{Fr} = \rho_g u^2 / (\rho_l - \rho_g) g d \quad (\text{ver apéndice B})$$

como:

$$Q = u A = u \pi d^4 / 4 \quad \text{de donde} \quad u = 4Q / \pi d^2$$

por lo que tenemos que:

$$N'_{Fr} = \rho_g (16 Q^2 / \pi^2 d^4) / (\rho_l - \rho_g) g d$$

$$N'_{Fr} = \rho_{O_2}^{1500} (16 Q_{O_2}^2 / \pi^2 d^4) / (\rho_{acero} - \rho_{O_2}^{1500}) g d$$

$$N'_{Fr} = \frac{2.19(10)^{-4} \text{ gr/cc} (16 (32667 \text{ cc/s})^2 / \pi^2 (1.27 \text{ cm})^4)}{(7.983 - 2.199(10)^{-4} \text{ gr/cc}) (981 \text{ cm/s}^2) (1.27 \text{ cm})} =$$

$$N'_{Fr} = 14.699$$

4) Gastos de helio.

despejando  $Q$  de la fórmula anterior, implica que :

$$Q = \pi d^2 / 4 (N'_{Fr} (\rho_l - \rho_g) g d / \rho_g)^{1/2}$$

$$Q = \pi d^2 / 4 (N'_{Fr} (\rho_{agua} - \rho_{helio}) g d / \rho_{helio})^{1/2}$$

$$Q = ((3.14)^2 (0.1587 \text{ cm})^4 (14.699) (1 - 1.63(10)^{-4} \text{ gr/cc}) (981 \text{ cm/s}^2) (0.1587 \text{ cm}) / (16) (1.63(10)^{-4} \text{ gr/cc}))^{1/2}$$

$$Q = 74.06 \text{ cc/s} = 4.44 \text{ lt/min}$$

De los cuáles se obtienen las siguientes tablas :

Tabla II. Números modificados de Froude ( $N^*Fr$ ) para el sistema acero/oxígeno.\*

t (min)	Q (l/min)	do		
		1.27	1.905 (cm)	2.54
10	1960	14.699	1.936	0.459
20	980	3.674	0.484	0.115
30	653	1.631	0.215	0.051
40	490	0.919	0.121	0.029

\*  $\rho$  acero = 7.983 gr/cc y  $\rho$  O<sub>2</sub> = 2.199(10)<sup>-4</sup> gr/cc

Tabla III. Gastos de helio (l/min) para el sistema He/SO<sub>2</sub>\*\*

N <sup>*</sup> Fr	do (cm)			
	0.1587	0.3175	0.635	0.9525
14.699	4.44 (9)	25.14 (13)	142.23	391.95
3.674	2.22 (10)	12.57 (14)	71.11	195.95
1.631	1.48 (11)	8.37 (15)	47.37	130.56
0.919	1.11 (12)	6.28 (16)	35.56	98.00
1.936	1.61 (5)	9.12 (1) (21† (29)‡)	51.61	142.24
0.484	0.80 (6)	4.56 (2) (22† (30)‡)	25.80	71.12
0.215	0.53 (7)	3.04 (3) (23† (31)‡)	17.20	47.40
0.121	0.40 (8)	2.28 (4) (24† (32)‡)	12.90	35.56
0.459	0.78 (25)	4.44 (17)	25.13	69.26
0.115	0.39 (26)	2.22 (18)	12.58	34.66
0.051	0.26 (27)	1.48 (19)	8.33	23.08
0.029	0.19 (28)	1.11 (20)	6.31	17.40

\*\*  $\rho$  He = 1.6(10)<sup>-4</sup> gr/cc y  $\rho$  H<sub>2</sub>O = 1 gr/cc

() es el número del experimento.

(†) varía la profundidad que es de 17 cm.

(‡) varía el ángulo de inclinación de la lanza que es de 45 grados.



#### 4.3.2. Selección de variables.

De la tabla III, se han determinado las variables que controlan el curso de la experimentación, como son el diámetro de la lanza de inyección (0.1587 y - 0.3175 cm), debido a que para diámetros mayores (0.635 y 0.9525 cm) los flujos de helio son relativamente altos y el sistema no alcanza a medirlos; también se selecciona el ángulo de inclinación de la lanza, correspondiente a 30 y 45 grados, así como la profundidad de inyección de 8.5 y 17 cm, e indirectamente se selecciona la velocidad de soplado, que es dependiente del flujo de gas de helio. Para ello la tabla se ha seccionado en 8 bloques con 4 experimentos cada uno, sin embargo algunos de ellos no se realizarán debido a que el sistema no alcanza a medir los flujos. Lo anterior es importante ya que para un mismo bloque para cada experimento se inyecta el mismo volumen de gas, a continuación se muestra la tabla IV.

Tabla IV. Variables seleccionadas en el modelado físico.

Bloque No.	Experimento No.	t (min)	N <sup>o</sup> Fr	Q (l/min)	do (cm)	Profundidad de la lanza (cm)	ángulo de inclinación (grados)
I	1	10	1.936	9.12	0.3175	8.5	30
	2	20	0.484	4.56			
	3	30	0.215	3.04			
	4	40	0.121	2.28			
II	21	10	1.936	9.12	0.3175	17.0	30
	22	20	0.484	4.56			
IV	9	10	14.699	4.44	0.1587	8.5	30
	10	20	3.674	2.22			
	11	30	1.631	1.48			

continúa Tabla IV.

Bloque No.	Experimento No.	t (min)	N <sup>o</sup> Tr	Q (l/min)	do (cm)	Profundidad de la lanza (cm)	angulo de inclinación (grados)
V	14	20	3.674	12.5	0.3175	8.5	30
	15	30	1.631	8.37			
VI	17	10	0.459	4.44	0.3175	8.5	30
	18	20	0.115	2.22			
	19	30	0.050	1.48			
	20	40	0.029	1.11			
VIII	29	10	1.936	9.12	0.3175	8.5	45
	30	20	0.484	4.56			

#### 4.5.3. Desarrollo experimental.

Como se menciona anteriormente la experimentación se lleva a cabo por bloques con sus correspondientes experimentos. La inyección se lleva a cabo para cada flujo de helio simultáneamente inyectando 1 % de dióxido de azufre y que son sopladados de 10 hasta 40 minutos. En donde en el transcurso de los mismos se toman muestras como a continuación se indica:

exp. 1: tomar muestras cada 2.5 minutos hasta 10 minutos.

exp. 2: tomar muestras cada 2.5 minutos hasta 10 minutos y después a los 15 y 20 minutos.

exp. 3: tomar muestras cada 2.5 minutos hasta 10 minutos y después a los 15, 20, 30 minutos.

exp. 4: tomar muestras cada 2.5 minutos hasta 10 minutos y después a los 15, 20, 30 y 40 minutos.

tomando muestras al inicio de cada experimento a un tiempo cero.

La toma de muestras se realiza para cada tubo muestreador, tomándose un volumen de muestras de 3 ml que se analizan por volumetría para determinar la concentración de  $H_2SO_4$ . El método consiste en agregar una cantidad suficiente de yoduro de potasio hasta que la solución toma un color ocre, y posteriormente se agrega sulfocianuro de amonio en una cantidad tal que la solución se vuelva clara, dichas soluciones se utilizan como indicadores, por lo que para titular la muestra así preparada se agrega solución de hidróxido de sodio 0.02 molar hasta que la solución vire a incolora, y por la ecuación de:

$$V_1 C_1 = V_2 C_2$$

se determina la concentración de  $H_2SO_4$  como se indica:

$$V_{\text{gastado}} \times C_{\text{NaOH}} = V_{\text{muestra}} \times C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$$

por lo tanto:

$$C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = (V_{\text{gastado}} \times C_{\text{NaOH}}) / V_{\text{muestra}}$$

Las cuales se grafican contra el tiempo de soplado y se determina la pendiente como se muestra en las figuras 5 a 10.

#### 4.4. EXPERIMENTOS CINEMATOGRAFICOS.

Basándose en la tabla III los experimentos cinematográficos se realizaron para observar tendencias generales en el comportamiento hidrodinámico del proceso, además para determinar la longitud del chorro y el ángulo de expansión del mismo, de los cuales depende la penetración del gas en el líquido y por ende la absorción de  $SO_2$ .

Para dicha filmación se utilizó una cámara marca Cannon super 8 la cuál se situa a 1.5 metros de distancia del modelo, asimismo para llevar a efecto la medición del chorro y el ángulo de expansión se utiliza un proyector marca Sankyo super 8 y además para observar la hidrodinámica para cada número modificado de Froude. En las figuras 3 y 4 se muestra la diferencia que sobre la longitud del chorro y su expansión tiene efecto el número modificado de Froude. La figura 3 es para un  $N'_{Fr}$  de 1.936, un flujo de helio de 9.12 l/min,  $d_o$  igual a 0.3175 cm, una profundidad de inyección de 8.5 cm y un ángulo de inclinación de 30 grados. Así para la figura 4 tenemos un  $N'_{Fr}$  de 0.459, un flujo de helio de 4.44 l/min,  $d_o$  igual a 0.3175, una profundidad de inyección de 8.5 cm, y un ángulo de inclinación de 30 grados. Como se puede apreciar se tiene una marcada diferencia en ambas fotografías al variar el  $N'_{Fr}$ , quizá aquí no se aprecia muy bien pero en la película si se observa una apreciación real. Sin embargo si se observa la tabla VI y de los experimentos 5 y 16 se tiene que la longitud del chorro es de 4.453 cm y de 2.457 cm respectivamente. Y con respecto al ángulo de expansión para el experimento 5 que corresponde al  $N'_{Fr}$  de 1.936 de la figura 3, es de  $6^\circ$ , mientras que en el experimento 16 que corresponde a la figura 4 es de 2.5 grados, que como se puede observar si se observa una gran diferencia en el chorro.



Fig. 3 Fotografía de un chorro de  $\text{He}/\text{SO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$ .  $N'Fr = 1.936$ ,  $d_o = 0.3175$  cm  
 profundidad de inyección = 8.5 cm  
 $Q = 9.12$  l/min, ang. incl. =  $30^\circ$

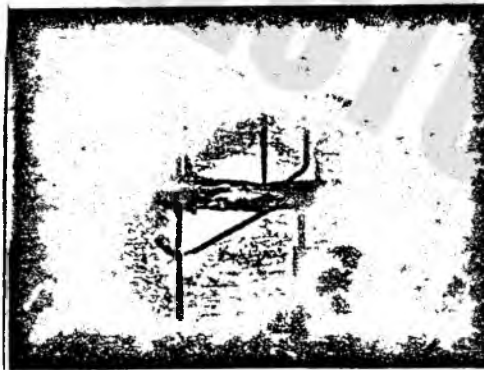


Fig. 4 Fotografía de un chorro de  $\text{He}/\text{SO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$ .  $N'Fr = 0.459$ ,  $d_o = 0.3175$  cm  
 profundidad de inyección = 8.5 cm  
 $Q = 4.44$  l/min, ang. incl. =  $30^\circ$

## V. RESULTADOS.

### 5.1. EXPERIMENTOS DE REACCION.

En las figuras 5,6,7,8,9,10 se presenta el resultado de los experimentos de las concentraciones de ácido sulfúrico, como era de esperarse, la concentración de  $H_2SO_4$  se incrementa linealmente con el tiempo de inyección, lo que comprueba que la rapidez de absorción de  $SO_2$  es constante.

La presión parcial del  $SO_2$  en el chorro (jet) en la superficie del baño  $P_{SO_2}^{So}$  fué calculada para cada experimento a partir de un balance de masa en el chorro cuya expresión final es:<sup>2</sup>

$$P_{SO_2}^{So} = P_{SO_2}^o - \frac{m V b R T}{8Q}$$

Es posible obtener la fracción absorbida de  $SO_2$  del baño como sigue:

$$f_j = \frac{m V b R T}{8Q P_{SO_2}^o}$$

Asimismo, ya que las condiciones experimentales fueron escogidas de manera tal que la rapidez de absorción de  $SO_2$  estuviera controlada por la transferencia de masa en la fase gaseosa para concentraciones de peróxido de hidrógeno superiores a  $6 \times 10^{-6}$  moles/cc<sup>2</sup> es posible obtener una idea del valor del coeficiente de transferencia de masa,  $K_{SO_2}$ , a partir de los experimentos como sigue:

$$-Q \ln(P_{SO_2}^{So}/P_{SO_2}^o) = K_{SO_2} \alpha' S_o$$

Si el producto  $K_{SO_2} \alpha'$  es constante a lo largo de la trayectoria del chorro, una gráfica de  $-Q \ln(P_{SO_2}^{So}/P_{SO_2}^o)$  contra  $S_o$  produce una línea recta la cual tiene una pendiente igual a  $K_{SO_2} \alpha'$  como se muestra en las figuras 11 y 12.

En la tabla V, asimismo, se presentan los resultados para todos los experimentos realizados.

NOTA 1. Las ecuaciones de la presión parcial del  $SO_2$  y de la fracción absorbida de  $SO_2$  se dividen entre 8 ya que éste es un factor de corrección. Puesto que los cálculos debieron haberse hecho para dos toneladas de acero, capacidad del horno eléctrico de arco (sólo se realizaron para una ton) lo cual significa que el  $N'_{Fr}$  aumenta el doble y como consecuencia  $Q$  también aumenta al doble. Por otra parte la relación D/L debió ser 4.48 que es la que corresponde al horno, por lo que se prefirió utilizar el doble para observar una mayor carga hidrostática de los experimentos.

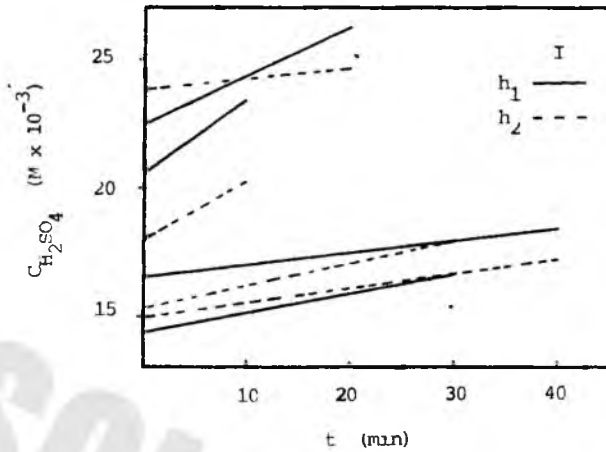


Fig. 5 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque I.

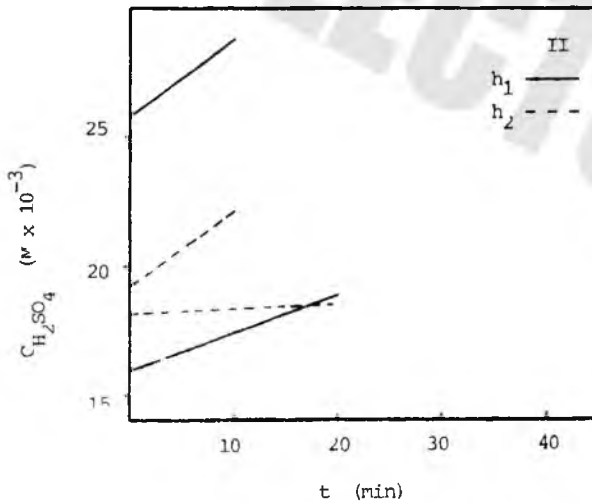


Fig. 6 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque II.



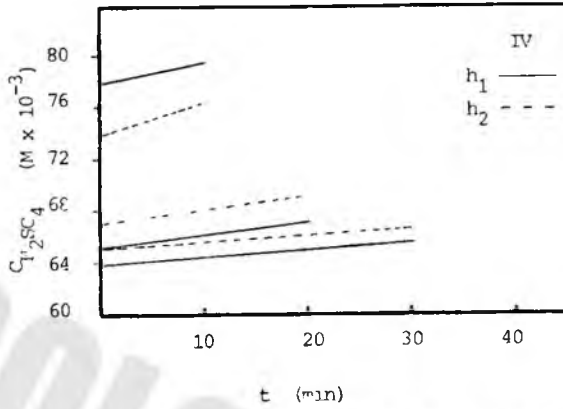


Fig. 7 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque IV.

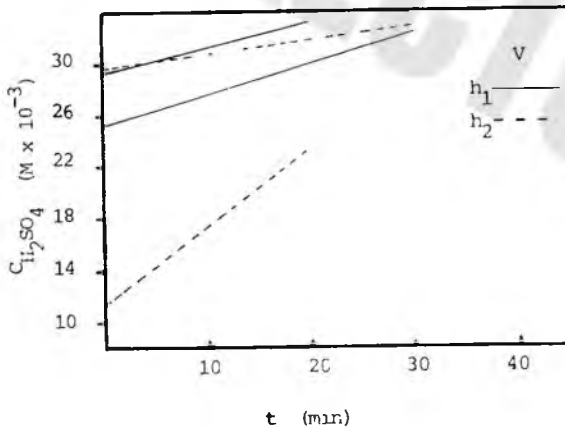


Fig. 8 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque V.

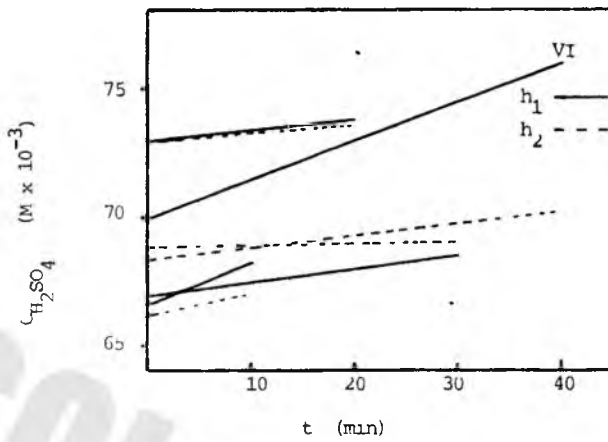


Fig. 9 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque VI.

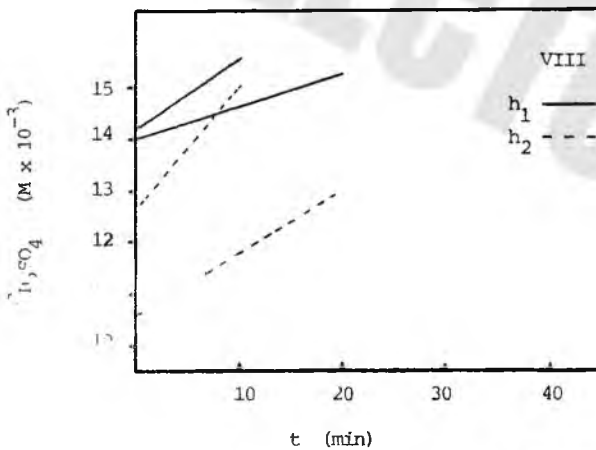


Fig. 10 Concentración de  $H_2SO_4$  en función del tiempo para los experimentos del bloque VIII.

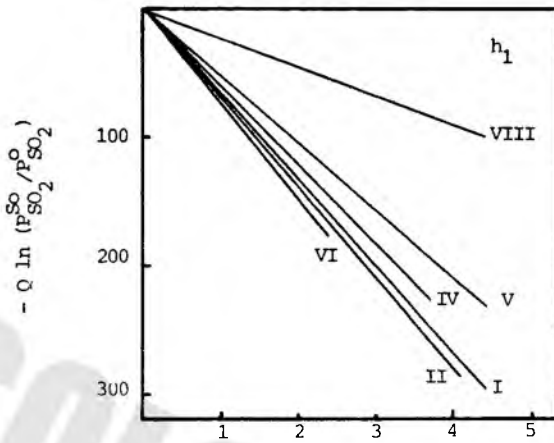
TABLA V. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS EFECTUADOS EN EL MODELO FISICO.

Bloque	Exp.	Pendiente	$P_{SO_2}^{So}$	$f_j$	$-2Q \ln(P_{SO_2}^{So}/P_{SO_2}^o)$	So	$K_{SO_2}$
I	1	$5.00 \times 10^{-9}$	$4.18 \times 10^{-3}$	0.62	267.847	4.5	63.14
		$5.00 \times 10^{-9}$	$4.18 \times 10^{-3}$	0.62	267.847		
	2	$3.13 \times 10^{-9}$	$2.20 \times 10^{-3}$	0.78	232.618	1.8	
		$6.34 \times 10^{-10}$	$8.42 \times 10^{-3}$	0.16	26.455		
	3	$1.21 \times 10^{-9}$	$5.47 \times 10^{-3}$	0.45	61.767	1.4	
		$1.39 \times 10^{-9}$	$4.80 \times 10^{-3}$	0.52	75.131		
	4	$8.88 \times 10^{-10}$	$5.60 \times 10^{-3}$	0.44	44.550	1.2	
		$9.80 \times 10^{-10}$	$5.12 \times 10^{-3}$	0.48	51.393		
II	21	$5.00 \times 10^{-9}$	$3.76 \times 10^{-3}$	0.62	300.015	4.1	71.15
		$4.66 \times 10^{-9}$	$4.18 \times 10^{-3}$	0.58	267.847		
	22	$2.36 \times 10^{-9}$	$4.10 \times 10^{-3}$	0.59	136.662	2.5	
		$4.00 \times 10^{-10}$	$9.00 \times 10^{-3}$	0.099	16.136		
IV	9	$2.96 \times 10^{-9}$	$2.31 \times 10^{-3}$	0.76	218.75	3.7	62.54
		$1.48 \times 10^{-9}$	$6.20 \times 10^{-3}$	0.38	71.34		
	10	$1.77 \times 10^{-9}$	$8.45 \times 10^{-4}$	0.91	180.37	2.5	
		$1.66 \times 10^{-9}$	$1.46 \times 10^{-3}$	0.85	143.78		
	11	$8.96 \times 10^{-10}$	$3.11 \times 10^{-3}$	0.67	58.207	1.7	
		$1.00 \times 10^{-9}$	$2.27 \times 10^{-3}$	0.77	73.74		
V	14	$3.16 \times 10^{-9}$	$7.13 \times 10^{-3}$	0.28	142.841	5.1	51.85
		$1.00 \times 10^{-8}$	$9.51 \times 10^{-4}$	0.90	995.618		
	15	$4.11 \times 10^{-9}$	$4.40 \times 10^{-3}$	0.56	330.923	4.5	
		$1.93 \times 10^{-9}$	$7.37 \times 10^{-3}$	0.26	85.82		
VI	17	$2.66 \times 10^{-9}$	$3.17 \times 10^{-3}$	0.68	171.805	2.4	68.62
		$1.33 \times 10^{-9}$	$6.58 \times 10^{-3}$	0.34	62.45		
	18	$6.83 \times 10^{-10}$	$6.50 \times 10^{-3}$	0.35	32.207	0.5	
		$5.85 \times 10^{-10}$	$7.00 \times 10^{-3}$	0.30	26.629		
	19	$8.88 \times 10^{-10}$	$3.16 \times 10^{-3}$	0.68	57.269	0.4	
		$7.81 \times 10^{-11}$	$9.40 \times 10^{-3}$	0.06	3.084		

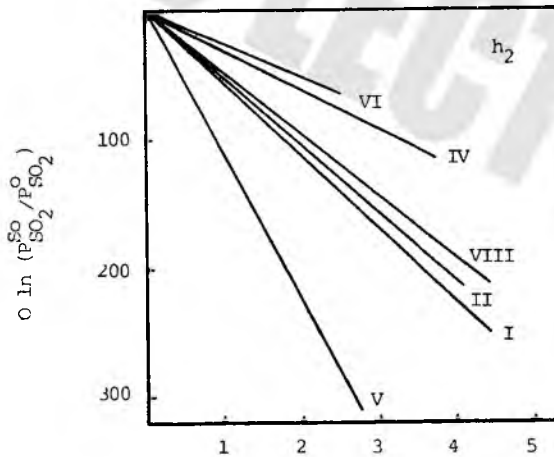
Continuación de la tabla V.....

Bloque	Exp.	Pendiente	$P_{SO_2}^{SO}$	$f_j$	$-2Q \ln(P_{SO_2}^{SO}/P_{SO_2}^O)$	$S_o$	$K_{SO_2}$
	20	$2.51 \times 10^{-10}$ $7.36 \times 10^{-10}$	$7.42 \times 10^{-3}$ $2.45 \times 10^{-3}$	0.25 0.75	11.142 52.631	0.3	
VIII	29	$2.20 \times 10^{-9}$ $3.93 \times 10^{-9}$	$7.23 \times 10^{-3}$ $5.10 \times 10^{-3}$	0.27 0.49	98.477 206.831	4.5	21.86 45.92
	30	$1.11 \times 10^{-9}$ $2.00 \times 10^{-9}$	$7.23 \times 10^{-3}$ $5.10 \times 10^{-3}$	0.27 0.49	49.82 106.07	1.5	

El valor superior en cada cuadro corresponde a  $h_1$  y el inferior a  $h_2$ , 4 y 21 cm de profundidad respectivamente.  $S_o$  se da en cm.



trayectoria del chorro So (cm)  
 Fig. 11 Gráfica de  $-Q \ln (P_{SO_2}^{SO} / P_{SO_2}^{SO_2})$  contra la trayectoria del chorro para una profundidad  $h_1$  (4 cm)



trayectoria del chorro So (cm)  
 Fig. 12 Gráfica de  $-Q \ln (P_{SO_2}^{SO} / P_{SO_2}^{SO_2})$  contra la trayectoria del chorro para una profundidad  $h_2$  (21 cm)

## 5.2. EXPERIMENTOS CINEMATOGRAFICOS.

En esta serie de experimentos, aunque muy simple en su concepción, es posible observar el comportamiento hidrodinámico del sistema. En la tabla VI se presentan las condiciones de cada uno de los experimentos filmados.

TABLA VI. VARIABLES DE LOS EXPERIMENTOS CINEMATOGRAFICOS.

Exp.	Equivalente en exp. de reacción.	Flujo Q (l/min)	Diámetro de la lanza (cm)	Profundidad de la lanza (cm)	Angulo de inclinación (°)	N' Fr	S <sub>o</sub> (cm)	Angulo de expansión del chorro (°)
1	-	1.61	0.1587	8.5	30	1.936	1.244	2.5
2	-	0.80				0.484	0.777	2
3	-	0.53				0.215	0.622	1.5
4	-	0.40				0.121	0.544	1
5	1	9.12	0.3175	8.5	30	1.936	4.453	6
6	2	4.56				0.484	1.843	4
7	3	3.04				0.215	1.382	3
8	4	2.28				0.121	1.228	2
9	21	9.12	0.3175	17.0	30	1.936	4.146	5
10	22	4.56				0.484	2.457	3.5
11	-	3.04				0.215	0.614	2.5
12	-	2.28				0.121	0.537	1.5
13	14	12.57	0.3175	8.5	30	3.674	5.067	7
14	15	8.37				1.631	4.453	5
15	-	6.28				0.919	3.378	4
16	17	4.44	0.3175	8.5	30	0.459	2.457	2.5
17	18	2.22				0.115	0.460	2
18	19	1.48				0.050	0.399	1.5
19	20	1.11				0.029	0.322	1
20	9	4.44	0.1587	8.5	30	14.699	3.733	3
21	10	2.22				3.674	2.488	2.5
22	11	1.48				1.631	1.711	2
23	-	1.11	0.1587	8.5	30	0.919	0.622	1.5
24	-	0.78				0.459	0.466	inapreciable
25	-	0.39				0.115	0.388	
26	-	0.26				0.051	0.311	
27	-	0.19				0.029	0.233	

## VI. DISCUSION DE RESULTADOS.

### 6.1. EFECTO DEL $N'_{Fr}$ .

En la tabla V se aprecia que a medida que aumenta el número modificado de Froude hay un incremento del coeficiente de transferencia de masa a una profundidad mayor que se puede observar claramente en los bloques V, I y VI. Contrariamente a ésto, a una profundidad menor se obtiene mayor transferencia de masa a medida que disminuye el  $N'_{Fr}$ , lo anterior se debe no solo a la mayor penetración del chorro (jet) sino también a la mayor agitación obtenida a mayor profundidad.

### 6.2. EFECTO DEL DIAMETRO DE LA LANZA,

Como se podrá observar de la tabla V para un  $N'_{Fr}$  dado, el coeficiente de transferencia de masa aumenta para un diámetro más grande, esto puede ser debido a que para el diámetro más grande existe un mayor flujo de inyección. También es de gran importancia notar que el coeficiente de transferencia de masa es casi igual para  $N'_{Fr}$  altos y diámetros pequeños que para  $N'_{Fr}$  bajos y diámetros grandes como se aprecia en los bloques IV y VI, esto principalmente se puede deber que para los primeros se tiene mayor velocidad de inyección que sería una relación proporcional a los flujos que se gastan con diámetros grandes y  $N'_{Fr}$  pequeños.

### 6.3. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE INYECCION.

El efecto de la profundidad de inyección se nota más en la superficie ( $h_1$ ) que en el fondo de la solución del baño ( $h_2$ ) y que al inyectarse el gas a una mayor profundidad el coeficiente de transferencia de masa se ve incrementado - ligeramente, lo anterior puede ser debido a que hay un mayor tiempo de residencia de la burbuja desde la salida del orificio de la lanza hacia la superficie y por lo tanto al formarse las burbujas a mayor profundidad, el diámetro es menor, y por ende el área de contacto es mayor. Dicho efecto se aprecia en los bloques I y II.

### 6.4. EFECTO DEL ANGULO DE INCLINACION

El efecto del ángulo de inclinación de la lanza sobre el coeficiente de transferencia de masa, comparando los bloques I y VIII, es más grande para un ángulo de inclinación menor y que se obtiene mayor coeficiente de transferencia de masa en el fondo ( $h_2$ ) que en la superficie ( $h_1$ ) a un ángulo mayor, esto puede ser debido a que se tenga una componente más grande hacia abajo del momento del gas que es consumida y, por lo tanto, existe un menor mezclado.



#### 6.5. EFECTO DEL $N'_{Fr}$ SOBRE LA PENETRACION Y EL ANGULO DE EXPANSION DEL CHORRO.

Como se puede observar en la tabla VI (resultados cinematográficos) la penetración del chorro en general es pequeña comparada con el volumen del baño y por consecuencia su expansión es también pequeña, logrando así un régimen de burbujeo más no de chorro. Por lo que si comparamos los bloques I y II que tienen los mismos  $N'_{Fr}$ , se observa una mayor penetración para cuando la lanza de inyección se encuentra más cerca a la superficie que en el fondo, esto probablemente se deba a que a mayor profundidad existe una mayor presión hidrostática. Así mismo cabe hacer notar que el ángulo de expansión más grande difícilmente rebasa los 6 grados para números de Froude altos y lanza de un diámetro de 0.3175 cm y que para diámetros de lanza más pequeños y números de Froude de la misma magnitud, el ángulo de expansión es casi inapreciable.

## VII. CONCLUSIONES.

Al existir un mayor número modificado de Froude se tiene una mayor penetración del chorro del gas en el líquido y por ende una mayor expansión puesto que se incrementa el flujo y consecuentemente se logra una mayor agitación y un mejor mezclado en el baño. Definitivamente el coeficiente de transferencia de masa tiende a incrementarse al aumentar el número modificado de Froude, que es el factor que controla la inyección del gas en el líquido para lograr penetrar, agitar y mezclar.

El coeficiente de transferencia de masa no solo depende del número modificado de Froude sino que también depende del diámetro de la lanza y que a medida que éste es mayor, aquél aumenta. Asimismo depende de la profundidad de la lanza, ya que aumenta, mientras más profundo se tenga la lanza, debido a que la burbuja tiene mayor tiempo de residencia para salir a la superficie. Aunque también podemos decir que el ángulo de inclinación de la lanza tiene un mínimo efecto con respecto a los dos puntos anteriores, sin embargo, entre mayor sea el ángulo de inclinación de la lanza con respecto a la horizontal del baño de la solución, dicho efecto se incrementara.

Se puede sugerir que al soplar oxígeno en el proceso real, se realice manteniendo números modificados de Froude altos y diámetros de lanza pequeños para lograr una mejor transferencia de masa, es decir, oxidar de manera efectiva el carbono y consecuentemente tener una mejor agitación y homogenización del baño.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- J. Szekely; THE MATHEMATICAL AND PHISICAL MODELLING OF METALS PROCESSING OPERATIONS, Metallurgical Treatises, Edit. by John K. Tien & John F. - - Elliott, pp. 277-289.
- 2.- J. K. Brimacombe, E. S. Stratigakos and P. Tarassoff; MASS TRANSFER BETWEEN A HORIZONTAL, SUBMEGED GAS JET AND A LIQUID, Metallurgical Transaction, vol 5, 1974, pp. 763-771.
- 3.- J. Szekely and N. J. Themelis; RATE PHENOMENA IN PROCESS METALLURGY, - - Edit. Wiley, 1971, pp. 557-597.
- 4.- Alejandro Bustos; FLUID DYNAMICS IN A PEIRCE-SMITH CONVERTER, Dept. of - Metallurgical Engineering, U.B.C., 1981.
- 5.- N. Smimov, A. F. Rayneri y G. Cabezas O.; PRODUCCION DE ACERO, Edit. Pueblo y Educación, pp. 43-46.

APENDICE A. CALIBRACION DE LOS ROTAMETROS.

Esta operación consiste en hacer pasar el gas a través del rotámetro, cuya salida se conecta a una columna de vidrio que contiene espuma de jabón con el que formará una burbuja que recorre una distancia en un tiempo determinado, que es el tiempo de vida de la partícula. Como se conoce el diámetro de la columna (2.4 cm) y la distancia que recorre la burbuja, se puede determinar el volumen que desplaza. Ahora, teniendo el anterior dato y el tiempo en que logra desplazarlo se determina el flujo o gasto del gas. Por otra parte en el momento que la burbuja desaparece y haber tomado el tiempo y distancia recorrida simultáneamente se toma la lectura marcada en el rotámetro. Todo lo anterior se realiza para varias corrientes de gas.

Los datos obtenidos se llevan a un gráfico donde la ordenada es la lectura medida en el rotámetro y la abscisa es el flujo calculado, y con las gráficas resultantes, al llevar a cabo los experimentos se podrá graduar el rotámetro para que proporcione el flujo deseado. Por lo que a continuación se proporcionan las gráficas obtenidas, gases de helio y bióxido de azufre (figuras a y b).

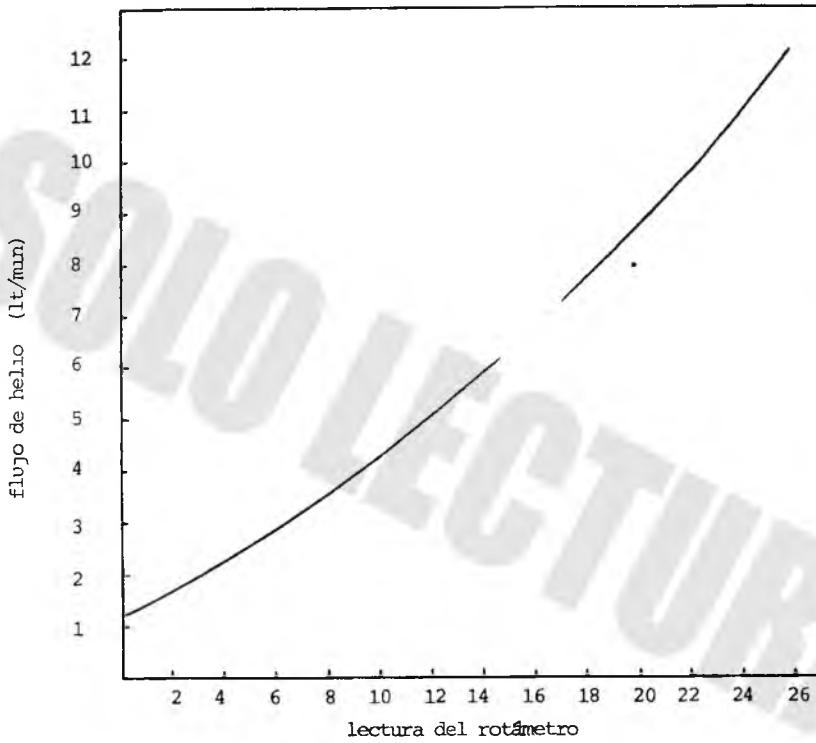


Fig. a Gráfica del flujo de helio contra la lectura del rotámetro.

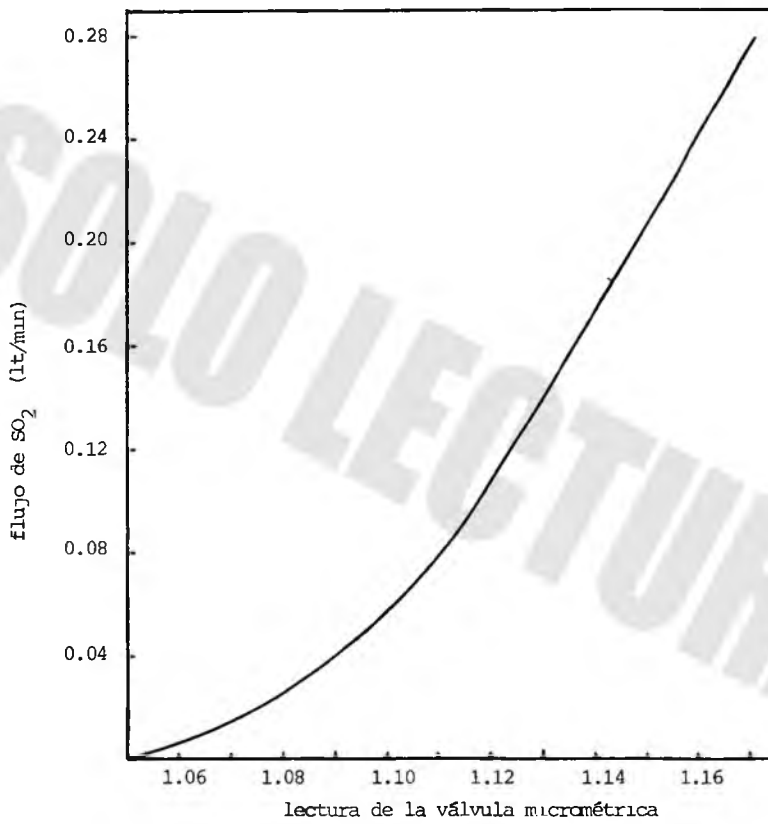


Fig. b Gráfica del flujo de  $\text{SO}_2$  contra la lectura de la válvula micrométrica.

APENDICE B. NOMENCLATURA.

- $g$  = aceleración debido a la gravedad, en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ .  
 $\rho_g$  = densidad del gas, en  $\text{gr}/\text{cc}$ .  
 $\rho_l$  = densidad del líquido, en  $\text{gr}/\text{cc}$ .  
 $v$  = velocidad de inyección del gas, en  $\text{cm}/\text{seg}$ .  
 $Q$  = flujo de gas en  $\text{cc}/\text{seg}$ .  
 $d$  = diámetro de la lanza de inyección, en  $\text{cm}$ .  
 $\pi$  = 3.1416  
 $V_{\text{gastado}}, V_{\text{muestra}}$  = volumen, en  $\text{ml}$  ó  $\text{cc}$ .  
 $C$  = concentración en molaridad, en  $\text{moles}/\text{lt}$ .  
 $P_{\text{SO}_2}^{\text{so}}$  = presión parcial en la superficie del baño, en  $\text{atm}$ .  
 $P_{\text{SO}_2}^{\text{or}}$  = presión parcial en el orificio de la boquilla, en  $\text{atm} = 0.1$ .  
 $m$  = pendiente de las rectas:  $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  contra tiempo, en  $\text{moles}/\text{cc seg}$   
 $V_b$  = volumen del baño, en  $\text{cc}$ .  
 $R$  = constante ideal de los gases,  $82.1 \text{ atm cc}/\text{mol } ^\circ\text{K}$   
 $T$  = temperatura absoluta, en  $^\circ\text{K}$ .  
 $f_j$  = fracción absorbida del reactante gaseoso en el chorro.  
 $\alpha'$  = área interfacial por unidad de longitud de la trayectoria del chorro,  
 en  $\text{cm}^2 \text{ cm}^{-1}$ .  
 $K_{\text{SO}_2}$  = coeficiente de transferencia de masa del  $\text{SO}_2$ , en  $\text{cm seg}^{-1}$ .  
 $l_0$  = longitud de la trayectoria del chorro, en  $\text{cm}$ .

APENDICE C. PREPARACION DE SOLUCIONES.

1) Solución de 0.3 % de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) para un volumen de - -  
62.609 lt de agua.

Si 62.609 lt  $H_2O$  ----- 100 %

X ----- 0.3 %

de donde: X = volumen de  $H_2O_2$  = 0.187 lt de  $H_2O_2$  (100 % puro)

Pero como la concentración de peróxido de hidrógeno se encuentra al 30 % lo -  
que implica que en un litro de este reactivo solamente se tengan 300 ml de - -  
peróxido de hidrógeno puro, por lo que es necesario agregar:

$62.609/100 = 0.626$  lt de  $H_2O_2$  (30 %)

2) Solución de 0.02 molar de hidróxido de sodio (NaOH).

pm NaOH = 40 gr/gmol

volumen = 1 lt de solución

molaridad = M = # moles/ lt sol'n = (W/pm)/lt sol'n

así tenemos que:  $W_{NaOH} = pm_{NaOH} V_{sol'n} M_{sol'n}$

$$= (40) (1) (0.1)$$

$$= 4 \text{ gramos (100 \%)}$$

Pero como el NaOH no se encuentra al 100 %, se tiene que corregir este peso a-  
fectandolo por la pureza del reactivo lo que proporciona el siguiente peso:

$$W_{NaOH} = 4.12 \text{ gr (97 \%)}$$

3) Solución de sulfocianuro de amonio ( $NH_4SCN$ ) al 20 % en peso (1 lt sol'n).



por lo que tenemos que:

$$\% \text{ peso} = \% W = a/b * 100$$

lo que implica que

$$\begin{aligned} a &= \% W b / 100 \\ &= (20) (1000)/100 \\ &= 200 \text{ gr de NH}_4\text{SCN} \end{aligned}$$

4) Solución de yoduro de potasio (KI) al 5 % en peso (100 ml).

Esto se realiza del mismo modo que en el punto anterior, así tenemos:

$$\begin{aligned} a &= \% W b / 100 \\ &= (5) (100)/100 \\ &= 5 \text{ gr de KI} \end{aligned}$$

## FE DE ERRATAS

<u>Dice</u>	<u>Debe decir</u>	<u>pp</u>	<u>Renglón</u>
iversión	inversión	4	12
aplicad	aplicada	4	22
psoceso	proceso	8	1
escuaciones	ecuaciones	13	21
ontienen	obtienen	27	24
cad	cada	30	25
n	en	31	5
liquido	líquido	46	5
liquido	líquido	46	9