



# **UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIVISION DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGIA**

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SUPERFICIE LIBRE DE UN LÍQUIDO EN UN CILINDRO INCLINADO ROTATORIO**

### **TESIS**

**Que para obtener el título de:**

**INGENIERO QUIMICO**

**Presenta:**

**MARÍA MERCEDES SALAZAR CAMPOY**

**Hermosillo, Sonora**

**Diciembre de 2010**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# CONTENIDO

	Página
LISTA DE FIGURAS .....	ii
LISTA DE TABLAS.....	iii
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo General.....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Descripción del Proceso de Producción de Metal Doré.....	4
3.1.1 Fusión.....	6
3.1.2 Conversión.....	11
3.1.3 Refinación.....	11
3.1.4 Purgas de Telurio.....	14
3.1.5 Moldeo de Doré y Sistema de Limpieza de Gases.....	15
3.2 Estudios Previos Sobre Hidrodinámica de Cilindros Rotatorios.....	16
4. METODOLOGÍA.....	20
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	24
5.1 Forma y Características de la Superficie Libre.....	24
5.2 Distancia a la Superficie Libre.....	37
5.3 Área Aparente de Contacto Líquido-Gas.....	39
5.4 Área de Impregnación de la Fase Ligera en la Pared del Cilindro.....	43
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
APÉNDICE: CONDENSADO DE DATOS EXPERIMENTALES.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura No.	Descripción	Página
1	Diagrama de bloques de producción de cobre y origen de los lodos anódicos descubrizados.....	5
2	Diagrama esquemático del horno Kaldo para la producción de metal doré...	7
3	Diagrama de bloques del proceso de producción de metal doré.....	8
	Formación del “Efecto cascada” durante la operación del horno Kaldo.....	12
5	Detalles de la boquilla de la lanza de soplado.....	13
6	Condición de “Flujo en Estado Estacionario” .....	15
7	Esquema de las características de movimiento dentro del cilindro giratorio horizontal.....	18
8	Fotografía modelo en acrílico transparente. ....	20
9	Fotografía del sistema experimental para la captura de imágenes.....	20
10	Fotografía del movimiento de la superficie libre: segregación de fases.....	25
11	Fotografía del efecto cascada de la superficie libre del líquido.....	26
12	Fotografías de la superficie libre del líquido. Retención volumétrica $\Phi = 0.4$	27
13	Fotografías de la superficie libre del líquido. Retención volumétrica $\Phi = 0.6$	28
14	Distancia adimensional desde la boca del cilindro hasta la superficie libre del líquido en función de las variables de estudio.....	37
15	Cálculo del área aparente de contacto líquido-gas.....	39
16	Área superficial aparente de contacto líquido-gas en función de las variables de estudio.....	40
17	Área de impregnación de la fase ligera en la pared del cilindro en función de las variables de estudio.....	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla No.	Descripción	Página
I	Referencias localizadas en relación al movimiento de líquidos en cilindros inclinados rotatorios.....	16
II	Valores de las variables de estudio.....	21
III	Condiciones Experimentales para la Discusión de Resultados.....	23
IV	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.....	29
V	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos.....	29
VI	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Segregación de Fases.....	30
VII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Ondulaciones	30
VIII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Efecto Cascada.....	31
IX	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.....	31
X	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos.....	32
XI	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Segregación de Fases.....	32
XII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Ondulaciones	33
XIII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Efecto Cascada.....	33

XIV	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.....	34
XV	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos.....	34
XVI	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Segregación de Fases.....	35
XVII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Ondulaciones.....	35
XVIII	Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Efecto Cascada.....	36
XIX	Serie de Condiciones para medir la distancia desde la boca del cilindro hasta la superficie libre del líquido.....	46
XX	Valores Obtenidos de Área Superficial Aparente de contacto Líquido- gas.....	46
XXI	Valores Obtenidos de Área de Impregnación de la Fase Ligera en la Pared del Cilindro.....	47

## RESUMEN

El presente trabajo está relacionado con la operación del horno Kaldo de una planta de metales preciosos para la producción de metal doré. En dicho proceso típicamente se presentan problemas operativos que están motivados por el desconocimiento de la hidrodinámica del sistema en el interior del horno Kaldo.

Con el fin de esclarecer el comportamiento de este sistema, en el presente trabajo se construyó un modelo a escala de laboratorio de dicho reactor y se llevaron a cabo experimentos con el fin de observar la forma y características de la superficie libre del líquido bajo diferentes condiciones de retención volumétrica, velocidad de rotación y ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. La observación se llevó a cabo visualmente y mediante captura de imágenes digitales de fotografía y video de alta velocidad.

Dependiendo de las condiciones de operación, se observaron fenómenos de impregnación de la pared del cilindro, ondulaciones, acumulación de fase ligera en la cercanía de la boca del cilindro, formación de coágulos, y efecto cascada. La distancia desde la boca del cilindro a la superficie libre del líquido varió entre 0.45-0.65 la longitud total del cilindro y fue función fundamentalmente de la retención volumétrica, de quien depende de una manera no lineal.

El área superficial aparente de contacto líquido-gas fue de 1.1 a 1.7 veces el área circular del cilindro. El área de impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del cilindro fue 0.14 a 0.58 veces el área lateral total. Ambas variables dependieron fuertemente del ángulo de inclinación. Los resultados del presente estudio aportan una primera aproximación al estudio de un horno Kaldo a nivel industrial.

## 1. INTRODUCCION

La motivación del presente trabajo tiene su origen en la planta de metales preciosos del complejo metalúrgico “La Caridad”. En esta planta se funden los lodos anódicos con valores de oro y plata generados en la refinería electrolítica de cobre del citado complejo. El proceso de fusión de los lodos anódicos se realiza en un reactor rotatorio intermitente, denominado Horno Kaldo. El material fundido es colocado en el interior del horno y calentado por medio de una lanza quemador. El proceso consiste de las siguientes etapas consecutivas: fusión, conversión, refinación y purgas de telurio. Al final de cada etapa, el reactor es inclinado para retirar en ollas los productos del proceso. Durante las etapas de conversión y refinación, adicionalmente a la lanza quemador se introduce una lanza de oxidación, la cual inyecta aire comprimido al reactor para promover la eliminación de algunos de los componentes del material fundido en forma de óxidos volátiles.

Un problema típico que se presenta durante las etapas de conversión y refinación, es la dificultad para controlar la profundidad y el ángulo de inclinación con la cual la lanza de oxidación debe ser introducida al reactor para llevar a cabo la inyección de aire. Esto ocasiona frecuentemente que el material fundido dentro del reactor salpique a la lanza produciendo taponamientos de ésta. Un problema adicional es que la inyección del gas de la lanza en ocasiones impacta directamente al refractario del horno, produciendo daños a éste y reduciendo su vida útil.

Dentro del horno Kaldo, el material fundido se desplaza siguiendo un movimiento rotatorio y con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. Estos factores aunados a la inyección de gas tienen un efecto directo sobre la forma que adopta la superficie libre del líquido dentro del reactor, con las implicaciones prácticas antes descritas. Debido a las altas temperaturas a las cuales se opera este equipo (alrededor de 1100 °C), no es posible de manera visual y directa determinar la posición y forma de la superficie libre del líquido durante la operación. Por lo anterior, como una primera aproximación a la solución de este problema se plantea un estudio experimental a nivel laboratorio en un modelo a escala del horno Kaldo con el fin de investigar el comportamiento de la superficie libre del líquido bajo condiciones de inclinación y rotación típicas de la operación del horno industrial. A partir de las observaciones realizadas se pretende obtener una mejor comprensión de los factores que afectan el comportamiento de la superficie libre del líquido, lo cual a su vez permita generar criterios para la futura optimización del proceso.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo fue estudiar el efecto de las condiciones de operación sobre las características de la superficie libre del líquido en un cilindro inclinado rotatorio a nivel laboratorio.

### 2.2 Objetivos Específicos

- (a) Diseñar y construir un modelo a escala del horno Kaldo para la realización de experimentos a temperatura ambiente.
- (b) Realizar experimentación en el modelo a escala con el fin de determinar el efecto del ángulo de inclinación, la velocidad de rotación y la fracción del volumen del reactor ocupado por el líquido sobre las características de la superficie libre en régimen estacionario.
- (c) Generar una base de datos en forma de imágenes digitales de alta resolución de la superficie libre del líquido a diferentes condiciones de operación.
- (d) Determinar experimentalmente la distancia desde la boca del reactor hasta la superficie libre del líquido a diferentes condiciones de operación.
- (e) Determinar experimentalmente el área superficial de contacto líquido-gas en función de las condiciones de operación.
- (f) Generar criterios de operación y rutas futuras de investigación en esta área.

### 3. REVISION DE LITERATURA

#### 3.1. Descripción del Proceso de Producción de Metal Doré [1]

La mayor parte de la producción mundial de cobre refinado proviene de la fundición de los concentrados de sulfuros de cobre y del tratamiento pirometalúrgico de ánodos desgastados de cobre. El proceso general se muestra en la Figura 1. En ambos casos, la mayor parte de las impurezas presentes en el concentrado o en el ánodo desgastado se concentran en el cobre blíster o los ánodos de cobre impuro. Dichas impurezas deben ser eliminadas a fin de obtener un producto final que cumpla con las especificaciones del mercado.

El proceso de electrorefinación en un electrolito de sulfato de cobre - ácido sulfúrico es usado universalmente para producir cobre de alta pureza, partiendo de ánodos de cobre impuro. En el proceso, una porción de algunas de las impurezas presentes en el ánodo se disuelven durante la electrorefinación y se concentran en el electrolito, el cual es purificado periódicamente.

Por otra parte, cuando el cobre de los ánodos se disuelve, los elementos que son insolubles durante la refinación electrolítica se acumulan como lodo anódico en la superficie corroída del ánodo y en el fondo de las celdas. El lodo anódico es sometido a una lixiviación ácida para eliminar el cobre, obteniéndose un lodo anódico descubrizado. En éste van presentes, entre otros elementos, oro y plata que posteriormente son recuperados en la planta de metales preciosos.

El lodo anódico descubrizado es procesado en la planta de metales preciosos dentro de un horno denominado Kaldo el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 2. El horno tiene la particularidad de poder rotar y bascular; es decir, moverse sobre su eje vertical. La velocidad de rotación puede variarse entre 0 a 20 rpm.

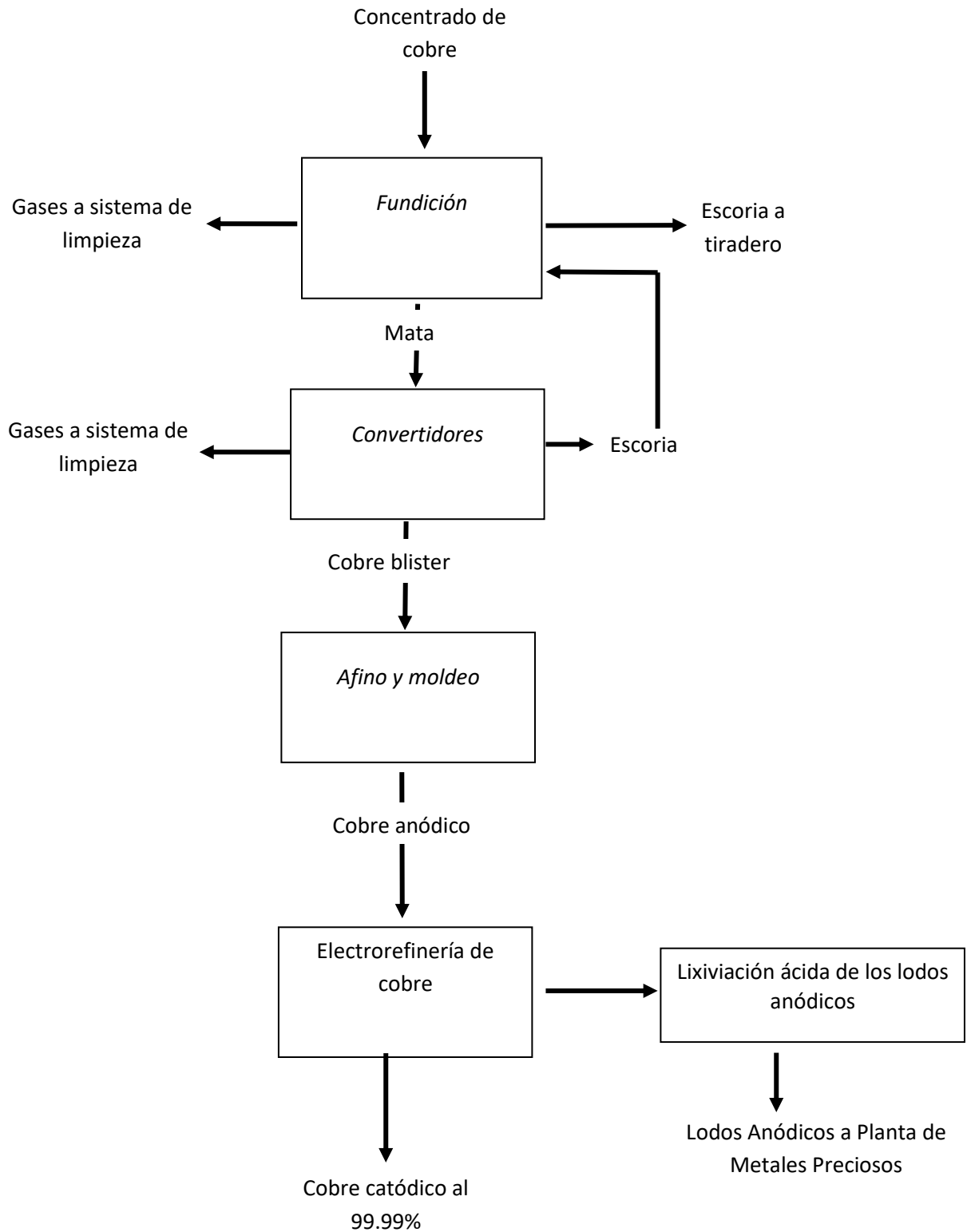


Figura 1. Diagrama de bloques de producción de cobre y origen de los lodos anódicos descubrizados

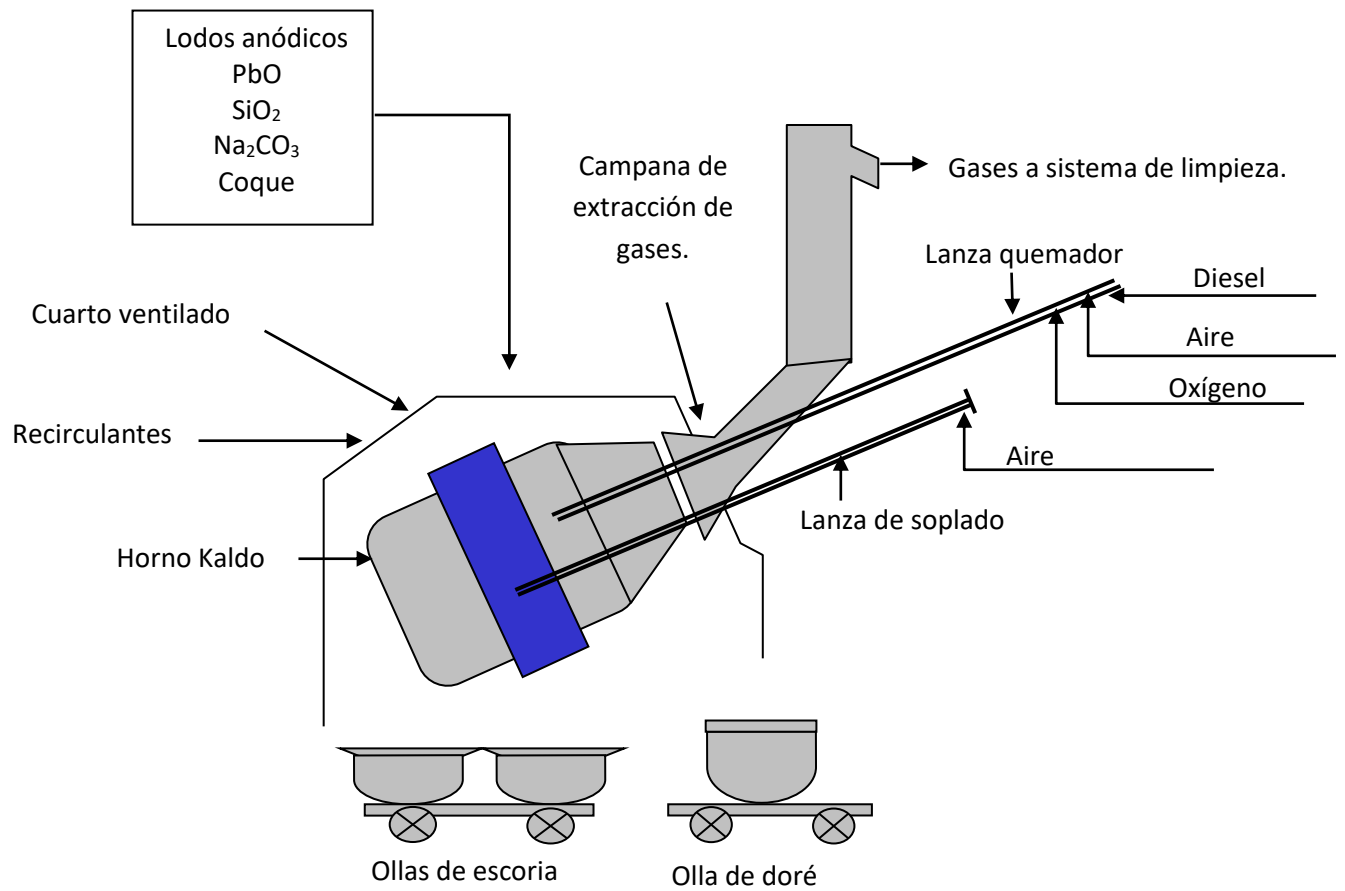


Figura 2. Diagrama esquemático del horno Kaldnef para la producción de metal doré

Durante la operación del horno, el sistema se opera a temperaturas del orden de 1000 C. Para alcanzar estas temperaturas, en una primera etapa de fusión se utiliza una lanza tipo quemador, la cual utiliza diesel como combustible y oxígeno como comburente. La lanza se mantiene enfriada con agua para mantener su integridad física. Una segunda lanza se utiliza en etapas posteriores del proceso para inyectar aire a presión hacia el interior del reactor. El horno se encuentra totalmente encapsulado en un cuarto lo que hace que la captación de humos y polvos sea muy efectiva.

El proceso para la producción de metal doré a partir de lodos anódicos consta de cuatro etapas, las cuales se esquematizan en la Figura 3. Dichas etapas comprenden: fusión, conversión, refinación y purgas de telurio, las cuales se describen a continuación.

### **3.1.1 Fusión**

La etapa de fusión tiene por objetivo separar como doré los metales preciosos contenidos en los lodos anódicos para su posterior refinación. La operación de fusión se inicia estableciendo la composición de la carga que se alimentará al horno Kaldor. A la tolva de almacenamiento de carga se le agregan las cantidades previamente calculadas de lodos anódicos, polvos de la casa de sacos y los reactivos: óxido de plomo, carbonato de sodio, sílice y coque pulverizado.

La cantidad total de material a procesar se divide en ocho porciones de igual peso que se procesan en dos lotes, A y B, integrados a su vez por cuatro porciones cada uno.

Lote A.- Al inicio de este ciclo el horno se coloca en posición de carga 1 (125°) para recibir primeramente los materiales de recirculación: lodos del venturi, selenio de recirculación, cementos de plata, etc. Posteriormente se alimentan cuatro de las porciones de la carga total colocando el horno en posición de carga 2 (58.5°). Entre cada porción cargada se sinteriza el material por calentamiento hasta 850 °C con la lanza quemador por espacio de 15 a 20 min, rotándose el horno a velocidad de 1 a 3 rpm. Durante la sinterización el horno se coloca en posición de trabajo (26-29°).

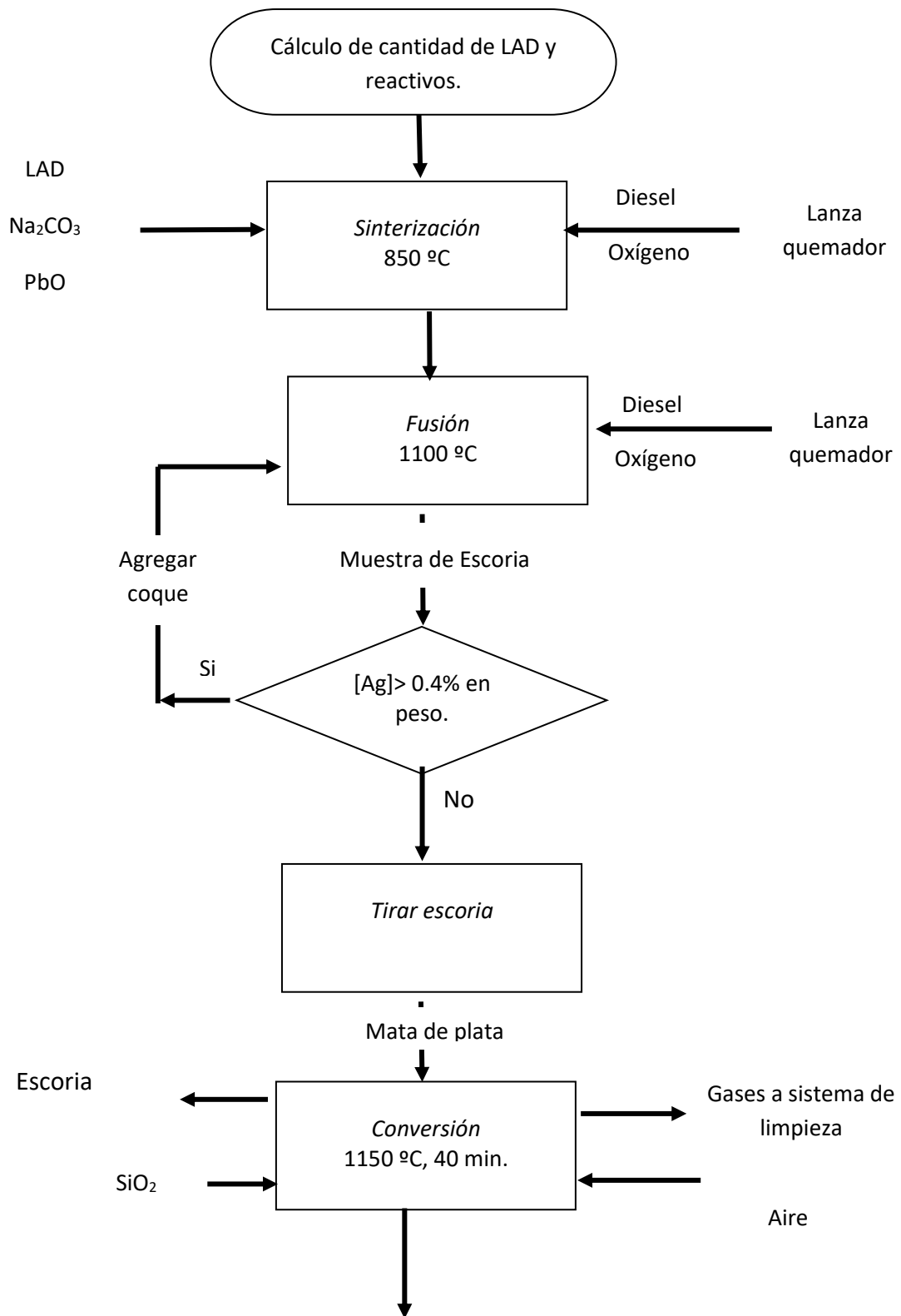


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de producción de metal doré

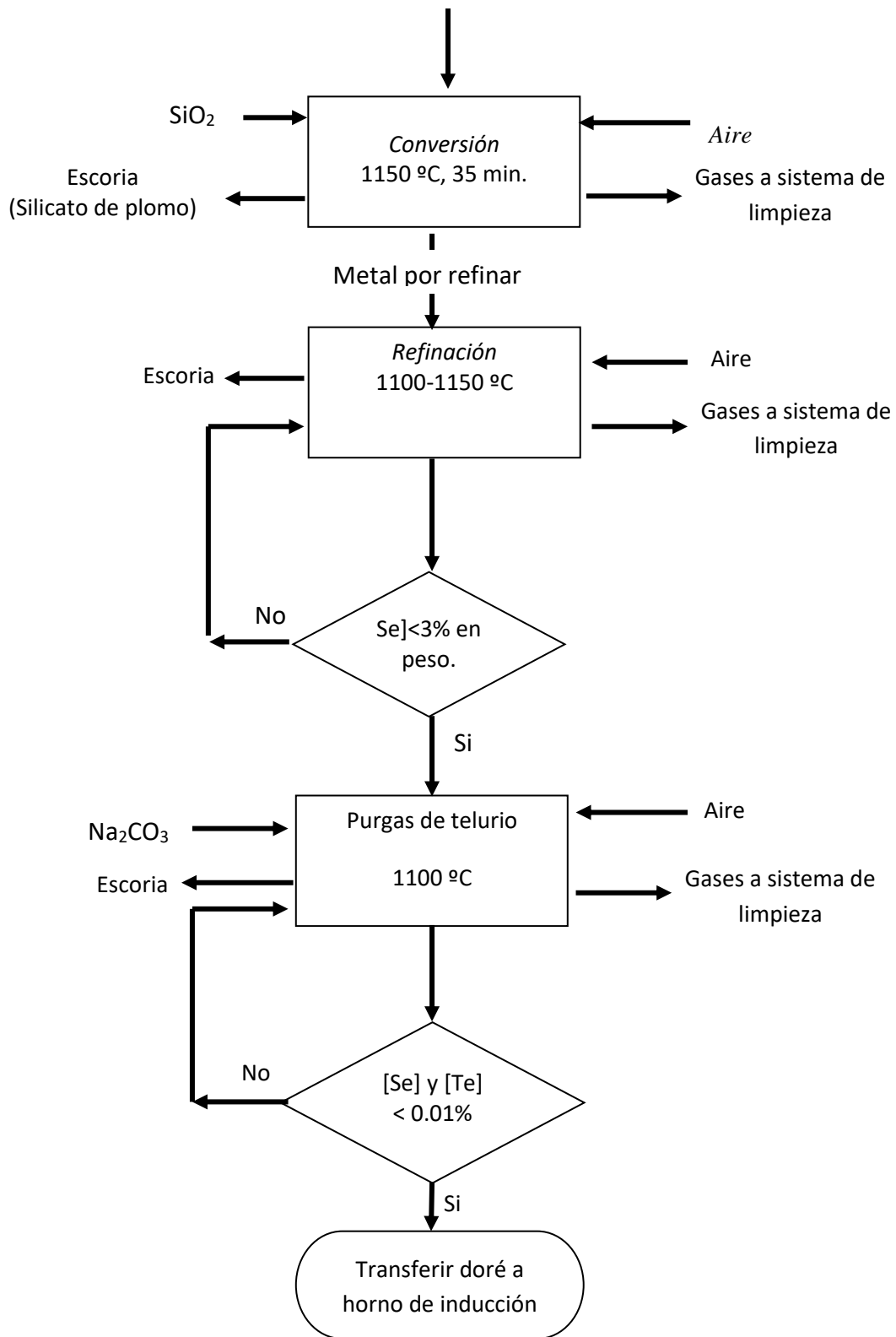


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de producción de metal doré (continuación)

Fusión lote A.- Al terminar de cargar las cuatro porciones, se incrementa el calentamiento en el horno para llevarlo de 850 hasta 1050-1100°C y la velocidad de rotación se incrementa a 6 -7 rpm.

Reducción y escorificado lote A.- Se toma muestra de la escoria fundida en el horno para determinar el contenido de plata. Si éste es mayor a 0.4% en peso, se procede a agregar manualmente coque hasta lograr que la plata tenga el valor antes mencionado, procediendo al escorificado (vaciado de la escoria). Durante la operación se controla la temperatura del horno entre 1050 -1100°C.

Para el vaciado de la escoria se colocan bajo el horno y en posición las ollas donde se recibe este material. Lentamente se bascula el horno cuidando que solo se vierta escoria y no mata. Al término de esta operación el horno queda listo para el siguiente ciclo de carga, fusión, reducción y vaciado de escoria.

Después del vaciado de la escoria, se carga escoria de recirculación de la etapa de conversión para enfriar el baño o en caso de no tener escoria se puede soplar aire al baño. El objetivo de enfriar el baño es para evitar explosiones de polvo al cargar los lodos anódicos del lote B. Para este último se procede en forma similar a lo descrito anteriormente para el lote A.

### **3.1.2 Conversión**

Esta etapa tiene como objetivo eliminar gran parte del plomo, principalmente por medio de sílice y soplado con aire. Después de sangrar la escoria del lote B se da inicio a la etapa de conversión, la cual se lleva a cabo en dos etapas. En la primera etapa se carga al horno una pequeña cantidad de arena sílice y posteriormente se inicia el soplado usando aire inyectado el cual es proyectado sobre la superficie del baño por una lanza, manteniéndose la temperatura a aproximadamente 1150°C. Durante esta etapa la rotación del horno se fija en 20 rpm. Después de unos 40 minutos de operación la mayor parte del plomo ha sido oxidado e integrado a la escoria, la cual es retirada del horno.

En la segunda etapa de conversión, se agrega sílice adicional y se continúa con el soplado de aire. Después de 35-40 minutos se suspende el soplado y se elimina la escoria, dando por finalizada la etapa de conversión. Al final de esta etapa la concentración de plomo en el material fundido se reduce a menos de 0.1 % en peso.



### 3.1.3 Refinación

El objetivo de la etapa de refinación es eliminar mediante oxidación y evaporación la mayor parte de las impurezas contenidas en el doré, principalmente selenio y cantidades remanentes de plomo. Esta operación se lleva a cabo soplando aire sobre la superficie del metal doré para eliminar las impurezas por oxidación directa. En ésta se busca eliminar el selenio por evaporación y mantener el telurio en el baño para ser eliminado posteriormente como escoria en la siguiente etapa. La temperatura se mantiene entre 1100-1150°C y la rotación del horno en 20 rpm.

Debido a que el selenio se obtiene como un subproducto y el telurio constituye una impureza no deseable, es importante eliminarlos selectivamente. En base a la experiencia en la operación de este equipo se ha observado que la mayor parte del selenio es oxidado y volatilizado primero hacia la corriente gaseosa. Conforme se va eliminando el selenio, llega un momento en el cual el telurio también se empieza a volatilizar, por lo que es necesario interrumpir la refinación. Para verificar el punto en el que debe interrumpirse el soplado, se toman muestras de doré cada hora. Cuando la concentración de selenio es de 2 a 3% en peso, se da por terminada la refinación. Debido a que el muestreo del baño es difícil y los resultados toman más tiempo del que opera el horno Kaldor, este criterio no es muy práctico.

Durante la etapa de refinación es necesario mantener la velocidad de rotación del horno Kaldor en 20 rpm con el fin de favorecer el denominado “efecto cascada”, el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 4. Dicho fenómeno consiste en el ascenso del material fundido en la cercanía de la pared del reactor y su posterior caída y recirculación hacia el seno del reactor. De acuerdo a las especificaciones del fabricante del horno, el “efecto cascada” es deseable ya que permite incrementar el área de contacto entre el aire y el metal doré [2]. Por esta razón, el diseño de la boquilla de la lanza de oxidación (Figura 5) tiene por objetivo dirigir el flujo principal de aire hacia la ubicación de la cascada.

Durante la etapa de refinación se ha observado que la rapidez de eliminación de selenio y telurio es afectada por diversas variables de operación, tales como: (a) el ángulo de inclinación del horno, (b) la presión de succión en la campana de extracción de gases, (c) el flujo de aire en la lanza de soplado, (d) la velocidad de rotación del horno, (e) el ángulo de inclinación de la boquilla de la lanza de soplado, y (f) la temperatura del baño.

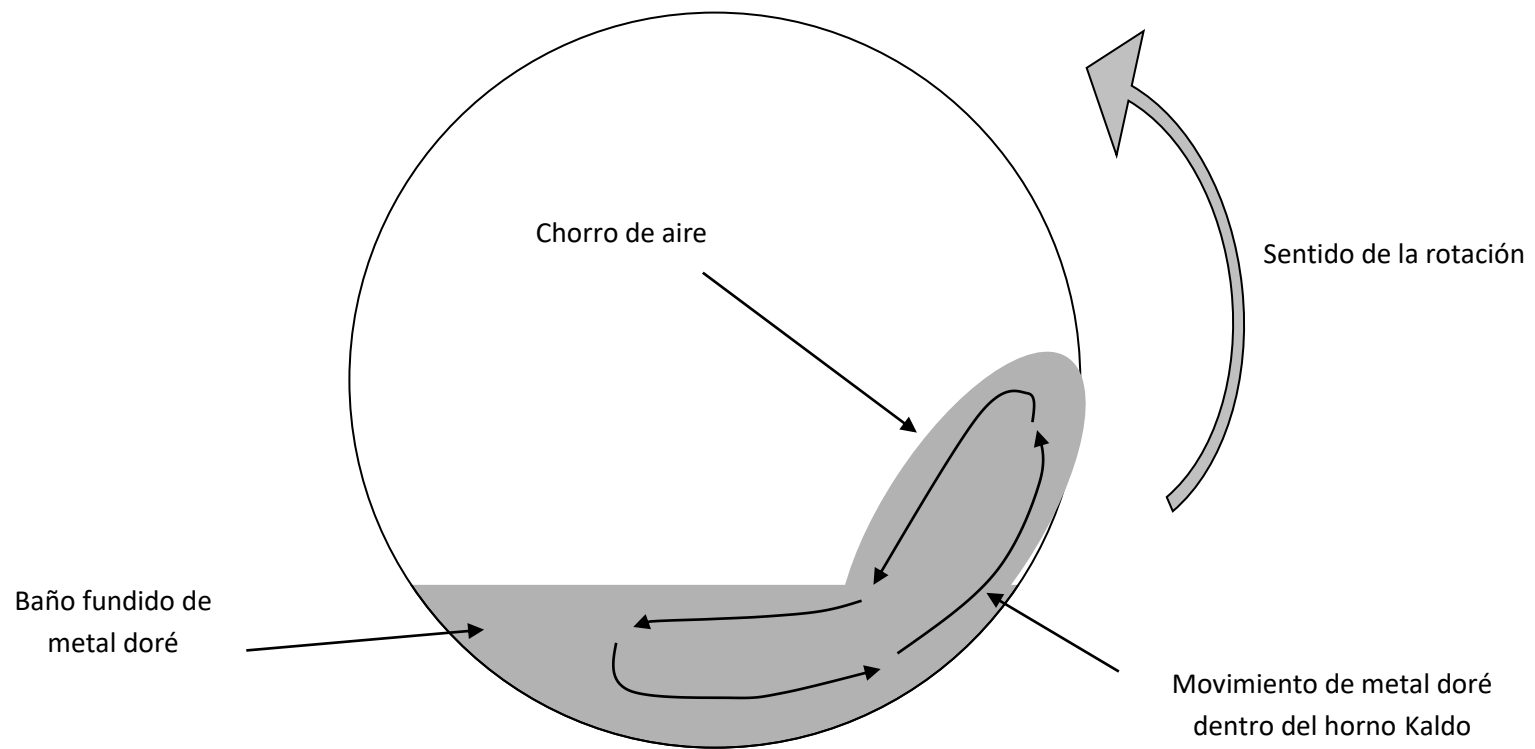


Figura 4. Formación del "efecto cascada" durante la operación del horno Kaldn

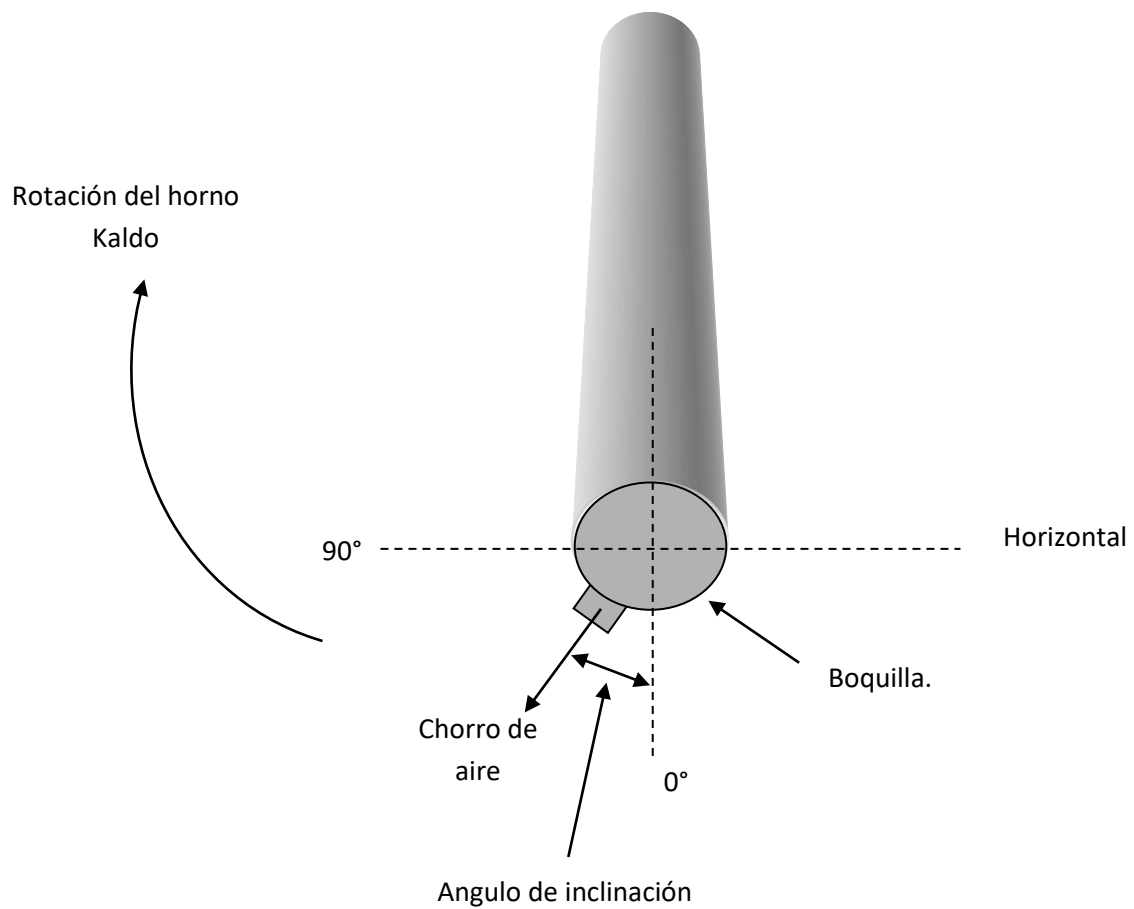


Figura 5. Detalles de la boquilla de la lanza de soplado

### 3.1.4 Purgas de Telurio

Una vez finalizada la refinación, se procede a eliminar el telurio como escoria con carbonato de sodio y simultáneamente se continúa la inyección de aire. Con esto se evita que la mayor parte del telurio se elimine como óxido hacia la corriente gaseosa con lo cual contaminaría al selenio previamente vaporizado. El selenio remanente en el doré se perderá como escoria, ya que tiende a reaccionar con el carbonato de sodio antes que el telurio, por lo que no es conveniente iniciar las purgas a altas concentraciones de selenio. La temperatura y velocidad de rotación del horno Kaldo se mantienen en 1100°C y 20 rpm, respectivamente. Cuando el telurio y el selenio se encuentran en concentraciones menores a 0.01% en peso, el doré se transfiere en una olla previamente calentada a 1100°C para su posterior procesamiento.

### 3.1.5. Moldeo de Doré y Sistema de Limpieza de Gases

Moldeo de doré. El objetivo de esta etapa es adecuar el doré para que pueda ser alimentado a las celdas de electrólisis. Una vez que el doré está en el horno de inducción, este es moldeado en forma de ánodos de 8 a 10 kg para ser cargados a las celdas electrolíticas.

Limpieza de gases: El objetivo de la etapa es captar y acondicionar los humos y gases generados en el horno Kaldo para ser descargados a la atmósfera cumpliendo con las regulaciones ambientales. Aquí se recupera el selenio generado en la etapa de refinación. Primeramente los gases son captados por una campana colocada en la boca del horno Kaldo, para después ser conducidos a un enfriador, en donde se enfrían por contacto directo con agua. Posteriormente pasan por un kimpactor y un ciclón, en donde por efecto centrífugo, se captan pequeñas gotas de agua con polvo. Enseguida pasan por un precipitador electrostático para terminar de capturar toda partícula de polvo. Finalmente pasan por lavador de gases para absorber el SO<sub>2</sub>. Debido a la complejidad de los fenómenos que ocurren en el interior del horno Kaldo y a la dificultad para su estudio *in situ* debido a las altas temperaturas a las cuales se opera, el establecimiento de criterios de operación y la optimización del proceso ha recaído fuertemente en la experiencia adquirida por los operadores e ingenieros de proceso a través de los años. A pesar de lo anterior, la presencia recurrente de problemas operativos, tales como el taponamiento de la lanza de oxidación y el desgaste del ladrillo refractario descritos con anterioridad, evidencian la necesidad de un estudio sistemático de la hidrodinámica de este sistema desde un punto de vista fundamental.

### 3.2 Estudios Previos sobre Hidrodinámica en Cilindros Rotatorios

Con el fin de establecer el estado del arte sobre el estudio del horno Kaldo, se realizó una búsqueda de literatura en los últimos veinte años sobre la hidrodinámica de dicho sistema. Durante la búsqueda fue evidente la escasez de estudios publicados sobre el horno Kaldo, lo cual probablemente es debido a restricciones relativas a los derechos de propiedad de los inventores de la tecnología.

Por lo anterior, la búsqueda de literatura se reorientó a la hidrodinámica en cilindros rotatorios. En esta área se localizaron dos tipos de sistemas con similitudes al horno Kaldo, todos ellos en el interior de cilindros horizontales: (a) el movimiento de líquidos a alta velocidad, y (b) el movimiento de materiales granulares.

La Tabla I resume las referencias localizadas. En relación al movimiento de líquidos en cilindros rotatorios, la mayoría de los estudios se enfocan al análisis de las condiciones de estabilidad para el movimiento en estado estacionario a altas velocidades de rotación. Bajo estas condiciones, el volumen total del líquido dentro del cilindro ocupa una región anular próxima a la pared del cilindro, dejando una cámara de aire en la región central (Figura 6). A esta condición se le denomina “flujo en estado sólido”.

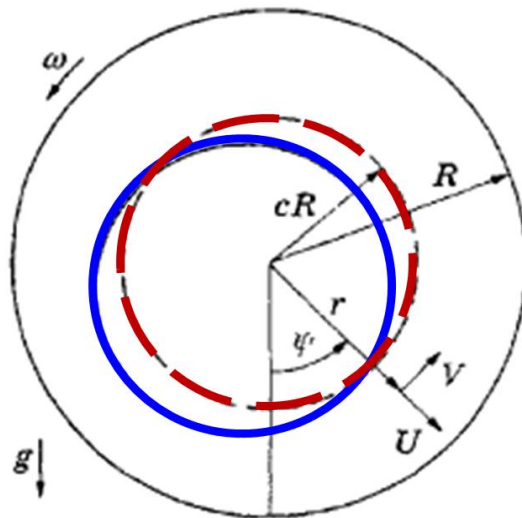


Figura 6. Condición de “Flujo en Estado Estacionario” [2].

Tabla I. Referencias localizadas en relación al movimiento de líquidos en cilindros inclinados rotatorios.

<b>Título</b>	<b>Contribuciones</b>	<b>Autor</b>
<b>A Kinetic Model for the Oxidation of Selenium and Tellurium in an Industrial Kaldo Furnace</b>	Los datos experimentales indican que las reacciones de oxidación de selenio y telurio presentan un orden cinético aparente de cero.	(Pérez-Tello et al., 2004)
<b>Granular Flow in Partially Filled Slowly Rotating Drums</b>	Marco teórico general que se desarrolla para el movimiento cuasi-bidimensional de material granular en un tambor giratorio. Una solución exacta para el caso de flujo continuo es presentada.	(Gray et al., 2001)
<b>Stability of the Tubular Layer of a Deformed Material in a Rotating Horizontal Cylinder</b>	Establece analíticamente las condiciones de estabilidad para el movimiento en estado estacionario de un material deformable, el cual puede considerarse como líquido newtoniano en movimiento rápido.	(Naumenko , 2000)
<b>Viscous Flow with a Free Surface Inside a Horizontal Rotating Drum</b>	El comportamiento del flujo se caracteriza por medio de dos parámetros: el máximo espesor de la superficie y la excentricidad.	(Deiber et al., 1976)
<b>Centrifugal waves</b>	El movimiento es analizado, asumiendo pequeñas perturbaciones. El modo de oscilación de la superficie libre es examinado y la ecuación de frecuencia es deducida.	(Phillips, 1960)

Al reducir progresivamente la velocidad angular, se presentará el momento en el cual las fuerzas inerciales que mantienen al líquido en rotación serán superadas por la fuerza de gravedad que actúa verticalmente, y parte del líquido ascendente caerá formando una cascada.

Experimentalmente [2] se ha observado que el movimiento del líquido presenta las siguientes características:

- (a) El espesor de la película de líquido en la parte superior del cilindro es mayor que en la parte inferior.
- (b) Bajo ciertas condiciones que dependen de la velocidad de rotación y fracción volumétrica del líquido en el cilindro, puede presentarse movimiento ondulatorio de la superficie libre del líquido en forma radial y/o longitudinal.

Por otro lado, estudios teóricos [2] indican que los diversos patrones de flujo observados en el movimiento de líquidos en cilindros horizontales pueden ser correlacionados en función de tres parámetros adimensionales:

$$\alpha, Re_f = \frac{\omega c^2 R^2}{\nu}, Fr = \frac{\omega^2 R}{g}$$

Donde  $\alpha$  es la fracción volumétrica ocupada por el líquido en el cilindro, y  $Re$  y  $Fr$  son los números de Reynolds y Froude, respectivamente, evaluados en la superficie libre del líquido.

En relación al movimiento de sólidos granulares en cilindros rotatorios horizontales, existe una vasta literatura sobre sistemas de secado de sólidos y molienda de minerales, entre otros. Sobre estos sistemas se han realizado estudios experimentales con diferentes tipos de sólidos y se han desarrollado modelos computacionales sofisticados. Se hace notar que para estos sistemas la formación del “efecto cascada” se ha observado experimentalmente.

A pesar de tratarse de materiales distintos, el movimiento de sólidos granulares y de líquidos en rotación presenta similitudes entre sí una vez que el movimiento en estado sólido se colapsa para formar una cascada. Un ejemplo de lo anterior se muestra esquemáticamente en la Figura 7 reportada por Naumenko (2000). No obstante lo anterior, algunas diferencias son notables: (a) los líquidos tienden a formar una película adherida a la pared del cilindro aún cuando se forma la cascada, y (b) al formarse la cascada, los sólidos presentan una zona adicional de desplazamiento en línea recta sobre la cama de sólidos.

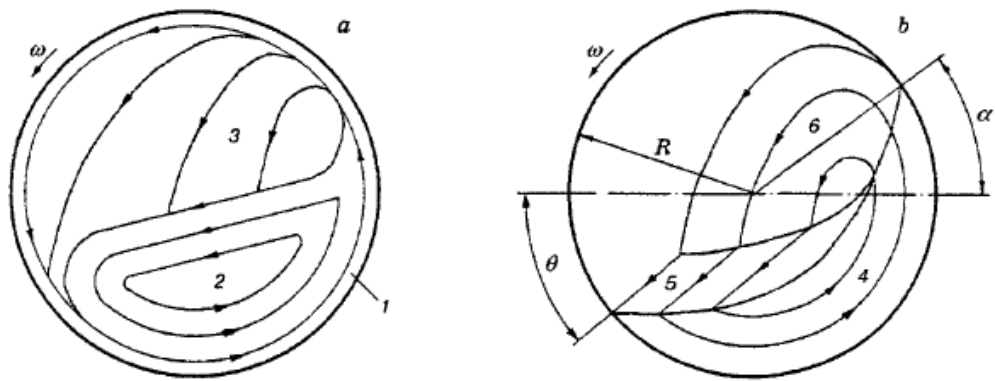


Figura 7 Esquema de las características de movimiento dentro del cilindro giratorio horizontal [2].

En resumen, la literatura abierta sobre el comportamiento del horno Kaldo en general es escasa. La literatura relacionada se refiere al movimiento de un líquido en un cilindro horizontal a altas velocidades de rotación, y al movimiento de materiales granulares. A pesar que algunas similitudes de estos sistemas con el tema de estudio son evidentes, existen aspectos típicos en la operación del horno Kaldo los cuales, hasta donde es del conocimiento de la autora, no han sido tratados en la literatura: (a) bajas velocidades de rotación, (b) inclinación del cilindro con respecto a la horizontal, (c) la presencia de dos fases en el interior del reactor, y (d) la presencia de una lanza de inyección de aire sobre la superficie libre del líquido. Adicionalmente, durante la operación del horno Kaldo se llevan a cabo reacciones químicas a alta temperatura.

Las anteriores consideraciones limitan sustancialmente la aplicación de los criterios planteados en la literatura en relación a la hidrodinámica del horno Kaldo. Por lo anterior, surge la necesidad de llevar a cabo estudios experimentales sobre este sistema desde un punto de vista fundamental a fin de dilucidar el comportamiento hidrodinámico de dicho sistema.



## 4. METODOLOGIA

En base a la necesidad planteada en el capítulo anterior, el presente estudio se centró en las etapas de conversión y refinación del metal doré. En dichas etapas se tiene un material fundido pesado y una pequeña cantidad de escoria en la superficie. Por lo tanto, el sistema de estudio es un sistema bifásico. Como una primera aproximación al estudio de este sistema, se plantearon una serie de simplificaciones. El metal fundido se representó por agua, mientras que la escoria fue representada por aceite mineral coloreado de una marca comercial. Asimismo, todos los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente en ausencia de lanza de inyección de aire.

La metodología para la realización de éste trabajo comprendió las siguientes etapas:

1. Diseño y construcción de un modelo a escala del interior de un Horno Kaldo en acrílico transparente.
2. Diseño y construcción de un sistema mecánico de inclinación y un sistema de control electrónico para la rotación del modelo.
3. Experimentación en el modelo de laboratorio en diferentes condiciones de operación.
4. Captura de imágenes digitales de la superficie libre del líquido en forma de fotografía y video.
5. Determinación de características cuantitativas del sistema mediante software especializado de análisis de imágenes.

Para la etapa 1 se consideró la construcción de un modelo a escala 1:7 del interior del horno Kaldo industrial, partiendo de las especificaciones proporcionadas por el fabricante. El modelo en acrílico transparente se construyó en el Taller de Máquinas y Herramientas del Departamento de Física de la Universidad de Sonora y tiene las dimensiones mostradas en la Figura 8. El volumen del modelo es de 5 L. Para la Etapa 2 se contó con la ayuda del personal del Laboratorio de Electrónica del Departamento de Física de la Universidad de Sonora. La Figura 9 muestra una fotografía del sistema experimental del presente estudio (etapa 3). El sistema consta del modelo en acrílico, una base rectangular con un sistema manual de soportes y varillas metálicas con el cual el sistema completo puede ser inclinado a un ángulo específico con respecto a la horizontal, un motor eléctrico, un sistema de poleas y un controlador electrónico de la rotación del cilindro de acrílico.

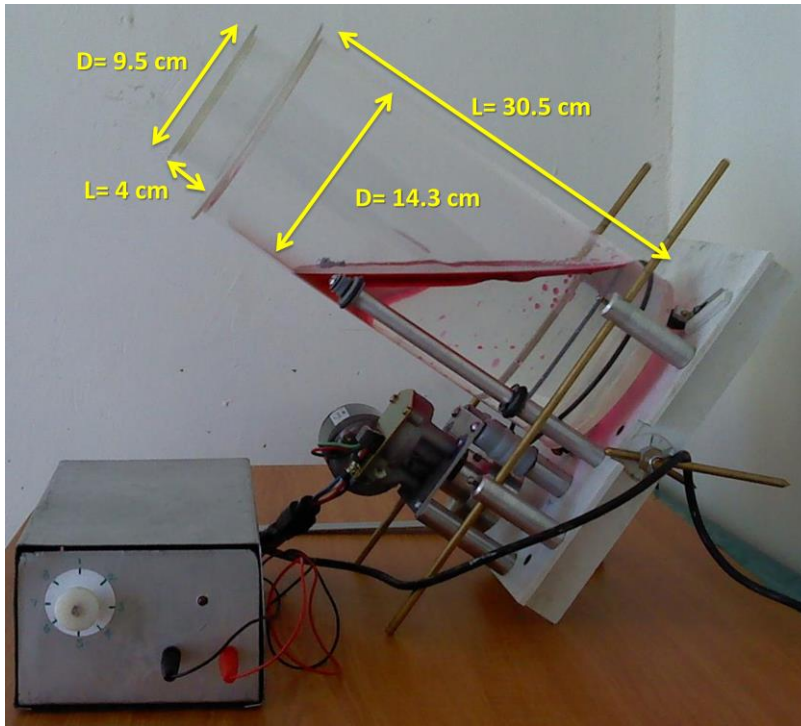


Figura 8. Fotografía modelo en acrílico transparente. Dimensiones a escala (1:7)



Figura 9. Fotografía del Sistema experimental para la captura de imágenes: 1. Cámara fotográfica de alta resolución; 2. Modelo en acrílico; 3. Pantalla blanca

Para la captura de las imágenes digitales (etapa 4) se utilizó una videocámara de alta velocidad y una pantalla blanca. El tratamiento digital de las imágenes se llevó a cabo por medio del software Image Tool 3.0 [3]

Tomando en consideración la experiencia en la operación del horno Kaldo por parte del personal de la planta de Metales Preciosos, para la experimentación se definieron las siguientes variables de estudio:

- (a) El ángulo de inclinación del reactor con respecto a la horizontal ( $\alpha$ ),
- (b) La velocidad angular de rotación,  $\omega$
- (c) La retención volumétrica,  $\phi$ .

La Tabla II muestra los valores de las variables de estudio del diseño experimental. Estos valores están basados en las especificaciones del fabricante del horno Kaldo.

Tabla II. Valores de las Variables de Estudio

<b>Velocidad de rotación <math>\omega</math>, rpm</b>	<b>10, 30, 60</b>
<b>Retención volumétrica* <math>\phi</math> adimensional</b>	<b>0.4, 0.5, 0.6</b>
<b>Ángulo de inclinación <math>\theta</math>, grados</b>	<b>30, 40, 50, 60</b>
<b>* Fracción del volumen interno del recipiente ocupado por las fases líquidas</b>	

Las variables de respuesta en este estudio incluyeron:

- (1) La forma y características cualitativas de la superficie libre del líquido en rotación
- (2) El área total de la superficie libre del líquido,  $y$
- (3) La distancia desde la boca del recipiente hasta la superficie del líquido a lo largo de la línea de centro ( $h$ ).

El diseño experimental consistió de un arreglo factorial completo  $3 \times 3 \times 4$  para un total de 36 condiciones experimentales, en las cuales se probaron todas las combinaciones posibles de las variables de entrada mostrados en la Tabla II. El volumen de aceite mineral utilizado en todos los experimentos fue de 100 mL. En un experimento típico, a partir del valor de la retención volumétrica requerida para el experimento, se calculó el volumen de agua requerido y se agregó al interior del cilindro. La medición del volumen de las fases líquidas se realizó mediante probetas graduadas.

El recipiente y su contenido se colocaron en la base y se ajustó el sistema mecánico para el ángulo de inclinación correspondiente. Enseguida se calibró el sistema de control de la velocidad de rotación y se fijó esta última. El sistema se dejó operar por aproximadamente 3 minutos hasta alcanzar el régimen estacionario. A partir de este momento se realizó la captura de fotografías y video para su posterior análisis.

Un segundo conjunto de experimentos fue realizado con el fin de determinar la distancia desde la boca del recipiente hasta la superficie libre del líquido en movimiento a lo largo de la línea de centro del cilindro. Para este propósito, se utilizó el sistema experimental mostrado en la Figura 8. Para estos experimentos, se colocó una tapa de acrílico transparente con un orificio circular en el centro. Durante el experimento se introdujo una banderilla de madera a través del orificio de manera perpendicular a la superficie de la tapa. La banderilla se introdujo gradualmente al recipiente hasta hacer contacto físico con el líquido en rotación, al cabo de lo cual se hizo una marca en la banderilla, se extrajo y se midió la distancia desde la punta de la banderilla hasta la marca.

## 5. DISCUSION DE RESULTADOS

### 5.1 Forma y Características de la Superficie Libre

La captura de imágenes y video de alta velocidad se realizó para la totalidad de los experimentos realizados. Con el fin de facilitar el análisis y discusión de los datos experimentales, en el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos bajo las condiciones de la Tabla III.

Tabla III. Condiciones Experimentales para la Discusión de Resultados

$\phi$	$\theta$ , grados	$\omega$ , rpm
0.4	30	10
0.4	60	30
0.4	30	60
0.4	60	10
0.4	30	30
0.4	60	60
0.6	30	10
0.6	60	30
0.6	30	60
0.6	60	10
0.6	30	30
0.6	60	60

La Tabla III corresponde a la tercera parte del diseño experimental original de 36 experimentos. Los valores de la retención volumétrica  $\Phi$  y el ángulo de inclinación  $\theta$  que aparecen en la Tabla II representan los valores extremos de la Tabla I, mientras que la velocidad de rotación  $\omega$  incluye la totalidad de los valores originales de la Tabla I. Por lo anterior, el comportamiento del sistema bajo las condiciones experimentales no incluidas en la Tabla II representa condiciones intermedias entre las discutidas en esta sección.

La Figura 10 muestra las fotografías del patrón de flujo observado en el sistema cuando la retención volumétrica se fijó en  $\phi = 0.4$ . La Figura 11 muestra las fotografías del patrón de flujo observado en el sistema cuando la retención volumétrica se fijó en  $\Phi = 0.6$ . La observación general de estas imágenes y los videos correspondientes indican la presencia de los fenómenos descritos a continuación. Cabe mencionar que dicha clasificación es en base únicamente a la observación visual directa del sistema, así como a través de las fotografías y videos.

(a) Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente

Bajo todas las condiciones experimentales, el aceite formó una película delgada bien definida sobre la cara interna del cilindro. La anchura de la banda de impregnación depende fundamentalmente del ángulo de inclinación y la retención volumétrica. La impregnación es debida a un fenómeno superficial entre el aceite mineral y la superficie del acrílico.

(b) Ondulaciones de la superficie libre de la fase ligera

En general, cuando la velocidad de rotación es lo suficientemente lenta, la superficie libre del aceite mineral presentó una forma plana con poco movimiento superficial, independientemente del ángulo de inclinación. Bajo ciertas condiciones experimentales se observaron ondulaciones verticales en la superficie libre del aceite mineral sin que ésta perdiera su integridad. En estos casos, la capa de aceite superficial aparece como una banda gruesa deformada de espesor no uniforme. Se observó que las ondulaciones son periódicas en el tiempo.

(c) Acumulación de la fase ligera en la cercanía de la boca del cilindro

Bajo todas las condiciones experimentales se observó que el espesor de la capa de aceite mineral en la cercanía de la boca del cilindro es mayor que en el resto de la superficie libre. Este fenómeno se observó también cuando el sistema no se encuentra en rotación y es atribuible a la fuerza de la gravedad, así como a la mojabilidad del acrílico por el aceite.

(d) Formación y desprendimientos de coágulos de la fase ligera

A velocidades de rotación lo suficientemente altas, la superficie libre pierde su integridad, formándose coágulos de diversos tamaños, los cuales se desprenden de la fase ligera, penetran en la fase pesada y resurgen a la superficie hacia la parte más lejana de la boca del cilindro, coalesciendo nuevamente y reincorporándose a la superficie.

(e) Segregación de fases en la superficie

A altas velocidades de rotación se observó la segregación de las fases ligera y pesada en la superficie del líquido. En la superficie cercana a la boca del cilindro se observó que se concentra la fase ligera, mientras la fase pesada se concentra en la zona de la superficie más alejada de la boca del cilindro. Bajo estas condiciones, el movimiento de la superficie libre sigue la forma de la elipse que se forma debido a la inclinación (Figura 10).

Desde un punto de vista práctico, la segregación de fases es un fenómeno relevante, ya que indica las condiciones bajo las cuales se favorece la inyección de aire sobre la superficie del metal fundido durante las etapas de conversión y refinación del horno Kaldo. Los datos experimentales obtenidos en este trabajo indican que bajo las condiciones típicas de operación del horno Kaldo (20 rpm) no es factible la segregación de fases de la superficie, por lo cual dicha separación deberá realizarse por efecto del impacto de la corriente de gas sobre la superficie del baño.

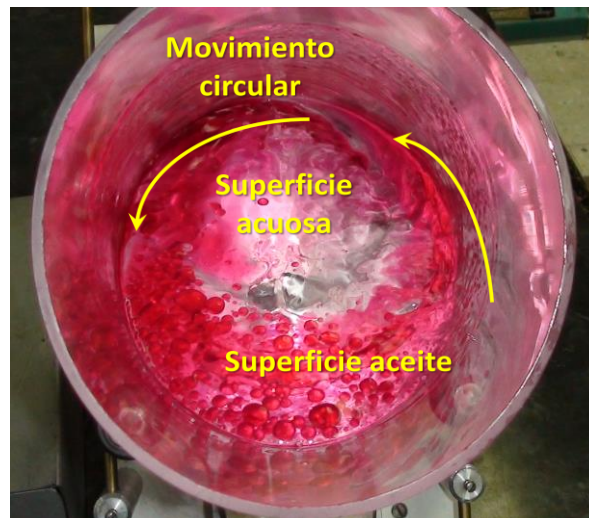


Figura 10. Fotografía del Movimiento de la Superficie: Libre Segregación de Fases

(f) Efecto cascada

En este trabajo, por efecto cascada se definió el fenómeno mediante el cual la superficie libre de la fase ligera experimentó un ascenso apreciable con respecto al resto de la superficie libre en una región próxima a la pared del cilindro y en la dirección del movimiento de rotación de éste. La presencia de este fenómeno se restringió a las condiciones de alta velocidad de rotación (60 rpm) y retención volumétrica de 0.4, mientras que no se detectó en el resto de las condiciones experimentales.

Estos resultados difieren de los criterios de operación del horno Kaldor, en los cuales se considera que el efecto cascada se presenta a velocidades de rotación del orden de 10-20 rpm. Esta discrepancia se puede deber a las diferencias en las propiedades de los fluidos utilizados en este estudio con respecto a los materiales fundidos que se utilizan en la planta industrial. En particular, la viscosidad, densidad y tensión superficial se espera que jueguen un papel importante en el comportamiento de la superficie libre. Estudios posteriores deben considerar estos efectos a fin de aproximarse gradualmente al comportamiento del sistema industrial.



Figura 11. Fotografía del Efecto Cascada de la superficie libre del líquido.

Condiciones experimentales:  $\omega = 60$  rpm,  $\phi = 0.4$ ,  $\theta = 30^\circ$ .



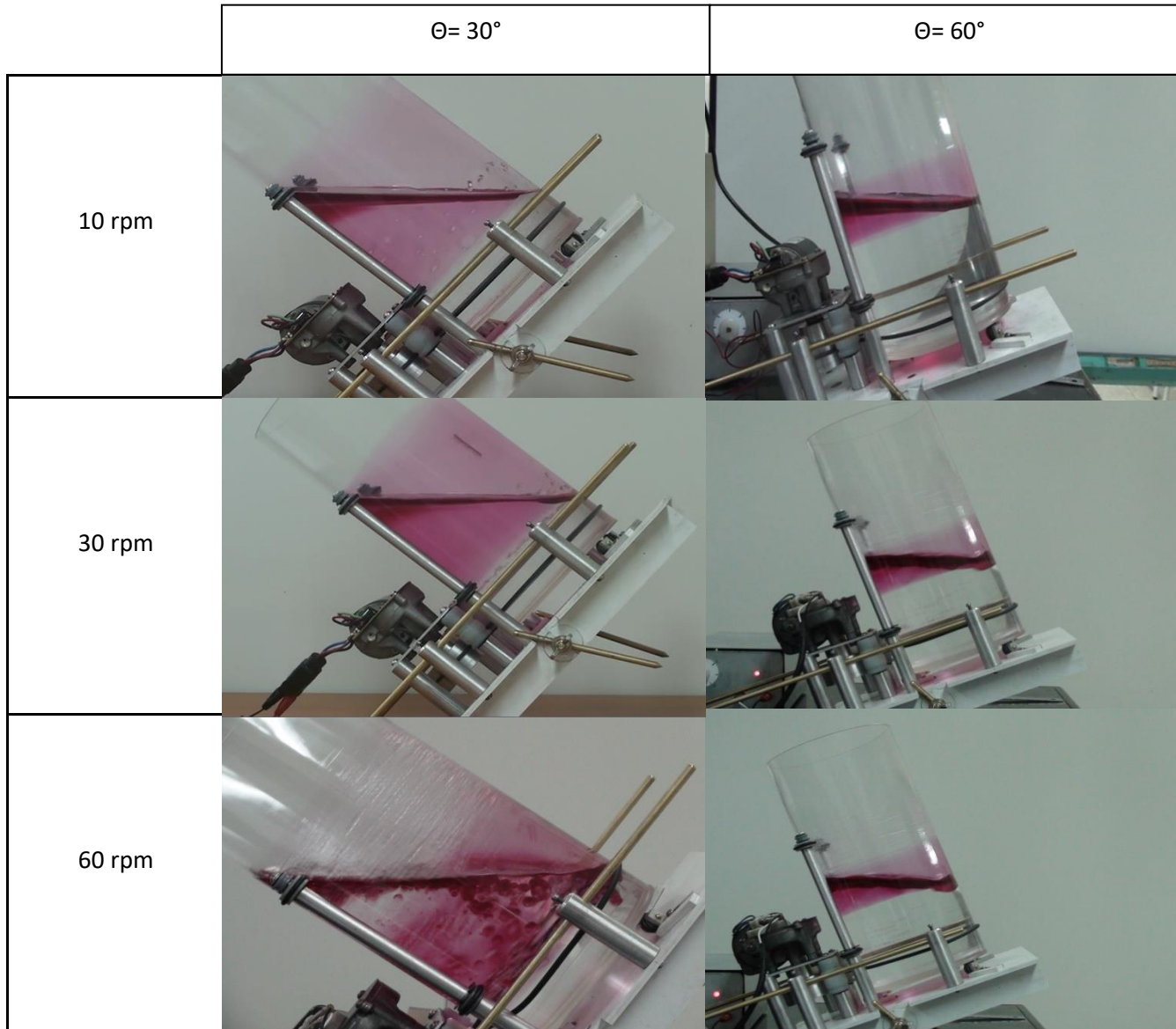


Figura 12. Fotografías de la superficie libre del líquido. Retención volumétrica  $\Phi = 0.4$

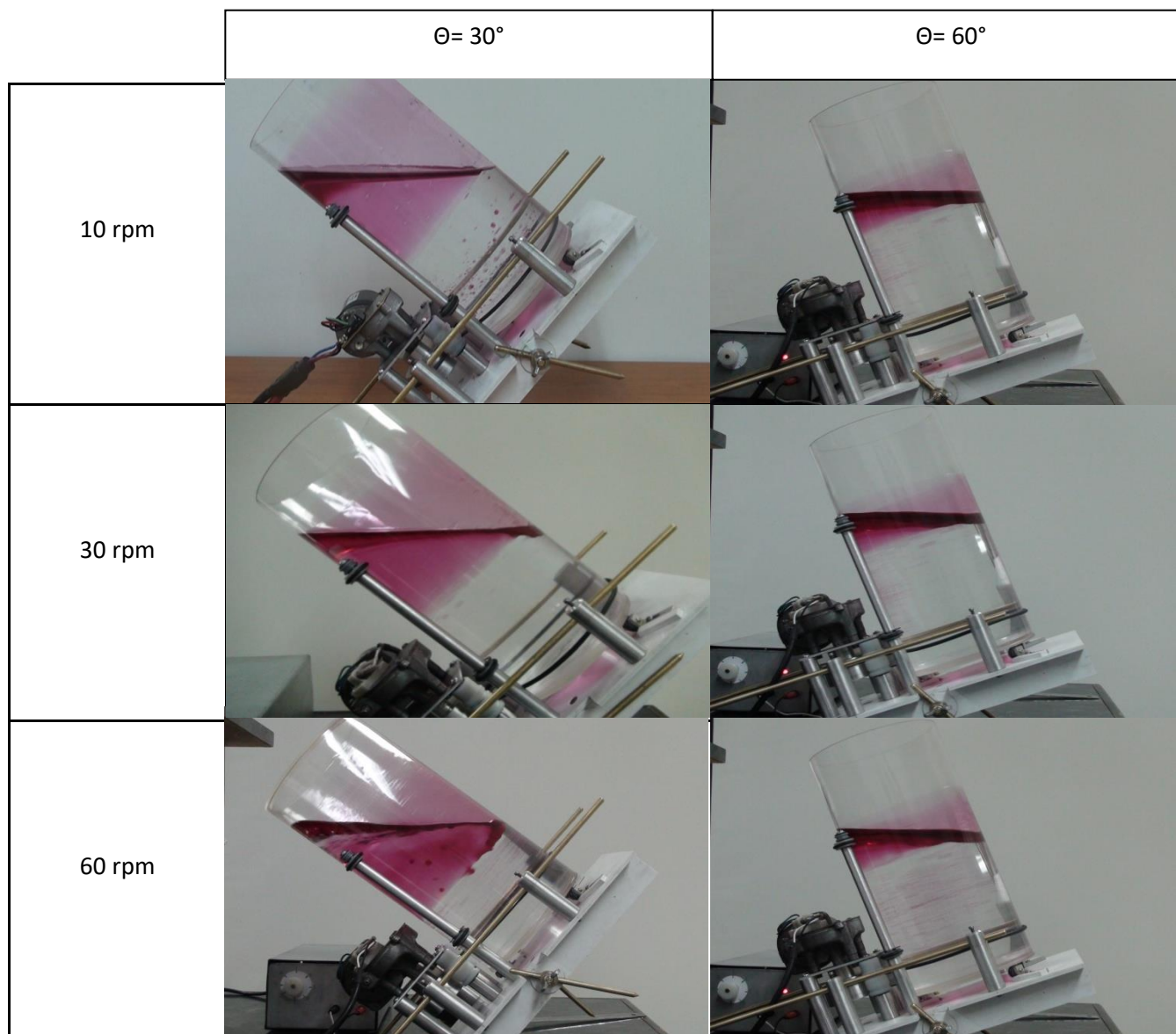


Figura 13. Fotografías de la superficie libre del líquido. Retención volumétrica  $\Phi = 0.6$

Las Tablas IV a XVIII resumen las condiciones experimentales en las cuales se observaron los fenómenos antes descritos.

Tabla IV. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.

$\phi=0.4$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	✓

Tabla V. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos.

$\phi=0.4$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	X
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	X

Tabla VI. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Segregación de Fases.

$\phi=0.4$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	X

Tabla VII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Ondulaciones.

$\phi=0.4$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	✓
$\omega=60$ rpm	X	X	X	✓

Tabla VIII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.4 Comportamiento observado: Efecto Cascada

$\phi=0.4$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	✓	X	X	X

Tabla IX. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.

$\phi=0.5$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	✓

Tabla X. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos

$\phi=0.5$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	X

Tabla XI. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Segregación de Fases.

$\phi=0.5$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	X

Tabla XII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Ondulaciones.

$\phi=0.5$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	✓

Tabla XIII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.5 Comportamiento observado: Efecto Cascada

$\phi=0.5$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	X	X	X	X

Tabla XIV. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Impregnación de la fase ligera sobre la cara lateral del recipiente.

$\phi=0.6$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	✓

Tabla XV. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Desprendimiento de Coágulos.

$\phi=0.6$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	✓	X	X	X



Tabla XVI. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Segregación de Fases.

$\phi=0.6$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	X	X	X	X

Tabla XVII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6. Comportamiento observado: Ondulaciones.

$\phi=0.6$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=30$ rpm	✓	✓	✓	✓
$\omega=60$ rpm	✓	✓	✓	✓

Tabla XVIII. Retención Volumétrica ( $\phi$ )=0.6 Comportamiento observado: Efecto Cascada

$\phi=0.6$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$
$\omega=10$ rpm	X	X	X	X
$\omega=30$ rpm	X	X	X	X
$\omega=60$ rpm	X	X	X	X

## 5.2 Distancia a la Superficie Libre

Esta variable de respuesta tiene relevancia práctica, ya que está relacionada con la distancia máxima a la cual puede introducirse una lanza de oxidación al sistema de manera perpendicular a la boca del cilindro, antes de tocar el baño fundido. La Figura 14 muestra la distancia medida desde el centro de la boca del cilindro hasta la superficie libre a todas las condiciones experimentales, dividida entre la longitud total del cilindro ( $L=35$  cm, ver Figura 8). La presentación de estos resultados en forma adimensional tiene como propósito el poder generalizar los resultados a otros sistema de dimensiones diferentes.

La observación indica que la distancia a la superficie libre:

- (a) varía en general entre 0.45-0.65 veces la longitud total del cilindro
- (b) depende fundamentalmente de la retención volumétrica; es decir, de la fracción del volumen del cilindro ocupada por las fases líquidas. La velocidad de rotación y el ángulo de inclinación no presentan efectos significativos sobre esta variable de respuesta.
- (c) presenta una funcionalidad no lineal con respecto a la fracción volumétrica. Esto se infiere de la separación de las curvas al pasar de una retención de 0.4 a 0.5 a 0.6.

La explicación fenomenológica de estos comportamientos requiere de un estudio más fundamental, el cual estuvo más allá de los alcances del presente trabajo.

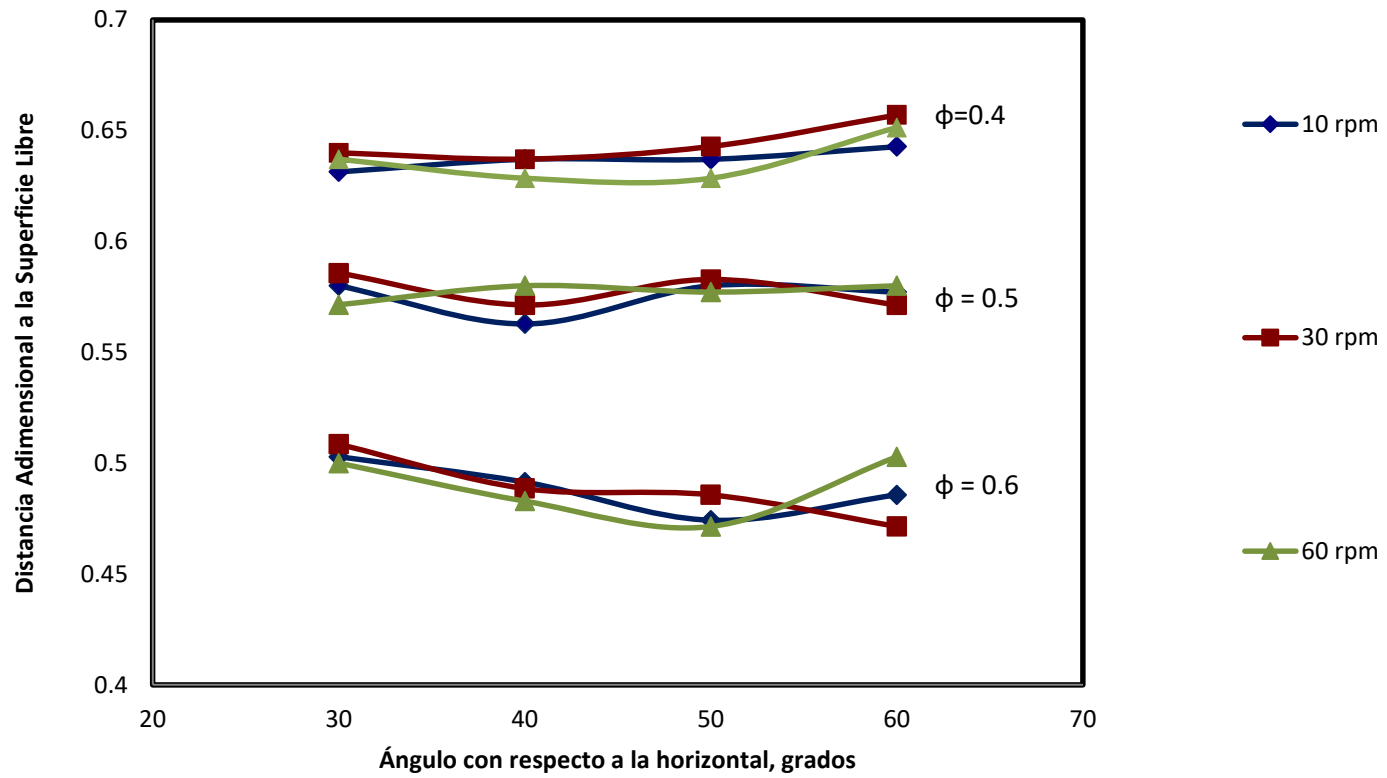


Figura 14. Distancia adimensional desde la boca del cilindro hasta la superficie libre del líquido en función de las variables de estudio.

### 5.3 Área Aparente de Contacto Líquido-Gas

Esta variable de respuesta fue definida como el área aparente de la superficie libre del líquido y fue determinada a partir de las fotografías capturadas de manera perpendicular a la superficie. Para los casos en que se observó segregación de fases como el mostrado en la Figura 10, dicha área incluyó a ambas fases.

La determinación numérica de esta variable de respuesta se realizó por medio del software Image Tool [7] suponiendo que el área de la superficie libre es plana y en forma de una elipse. Un ejemplo del cálculo se muestra en la Figura 15. Debido a que la superficie real puede presentar protuberancias o cascadas, coágulos, hundimientos, etc., esta determinación es aparente y representa una primera aproximación del área de contacto efectiva entre el líquido y el gas en la superficie. Mediciones más precisas de esta variable requieren de equipo experimental de alta sofisticación no disponible para este estudio.

Con el fin de generalizar los resultados, el área calculada mediante este procedimiento se dividió entre el área circular del cilindro. Los resultados de esta operación se muestran en la Figura 16 para todas las condiciones experimentales. La línea punteada de la Figura 16 indica la tendencia general de los valores. Como era de esperarse, el área superficial aparente disminuye conforme el ángulo de inclinación aumenta y el cilindro se aproxima a una posición vertical, en cuyo caso el área aparente es igual a la unidad. Los efectos de la retención volumétrica y velocidad de rotación son significativos aunque no muy claros. Se hace notar que entre 30 y 50 grados de inclinación se observa la mayor dispersión de datos.

Una observación relevante de la Figura 16 se refiere a que el área superficial aparente de contacto líquido-gas en ningún caso llega a ser el doble del área circular del cilindro. Los valores oscilan entre el 10 y el 70% del área circular. En este sentido, la posible presencia del efecto cascada es una alternativa para aumentar dicha área de contacto y consecuentemente favorecer las reacciones heterogéneas durante la conversión y refinación del metal doré.

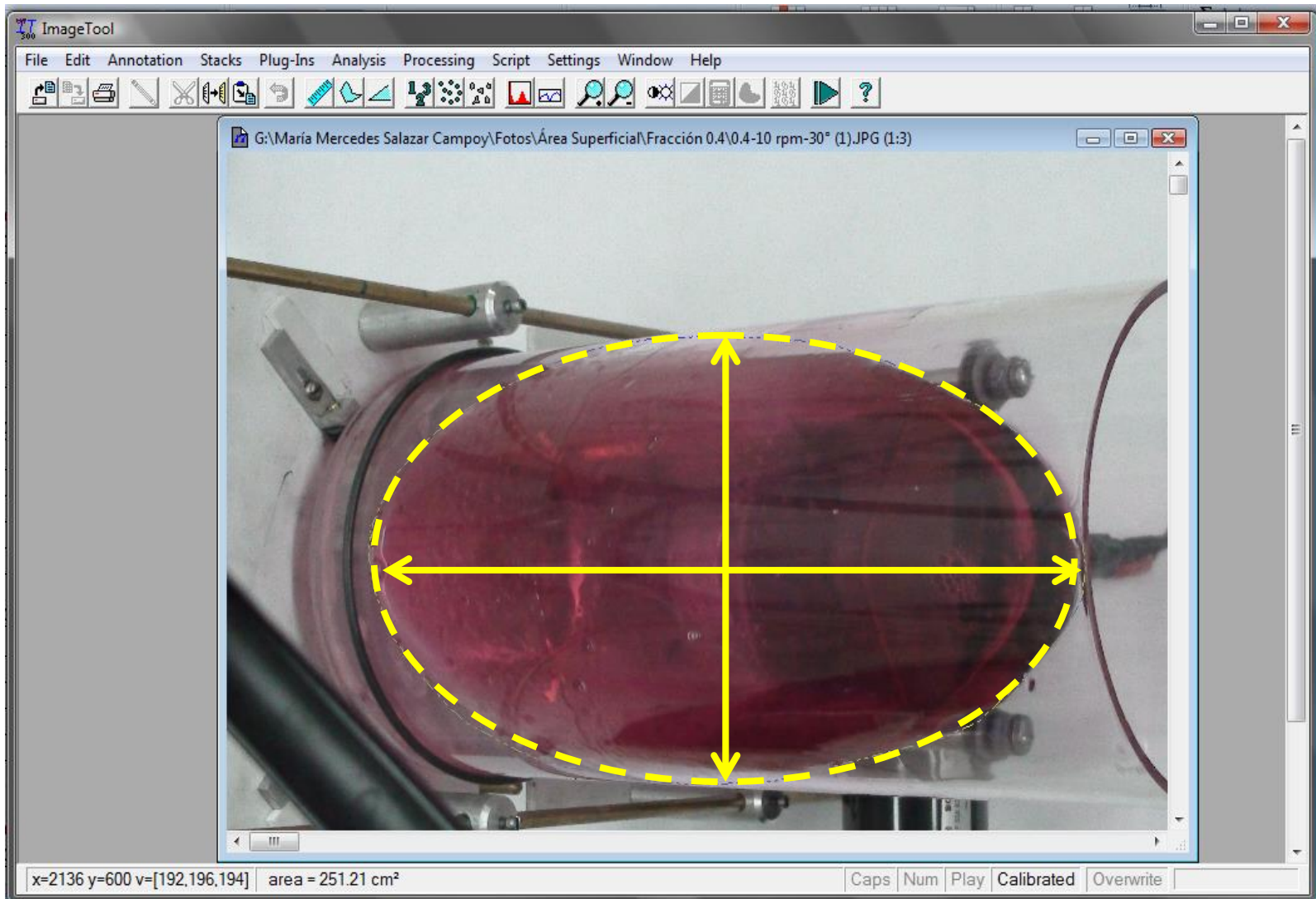


Figura 15. Cálculo del Área Aparente de contacto Líquido-Gas por medio del software Image Tool [7].

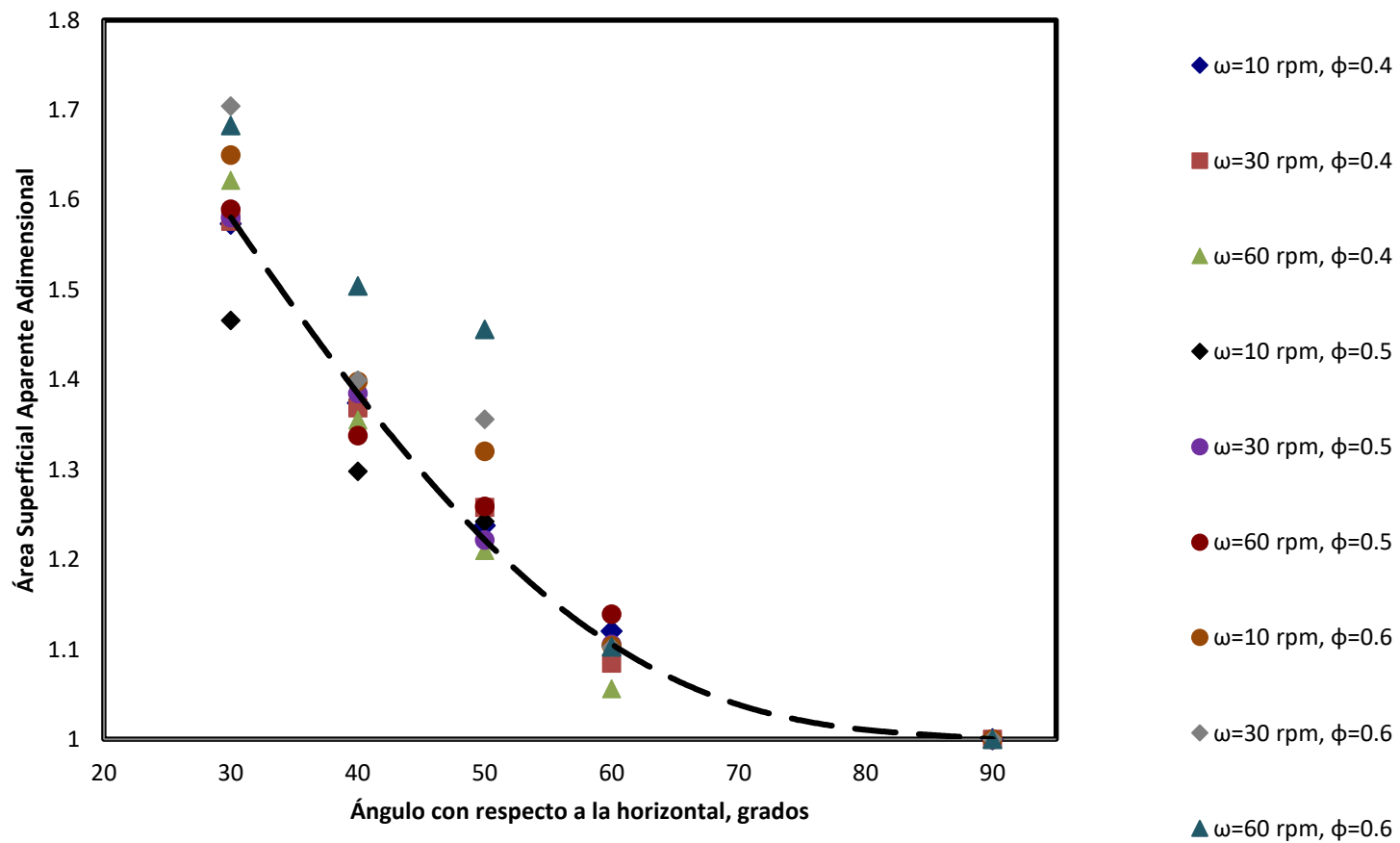


Figura 16. Área Superficial Aparente de contacto líquido-gas en función de las variables de estudio.

## 5.4 Área de Impregnación de la Fase Ligera en la Pared del Cilindro

Esta variable de respuesta puede tener implicaciones prácticas, ya que está relacionada con el área de contacto entre la escoria y el material refractario en el horno Kaldor. El área de impregnación de la fase ligera en la cara lateral del cilindro fue determinada a partir de las fotografías capturadas de manera lateral al sistema experimental. Su determinación numérica se realizó por medio del software Image Tool [7], midiendo la longitud de la zona de impregnación ( $h$ ) del aceite sobre la cara lateral del modelo de acrílico y calculando el área de impregnación correspondiente, mediante:  $A_h = \pi D h$ , donde  $D$  es el diámetro del cilindro.

Con el fin de generalizar los resultados, el área calculada mediante este procedimiento se dividió entre el área lateral total del cilindro:  $A_L = \pi D L$ . El área adimensional resultante es:  $A_h / A_L = h / L$  y se muestra en la Figura 17 para todas las condiciones experimentales. La línea punteada de la Figura 17 indica la tendencia general de los valores experimentales. Se observa que el área de impregnación disminuye de manera aproximadamente lineal conforme el ángulo de inclinación aumenta y el cilindro se aproxima a una posición vertical. De manera similar a la discusión previa sobre el área superficial de contacto líquido-gas, en este caso los efectos de la retención volumétrica y velocidad de rotación sobre el área de impregnación no son claros.

En general, el área de impregnación en ningún caso llega a ser igual al área lateral del cilindro, aún para los valores más altos de retención volumétrica ( $\Phi=0.6$ ) y velocidad de rotación ( $\omega=60$  rpm). Los valores oscilan entre 0.14 y 0.58 veces el área total del cilindro.

Los resultados del presente estudio experimental han aportado una primera caracterización del comportamiento de la superficie libre en un sistema bifásico en el interior de un cilindro inclinado rotatorio. Dicho sistema representa una primera aproximación al estudio de los patrones de flujo en un horno Kaldor a nivel industrial. Se espera que los resultados obtenidos sirvan de base para posteriores estudios teórico y experimental en esta área.

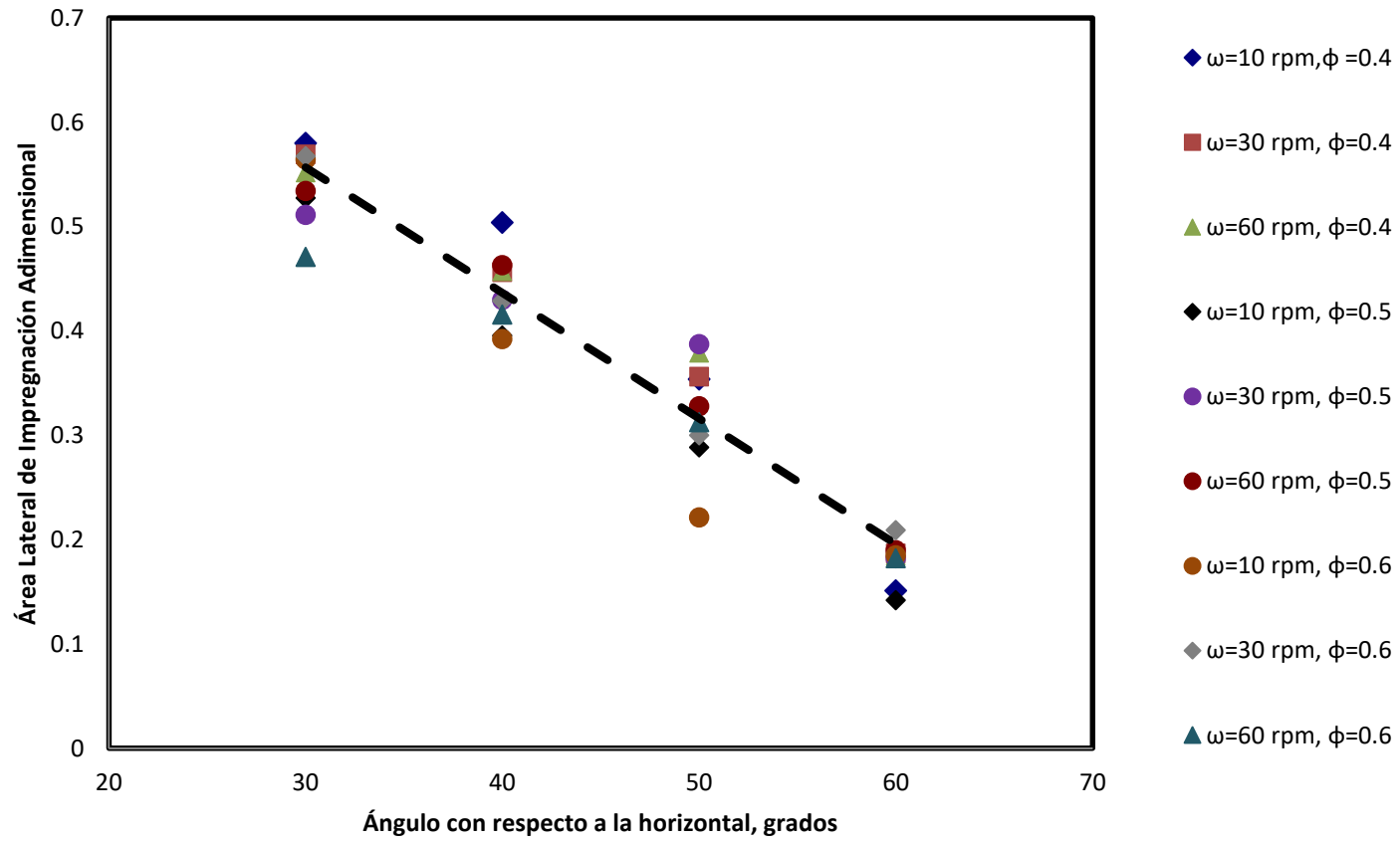


Figura 17. Área de impregnación de la fase ligera en la pared del cilindro en función de las variables de estudio.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- (1) El sistema experimental a nivel laboratorio fue de utilidad para el estudio de la superficie libre de un líquido en un cilindro inclinado rotatorio que representa en escala 1:7 a un horno Kaldo a nivel industrial.
- (2) En general, la forma de la superficie libre del líquido depende de las tres variables de estudio: retención volumétrica, ángulo de inclinación con respecto a la horizontal y velocidad de rotación del cilindro.
- (3) Dependiendo de las condiciones de operación, se presentan los siguientes fenómenos en el comportamiento de la superficie libre del líquido: impregnación de la pared del cilindro, ondulaciones, acumulación de fase ligera en la cercanía de la boca del cilindro, formación de coágulos, segregación de fases, y efecto cascada.
- (4) El efecto cascada se presentó para condiciones excepcionales de alta velocidad de rotación (60 rpm) y baja retención volumétrica (0.4).
- (5) La distancia desde la boca del cilindro a la superficie libre del líquido varió entre 0.45-0.65 veces la longitud total del cilindro y depende fundamentalmente de la retención volumétrica, de quien depende de una manera no lineal.
- (6) El área superficial aparente de contacto líquido-gas varió entre 1.1-1.7 veces el área circular del cilindro y presentó una dependencia no lineal con el ángulo de inclinación.
- (7) El área de impregnación varió entre 0.14-0.58 veces el área lateral del cilindro y presentó una dependencia lineal con el ángulo de inclinación.
- (8) Los resultados del presente estudio aportan una primera caracterización del comportamiento de la superficie libre en un sistema bifásico en el interior de un cilindro inclinado rotatorio similar a un horno Kaldo a nivel industrial.

De acuerdo a las conclusiones de este proyecto se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros sobre el tema:

- (1) Extender la experimentación para incluir la inyección de aire y su efecto sobre la forma de la superficie libre de los líquidos.
- (2) Incluir el efecto de la viscosidad de los líquidos sobre la forma de la superficie libre, a fin de escalar el comportamiento del metal doré y la escoria en el horno Kaldor.
- (3) Realizar la simulación computacional de este sistema utilizando un software especializado de dinámica de fluidos computacional, a fin de explicar con mayor profundidad los fenómenos observados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Moisés Ranulfo Prieto Sánchez. MODELO CINETICO DE LA OXIDACION DE SELENIO Y TELURIO EN UN BAÑO FUNDIDO DURANTE LA REFINACION DE METAL DORE. Tesis de Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Hermosillo Sonora, México, 2003, pp. 1-18
- [2]. Yu. V. Naumenko. STABILITY OF THE TUBULAR LAYER OF A DEFORMED MATERIAL IN A ROTATING HORIZONTAL CYLINDER. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 41, No. 1, pp.120-127
- [3]. Manuel Perez-Tello, Moises R. Prieto-Sanchez, Oscar Rodriguez-Hoyos, and Victor M. Sanchez-Corrales. A KINETIC MODEL FOR THE OXIDATION OF SELENIUM AND TELLURIUM IN AN INDUSTRIAL KALDO FURNACE. *Pyrometallurgy Fundamentals*. 2004
- [4]. J. M. N. T. Gray. GRANULAR FLOW IN PARTIALLY FILLED SLOWLY ROTATING DRUMS. *J. Fluid Mech.* (2001), vol. 441, pp. 1-29. Institut für Mechanik, Technische Universität at Darmstadt, 64289 Darmstadt, Germany and Department of Mathematics, University of Manchester, Manchester.
- [5]. Julio A. Deiber, and Ramon L. Cerro. VISCOUS FLOW WITH A FREE SURFACE INSIDE A HORIZONTAL ROTATING DRUM. *Ind. Eng. Chem. Fundamen.* (2002) Vol. 15 No. 2, pp. 102-110.
- [6]. O. M. Phillips. CENTRIFUGAL WAVES. Mechanical Engineering Department, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland. 1960
- [7]. <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>

## APÉNDICE.

Tabla XIX. Serie de Condiciones para medir la distancia desde la boca del cilindro hasta la superficie libre del líquido.

<b>1.-</b>	<b>0.4 - 10 rpm - 30°</b>	<b>13.-</b>	<b>0.5 - 10 rpm - 30°</b>	<b>25.-</b>	<b>0.6 - 10 rpm - 30°</b>
<b>2.-</b>	0.4 - 10 rpm - 40°	<b>14.-</b>	0.5 - 10 rpm - 40°	<b>26.-</b>	0.6 - 10 rpm - 40°
<b>3.-</b>	0.4 - 10 rpm - 50°	<b>15.-</b>	0.5 - 10 rpm - 50°	<b>27.-</b>	0.6 - 10 rpm - 50°
<b>4.-</b>	0.4 - 10 rpm - 60°	<b>16.-</b>	0.5 - 10 rpm - 60°	<b>28.-</b>	0.6 - 10 rpm - 60°
<b>5.-</b>	0.4 - 30 rpm - 30°	<b>17.-</b>	0.5 - 30 rpm - 30°	<b>29.-</b>	0.6 - 30 rpm - 30°
<b>6.-</b>	0.4 - 30 rpm - 40°	<b>18.-</b>	0.5 - 30 rpm - 40°	<b>30.-</b>	0.6 - 30 rpm - 40°
<b>7.-</b>	0.4 - 30 rpm - 50°	<b>19.-</b>	0.5 - 30 rpm - 50°	<b>31.-</b>	0.6 - 30 rpm - 50°
<b>8.-</b>	0.4 - 30 rpm - 60°	<b>20.-</b>	0.5 - 30 rpm - 60°	<b>32.-</b>	0.6 - 30 rpm - 60°
<b>9.-</b>	0.4 - 60 rpm - 30°	<b>21.-</b>	0.5 - 60 rpm - 30°	<b>33.-</b>	0.6 - 60 rpm - 30°
<b>10.-</b>	0.4 - 60 rpm - 40°	<b>22.-</b>	0.5 - 60 rpm - 40°	<b>34.-</b>	0.6 - 60 rpm - 40°
<b>11.-</b>	0.4 - 60 rpm - 50°	<b>23.-</b>	0.5 - 60 rpm - 50°	<b>35.-</b>	0.6 - 60 rpm - 50°
<b>12.-</b>	0.4 - 60 rpm - 60°	<b>24.-</b>	0.5 - 60 rpm - 60°	<b>36.-</b>	0.6 - 60 rpm - 60°

Tabla XX. Valores Obtenidos de Área Superficial Aparente de contacto líquido-gas

Experimento No.	Condición	Área Superficial (cm <sup>2</sup> )	Separación de Fases
<b>1.-</b>	<b>0.4 - 10 rpm - 30°</b>	1.57	No
<b>2.-</b>	0.4 - 10 rpm - 40°	1.37	No
<b>3.-</b>	0.4 - 10 rpm - 50°	1.23	No
<b>4.-</b>	0.4 - 10 rpm - 60°	1.12	No
<b>5.-</b>	0.4 - 30 rpm - 30°	1.57	Si
<b>6.-</b>	0.4 - 30 rpm - 40°	1.36	Si
<b>7.-</b>	0.4 - 30 rpm - 50°	1.25	No
<b>8.-</b>	0.4 - 30 rpm - 60°	1.08	No
<b>9.-</b>	0.4 - 60 rpm - 30°	1.62	Si
<b>10.-</b>	0.4 - 60 rpm - 40°	1.35	Si
<b>11.-</b>	0.4 - 60 rpm - 50°	1.20	Si
<b>12.-</b>	0.4 - 60 rpm - 60°	1.05	No
<b>13.-</b>	<b>0.5 - 10 rpm - 30°</b>	1.46	No
<b>14.-</b>	0.5 - 10 rpm - 40°	1.29	No
<b>15.-</b>	0.5 - 10 rpm - 50°	1.24	No

16.-	0.5 - 10 rpm - 60°	1.10	No
17.-	0.5 - 30 rpm - 30°	1.58	No
18.-	0.5 - 30 rpm - 40°	1.38	No
19.-	0.5 - 30 rpm - 50°	1.22	No
20.-	0.5 - 30 rpm - 60°	1.10	No
21.-	0.5 - 60 rpm - 30°	1.58	Si
22.-	0.5 - 60 rpm - 40°	1.33	Si
23.-	0.5 - 60 rpm - 50°	1.25	Si
24.-	0.5 - 60 rpm - 60°	1.13	No
25.-	<b>0.6 - 10 rpm - 30°</b>	1.64	No
26.-	0.6 - 10 rpm - 40°	1.39	No
27.-	0.6 - 10 rpm - 50°	1.32	No
28.-	0.6 - 10 rpm - 60°	1.10	No
29.-	0.6 - 30 rpm - 30°	1.70	Si
30.-	0.6 - 30 rpm - 40°	1.39	Si
31.-	0.6 - 30 rpm - 50°	1.35	No
32.-	0.6 - 30 rpm - 60°	1.10	No
33.-	0.6 - 60 rpm - 30°	1.68	Si
34.-	0.6 - 60 rpm - 40°	1.50	Si
35.-	0.6 - 60 rpm - 50°	1.45	Si
36.-	0.6 - 60 rpm - 60°	1.10	No

Tabla XXI. Valores Obtenidos de Área de Impregnación de la Fase Ligera en la Pared del Cilindro.

Experimento No.	Condición	Área de Impregnación (cm <sup>2</sup> )
1.-	0.4 - 10 rpm - 30°	0.58
2.-	0.4 - 10 rpm - 40°	0.50
3.-	0.4 - 10 rpm - 50°	0.35
4.-	0.4 - 10 rpm - 60°	0.15
5.-	0.4 - 30 rpm - 30°	0.57
6.-	0.4 - 30 rpm - 40°	0.46
7.-	0.4 - 30 rpm - 50°	0.36
8.-	0.4 - 30 rpm - 60°	0.19
9.-	0.4 - 60 rpm - 30°	0.55
10.-	0.4 - 60 rpm - 40°	0.46
11.-	0.4 - 60 rpm - 50°	0.38
12.-	0.4 - 60 rpm - 60°	0.18
13.-	0.5 - 10 rpm - 30°	0.53
14.-	0.5 - 10 rpm - 40°	0.40
15.-	0.5 - 10 rpm - 50°	0.29
16.-	0.5 - 10 rpm - 60°	0.14

<b>17.-</b>	0.5 - 30 rpm - 30°	0.51
<b>18.-</b>	0.5 - 30 rpm - 40°	0.43
<b>19.-</b>	0.5 - 30 rpm - 50°	0.39
<b>20.-</b>	0.5- 30 rpm - 60°	0.18
<b>21.-</b>	0.5 - 60 rpm - 30°	0.53
<b>22.-</b>	0.5 - 60 rpm - 40°	0.46
<b>23.-</b>	0.5 - 60 rpm - 50°	0.33
<b>24.-</b>	0.5 - 60 rpm - 60°	0.19
<b>25.-</b>	0.6 - 10 rpm - 30°	0.56
<b>26.-</b>	0.6 - 10 rpm - 40°	0.39
<b>27.-</b>	0.6 - 10 rpm - 50°	0.22
<b>28.-</b>	0.6- 10 rpm - 60°	0.18
<b>29.-</b>	0.6 - 30 rpm - 30°	0.57
<b>30.-</b>	0.6 - 30 rpm - 40°	0.43
<b>31.-</b>	0.6 - 30 rpm - 50°	0.30
<b>32.-</b>	0.6 - 30 rpm - 60°	0.21
<b>33.-</b>	0.6 - 60 rpm - 30°	0.47
<b>34.-</b>	0.6 - 60 rpm - 40°	0.42
<b>35.-</b>	0.6 - 60 rpm - 50°	0.31
<b>36.-</b>	0.6 - 60 rpm - 60°	0.18