

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

**DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL  
Y COEFICIENTES DE  
TRANSFERENCIA DE MASA**

METODO QUIMICO UTILIZANDO UN SOLO SISTEMA GAS - LIQUIDO  
COMPROBADO EN UNA CELDA AGITADA Y APLICADA A UN PLATO  
PERFORADO CON VERTEDEROS.

P O R

*G. B. BARTHLOMAI*

TESIS PRESENTADA PARA OPTAR AL TITULO DE

DOCTOR EN CIENCIAS QUIMICAS

(ORIENTACION TECNOLOGICA)

Universidad Nacional de La Plata

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

---

DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES

DE TRANSFERENCIA DE MASA

Método químico utilizando un solo sistema gas-líquido  
comprobado en una celda agitada y aplicada a un plato  
perforado con vertederos.

por

G.B. BARTHOLOMAI

Tesis presentada para optar el título de

DOCTOR EN CIENCIAS QUIMICAS

(Orientación Tecnológica)

1971

Director de Tesis:

Dr. Jorge J. Ronco.

A mi madre.

A mi esposa.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a los Dres Robert G. Gardner y William Hamilton, por su constante guía y valiosa colaboración prestada durante el tiempo que estuvieron contratados por la Universidad de Buenos Aires.

Este trabajo se realizó en el Departamento de Industrias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, a la que agradezco todas las facilidades acordadas para su realización.-

INDICE

<u>Sección</u>		<u>Página</u>
	<u>PRIMERA PARTE</u>	
1	INTRODUCCION	
1.1	La determinación de area interfacial y coeficientes de transferencia de masa.....	4
1.2	Planteamiento de la investigación.....	4-5
2	TEORIA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA CON REACCION QUIMICA.....	
2.1	Introducción.....	6
2.2	Resultados y conclusiones.....	6-7
3	DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	8
3.1	Método propuesto utilizando un solo sistema gas-líquido.....	8-10
3.2	Cálculo de los datos físico químicos.....	10-11
4	PARTE EXPERIMENTAL.....	12
4.1	Equipo utilizado para comprobar el método propuesto.....	12
4.2	Medición y rango de variación de las variables de operación.....	12-13
4.3	Procedimiento experimental.....	14
4.3.1	Método de medida de la velocidad de absorción.....	14
4.3.2	Cálculo del error experimental.....	14-16
4.4.	Resultados obtenidos.....	17
4.4.1.	Variación de la velocidad de absorción con la concentración y agitación de la solución.....	17
4.4.2	Determinación de area interfacial y coeficiente de transferencia $k_L$ .....	17 18
4.4.3	Determinación del coeficiente de transferencia $k_G$ .....	18-19
4.5	Conclusiones.....	21

Sección

Página

SEGUNDA PARTE

5	CARACTERISTICAS BASICAS Y APLICACION DEL METODO PROPUESTO, A LA DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA, A UN PLATO PERFORADO CON VERTEDEROS	
5.1	Introducción.....	22
5.2	Comparación de los diferentes platos usados en transferencia de masa.....	22
5.2.1	El Plato de burbujeo.....	22-23
5.2.2	Plato perforado.....	23
5.2.3	Plato con tapa flotante.....	23-24
5.2.4	Platos de doble corriente.....	24
5.3	Conclusiones.....	24
6.	FACTORES QUE AFECTAN AL DISEÑO DE UN PLATO PERFORADO	
6.1	Diseño mecánico.....	25-26
6.2	Condiciones de operación.....	26-27
6.3	Propiedades del sistema.....	27
6.4	Factores hidráulicos y difusionales.....	27-28
6.5	Conclusiones.....	28
7.	PARTE EXPERIMENTAL	
7.1	Introducción.....	29
7.2	Equipo utilizado.....	29-32
7.3	Medición y rango de variación de las variables de operación.....	32-33
7.4	Procedimiento experimental.....	<b>34</b>
7.4.1	Determinación de las características hidráulicas.....	<b>34-36</b>
7.4.2	Conclusiones de las pruebas hidráulicas.....	36-37
7.5	Determinación de area interfacial y coeficientes de transferencia de masa.....	38
7.5.1	Introducción.....	38
7.5.2	Procedimiento experimental.....	39-40
7.5.3	Resultados obtenidos.....	41
7.5.3.1.	Determinación de la variación de la velocidad de absorción con la concentración de la solución.....	41

<u>Sección</u>	<u>Página</u>
7.5 3.2. Determinación de área interfacial y coeficiente de transferencia $k_L$ , considerando resistencia en la fase gaseosa..	41
7.5.3.3. Determinación del coeficiente de transferencia $k_G$ considerando resistencia en la fase líquida.....	42
7.5.3.4. Determinación de $a$ y $k_L$ sin considerar la resistencia de la fase gaseosa.....	42-43
7.5.3.5. Determinación de área interfacial despreciando $k_G$ y $k_L$ ....	43
7.6 CARACTERISTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE $a$ Y $k_L$	
7.6.1. Variación del área interfacial con la concentración de la solución.....	44
7.6.2. Variación del coeficiente de transferencia $k_L$ con la concentración de la solución.....	44-45
7.6.3. Conclusiones.....	46
8. CONCLUSIONES GENERALES.....	47
9. NOMENCLATURA.....	50
10. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	48-49
11. TABLAS.....	51-80

1.

## INTRODUCCION

1.1

### LA DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA

Para la determinación de estos parámetros es frecuente utilizar la absorción con simultánea reacción química; en el estudio de la que se parte de la ya conocida absorción física complicada ahora por la inclusión de la reacción química.

Varias teorías o modelos se han propuesto para estudiar el proceso de absorción de un gas, especialmente el modelo de la película y varios modelos de renovación de superficie, que se pueden usar para predecir la velocidad de absorción con y sin reacción química.

El tipo de sistema más usado, es la disolución de un gas en un líquido que contiene un reactivo con el que reacciona irreversiblemente, en la fase líquida siendo el reactivo no volátil.

En los casos en que el coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida  $k_L$  y el coeficiente de transferencia de masa en la fase gas ( $k_G$ ) no se pueden despreciar es común primero determinar  $k_{Ga}$  en un sistema donde prácticamente todo el control está en la fase gaseosa y entonces vincular este  $k_{Ga}$  obtenido en las mismas condiciones físicas, con el sistema requerido por la siguiente relación:

$$k_{Ga} \propto D_G^x$$

con el valor calculado de  $k_{Ga}$  ahora se puede resolver la ecuación general de transferencia de masa para obtener  $a$  y  $k_L$ .

1.2

### Planteamiento de la Investigación

El presente trabajo se propone a diferencia del método que utiliza dos sistemas como vimos en la parte anterior, encontrar un método que permita el cálculo de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$  para el caso donde  $k_L$  y  $k_G$  no se pueden despreciar (o no se conoce si se puede despreciar), haciendo una serie de experiencias en un solo sistema. Luego, comprobar este método en un equipo adecuado y para un sistema con control en las dos fases y que por lo tanto es importante conocer los valores de  $k_L$  y  $k_G$  para la determinación de  $a$ .

Además aplicar este método a la determinación de área interfacial y coeficientes de transferencia de masa a un plato perforado con vertederos, dado que se han hecho muchas investigaciones en torres rellenas y platos de burbujeo, pero muy poco son los datos publicados sobre platos perforados y menos aún para aquellos que tienen vertederos.

2.

TEORIA DE TRANSFERENCIA DE MASA CON REACCION QUIMICA

2.1.

INTRODUCCION

En las operaciones de transferencia de materia es frecuente encontrar que están acompañadas de una reacción química. La influencia de la reacción está dada por el factor de reacción que expresa el aumento de la velocidad de transferencia con respecto a la transferencia en ausencia de reacción. Es decir el factor de reacción ( $\phi$ ) señala la relación entre el coeficiente de transferencia de materia con reacción química  $k_L'$  y el coeficiente de transferencia sin reacción  $k_L$ , para un sistema de iguales condiciones hidrodinámicas.

Estos coeficientes podrán ser instantáneos o medios, y el factor de reacción correspondiente será instantáneo ( $\phi$ ) ó medio ( $\bar{\phi}$ ) y están respectivamente dados por las siguientes relaciones:

$$\phi = \frac{k_L'}{k_L} \quad \text{ec (1)} \quad \text{y} \quad \bar{\phi} = \frac{\bar{k}_L'}{\bar{k}_L} \quad \text{ec (2)}$$

Se han propuesto soluciones analíticas (1,2,3,6,7,8,11,14,15,17) y numéricas (4,5) para expresar el factor de reacción en sistemas de geometría simple, para diferentes tipos de reacción, de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas y al modo de transporte de las especies hacia la zona de reacción

2.2

Resultados y Conclusiones

1°.- En la mayoría de las soluciones teóricas que se conocen, el factor de reacción, para el caso de reacciones de primer orden, depende de un solo parámetro, y se puede ver que todas estas soluciones, admiten los siguientes casos límites:

$$\bar{\phi} = 1 \quad \text{cuando } \bar{\gamma} \text{ tiende a } 0$$

$$\bar{\phi} = \bar{\gamma} \quad \text{cuando } \bar{\gamma} \text{ aumenta indefinidamente}$$

El parámetro  $\bar{\gamma}$  tiene por expresión general:

$$\bar{\gamma} = (k_I D_A)^{1/2} / \bar{k}_L \quad \text{(ec (3)) si la reacción es de primer orden}$$

$$\text{y } \bar{\gamma} = (k_{II} D_A C_{BL})^{1/2} / \bar{k}_L \quad \text{ec (4) si la reacción es de pseudo primer orden}$$

Es decir, los dos casos límites corresponden a las reacciones infinitamente lentas (control difusional) y a las reacciones infinitamente rápidas (control cinético). El parámetro  $\bar{\gamma}$  es pues el factor de reacción correspondiente a la reacción de primer orden o pseudo primer orden infinitamente rápida.

Danckwerts y Kennedy (19) han comparado las soluciones teóricas (1,3,14) para algunos valores de  $\bar{\gamma}$ , sus resultados indican una diferencia relativa inferior a un 10%.

Posteriormente Ronco y Couret (20) hicieron la comparación de la mayoría de las soluciones conocidas, eligiendo la solución de Hatta (1) como solución de referencia, y calculando la desviación relativa:  $\frac{\bar{\phi} - \phi_H}{\phi_H}$

De esta manera ellos encuentran que la mayoría de las soluciones analíticas presenta en relación a (1) una desviación máxima (entre valores de 1,5 y 2,0) que también en general es menor de un 10% en valor absoluto.

2° - Para el caso de reacciones de segundo orden, las soluciones conocidas admiten también como límites comunes:

$\bar{\phi} = 1$  correspondiente a las reacciones muy lentas

$\bar{\phi} = \bar{\phi}_s$  correspondiente a las reacciones infinitamente rápidas.

Para el tipo de reacciones que estudiaron Ronco y Couret (20) han determinado que la desviación de las diferentes expresiones para un mismo valor de  $\bar{\gamma}$  con relación a (2) que corresponde al modelo más simple, y calculando la desviación relativa:

$$\frac{\bar{\phi} - \bar{\phi}_{V.K.}}{\bar{\phi}_{V.K.}}$$

observaron que la desviación máxima es pequeña e inferior a 10%.

La razón de existir una desviación pequeña entre los diferentes modelos, nos llevó a seleccionar uno de ellos que permitiera una solución sencilla y rápida para la determinación de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$ , parámetros fundamentales para predecir la velocidad de absorción, necesaria para el diseño de equipos

3.

DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA

3.1.

Método propuesto utilizando un solo sistema gas-líquido.

Para el cálculo de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$  con un solo sistema, por conveniencia adoptaremos el modelo de la penetración con renovación aleatoria de la superficie propuesto por Danckwerts, aplicado al sistema  $CO_2$  en aire, NaOH disuelto en agua.

Este es el caso de una reacción irreversible de segundo orden de velocidad de reacción no muy veloz, al que impondremos la restricción de mantener la concentración de NaOH en la interfase prácticamente igual a la del seno de la solución, con el objeto de que la reacción a considerar sea de pseudo primer orden; para lo que se debe cumplir que:

$$(k_{II} D C_o)^{1/2} \ll \bar{k}_L (1 + C_o / H P y^*) \quad \text{ec (5)}$$

En estas condiciones según el modelo de Danckwerts el factor de reacción medio  $\bar{\phi}$  tiene por expresión:

$$\bar{\phi} = (1 + \bar{\gamma}^2)^{1/2} \quad \text{ec (6)}$$

Solución aplicable a todos los sistemas que cumplen con el modelo de la renovación de Danckwerts.

Donde:  $\bar{\gamma} = (k_{II} D C_o)^{1/2} / \bar{k}_L \quad \text{ec (7)}$

es decir:  $\bar{\phi} = \frac{R}{k_L C^*} = (\bar{k}_L^2 + k_{II} D C_o)^{1/2} / \bar{k}_L \quad \text{ec (8)}$

donde  $C^* = y^* H P \quad \text{ec (9)}$

y  $y^*$  = fracción molar de  $CO_2$  en la interfase.

La velocidad de absorción estará dada por:

$$R.A = A.C^* (\bar{k}_L^2 + k_{II} D C_o)^{1/2} \quad \text{ec (10)}$$

donde:  $A$  = area interfacial efectiva a la transferencia.

La ecuación de transferencia de materia con reacción química considerando el efecto de la resistencia de la fase gaseosa será:

$$\frac{y^* AP}{RA} = \frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{H (\bar{k}_L^2 + k_{II} D C_o)^{1/2}} \quad \text{ec (11)}$$

$$y^* HP / RA = ?$$

Está demostrado que la ecuación (11) que da la suma de resistencias en serie es aplicable sin error al modelo de la renovación de Danckwerts en el trabajo de Szekely (13).

Para la determinación de A,  $k_L$  y  $k_G$  la ecuación (11) se puede resolver de las siguientes maneras:

a) Cuando  $1/k_G \ll 1/H (k_L D C_o + \bar{k}_L^2)^{1/2}$  ec (12) es decir la resistencia de la fase gaseosa es despreciable la ecuación (11) se reduce a:

$$(RA / H P y^*)^2 = A^2 (k_L D C_o) + (A \bar{k}_L)^2 \quad \text{ec. (13)}$$

y los valores de A y  $\bar{k}_L$  pueden obtenerse de la recta que se obtiene al graficar  $k_L D C_o$  contra  $(RA / H P y^*)^2$

b) Cuando  $k_L D C_o \gg 5 \bar{k}_L^2$  ec (14) la resistencia de la fase líquida se puede despreciar y la ecuación (11) toma la forma:

$$HP y^* / RA = \frac{1}{A} (1 / \sqrt{k_L D C_o}) + H / k_G A \quad \text{ec (15)}$$

Graficando  $y^* HP / RA$  contra  $1 / (k_L D C_o)^{1/2}$  tenemos una línea recta de donde podemos obtener A y  $k_G$ .

c) Cuando se presenta el caso en que  $k_L$  y  $k_G$  es despreciable la ecuación (11) se reduce a:

$$RA / HP y^* = A (k_L D C_o)^{1/2} \quad \text{ec(16)}$$

y graficando  $RA / HP y^*$  contra  $k_L D C_o$  obtenemos A

d) En el caso en que  $\bar{k}_L$  y  $k_G$  no se pueden despreciar es común medir primero  $k_G A$  en un sistema donde practicamente todo el control está en la fase gaseosa trabajando en las mismas condiciones físicas que con el sistema requerido, y vincular esta  $k_G A$  por la siguiente relación

$$k_G A \propto D_G^x$$

Con este valor calculado de  $k_G A$  se puede resolver graficamente la ecuación (11) y obtener A y  $\bar{k}_L$ .

#### Método propuesto

El siguiente análisis muestra que, para el caso donde  $\bar{k}_L$  y  $k_G$  no se pueden despreciar (o cuando no se sabe si se puede despreciar) como pueden calcularse estos coeficientes simultáneamente junto con A haciendo una serie de experiencias en un solo y único sistema, en condiciones donde todas

las cantidades de la ecuación (11) excepto (RA) y  $(k_{II} D C_o)$  se mantienen constante.

Por diferenciación de la ecuación (11) donde consideramos  $k_G$  independiente de  $(k_{II} D C_o)$  (25,49) obtenemos:

$$\frac{d (k_{II} D C_o)}{d (R A)} = \frac{2 y A H P}{(R A)^2} (k_{II} D C_o + k_L^{-2})^{1.5} \quad \text{ec. (17)}$$

la que puede ordenarse y escribir:

$$\left[ \frac{(R A)^2 d (k_{II} D C_o)}{2 y^* H P d (R A)} \right]^{2/3} = A^{2/3} (k_{II} D C_o) + A^{2/3} k_L^{-2} \quad \text{ec. (18)}$$

Graficando el termino de la izquierda contra  $k_{II} D C_o$  obtenemos una linea recta de pendiente  $A^{2/3}$  y ordenada al origen  $A^{2/3} k_L^{-2}$ .

Reemplazando los valores obtenidos de A y  $k_L$  en la ecuación (11) y graficando  $y^* A P / (R A)$  contra  $1/H (k_{II} D C_o + k_L^{-2})^{1/2}$  obtendremos una recta de pendiente 1 (uno) y ordenada al origen  $1/k_G$ .

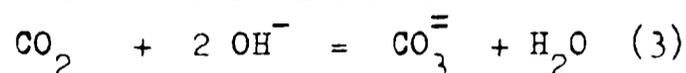
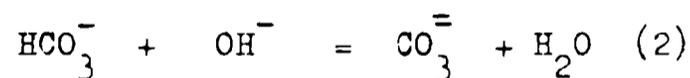
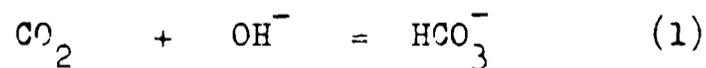
Este es el método que hemos propuesto y que se ha probado haciendo absorción de  $CO_2$  de una mezcla con aire en una solución de  $NaOH/CO_3Na_2$  en una celda agitada magneticamente.

3.2

### Cálculo de los datos físico-químicos

#### Cinética de la reacción

Para nuestro sistema, absorción de  $CO_2$  de una mezcla con aire en una solución de  $NaOH$ , la reacción es:

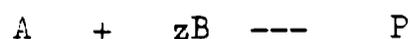


La reacción (1) es la etapa limitante siendo:

$$r = k_{II} [CO_2] [OH^-]$$

mientras que la reacción (2) es infinitamente rápida.

La reacción (3) que es la que interesa es del tipo:



La constante  $k_{II}$  se supuso (21) que varia linealmente con la fuerza iónica de la solución. De los datos publicados (21,22,23),  $k_{II}$  está dada por:

$$k = k_{II} = 10^6 (5.7 + 2.6 I) 10^{-2.815 (1/293 - 1/T)} \quad \text{ec. (19)}$$

donde: I es la fuerza iónica y está dada por:

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2$$

#### Solubilidad del gas en el líquido

La solubilidad del  $\text{CO}_2$  en agua pura está dada por:

$$\log H^o = \frac{1140}{T} - 5.30$$

donde las unidades de  $H^o$  son: l/gmol atm.

La solubilidad del  $\text{CO}_2$  en la solución real según lo proponen Van Krevelen y Hofftjzer (24) es la siguiente:

$$\log H = 1140/T - 8.3 - KsI \quad \text{ec. (20)}$$

donde  $Ks$  es una constante calculada empíricamente de la manera siguiente:

$$Ks = K_+ + K_- + K_g$$

donde  $K_+$ ,  $K_-$  y  $K_g$  es la contribución de los cationes, aniones y gas respectivamente

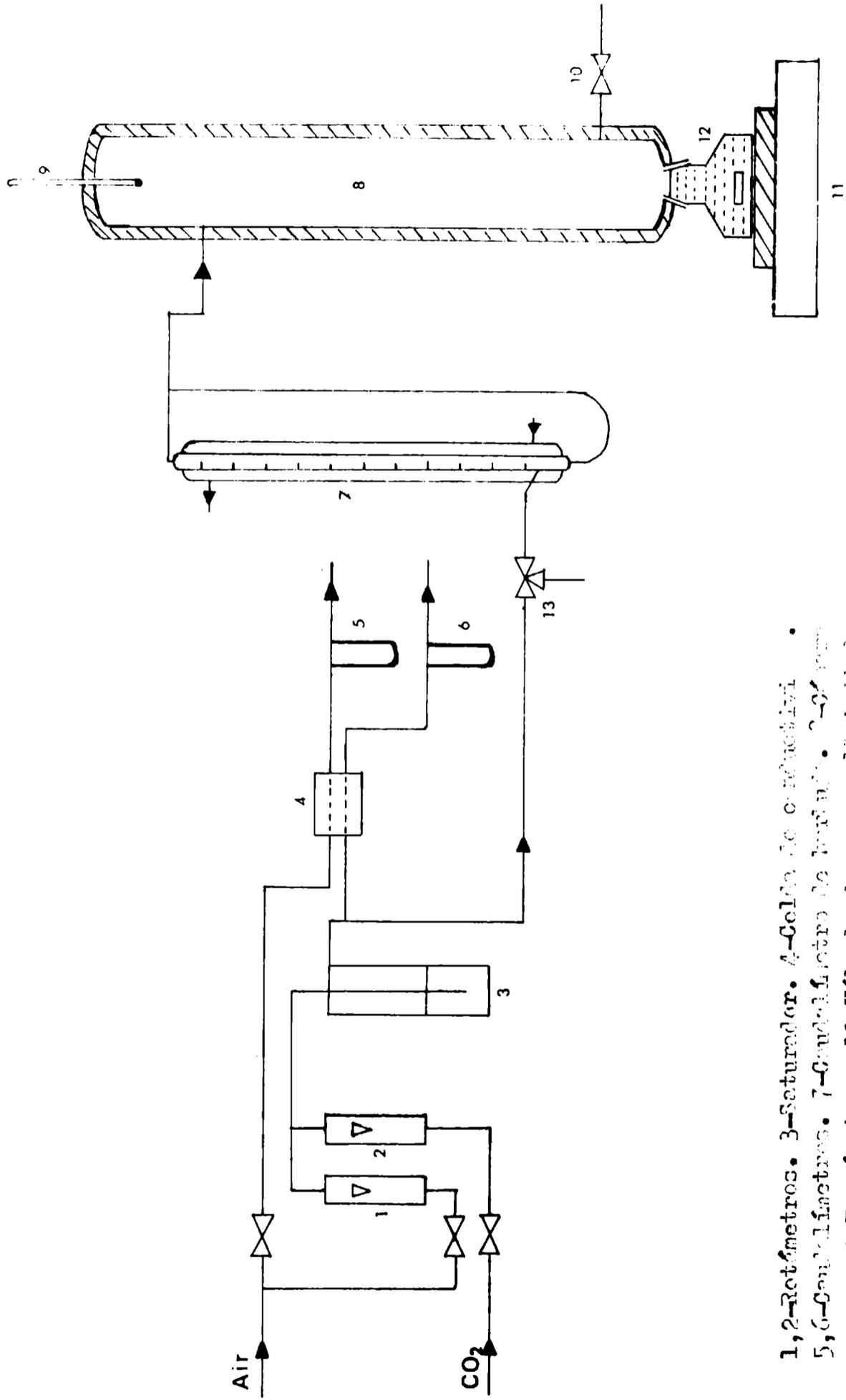
#### Difusividad en la fase gaseosa

La difusividad del  $\text{CO}_2$  en la solución fue calculada de la relación

$$D \mu / T = \text{cte}$$

usando los valores de Danckwerts y Sharma (21) para la difusividad en agua pura como base.

La viscosidad de la solución fue determinada experimentalmente utilizando un viscosímetro tipo Ostwald.-



1, 2—Rotímetros. 3—Saturador. 4—Celda de conductiviti .  
 5, 6—Condulímetros. 7—Condulímetro de buretas. 8—Termo-  
 metros. 9—Termómetro. 10—Válvula. 11—Bases de soporte  
 magnético. 12—Celda agitada. 13—Válvula de escape.

FIG. 1

4

## PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1

#### Equipo utilizado para comprobar el método propuesto

Se construyó un aparato cuyo diagrama básico se pueden ver en la figura (1) -

Las partes esenciales del mismo son: Un recipiente de vidrio ó cámara de gas de aproximadamente 6 lts. de capacidad (aislada termicamente con lana de vidrio y tela de amianto), colocada por encima de una celda de 250 cc. de capacidad agitada magneticamente a la que está unida por medio de una junta esmerilada.

Dentro de la cámara de gas se introduce la mezcla de  $\text{CO}_2$ -aire que se absorberá con reacción química en la solución de NaOH contenida en la celda.

La mezcla de  $\text{CO}_2$ -aire proviene de un cilindro de  $\text{CO}_2$  y otro de aire que tienen sus respectivos mano-reductores, que permiten ajustar el porcentaje de  $\text{CO}_2$  deseado. Se utilizaron un caudalímetro marca Fisher con rango 0-1 lts/min para medir aproximadamente el caudal de  $\text{CO}_2$  y otro caudalímetro marca Las-Kit con rango 0-6 lts/min para medir el caudal aproximado de aire.

La mezcla luego de saturada con agua se mide con exactitud con una celda de conductividad térmica que se calibra contra un analizador de gas de tipo Orsat. El caudal de mezcla y aire que alimentan la celda de conductividad se pueden regular mediante válvulas o llaves de vidrio y ser medidos por manómetros?

La mezcla de  $\text{CO}_2$  - aire se introduce a la cámara de gas a través de un caudalímetro de burbujas de 50 ml. (aislado termicamente mediante una camisa de agua), manteniendo abierta la llave de purga. El caudalímetro a su entrada tiene unallave de tres vias que permite su conexión con el sistema de alimentación de gas o con la atmósfera. Además tiene un reservorio con detergente que al ser levantado con suavidad coloca una burbuja en el tubo graduado, para permitir la medida de velocidad de absorción.

### 4.2.

#### Medición y rango de variación de las variables de operación

Las variables de operación son: agitación de la solución, tempera-

tura de gas y solución, porcentaje de  $\text{CO}_2$  en el gas y concentración de la solución

Agitación de la solución: el rango de trabajo fue el comprendido entre 1.500 y 2.000 r p.m mediciones realizadas con un Osciloscopio Phillips. Se utiliza un agitador magnético con dos tamaños de buzos. Además sobre la plataforma del agitador hay colocado un dispositivo que permite mantener la celda siempre en la misma posición, para reproducir exactamente las condiciones de agitación. Esto da la posibilidad de cambiar la velocidad de agitación o tamaño de buzo, lo que permite obtener diferentes valores de area interfacial o coeficientes de transferencia de masa de la fase líquida.

Temperatura del gas y solución: Con el objeto de simplificar el aparato se optó por trabajar a la temperatura ambiente de gas y solución, pero teniendo sumo cuidado de que estos no cambiaran durante una experiencia. Las temperaturas fueron medidas con termómetros de mercurio en vidrio graduados a el  $1/10^{\circ}\text{C}$ .

Porcentaje de  $\text{CO}_2$  en el gas: El rango de operación fue entre 4% y 9%, pero la mayoría de las experiencias se realizaron a 6% dado que en esta forma las determinaciones son mas exactas, primero por que demanda un tiempo suficientemente largo, asegurando un menor error de lectura, y segundo por que el cambio de composición de la mezcla es despreciable.

Concentración de la solución: La concentración de NaOH se varió entre 0,1 N y 2,0 N pero tomando la precaución de mantener la solubilidad (H) en un valor constante, por el agregado de una cantidad apropiada de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ .

4.3.

Procedimiento Experimental

4.3.1

Método de medida de la velocidad de absorción

Se conecta la cámara de gas con el sistema de alimentación de mezcla  $\text{CO}_2$  - aire, y se comienza la mayor parte de purga de la cámara. Luego se coloca la celda que contiene una cantidad exacta de solución de NaOH y se continúa purgando un par de minutos más, para tener la seguridad de que el gas contenido en la cámara es de la misma concentración que el medido en la celda de conductividad.

Se cierra la llave de purga y se conecta la entrada del caudalímetro con la atmósfera. Se pone una burbuja (levantando el reservorio de detergente) y se comienza la agitación de la solución. En este momento se comienza a tomar lecturas del tiempo de absorción de un mililitro de  $\text{CO}_2$  para comprobar que estos tiempos son constantes. En estas condiciones se toma nuevamente el tiempo que se tarda para absorber 10 ml. de  $\text{CO}_2$ , dato que se utiliza para calcular la velocidad de absorción, para las condiciones de temperatura de gas y solución existentes durante la experiencia.

La velocidad de absorción será:

$$RA = \frac{V T}{t T^0} 22.400 = \text{gmol} / \text{seg.}$$

donde

t = tiempo para absorber 10 ml.

V = volumen medido = 10 ml.

$T^0 = 273 \text{ } ^\circ\text{K}$

T = temperatura del gas

4.3.2.

Calculo del error experimental

Para determinar el error del método empleado, se realizaron diez (10) corridas en idénticas condiciones experimentales, y se calcularon las velocidades de absorción. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

<u>Corrida N°</u>	<u>Velocidad de Absorción, RA</u>
1	1,795
2	1,825
3	1,890
4	1,780
5	1,845
6	1,890
7	1,860
8	1,910
9	1,875
10	1,890

Ordenando estos valores en una serie **decreciente**, tenemos:

<u>R A</u>
1,910
1,890
1,890
1,890
1,875
1,860
1,845
1,825
1,795
1,780

\_\_\_\_\_ Mediana

El rango de la serie es

$$1,910 - 1,780 = 0,130$$

La mediana es

$$\frac{1,875 + 1,860}{2} = 1,867$$

La media aritmética ( $\bar{X}$ ) resulta

$$\bar{X} = 1,856$$

La casi coincidencia de ambas medidas de posición corresponde a la distribución según la curva normal de errores.

La desviación standard (s) de la serie es

$$s = 0,0416$$

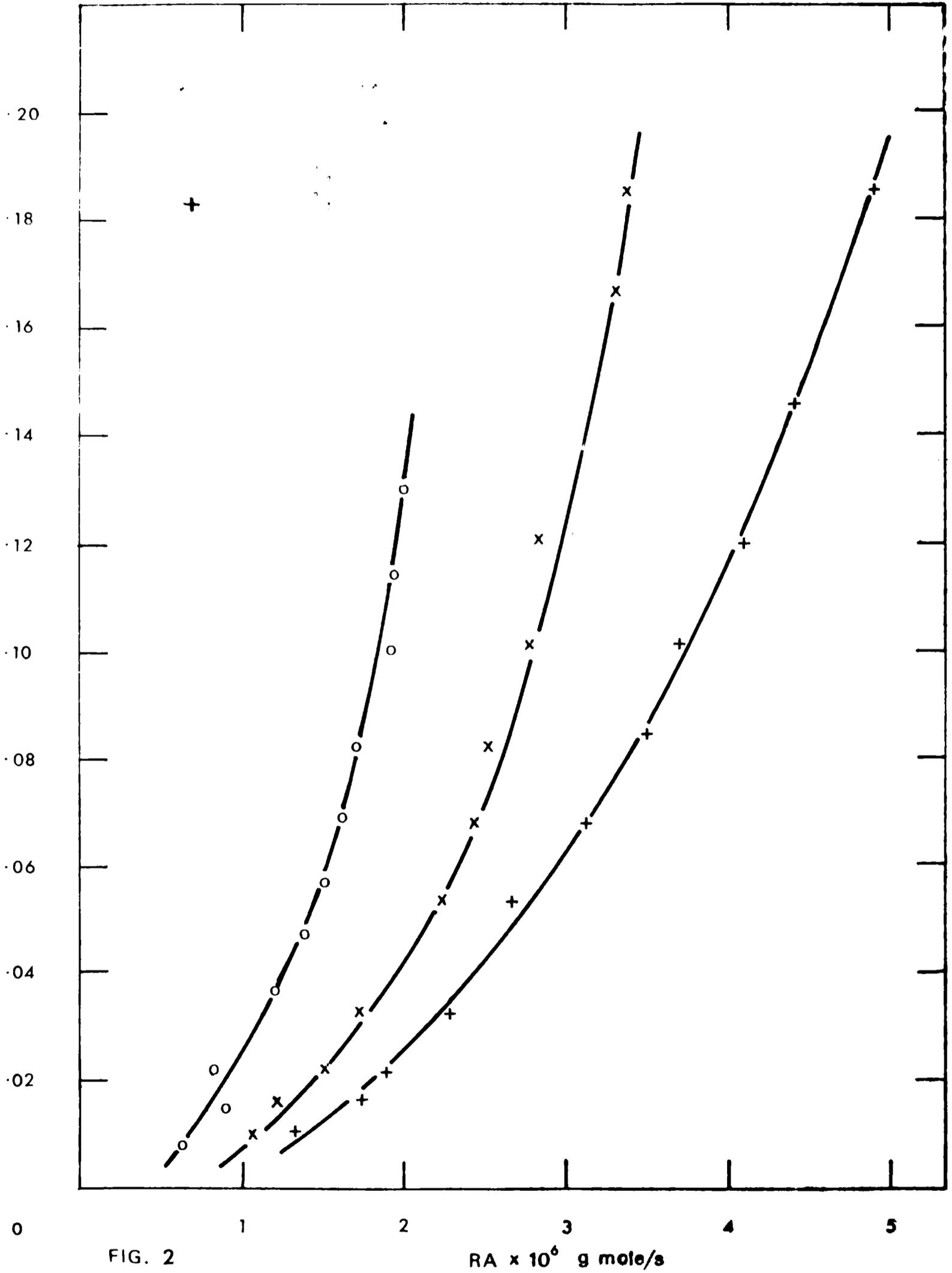
De acuerdo con las propiedades de la curva normal, hay 95% de probabilidad de que cualquier valor medido oscile entre

$$\bar{X} \pm 2s \text{ o sea, entre } \underline{1,9792} \text{ y } \underline{1,7728}$$

El error de nuestras mediciones será, por lo tanto, con un 95% de probabilidad:

$$\sigma (\%) = \frac{0,0416 \times 2}{1,856} \times 100 = 4,48 \%$$

$$\begin{array}{r} 1,856 \\ + 0,083 \\ \hline 1,939? \end{array}$$



4.4.

Resultados Obtenidos

4.4.1

Determinación de la variación de la velocidad de absorción con la concentración y agitación de la solución

La Figura (2) muestra las curvas que se obtienen al graficar RA contra  $(k_{II} D C_o)$ . Cada curva representa una serie de experiencias realizadas a la misma velocidad de agitación de la solución. Para mayor claridad en esta figura solo se muestran experiencias a tres velocidades distintas con el mismo buzo de agitación. Como se puede ver en las Tablas de resultados, la temperatura tanto del gas como de la solución fue prácticamente igual para todas las experiencias. Por otro lado todas las experiencias mostradas en la Figura (2) se realizaron con una mezcla de gas que contiene 6,0 % de  $CO_2$ . La solubilidad del  $CO_2$  en la solución se mantuvo constante por el agregado de la cantidad apropiada de  $CO_3Na_2$  a las soluciones de NaOH.-

4.4.2

Determinación del area interfacial y coeficiente de transferencia  $k_L$

a) Sin considerar la resistencia de la fase gaseosa:

Según el modelo de Danckwerts (14,21,25) la ecuación de transferencia de masa con reacción química, considerando el efecto de las resistencias en la fase gas y líquido, es:

$$\frac{yAP}{RA} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{H (kDC_o + k_L^2)^{1/2}} \quad \text{ec. (21)}$$

si presuponemos que la resistencia de la fase gaseosa es despreciable, es decir que:

$$1/k_G \ll 1/H (kDC_o + k_L^2)^{1/2} \quad \text{ec. (21a)}$$

entonces la ecuación (21) se reduce a:

$$(RA/HP_y)^2 = A^2 (k D C_o) + (A k_L)^2 \quad \text{ec. (22)}$$

y representando  $(RA/yPH)^2$  contra  $(k_{II} D C_o)$  se obtendrá A y  $k_L$ .

Este es el método que propone Danckwerts y Sharma (21) y que muestra para sus experiencias Pasiuk-Bronikowska (26).

La Figura (3) muestra la representación de esta ecuación (22) para los datos que se obtuvieron para distintas velocidades de agitación de la solución.

Se puede notar que son evidentes líneas curvas que nos hacen denotar la existencia de resistencia en la fase gaseosa.

Es decir, que estamos en un caso típico donde no es posible despre-  
ciar la resistencia de la fase gaseosa para el calculo de  $k_L$  y de A.

Considerando la resistencia de la fase gaseosa

En la sección anterior, vimos como por diferenciación de la ecuación (11) se puede obtener:

$$\left[ \frac{(RA)^2 d(kDC_o)}{2 \text{ y HP d}(RA)} \right]^{2/3} = A^{2/3} (kDC_o) + A^{2/3} k_L^2 \quad \text{ec. (23)}$$

que incluye implícitamente la resistencia de la fase gaseosa.

Los valores de  $d(kDC_o)/d(RA)$  que figuran en el término de la izquierda de la ecuación, se determinaron de los resultados representados en la figura (2), donde tenemos RA contra  $k D C_o$ .

Representando el término de la izquierda de la ecuación (23) contra  $kDC_o$  como se muestra en la figura (4) se puede obtener A y  $k_L$ .

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. (5). En ella se puede ver como la influencia de la velocidad de agitación que crea un vórtice en la superficie de la solución, hace crecer el área interfacial a medida que la velocidad es mayor. Del mismo modo se puede observar el efecto que tiene la agitación de la solución sobre la resistencia de la fase líquida.

Los valores de A fueron además medidos como lo hace Astarita (10), es decir considerando que el vórtice tiene la forma de un cono. Esta forma de medida dió en todos los casos un valor 7 % mayor que el calculado por el método propuesto con reacción química.

Los valores de  $k_L$  obtenidos muestran que la condición ec. (5) fue satisfecha en cada caso, y que, por lo tanto, se trabajó en condiciones de seudo primer orden.

4.4.3

Determinación del coeficiente de transferencia  $k_G$

Considerando el efecto de la resistencia de fase líquida

Utilizando los valores obtenidos de A y  $k_L$ , tal como se determinaron en la sección anterior, estos se pueden introducir en la ecuación de transferencia (11) y de esta manera obtener  $k_G$ .

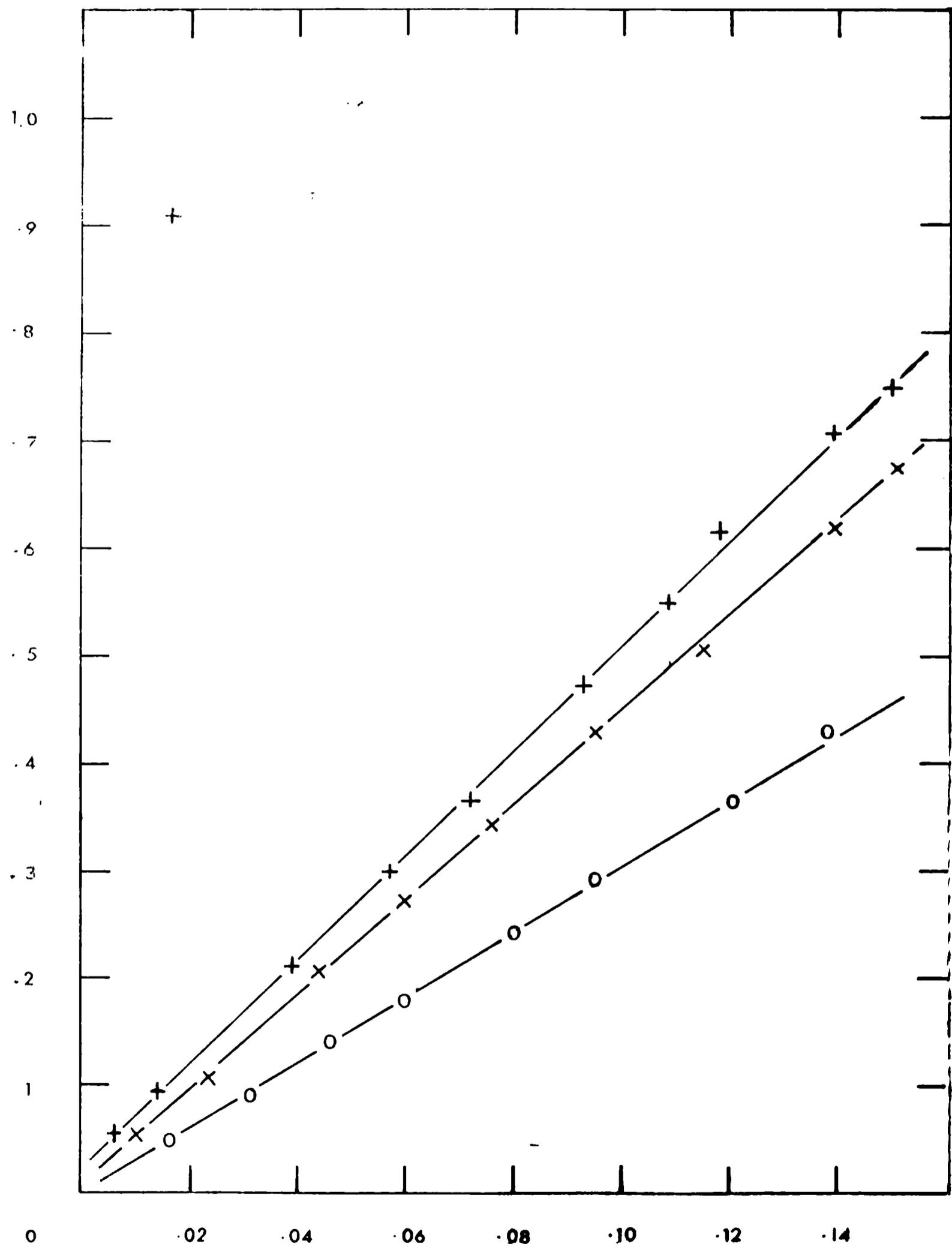
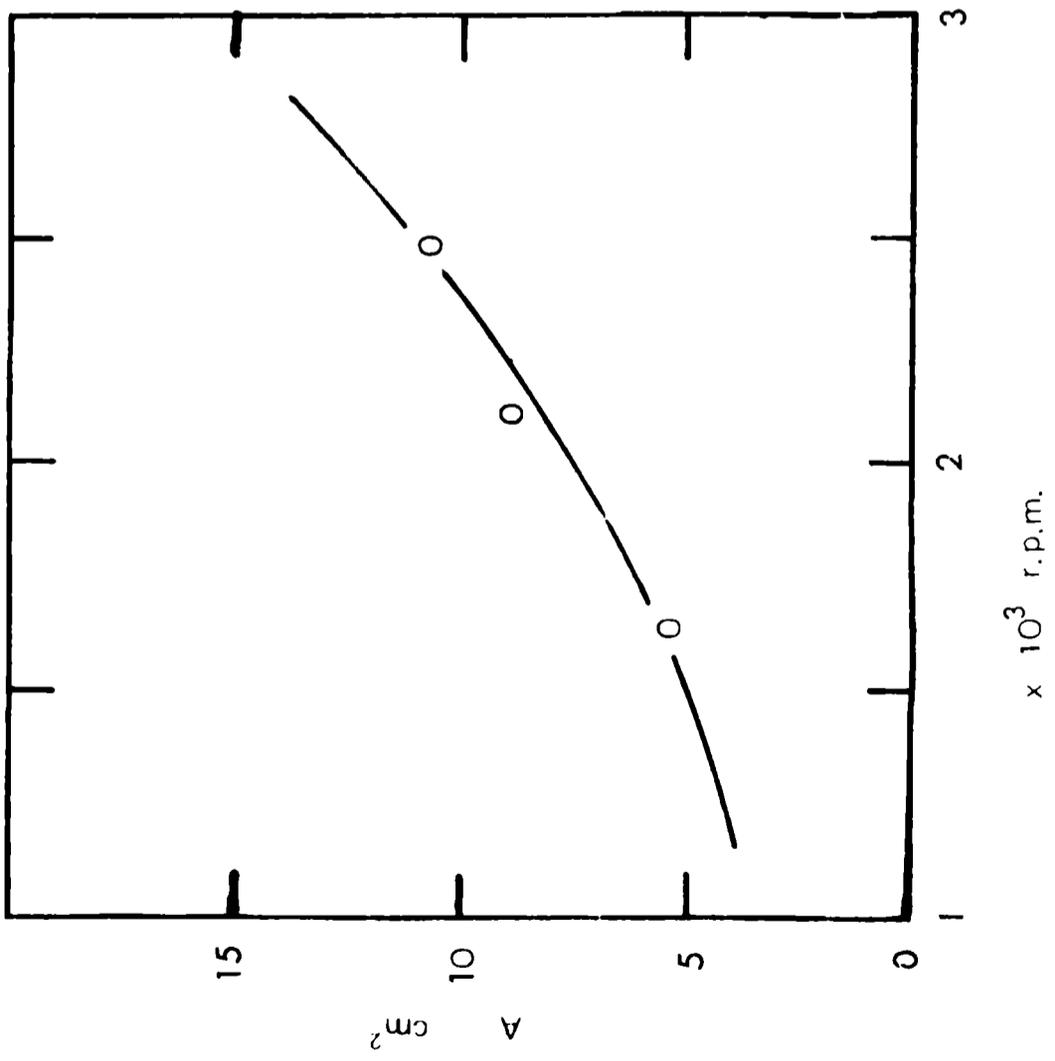
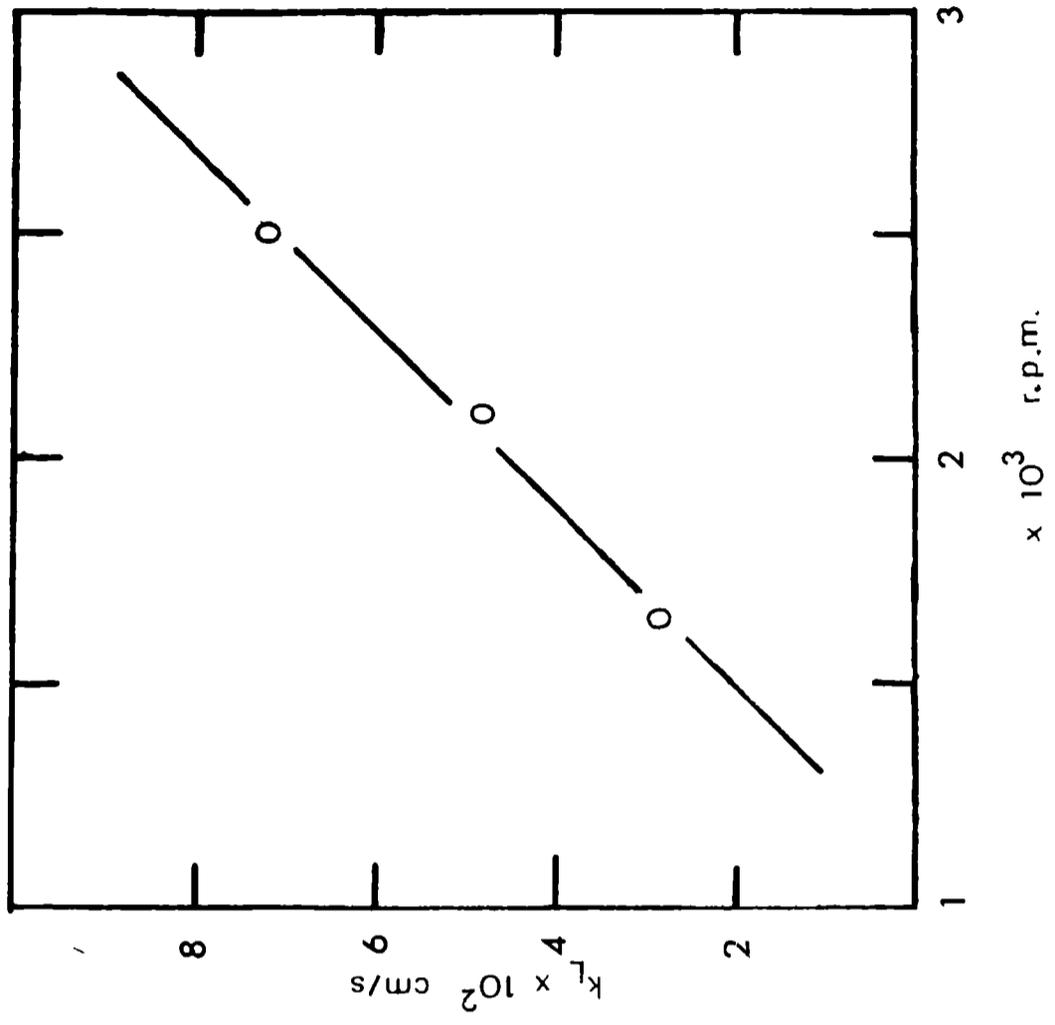


FIG. 4

k DC, cm²/s²

FIG. 5



En la figura (5) se puede ver la representación de la ecuación (11) que nos determina los valores de  $k_G$ .

Se observó que los valores de  $k_G$  crecen con el aumento de agitación de la solución, posiblemente a raíz de que esta produce agitación en la fase gaseosa.

Importante: El hecho de que la representación de las ecuaciones (23,11) que se muestran en las figuras (4,6) sean líneas rectas y que la pendiente que se obtiene al representar la ecuación (11) es 1,0, indica que  $A$ ,  $k_L$  y  $k_G$  se pueden obtener por esta técnica.

Sin considerar el efecto de la resistencia de la fase líquida

Es factible presuponer que la resistencia de la fase líquida es despreciable, en cuyo caso  $k D C_0 \gg k_L$ .

En estas condiciones la ecuación (11) se reduce a:

$$\frac{H P_y}{R A} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{\sqrt{k D C_0}} \right) + \frac{H}{k_G A} \quad \text{ec. (24).-}$$

y representando  $H P_y/R A$  contra  $1/\sqrt{k D C_0}$  se puede obtener  $A$  y  $k_G$ .

Los resultados que se obtienen de esta manera se pueden ver en la figura (7) y en la tabla (I).-

Es notable como los valores de  $A$  y  $k_G$  que se obtienen al hacer este tipo de suposición, son muy diferentes a los que se obtienen al tener en cuenta la resistencia de la fase líquida.

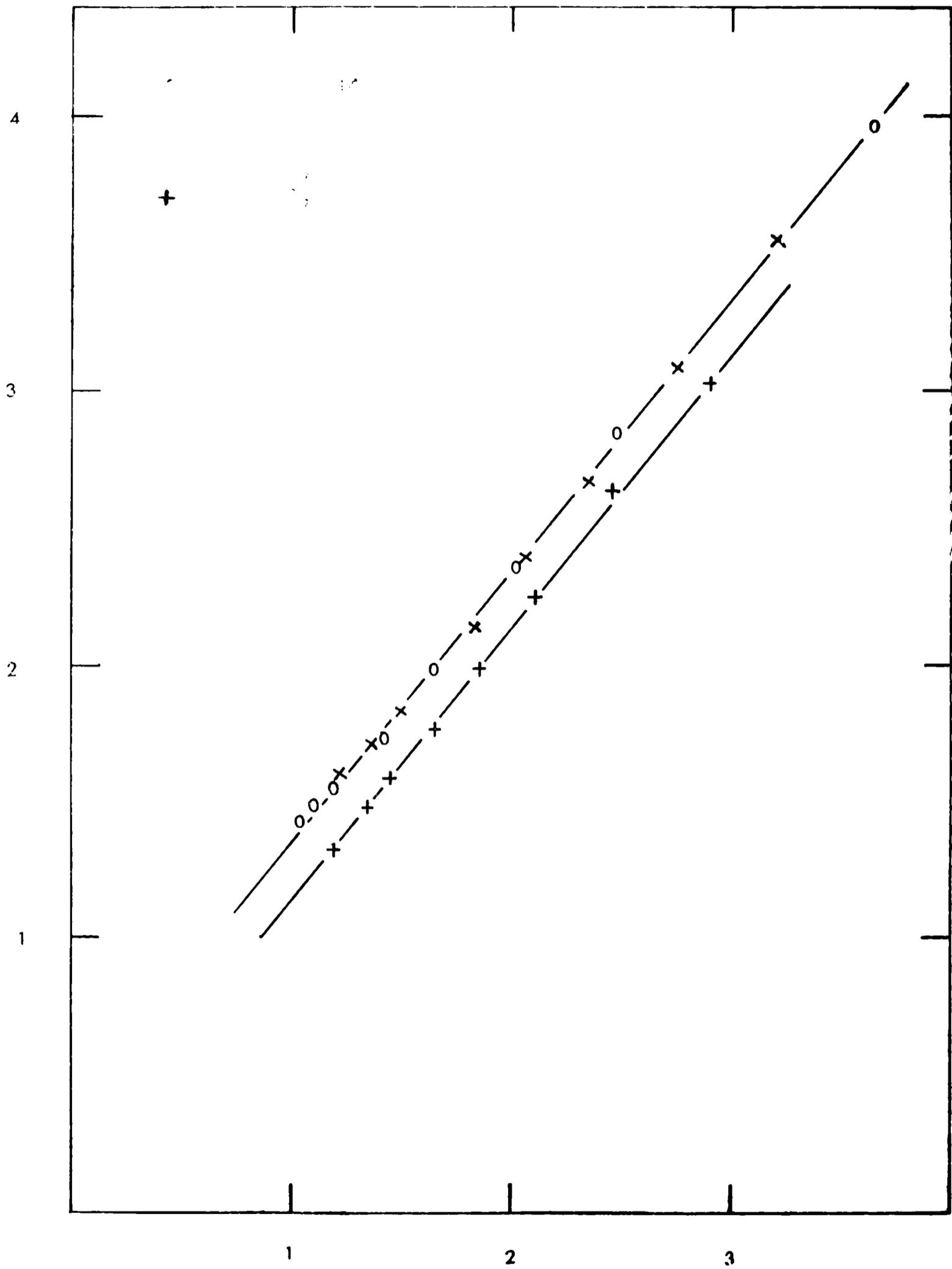


FIG. 6

$$1/H(kDC_0 + k_L^2)^{1/2} \times 10^3 \quad \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ atm/g mole}$$

TABLA I

Sim- bolo	Agit. relat	$\Lambda$ (1)	$k_L$ (1)	$k_G$ (1)	$\Lambda$ (2)	$k_G$ (2)
0	1,0	5,30	0,029	$3,1 \times 10^{-5}$	5,97	$1,66 \times 10^{-5}$
	1,0 <sup>x</sup>	7,15	0,026	2,0 "	7,60	1,43 "
<b>x</b>	1,3	9,15	0,048	3,1 "	9,70	1,78 "
	1,3	9,15	0,048	3,1 "	9,70	1,97 "
+	1,5	10,60	0,072	5,7 "	12,00	3,25 "

(1) utilizando la ec. (11).-

(2) utilizando la ec. (24).-

(x) se usó un agitador corto.-

4.5

### CONCLUSIONES

El propósito de esta parte del trabajo fue encontrar un método sencillo como es el de utilizar un solo y único sistema en un mismo equipo, que permita la determinación simultánea de  $A$ ,  $k_L$  y  $k_G$ , que tienen fundamental importancia para poder predecir la velocidad de absorción, que es primordial para el diseño de equipos industriales. Las conclusiones son las siguientes:

- 1) - Se comprueba que en un sistema donde es factible medir la velocidad de absorción ( $RA$ ) con el cambio de  $kDC_0$  manteniendo constante todos los demás términos de la ecuación (11) se puede determinar valores de  $(RA)/d(kDC_0)$  que se pueden utilizar en la ecuación (23) obteniéndose líneas rectas que permiten el cálculo de  $A$  y  $k_L$ .
- 2) - Se comprueba que estos valores de  $A$  y  $k_L$  determinada por la forma indicada son correctos, dado que introducidos en la ecuación de transferencia (11) nos da rectas de pendiente 1,0 y el correspondiente valor de  $k_G$ .

El método es de aplicabilidad general a cualquier equipo y de especial utilidad cuando no se conoce o se prevee encontrar resistencias apreciables a la transferencia en la fase **gaseosa**.

5

CARACTERISTICAS BASICAS Y APLICACION DEL METODO PROPUESTO, A LA DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA A UN PLATO PERFORADO CON VERTEDEROS

5.1

Introducción

Aunque las características básicas, y de transferencia de masa como  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$ , de torres rellenas y platos de burbujeo fueron objeto de muchas investigaciones (una extensa lista de referencias fue recientemente publicada por Sharma y Danckwerts (25) ), muy pocos son los datos publicados sobre platos perforados, y menos aún de aquellos que tienen vertederos.

Para resaltar la importancia que tiene éste último tipo de plato, objeto de nuestro estudio, haremos una comparación de los diferentes platos existentes y la aplicabilidad de cada uno de ellos.

5.2

Comparación de los diferentes platos usados en transferencia de masa

Aquí solo haremos un resumen de las principales características y una comparación de las propiedades más importantes que los distinguen.

5.2.1

El plato de burbujeo

Es la variedad comercial más usada en transferencia de masa, líquido vapor.

El diseño básico consiste en tapas circulares montadas sobre pequeños tubos verticales que atraviesan el piso del plato, a través de los cuales pueden ascender los vapores procedentes de los inferiores. Los bordes de las tapas son dentadas o con ranuras para permitir que las láminas de vapor que pasan a través de los tubos se puedan romper en burbujas. El líquido que llega hace de cierre a las campanas y pasa por todo el plato y luego llega a uno o más caños de salida por donde desborda hacia el inmediato inferior, manteniendo el nivel del líquido en este y no dejando que el vapor entre.

En los platos de más de 15 cm. de diámetro, los caños de desborde están ubicados alternativamente a uno y otro costado de los mismos para permitir que el líquido pueda cruzar completamente el plato y contactar con el vapor.

En platos de grandes dimensiones el flujo de líquido parte desde el centro hacia la periferia y viceversa.

## 5.2 2

### El plato perforado

Este tipo es mucho más simple que el plato de burbujeo ya que consiste en un simple plato horizontal con perforaciones. Este puede estar o no adaptado con caños de desborde o vertederos similares a los del plato de burbujeo y el flujo de líquido es semejante o el mismo, excepto que en este caso el flujo no es obstruido por ninguna tapa o campana.

El gas pasa a través de las perforaciones y toma contacto con el líquido, la velocidad del gas debe ser la suficiente como para prevenir que el líquido pase a través de las perforaciones. Esto significa que el plato debe operar dentro de ciertos límites en flujos de gas y líquido pero con la ventaja de poder hacerlo durante muchos años sin que tenga que recibir demasiada atención. Es decir, el campo de operación es estrecho y por ello su uso está limitado a las industrias que lo prefieren por su muy fácil limpieza.

Mayfield y colaboradores (27) presentaron un estudio sobre platos perforados que tuvo gran aceptación, dado que menciona la alta eficiencia, capacidad y bajo costo de este tipo de plato. Más tarde otros investigadores (28,29,30,31) sacaron muy amplias y favorables conclusiones de los estudios realizados en platos perforados.

El limitado rango de operación ha dejado de ser una desventaja dado que ahora se usan métodos de diseño mucho más exactos y el plato perforado ha comenzado a ser más usado que el de burbujeo.

## 5 2.3

### Plato con tapa flotante

El diseño de este tipo de plato introduce una modificación del pla

to perforado para que funcione en un rango más amplio de operación, reteniendo algunas ventajas del plato perforado sobre el de burbujeo, como por ejemplo pequeña pérdida de carga y económica construcción (32,33).

Consta de un plato perforado con agujeros de 2 a 5 cm. de diámetro y un área libre del 15 % aproximadamente

Las perforaciones están cubiertas por una cápsula de metal. La forma y tamaño usadas para el diseño de este tipo de platos, son calculadas en base a la velocidad necesaria del gas para levantar las cápsulas de metal y tener una velocidad constante a través de los orificios. Esto ha sido estudiado para los casos prácticos por Norman y Grocott (34). Este tipo de plato no tiene preponderantes ventajas para su uso, dado que debe operar entre límites muy convenientemente elegidos.

#### 5.2.4

##### Platos de doble corriente o sin vertederos

Estos platos pueden ser platos perforados con agujeros o con perforaciones extremadamente grandes o compuestas de barras paralelas de metal como el caso del plato de rejillas (35,36).

El líquido cae a través de las perforaciones por las cuales el gas también sube.

El rango de operación de este tipo de plato es más pequeño que el plato perforado, como así también la eficiencia, pero la pérdida de carga es más baja.

#### 5.3

##### Conclusiones

La mayor parte de los investigadores están de acuerdo de que el plato perforado es el más apropiado para la mayoría de los usos.

Es por motivos muy especiales y para fines específicamente determinados que se usan otros tipos de platos. Por ejemplo, los platos a válvulas cuando se desea operar en un rango muy amplio de condiciones o el tipo de plato a rejillas para el caso que se opera con alto vacío.

6

## FACTORES QUE AFECTAN AL DISEÑO DE UN PLATO PERFORADO

Los factores que más se deben tener en cuenta para el diseño de un plato son aquellos vinculados con la eficiencia del mismo

Estos pueden ser divididos en los siguientes grupos:

- a) Diseño mecánico del plato. Por ejemplo: área libre, altura de los tabiques de nivel, diseño de los vertederos.
- b) Condiciones de operación. Ejemplo: Flujo del gas y del líquido, temperatura y presión.
- c) Propiedades del sistema. Ejemplo: Densidad, viscosidad del gas y del líquido.
- d) Factores hidráulicos y difusionales. Ejemplo: area interfacial, velocidad de transferencia de masa.

Como no es posible describir en detalle todo lo realizado dentro de estos tópicos, aquí se ha resumido el efecto de las variables más importantes.

6 1

### Diseño mecánico

#### Area libre

La mayoría de las publicaciones cuando tocan el efecto de esta variable difieren notablemente. Por ejemplo, Ellis y Moyade (37) dicen que hay un incremento de la eficiencia del plato cuando el área crece, por el contrario English y Van Winkle (38) dicen que hay una disminución de la eficiencia

Esto puede ser, dado que si el diámetro de las perforaciones es pequeño da una gran eficiencia pero a costa de una gran pérdida de carga. Porque además, la eficiencia crece mientras crezca el número de perforaciones, pero esto es válido hasta un valor máximo por encima del cual la eficiencia disminuye.

El valor de área libre que se recomienda usualmente es de 10 % con perforaciones entre 1/8 y 3/8 de pulgada, con espaciamiento triangular equilátero.

### Altura de los tabiques de nivel

La altura de los tabiques causa un incremento del líquido retenido en el plato, con lo que se puede fundamentar la causa del aumento de eficiencia. Esto lo sostiene la mayoría de los investigadores, incluyendo a Ellis y Moyade (37), English y Van Winkler (38), y otros (39).

Por otro lado, se debe tener en cuenta que al aumentar la altura de los tabiques de nivel esto causa un aumento de la pérdida de carga y por encima de un cierto valor el incremento de eficiencia puede no ser compensado económicamente por el aumento de pérdida de carga.

### Diseño de tubos de descarga o vertederos

Es muy necesario al hacer el diseño de los vertederos el asegurar que sean capaz de permitir el flujo de líquido al plato siguiente y de impedir de que el gas suba por el mismo.

6 2

### Condiciones de operación

#### Flujo de gas

Un aumento del flujo de gas causa una gran turbulencia en el plato y se puede fundamentar que ambos no traen como consecuencia una disminución de la eficiencia del plato (39,40). Se debe tener presente que flujos bajos de gas hacen que el líquido pase a través de las perforaciones; esto no tiene un efecto muy marcado sobre la eficiencia, pero cuando el flujo es muy bajo el líquido caerá en forma de lluvia, a través de las perforaciones del plato y el rendimiento del plato será casi nulo.

Por otro lado altos flujos de gas causan un arrastre de gotas (41), con un efecto perjudicial en la eficiencia.

#### Flujo de líquido

Un aumento del flujo del líquido da como resultado un incremento del líquido detenido en el plato, con un consecuente aumento de la eficiencia

(37,39). Por encima de ciertos valores de flujo los vertederos se pueden cubrir de líquido y el plato se inunda.

### Temperatura y presión

La influencia de la temperatura y la presión se refleja principalmente en el efecto que estas variables tienen sobre el sistema usado. Ellis, Barker y Contractor (42) dicen que el efecto de la presión sobre la eficiencia es muy pequeño.

6.3.

### Propiedades del sistema

En la fase gaseosa es muy importante el efecto que tiene la viscosidad y densidad del gas sobre la difusión molecular y por lo tanto sobre la eficiencia

De la misma manera en la fase líquida la viscosidad y densidad del líquido tienen un efecto marcado sobre la difusión molecular, y por consiguiente sobre la transferencia de masa.

Se puede comprobar que la tensión superficial tiene un efecto muy marcado sobre el gas retenido por el líquido y sobre la altura de dispersión. (43,44).

6.4

### Factores hidráulicos y difusionales

En un proceso de transferencia de masa que tiene lugar entre dos fases, en un plato perforado, la eficiencia de este depende sobre todo de los factores hidráulicos y difusionales entre las dos fases. Los factores difusionales generalmente involucran variables y parámetros como por ejemplo la difusión molecular, área interfacial, etc.

En cambio los factores hidráulicos dependen más de las condiciones de operación como por ejemplo los flujos de gas y de líquido, que afectan directamente el área interfacial

Cuando un plato perforado está operando, dos zonas se pueden distinguir: una película en el fondo del plato actuando de sello y una capa de lí-

quido con burbujas de gas dispersas, que llamaremos "dispersión" en forma general. La mayoría de las veces esta capa de líquido disperso que se encuentra sobre la película de sello, es grande y alto con respecto a esta última.

El gas que entra en un orificio del plato, forma discretas burbujas al pasar a través de la película de sello y se unen formando una dispersión, que será la zona donde tendrá un íntimo contacto con el líquido. Finalmente, el gas dejará esta zona reventando la burbuja.

El área interfacial aprovechable para la transferencia de masa es sobre todo y principalmente el área de la zona de dispersión. Así por ejemplo Porter (45) indica que el área interfacial en la zona de dispersión de un plato de burbujeo puede ser de 3,3 a 6,6  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$  siendo este valor mucho mayor que el obtenido en otros tipos de columnas, salvo las de relleno muy pequeño. Así por ejemplo el área interfacial de una columna rellena con anillos Rashing de 1/2 pulg. es de 0,66 a 1,66  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ .

## 6.5

### Conclusiones

Si bien muchos trabajos se hicieron para estudiar las características hidrodinámicas que afectan al diseño de platos perforados, es muy poco lo que se conoce acerca de las características que influyen en la transferencia de masa. Por lo tanto en la segunda parte de este trabajo consideramos hacer algún aporte al estudiar especialmente los factores hidráulicos y difusionales, como el área interfacial y coeficientes de transferencia de masa, señalando la factibilidad de hacerlo por medio del método sencillo y práctico descrito en la primera parte.

7.

## PARTE EXPERIMENTAL

7.1

### Introducción

En esta parte experimental nos proponemos estudiar los factores hidráulicos y difusionales que afectan a la transferencia de materia en sistemas gas- líquido

Previo a la determinación de los parámetros característicos de transferencia de masa se hacen determinaciones preliminares para establecer características básicas de este tipo de plato perforado, y además con el objeto de seleccionar las condiciones de operación y determinar los rangos apropiados de trabajo. Con este motivo los ensayos hidráulicos se realizaron primero con agua y luego con las mismas soluciones alcalinas que se utilizarían más adelante para las determinaciones de área interfacial y coeficientes de transferencia. Para el cálculo de estos parámetros  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$  el sistema a utilizar es el de  $CO_2$  en soluciones acuosas de NaOH, haciendo la restricción de mantener la concentración de NaOH en la interfase prácticamente igual a la del seno de la solución, con el objeto de que la reacción sea de pseudo primer orden y de esta manera poder usar la ecuación general de transferencia con reacción química siguiente:

$$\frac{y a P}{Ra} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{H (k D J_0 + k_L^2)^{0.5}} \quad \text{ec. (25)}$$

7 2

### Equipo utilizado

El aparato fué diseñado para trabajar reciclando el líquido y el gas, y consta de los siguientes elementos que podemos agrupar según su función en:

#### Circulación de la solución

El líquido o la solución absorbente se coloca en un tanque de almacenaje de aproximadamente 50 litros de capacidad. Este tanque está provisto de un embudo para facilitar la carga de la solución; un tubo lateral trans-

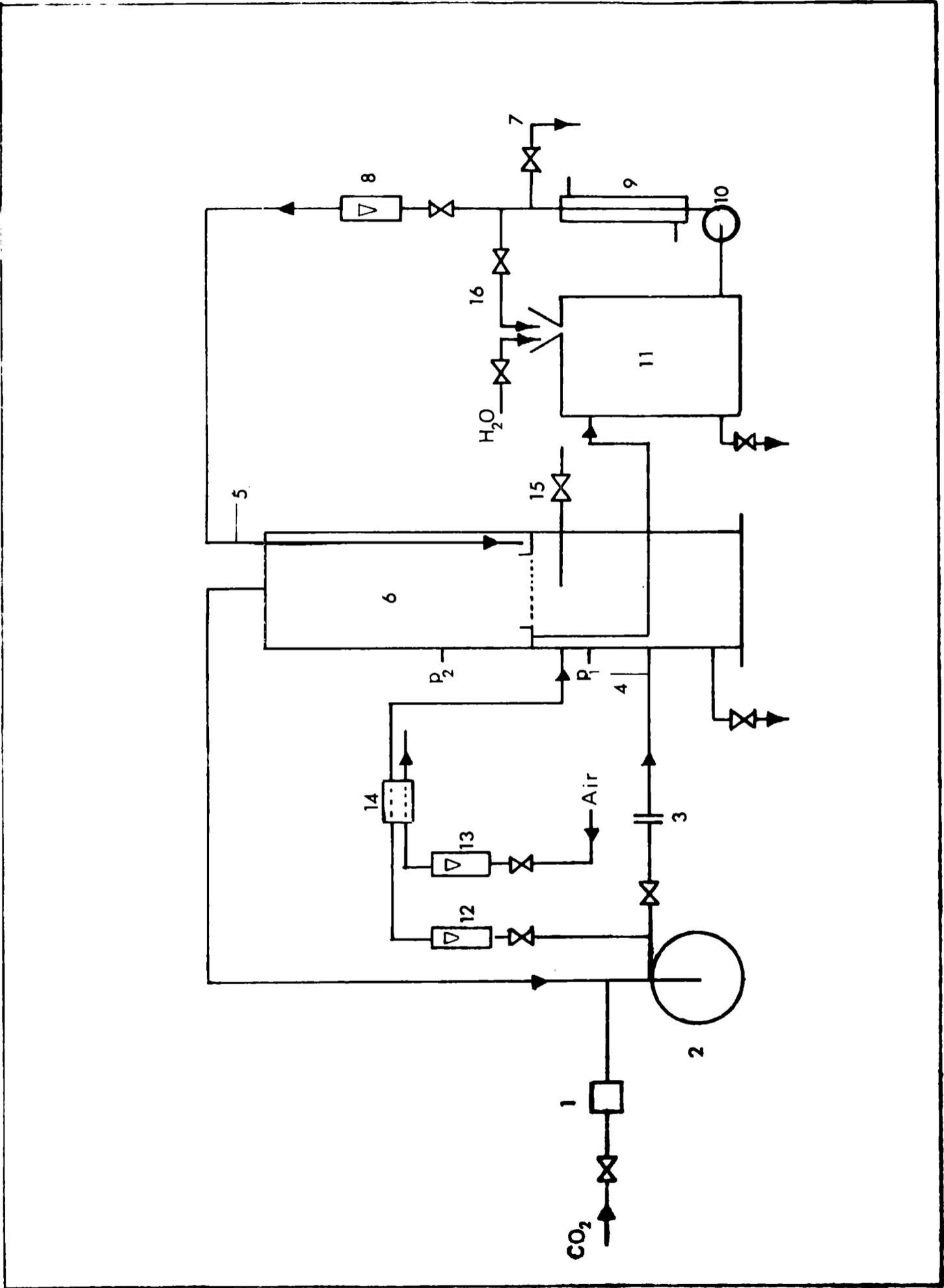


Fig. 8

parente para control de nivel y de una válvula de descarga en el fondo. Por la parte inferior está conectado a una bomba centrífuga con motor de 1 H P. y 2 800 r p m que impulsa la solución al plato perforado. En la línea que conduce la solución al plato se ha colocado una camisa como intercambiador de calor por la que se puede circular vapor o agua para permitir seleccionar la temperatura de trabajo. Esta última fue medida con un termómetro de vidrio con mercurio.

El caudal de solución se regula por medio de una válvula con diafragma de neopreno y se mide con un flotómetro convenientemente calibrado.

La solución que sale del plato se introduce nuevamente en el tanque de almacenaje, recirculando de esta manera la solución.

A la salida de la bomba de circulación se conectó una cañería con una válvula que permite tomar muestras de solución y además hacer un reciclo entre la salida inferior del tanque y la boca de carga del mismo para asegurar un buen mezclado de la solución.

#### Circulación del gas

El sistema de recirculación de gas está constituido por un ventilador centrífugo F B Tipo P 30 con motor de 2 H P y 2 800 r p.m en el que se adaptaron cojinetes de teflón para evitar fugas de gas en el eje que une las paletas del ventilador con el motor.

El caudal de gas se regula por medio de una válvula esclusa colocada a la salida del ventilador y se mide con una placa orificio. Las cañerías de circulación son de 2 pulgadas de hierro galvanizado y de P.V.C.

Se midió la temperatura del gas con termómetro de mercurio, colocado a la entrada del gas en la base de la columna donde se encuentra el plato perforado.

#### Plato perforado

El plato perforado está colocado en una columna con diferentes secciones; primero tiene una base metálica que sirve de sostén a las demás secciones de la columna; en la parte media de la base está la entrada de gas y en la parte superior hay colocada una plancha perforada para uniformar la velo-

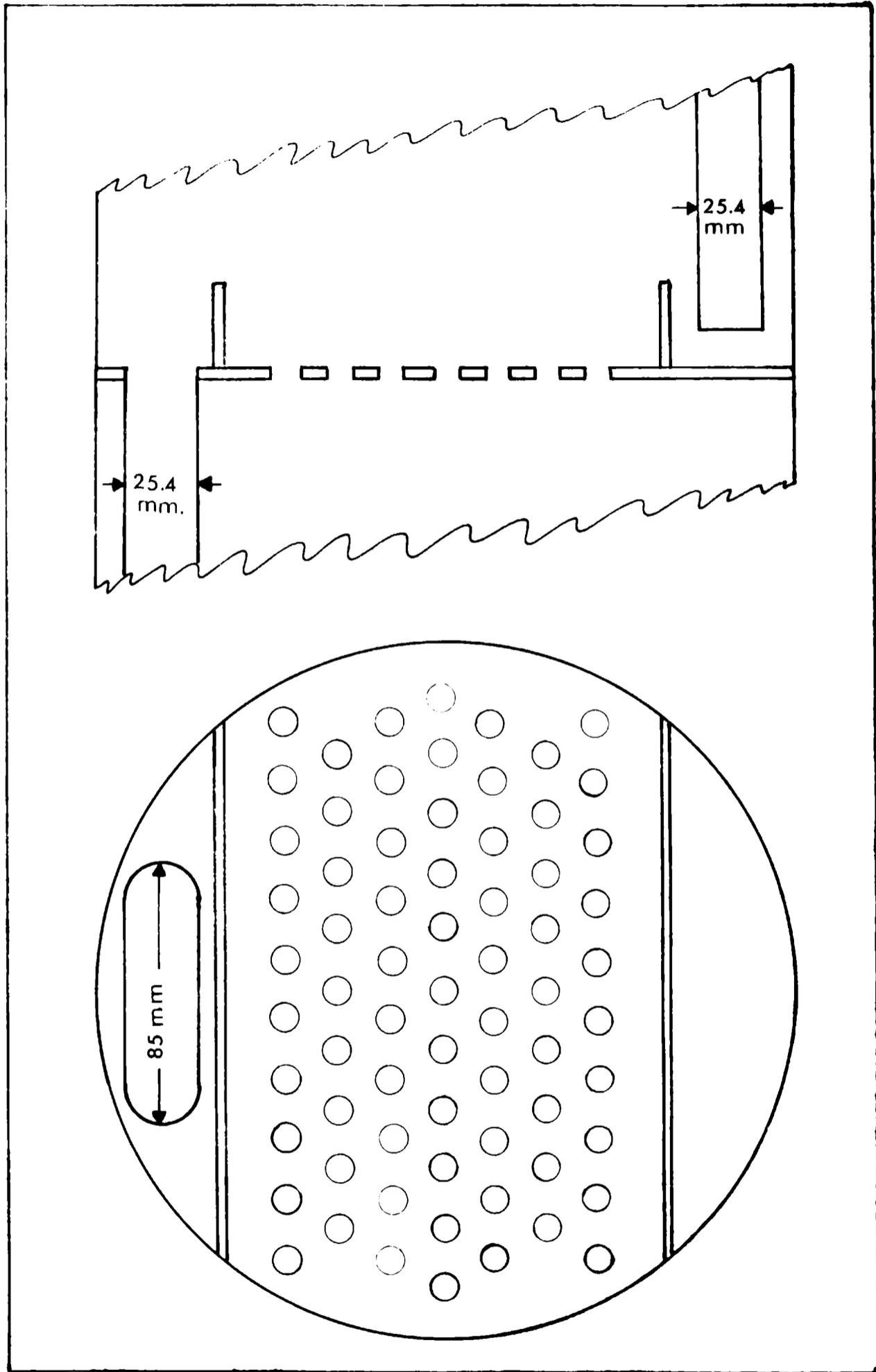


Fig. 9

cidad del gas que entra en el plato colocado más arriba. A nivel del piso de la base metálica se colocó una válvula de descarga que permite mandar a sumidero la pequeña cantidad de líquido que puede caer a través de las perforaciones del plato durante las puesta en marcha o paradas del equipo.

La sección siguiente de columna es de "Lucite" y está colocada a continuación de la base metálica. Esta sección de columna, que es de 30 cm. de longitud, permite ver el funcionamiento de la parte inferior del plato, dado que sobre esta sección está colocada una brida que ajusta el plato perforado y la sección siguiente de columna. Esta nueva sección de columna es también de "Lucite", pero de 100 cm de longitud, por la cual se puede observar el funcionamiento sobre el plato de los tabiques de nivel, vertederos, etc.

Esta última sección de columna es de mayor longitud que la inferior para salvar cualquier problema de salpicado que ocurre, especialmente cuando la cantidad de líquido retenido en el plato es pequeña y la velocidad del gas es muy grande; esto último puede provocar la entrada de solución al ventilador.

Un diagrama del plato propiamente dicho se puede ver en la figura (8) y las características del mismo son:

Diámetro	228 mm.
Altura de los tabiques de nivel	25,4 mm.
Distancia entre los tabiques de nivel	142,8 mm
Diámetro de las perforaciones	4,75 mm
Número de perforaciones	69
Area libre	2,98 %

#### Sistema de alimentación de CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> se alimenta desde un cilindro con mano-reductor que está cubierto con un manto de calefacción eléctrica para evitar el enfriamiento debido a la evaporación y posterior expansión, que producen alteraciones en el flujo. El caudal de CO<sub>2</sub> se mide con un integrador "Nordgas" (capacidad

3 m<sup>3</sup>, apreciación 0,1 lt.). En la línea de alimentación de CO<sub>2</sub> hay colocado un tanque pulmón y una camisa de vapor para regular la temperatura de trabajo. El CO<sub>2</sub> se inyecta en la entrada del ventilador para conseguir un buen mezclado.

#### Sistema de medida y control de la concentración de CO<sub>2</sub> en la mezcla de gas

Este sistema de control y medida está colocado para poder operar con una concentración constante de CO<sub>2</sub> en la mezcla de gas, con el objeto de que la cantidad de CO<sub>2</sub> que se introduce al sistema sea igual a la que se absorbe con reacción química en la solución. Para ello de la línea de circulación de gas se desvía una parte del mismo a un sistema de medida y control. Con este fin se utiliza una bomba de vacío que succiona una parte de la mezcla de gas, haciéndola pasar por una celda de conductividad térmica, un caudalímetro de burbuja de detergente para control del caudal que pasa por la celda, y un tanque pulmón para estabilizar las fluctuaciones de la bomba de vacío. El gas que pasa por la bomba se introduce nuevamente en la corriente de gas que va al plato. Como gas de referencia para la celda de conductividad se utiliza aire proveniente de un cilindro con mano reductor y un caudalímetro para control del caudal.

La celda de conductividad se calibra periódicamente contra un analizador de CO<sub>2</sub>, tipo Orsat.

7 3

#### Medición y rango de variación de las variables de operación

Las variables de operación son las siguientes:

Caudal de gas: El rango de trabajo fue el comprendido entre 2,5 y 9 m<sup>3</sup>/h que da una velocidad superficial en el plato entre 5 y 18 m/seg. para las soluciones alcalinas. En cambio, para pruebas hidráulicas realizadas con agua, la velocidad superficial en el plato fue mucho menor y solo entre 1,3 y 4,1 m/seg. Por encima de este valor de 4,1 m/seg. se produce salpicado.

Para las soluciones alcalinas trabajar con velocidades de gas menores de 5 m/seg. significa permitir el paso de solución a través de los orificios del plato.

El caudal de gas se puede variar con una válvula osclusa colocada a la salida del ventilador y medir con una placa orificio colocada con ese propósito.

Caudal de solución: Los rangos de operación fueron los siguientes: Entre 228 y 540 kg/h. para agua y entre 384 y 672 kg/h. para las soluciones alcalinas. Los caudales fueron medidos con un rotámetro calibrado previamente.

Temperaturas de gas y solución: Las temperaturas de la solución y del  $\text{CO}_2$  de alimentación se pueden variar a voluntad como se indica en la descripción del equipo. Todas fueron medidas con termómetros de mercurio en vidrio.

Concentración de  $\text{CO}_2$  en el gas: La mayoría de las experiencias se realizaron con un porcentaje de  $\text{CO}_2$  en la mezcla de 7-8 % dado que con estos valores las corridas se hacen en tiempos convenientes para la lectura de todas las variables de operación con el menor error.

Concentración inicial de NaOH en la solución: Se realizaron experiencias utilizando soluciones de NaOH iniciales que variaron entre 0,7 N y 3,0 N con el objeto de comprobar el efecto que produce esta variable sobre los parámetros hidráulicos y difusionales.

## 7.4

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 7.4.1

##### Determinación de las características hidráulicas

Estas determinaciones se realizaron con el objeto de determinar las características básicas del comportamiento del plato perforado en estudio que son: Altura de dispersión y pérdida de carga a través del plato.

##### Altura de dispersión

Se realizaron distintas experiencias para ver el efecto que tienen sobre este parámetro:

- 1) El caudal de gas y de líquido.
- 2) Las soluciones de distinta concentración de NaOH.
- 3) Las soluciones de distinta concentración de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ .
- 4) El tiempo de recirculación de estas soluciones.

La altura de dispersión fue medida visualmente utilizando un catetómetro. Para tener una imagen más nítida de la zona de separación entre el líquido disperso y el gas, se coloca en la parte opuesta de la columna de "Lucite", un papel negro con un corte (en forma de ranura de 3 mm. de espesor) vertical de manera que dejara pasar la luz de una lámpara de 100 watts colocada detrás. El catetómetro se enfoca con el haz de luz que pasa a través del corte en el papel. En la parte anterior de la columna con respecto al catetómetro se coloca una escala que permite medir la altura de dispersión minimizando los errores de lectura.

### Resultados

#### Efecto de la velocidad del gas y del líquido

Se puede ver en la Figura (10) donde se muestra la variación de la altura de dispersión con la velocidad del gas, que esta no es lineal como encuentran Harris y Roper (46) para un plato perforado de 12 pulgadas con vertedero y un área libre de 4,37 %. La razón posiblemente estriba en que ellos trabajaron en una zona muy chica de rango de velocidades de gas, dado

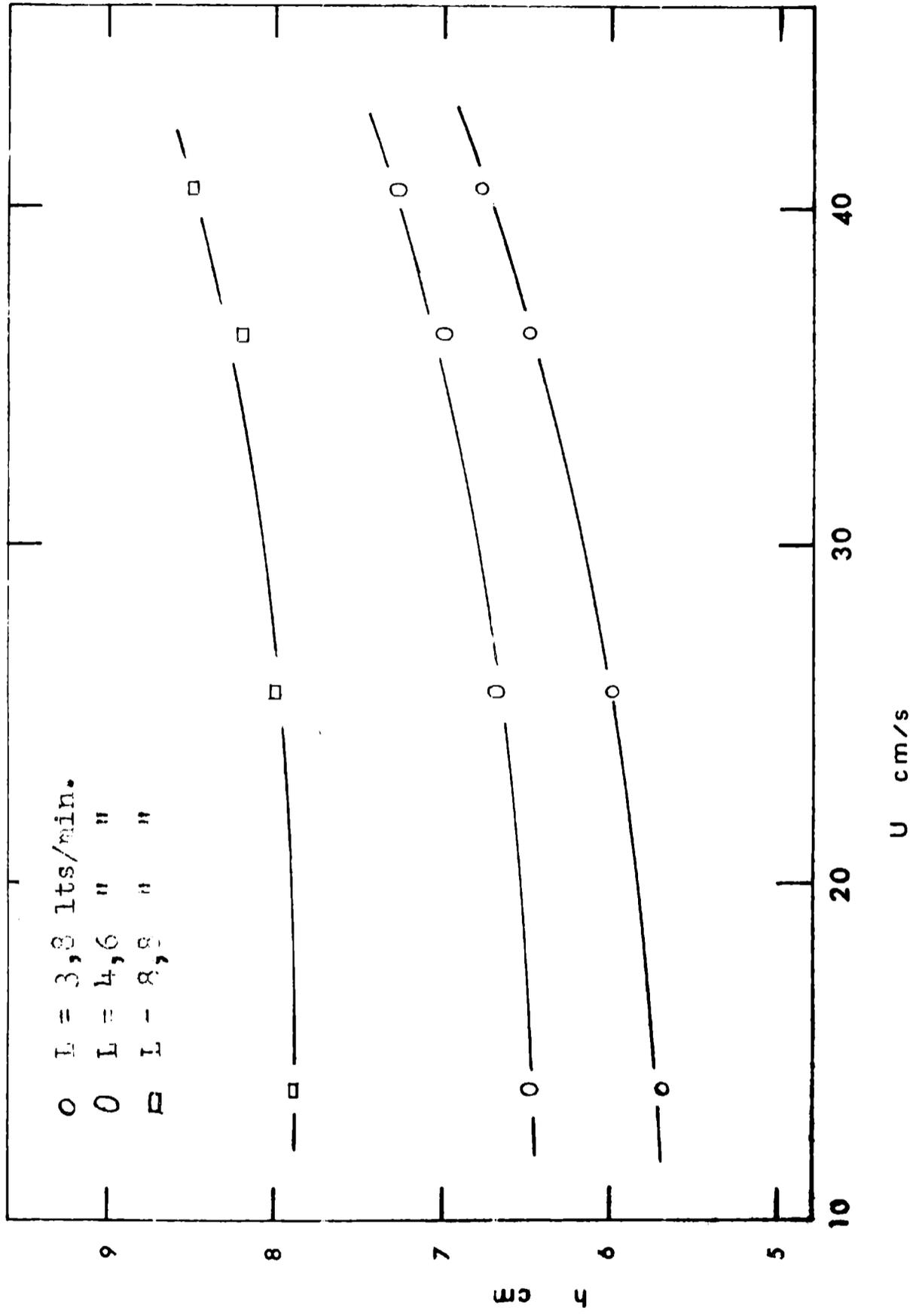


Fig. 10

que sólo pueden aumentar esta dos veces, mientras que nuestras determinaciones fueron realizadas en un rango donde se aumenta cuatro veces la velocidad del gas

Del mismo modo, en nuestro caso el caudal de líquido produce una variación no lineal y asintótica de la altura de dispersión, también en contraposición a los resultados que obtienen los autores anteriormente mencionados, que encuentran que es lineal. Podemos asumir que esta diferencia es a causa de que nuestro plato tiene una pérdida de carga más notable con el aumento de caudal de solución.

#### Comportamiento de las soluciones de NaOH

En este caso, como podemos ver en la Figura (11), hay un marcado descenso de la altura de dispersión con las soluciones de NaOH, respecto al agua, cuando se opera en las mismas condiciones de trabajo. Esto es distinto a lo que observaron Porter y colaboradores (47) para un plato con campanas de burbujeo, donde prácticamente la altura de dispersión es la misma en ambas condiciones

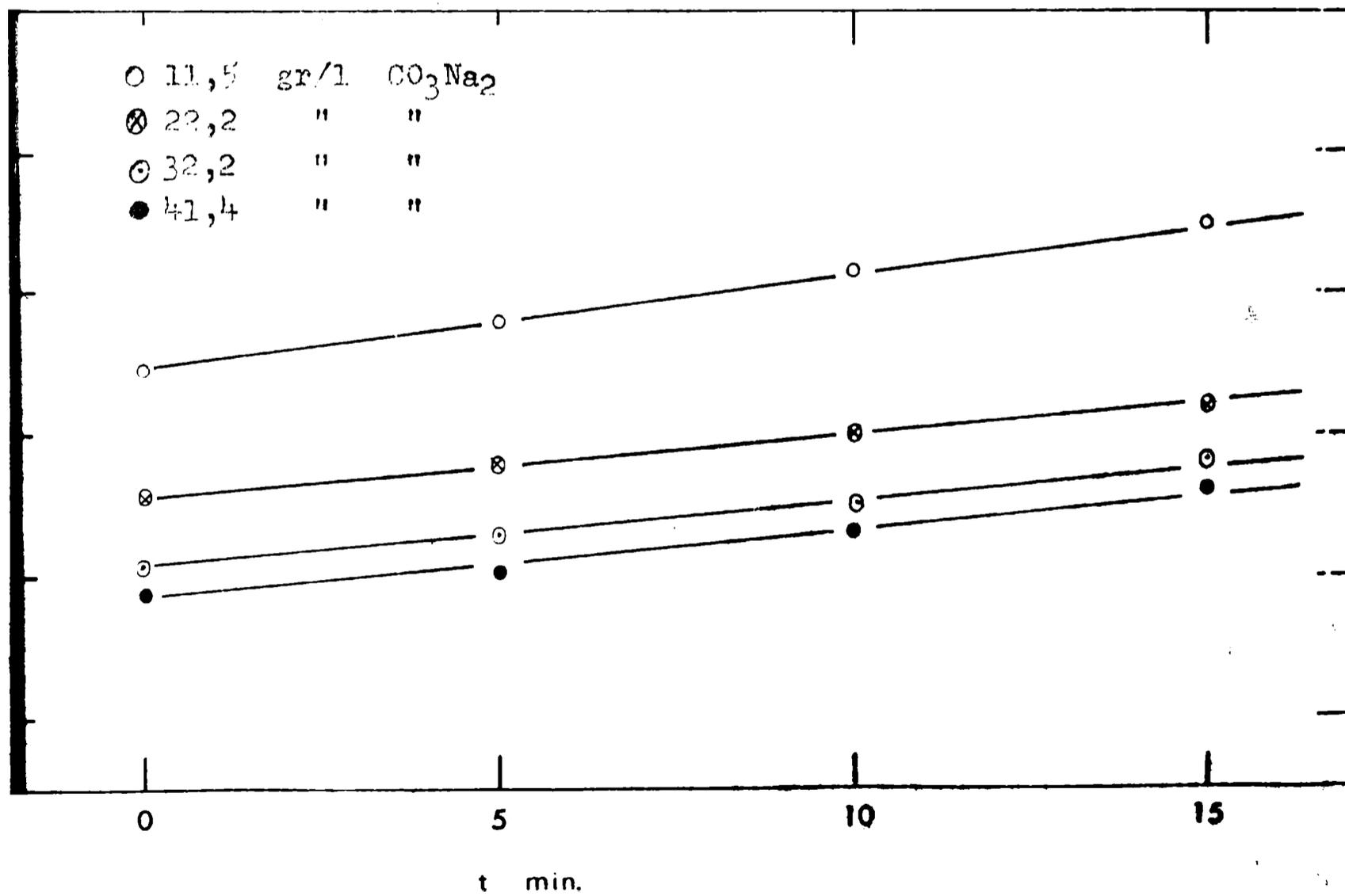
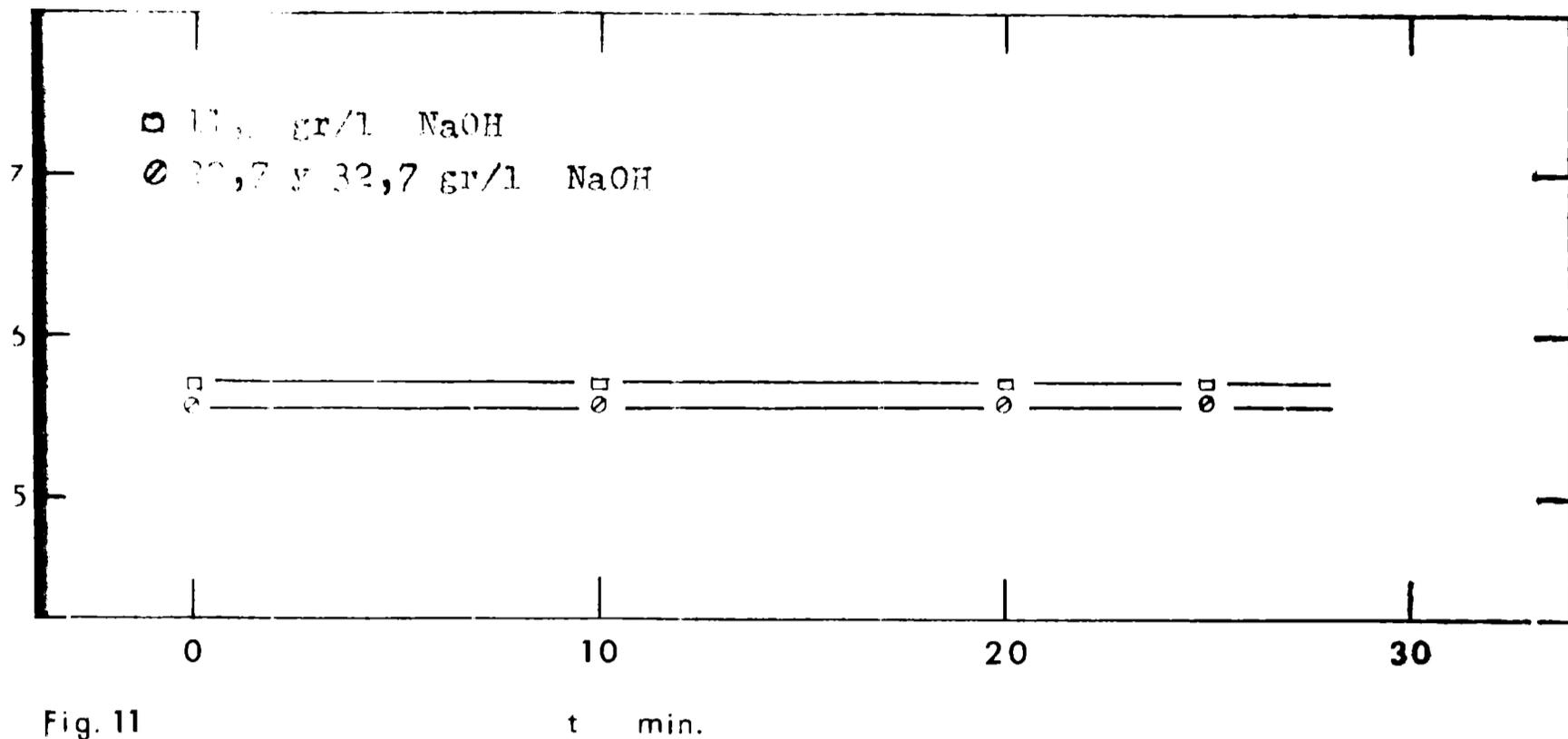
#### Comportamiento de las soluciones de $\text{CO}_3\text{Na}_2$

El propósito de estudiar las soluciones de NaOH y  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  fué conocer el tipo de comportamiento que tendrían las soluciones que mas adelante utilizaríamos para realizar experiencias de absorción con reacción química.

El comportamiento de las soluciones de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  se pueden ver en la Figura (12) donde se muestra el efecto de la concentración de estas, sobre la altura de dispersión. Es evidente que la disminución de altura de dispersión es mucho mayor en este caso que para las soluciones de NaOH.

#### Efecto del tiempo de recirculación sobre las soluciones de $\text{CO}_3\text{Na}_2$ y NaOH

En la misma Figura (12) también se puede ver el efecto del tiempo de recirculación sobre la altura de dispersión, al trabajar con estas soluciones. Es muy notable el crecimiento que se nota en el caso de las soluciones de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  pero no así en las de NaOH. El incremento de la altura de dis-



persión para el caso de soluciones de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  es causada por la formación de espuma sobre la masa de líquido dispersa. Este efecto también fue notado por Krasuk y Ronco (48) y además por Sharma y Gupta (49) de los que adoptamos la técnica de utilizar un agente antiespumante como Tricresilfosfato para las determinaciones posteriores.

#### Pérdida de carga a través del plato perforado

Se realizaron experiencias para determinar la pérdida de carga para diferentes caudales de gas en:

- a) Plato seco
- b) A distintos caudales de agua

Los resultados se pueden ver en la Figura (13), esta nos muestra la pérdida de carga del plato seco cuando circula agua por el mismo y además como el efecto de diferentes caudales de agua es pequeño sobre la pérdida de carga. Este resultado es comparable al que obtuvieron Harris y Roper (46) que encontraron: que varía la pérdida de carga según la siguiente función:

$$P_w \propto L_w$$

donde:  $P_w$  = Pérdida de carga del plato con agua.

$L_w$  = Caudal de agua.

#### 7.4.2

#### Conclusiones de las pruebas hidráulicas

Estas experiencias nos permiten ver la forma de trabajo y comportamiento del plato perforado, y por lo tanto como debemos operar para las determinaciones posteriores en las cuales usaremos absorción con reacción química en soluciones de  $\text{NaOH}-\text{CO}_3\text{Na}_2$ .

Las conclusiones son las siguientes:

- 1) Hemos determinado el rango de trabajo de caudal de gas y líquido dentro del cual no se produce salpicado, ni el líquido pasa a través de las perforaciones.
- 2) Se determinó la variación de la altura de dispersión con el caudal de gas y de líquido.

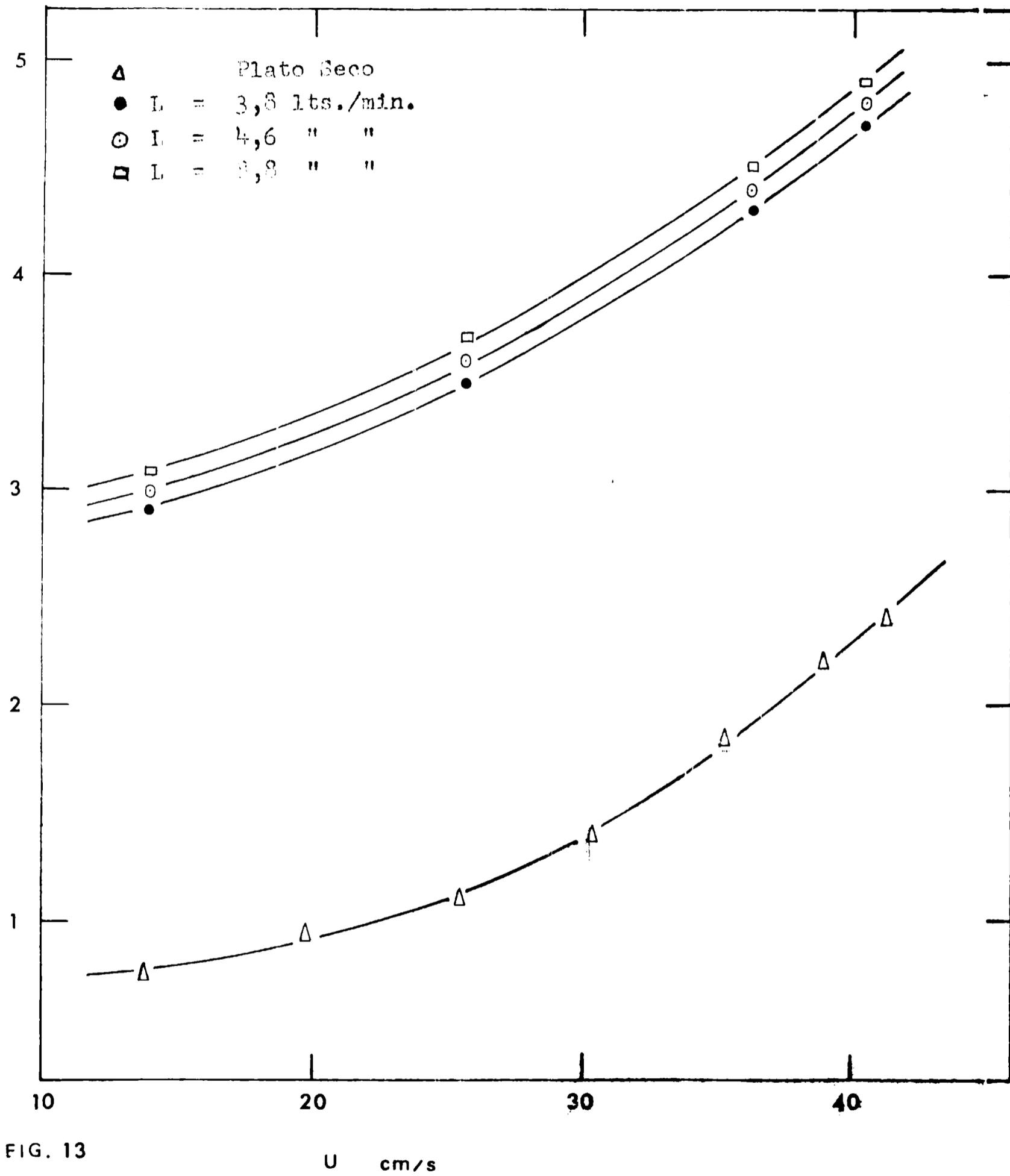


FIG. 13

3) Se observó que el comportamiento de las soluciones de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  es diferente que el de las soluciones de  $\text{NaOH}$ , dado que las primeras forman una capa de espuma sobre la masa de líquido disperso. Se comprueba que, por el agregado de muy pequeñas cantidades de Tricosilfosfato, este problema es superado

## 7.5

### DETERMINACION DE AREA INTERFACIAL Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA

#### 7.5.1

##### Introducción

Esta parte del trabajo tiene como propósito aplicar a un plato perforado con vertederos, (como representativo de un equipo de aplicación industrial), el método de determinación de área interfacial y coeficientes de transferencia de masa (que son parámetros fundamentales de diseño), que hemos propuesto en la primera parte y probado en una celda agitada magnéticamente.

En este caso de absorción gas-líquido en un plato perforado no conocemos ni sabemos si podemos despreciar  $k_G$  y  $k_L$ , que determinan respectivamente la resistencia de la fase gaseosa y líquida. Hacemos una serie de experiencias en un solo sistema ( $CO_2$ -aire, solución de NaOH), para medir la variación de Ra en función de  $kDCo$ , la que aplicamos a la ecuación:

$$\left[ \frac{d(kDCo)}{d(Ra)} \frac{(Ra)^2}{2PHy} \right]^{2/3} = a^{2/3} (kDCo) + (a^{2/3} k_L^2) \quad \text{ec. (26)}$$

para determinar a y  $k_L$ .

Una vez conocidos estos valores, es posible utilizar la ecuación general de transferencia de masa:

$$\frac{y a P}{Ra} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{H (kDCo + k_L^2)^{0.5}} \quad \text{ec. (27)}$$

para la determinación de  $k_G$ .

Los datos fisico-químicos necesarios para el cálculo, se determinan en la misma forma que vimos anteriormente para el cálculo de A,  $k_L$  y  $k_G$  para el caso de la celda agitada.

En este caso, los valores de área interfacial son distinguidos por "a" dado que están referidos a la unidad de volumen de líquido disperso.

Se realizan distintas experiencias para determinar el efecto que tiene la velocidad del gas y líquido sobre el área interfacial y, además, el efecto que tiene la concentración de la solución de cada corrida sobre el área interfacial y coeficiente de transferencia de la fase líquida  $k_L$ .

7.5 2.

### Procedimiento Experimental

#### Método de medida de la velocidad de absorción

Como vimos en la parte de descripción del equipo, este fue diseñado para operar en circuito cerrado, tanto en gas como en solución.

En el tanque de almacenamiento se colocan 27 lts de solución de NaOH con 2 ml de agente antiespumante, tricresilfosfato.

Se conecta el ventilador de impulsión del gas y la bomba de recirculación de solución. Se ajustan para ambos los valores deseados de caudal.

La temperatura del líquido se controla por medio del intercambiador de calor, y la temperatura del gas se deja estabilizar. Por medio del "by-pass" se permite un mejor mezclado de la solución en el tanque de almacenaje.

Se abre la válvula de alimentación de  $\text{CO}_2$ , cuya línea conduce a la entrada del ventilador, y, cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  alcanza el nivel requerido, indicado por la medida de la celda de conductividad térmica, se saca una muestra de solución para análisis y se anota el tiempo y lectura del medidor de  $\text{CO}_2$ .

El agregado de  $\text{CO}_2$  a lo largo de la experiencia, se controla muy cuidadosamente para mantener la concentración de  $\text{CO}_2$  en el gas totalmente constante.

La medida de absorción de  $\text{CO}_2$  se registra a intervalos regulares y a iguales tiempos se toman muestras de la solución de NaOH.

Las soluciones se analizan para determinar la concentración de NaOH y  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  por el método de Cloruro de Bario como indica Vogel (51). Los resultados fueron concordantes con un error de  $\pm 2,4\%$  con respecto a los valores medidos de  $\text{CO}_2$  absorbido.

Se toman medidas de la altura de dispersión del líquido en el plato por medio del catetómetro, para referirlos al área interfacial por unidad de volumen de dispersión.

La difusividad del  $\text{CO}_2$  en la solución se obtiene como valor promedio, de la corrida, por la relación  $D\sqrt{t} = \text{cte}$ , dado que la variación entre la difusividad inicial y final es pequeña.

La solubilidad del  $\text{CO}_2$  en la solución se calcula por la expresión (21,24):

$$\log H = 1140/T - 8.3 - (0.138 \quad [\text{OH}^-] + 0.294 \quad [\text{CO}_3^-]) \quad \text{ec. (28)}$$

La constante de velocidad de segundo orden, k, se supone que varía linealmente con la fuerza iónica de la solución y está dada por la expresión derivada de los datos publicados (21,22,23)

$$k = 10^6 (5.7 + 2.6 I) 10^{-2.895 (1/293 - 1/T)} \quad \text{ec. (29)}$$

Para este caso, durante la corrida, k varía según el cambio de la fuerza iónica que depende del  $\text{CO}_2$  absorbido.-

7.5.3.

Resultados obtenidos

7.5.3.1

Determinación de la Variación de la velocidad de absorción con la concentración de la solución

La medida de la velocidad de absorción,  $R_a$ , en función de  $kDC_o$  se muestra en la figura (14) Se obtienen diferentes curvas, dado que para cada una de ellas se parte de distintas soluciones iniciales de NaOH, y cada curva representa una serie de determinaciones de absorción de  $CO_2$  a partir de la misma solución inicial de NaOH. La temperatura del gas, como la de la solución y % de  $CO_2$  en la mezcla de gas, fue prácticamente igual para todas las experiencias.

7.5.3.2.

Determinación de área interfacial y coeficiente de transferencia  $k_L$

Considerando la resistencia de la fase gaseosa

Según el modelo de Danckwerts, la ecuación general de transferencia de masa con reacción química, considerando las resistencias de la fase gas y líquido, es:

$$\frac{y a P}{R_a} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{H (kDC_o + k_L^2)^{0.5}} \quad \text{ec. (30)}$$

y por diferenciación de ésta ecuación podemos obtener:

$$\left[ \frac{(R_a)^2}{2 y H P} \frac{d (kDC_o)}{d (R_a)} \right]^{2/3} = a^{2/3} (kDC_o) + a^{2/3} k_L^2 \quad \text{ec (31)}$$

Los valores de  $d (kDC_o)/d (R_a)$  que figura en el término de la izquierda de la ecuación (31) se determina de los valores representados en la Figura (14).

Representando la ecuación (31) obtenemos la Figura (15) de donde se pueden calcular los valores de  $a$  y  $k_L$ .

Con los valores obtenidos de  $k_L$  podemos ver que se satisface la condición:

$$(kDC_o)^{0.5} \ll k_L \left( 1 + \frac{C_o}{z PHy^*} \right)$$

que indica condiciones de reacción de pseudo primer orden.

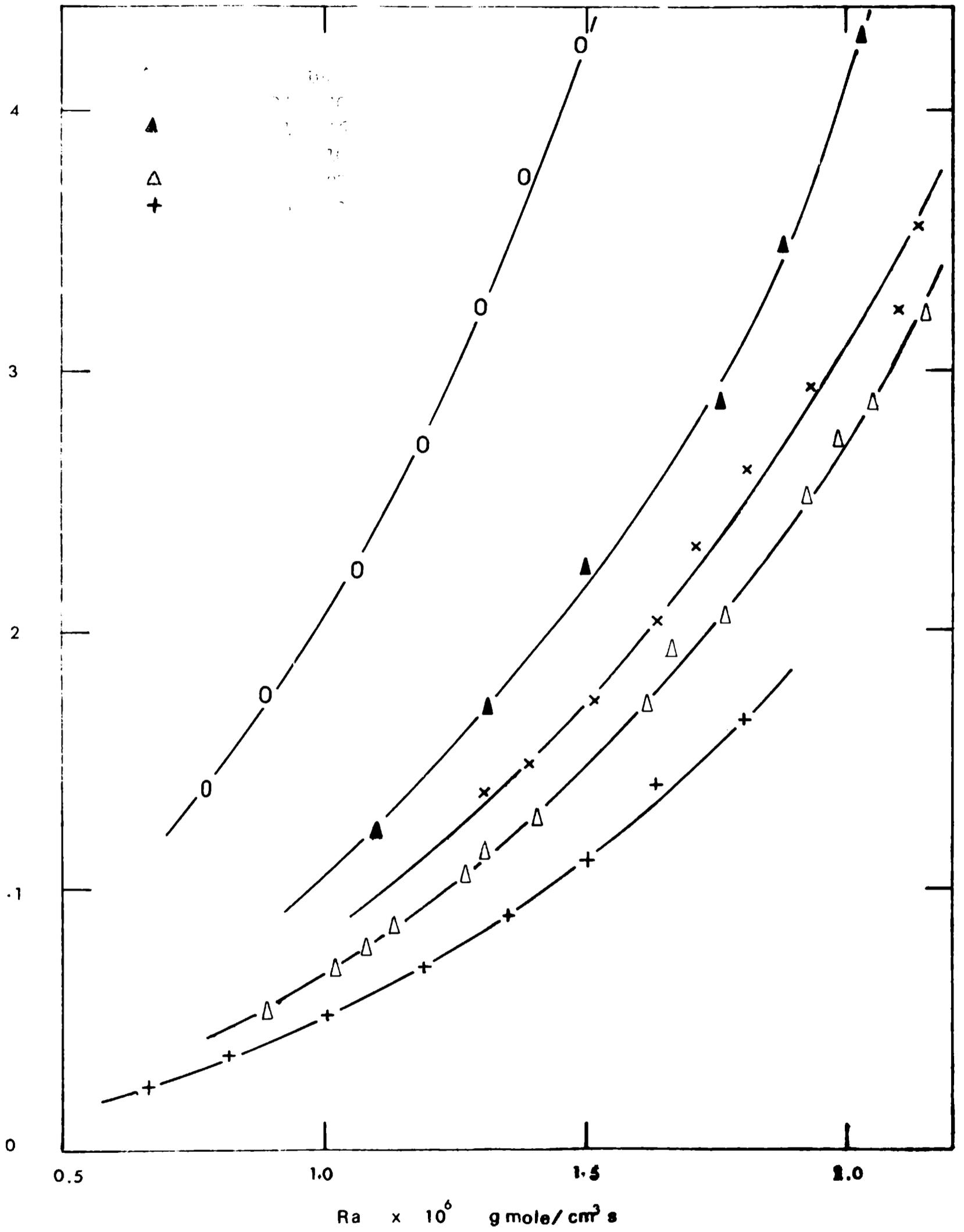


Fig. 14

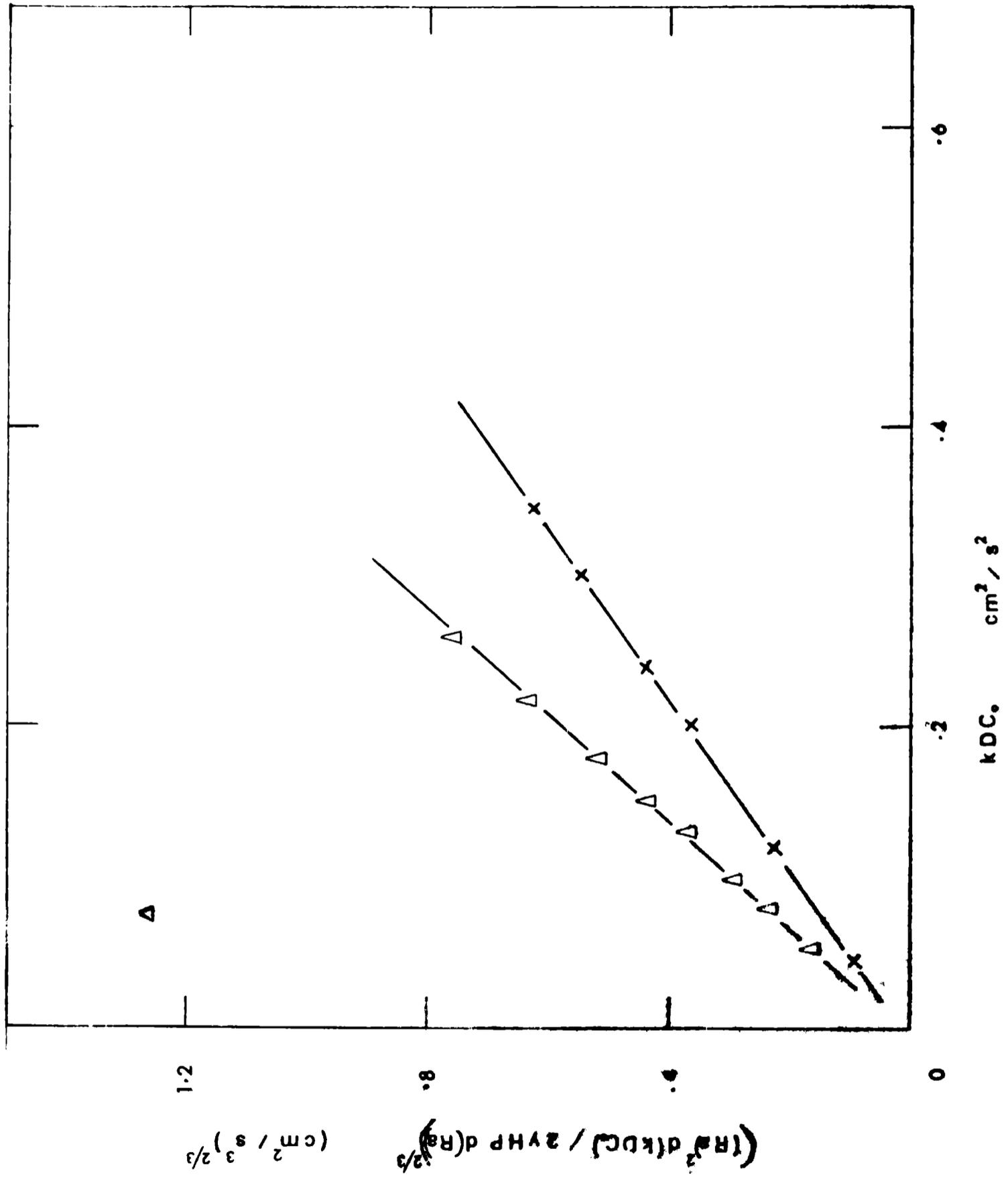


Fig. 15

### 7.5.3.3

#### Determinación del coeficiente de transferencia en fase gaseosa $k_G$

##### Considerando la resistencia de la fase líquida

Con los valores obtenidos de  $a$  y  $k_L$  podemos calcular y representar la ecuación general (30) para determinar el valor de  $k_G$ , que corresponde a estas experiencias.

En la Figura (16) se puede ver la representación de la ecuación general, donde se obtienen líneas rectas de pendiente 1,0 y los correspondientes valores de  $k_G$ .

Para todos los casos el valor de  $k_G$  calculado da un valor muy grande, lo que muestra la inexistencia de resistencia en la fase gaseosa.

### 7.5.3.4

#### Determinación de Area Interfacial y Coeficiente de Transferencia $k_L$

##### Sin considerar la resistencia de la fase gaseosa

De la ecuación general de transferencia (30) si suponemos que la resistencia de la fase gaseosa es despreciable, es decir que:

$$1/k_G \ll 1/H \quad (kDC_0 + k_L^2)^{1/2}$$

la ecuación que queda es:

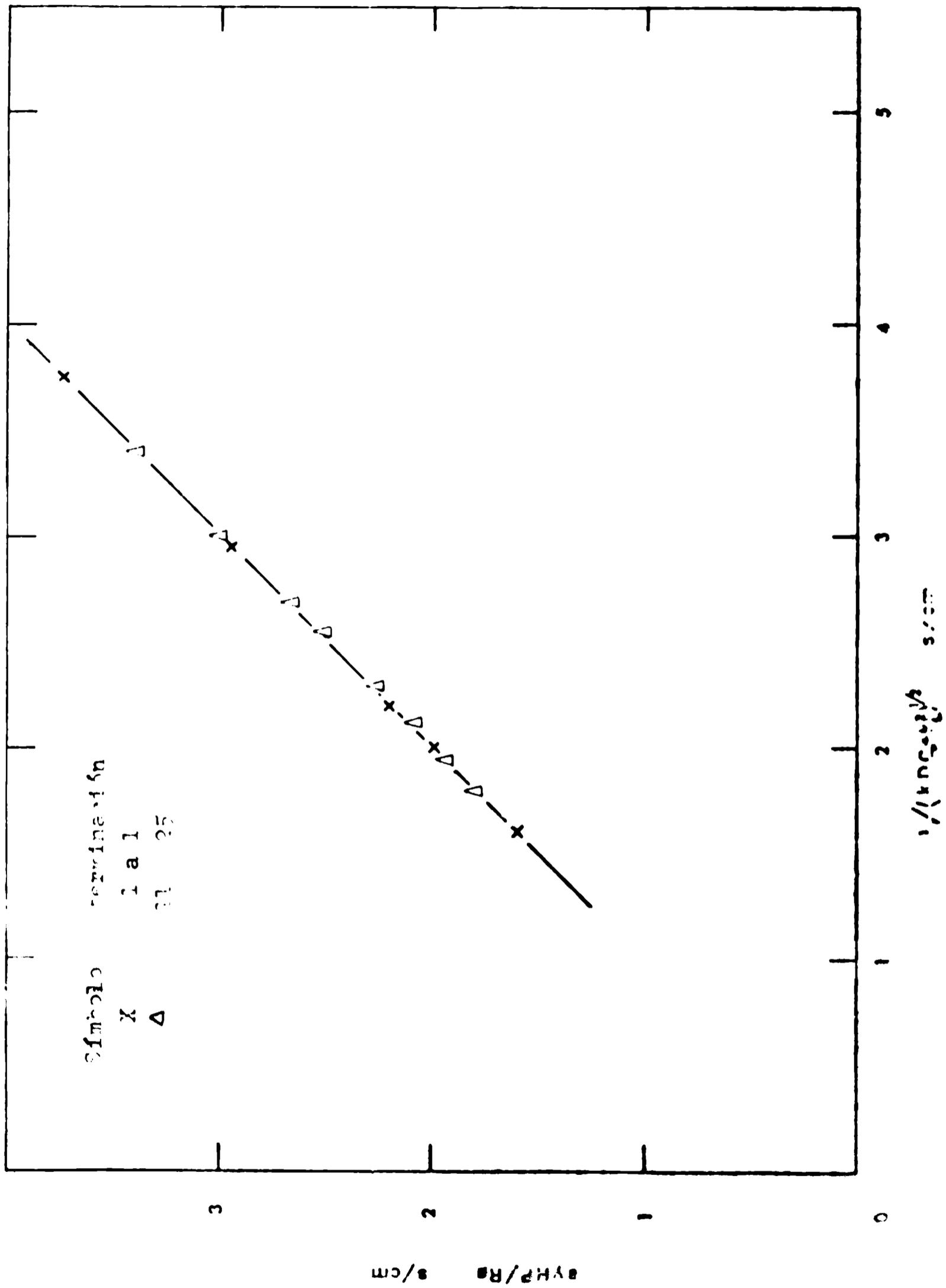
$$\left( \frac{Ra}{H y P} \right)^2 = a^2 (kDC_0) + (a k_L)^2 \quad \text{ec. (32)}$$

Representando esta última ecuación se obtienen los valores de  $a$  y  $k_L$ .

En la Figura (17) se muestra esta representación donde se obtienen perfectas líneas rectas que nos están indicando que es despreciable el control en fase gaseosa (Ver el caso contrario cuando se trabaja en la celda agitada).

Los valores que se obtienen de  $a$  y  $k_L$  son coincidentes con los calculados, considerando el efecto de  $k_G$ , lo que indica, una vez más, la aplicabilidad de la técnica propuesta, y, por otro lado, confirma lo despreciable de la resistencia de la fase gaseosa para este caso. Es decir, para este caso particular de plato perforado con este sistema, es factible calcular directamente  $a$  y  $k_L$  a partir de la ecuación :

$$\left( \frac{Ra}{PHy} \right)^2 = a^2 (kDC_0) + (a k_L)^2$$



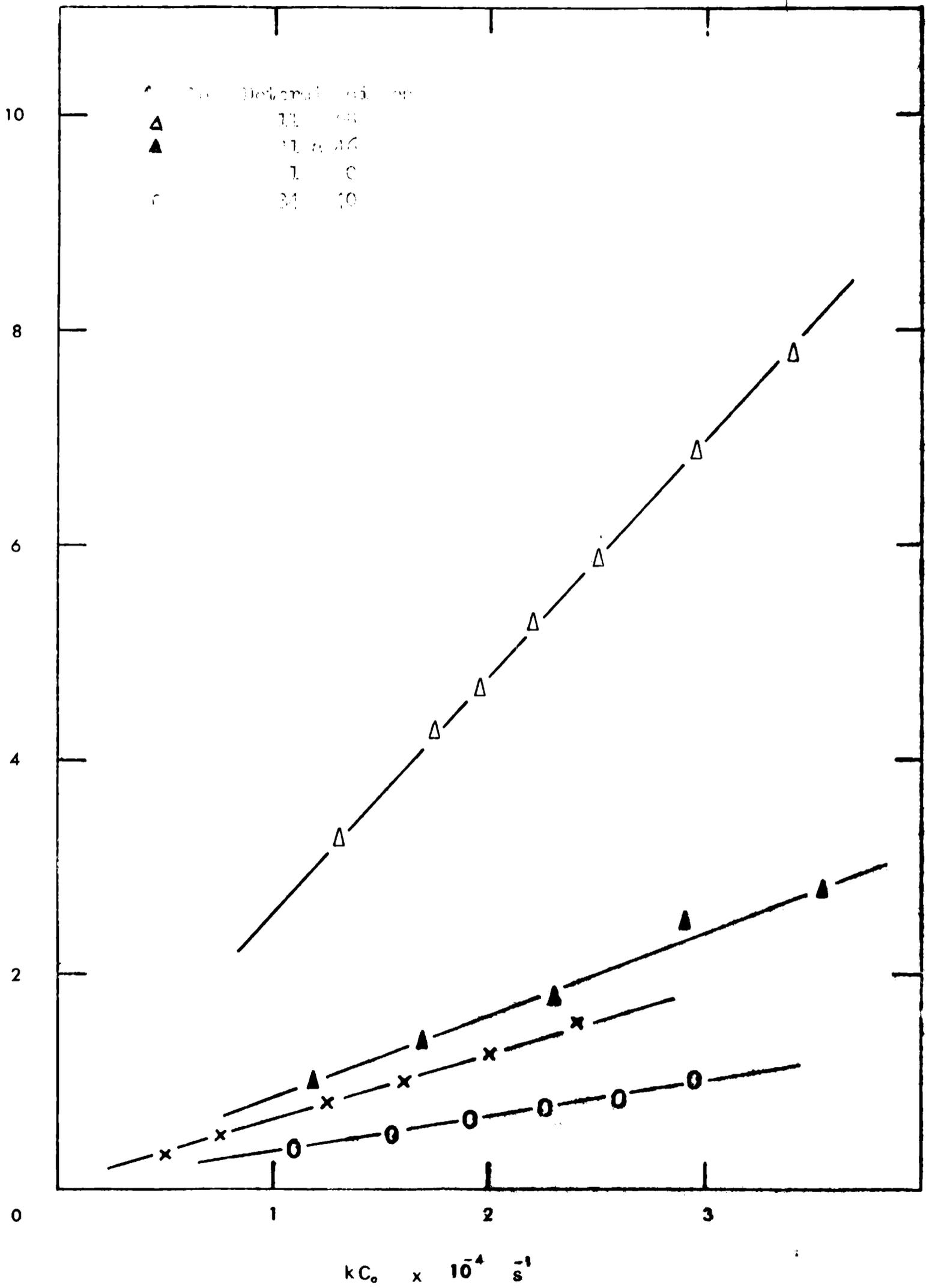


Fig. 17

$$\delta \left( \frac{Ra}{PHy \sqrt{D}} \right)^2 = a^2 (k C_o) + \frac{a^2 k_L^2}{D}$$

Pero en un sistema donde la resistencia de la fase gaseosa sea apreciable, será necesario aplicar la técnica propuesta en este trabajo, excepto que se quiera hacer el doble trabajo, haciendo experiencias con otro sistema en las mismas condiciones hidrodinámicas pero con completo control de fase gaseosa.

### 7.5.3.5

#### Determinación de área interfacial despreciando $k_G$ y $k_L$

Cuando se cumple que:

$$1/k_G \ll 1/H (kDC_o + k_L^2)^{1/2}$$

y además que:

$$kDC_o \gg 5 k_L$$

la ecuación general (30) queda reducida a la siguiente expresión:

$$\frac{Ra}{PHy} = a (kDC_o)^{0.5} \quad \text{ec (33)}$$

Estas condiciones se presentan en nuestro caso, por lo que para algunas determinaciones hemos utilizado esta técnica para calcular directamente el área interfacial.

7.6.

Características del comportamiento de  $a$  y  $k_L$

Variación del área interfacial con el caudal de gas y líquido

En las Figuras (18,19) se puede ver el efecto que tiene el caudal de gas y líquido sobre el área interfacial.

Se puede notar el incremento marcado que tiene con el caudal de gas, pero como el caudal de líquido produce poco cambio en el área interfacial. Un efecto similar fue observado por Sharma y Gupta (50) y por Sharma, Mashelkar y Mehta (49), que trabajaron con un plato perforado, pero sin vertederos

7.6.1

Variación del área interfacial con la concentración inicial de la solución

En la Figura (20) se muestra el crecimiento del área interfacial con la concentración inicial de NaOH ( $C_{o in.}$ ) y es especialmente marcado este incremento por encima de la concentración 2 N. Este efecto es la combinación del incremento de la viscosidad y la fuerza iónica. Resultado similar a este es el que muestra Sharma y col. (49).

Los valores de área interfacial que hemos encontrado en este trabajo están dentro del rango de valores que obtienen, otros investigadores (26,49) para un plato perforado, sin vertederos.

7.6.2.

Variación del coeficiente de transferencia de fase líquida  $k_L$  con la concentración inicial de NaOH ( $C_{o in.}$ )

Para nuestro caso, en la Figura (21) se puede ver que hay un decrecimiento suave del coeficiente de transferencia,  $k_L$ , con el crecimiento de  $C_{o in.}$  con un rango que va desde 0,06 a 0,123 cm/seg.

Los valores de  $k_L$  que se dan en las publicaciones, tienen una gran discrepancia para el caso de platos perforados sin vertederos.

Por ejemplo, Sharma y Gupta (50) dan valores mayores de 0,04 cm/seg. para una altura de dispersión de 10 cm., pero no especifican la velocidad de gas que utilizaron.

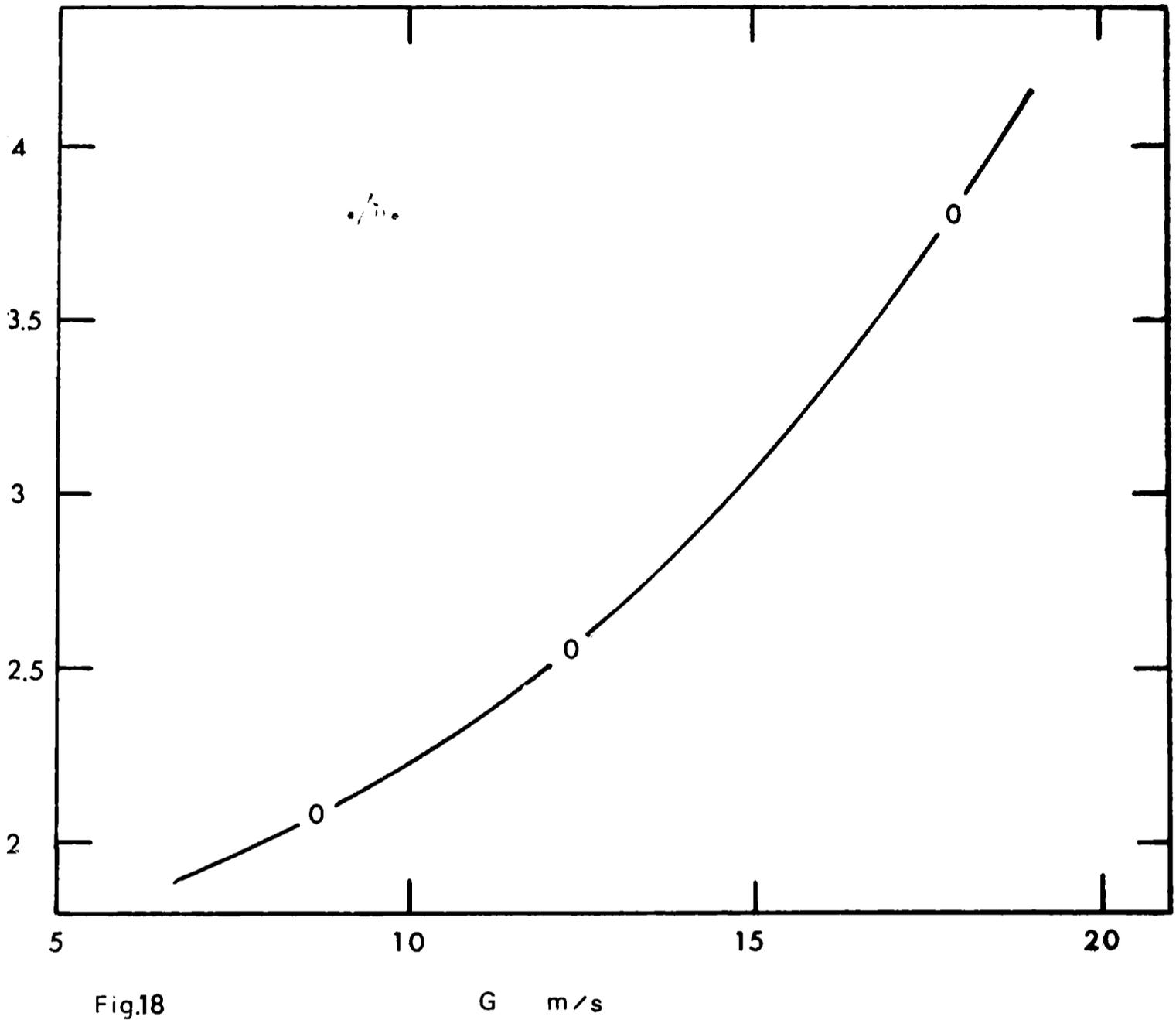


Fig.18

$G$  m/s

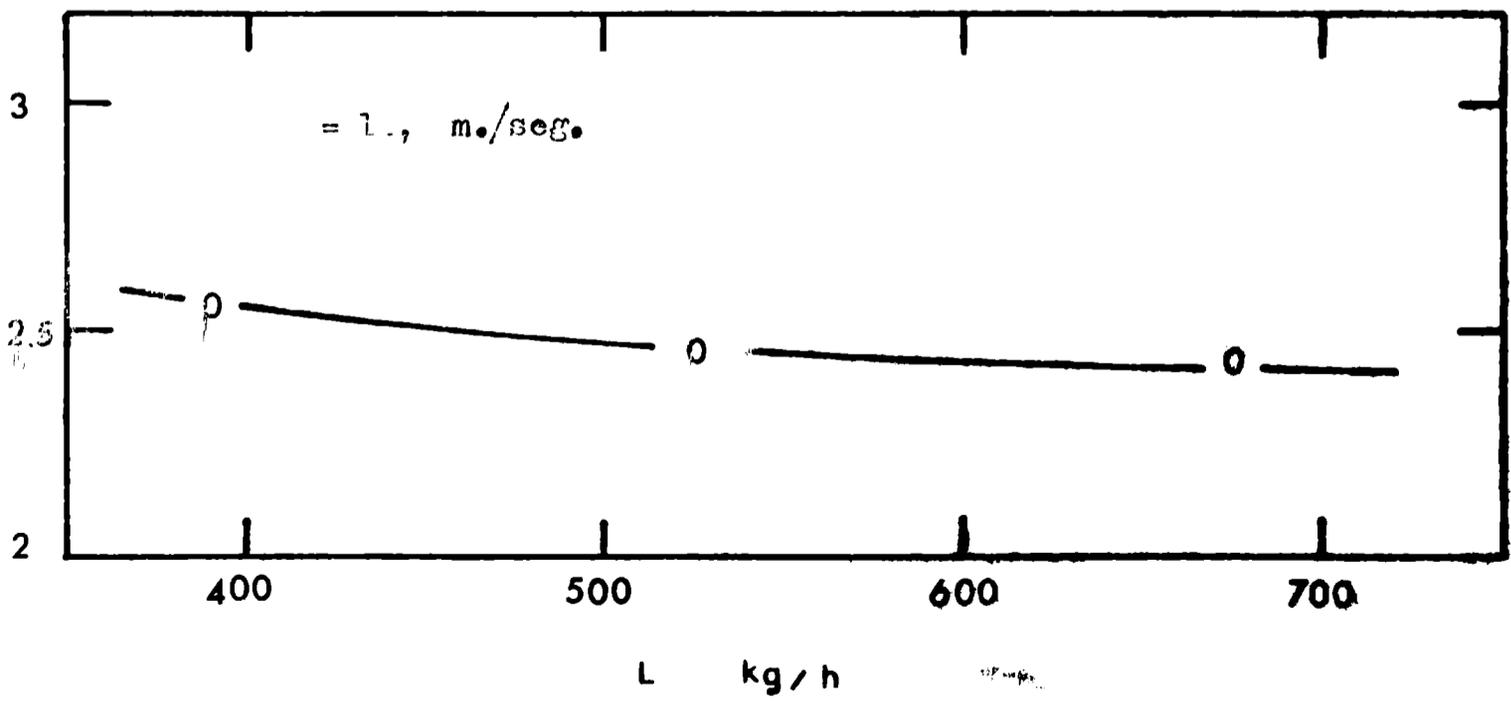


Fig.19

$L$  kg/h

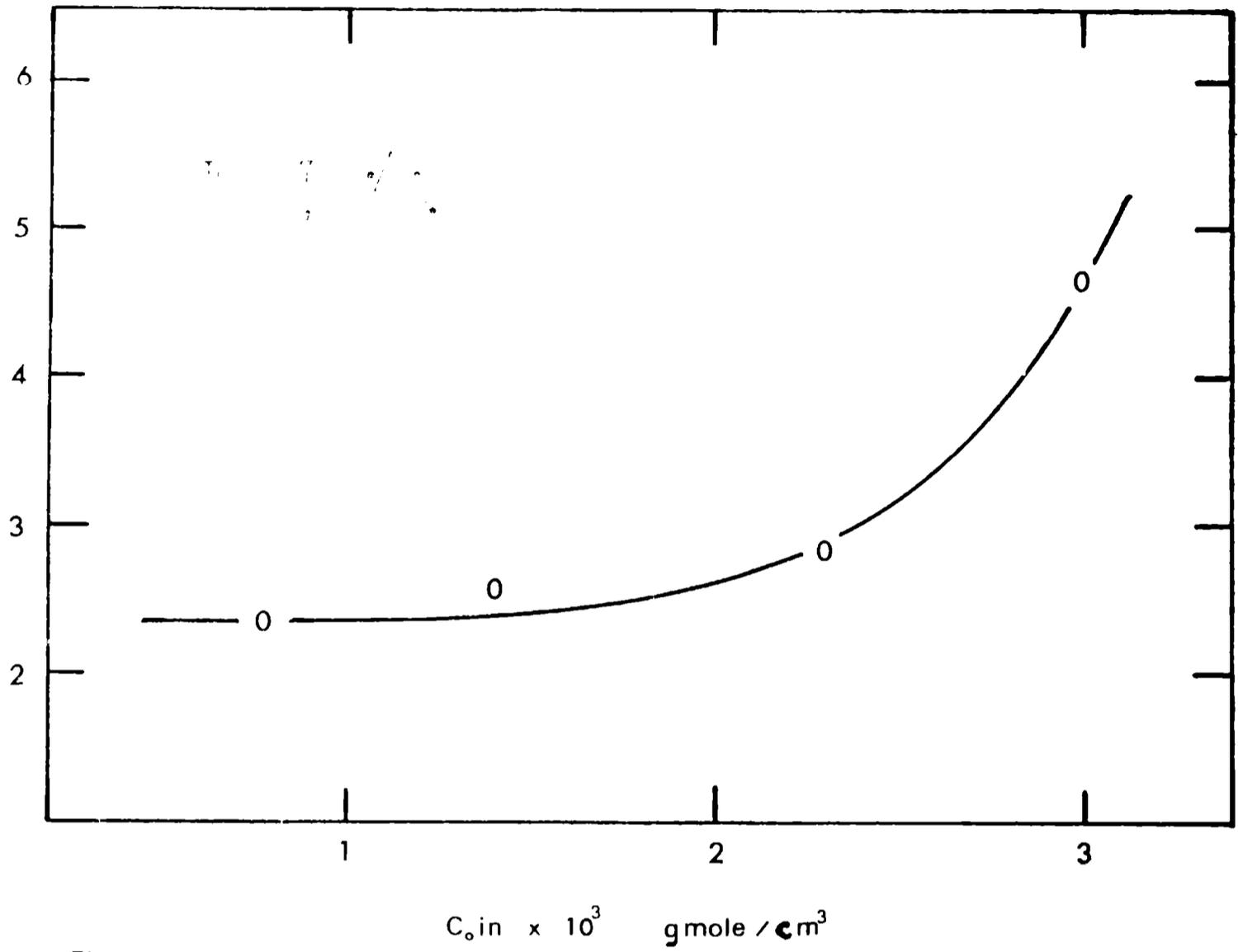


Fig.20

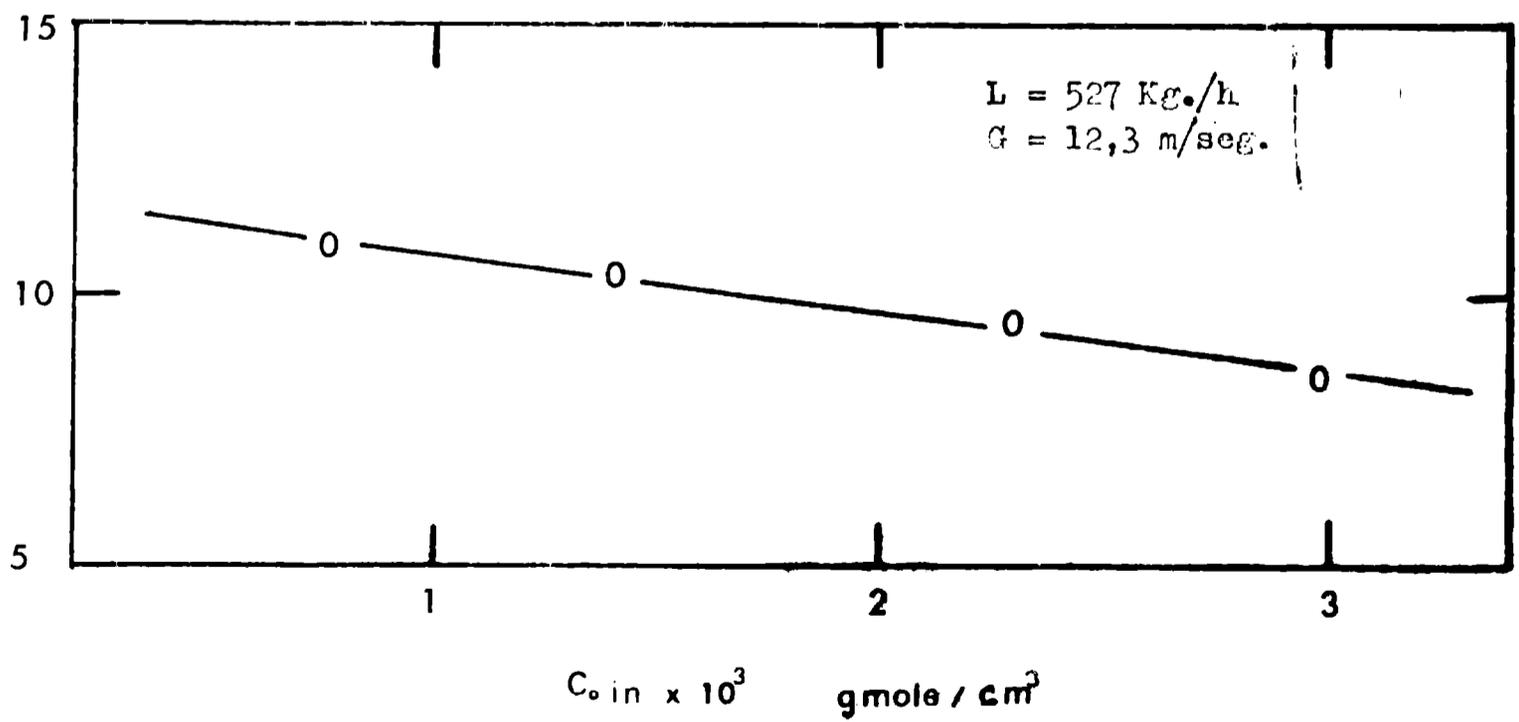


Fig. 21

Ellos comentan que el uso de antiespumante disminuye el valor de  $k_L$  en alrededor de 30%.

Para una velocidad de gas en las perforaciones de 11 m/seg. Pasiuk-Bronikowska (26) obtiene valores de  $k_L$  entre 0,17 a 0,27 cm/seg., que son considerablemente mayores que los valores máximos que dan Sharma y Gupta, esto es posible porque la ausencia de un agente antiespumante hace que la primera obtenga valores tan altos

## 7.7

### Conclusiones

Estas experiencias permiten ver la aplicabilidad del método propuesto, a un plato perforado con vertederos, para la determinación de área interfacial y coeficientes de transferencia de masa.

Las conclusiones son las siguientes:

- 1) Se determinan valores de  $a$  y  $k_L$  considerando la resistencia de la fase gaseosa  $k_G$ , y posteriormente sin considerar esta resistencia. Se comprueba la coincidencia de valores por ambos caminos, que indica la inexistencia de resistencia en fase gaseosa para las condiciones de operación de éste plato perforado.
- 2) Se analiza la variación del área interfacial con el caudal de gas y de líquido, calculada despreciando las resistencias de fase gas y líquido por ser despreciables aún para las condiciones límites de trabajo con este sistema. Se compara los resultados, con los obtenidos por otros autores que utilizaron un plato perforado similar pero sin vertederos, por falta de información de platos con vertederos.
- 3) Se muestran los resultados obtenidos de la variación de área interfacial y  $k_L$ , con la concentración de la solución (referida a la concentración inicial de la solución) para ver el efecto combinado que tiene la fuerza iónica y viscosidad de la solución.

8

CONCLUSIONES GENERALES

El propósito de esta investigación fue encontrar un método de aplicación general que sea sencillo y práctico para la determinación de área interfacial y coeficientes de transferencia de masa, lo que es primordial para el diseño de equipos industriales.

Las conclusiones generales son las siguientes:

- 1) En base a los modelos existentes, se propone un método basado en la teoría de la renovación de Danckwerts que requiere simplemente medir la variación de la velocidad de absorción en función de la concentración, en un solo sistema gas-líquido, para el cálculo simultáneo de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$ .
- 2) Se comprueba el método propuesto en una celda agitada magnéticamente, y se analiza el efecto que produce la velocidad de agitación sobre  $a$  y  $k_L$ .
- 3) Luego de comprobar las características de comportamiento y rangos de trabajo, se aplica el método, a la determinación de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$ , en un plato perforado con vertederos.
- 4) Se analiza el efecto que producen distintas variables, como caudal de gas y líquido, concentración de la solución, etc. sobre  $a$  y  $k_L$ .
- 5) En resumen se concluye que el método propuesto es de gran utilidad por los siguientes motivos: es sencillo y práctico, requiere un solo sistema gas líquido, y es de aplicabilidad general.

*J. Bartholomew*

BIBLIOGRAFIA CITADA

- (1) HATTA S. Tech.Repts. Tohoku Imp.Univ. 10, 119 (1932)
- (2) VAN KREVELEN D. y HOFTIJZER R. Rec.Trav.Chim. 67,9/10, 563 (1948)
- (3) DANCKWERTS P.V. Trans.Faraday Soc. 46,300,(1950)
- (4) BRIAN P.L.T., HURLEY J.F. y HASSELTINE E.H., A.I.Ch.E. Journal, 7,226 (1961)
- (5) PEARSON J.R.A., App.Sci.Res.,All, 321,(1963)
- (6) HIKITA H. y ASAI S. Int.Chem.Eng. 4,332,(1964)
- (7) ASTARITA G. Chem. Eng.Sci. 17,708,(1962)
- (8) RONCO J.J. RIVAROLA J.B. y FIXMAN M. Génie Chimique 99,8,(1968)
- (9) LYNN S., STRAATEMEIER J.R. y KRAMERS H.,Chem.Eng.Sci.,4,63,(1955)
- (10) ASTARITA G., MARRUCI G. y F. GIOIA, Chem.Engng.Sci,19,95,(1964)  
Amsterdam.
- (11) CHAMBRE P.L. y YOUNG J.D.,Phys.Fluids.,1,48,(1958)
- (12) RONCO J.J. y COEURET F. Genie Chimique 100,2,(1968)
- (13) SZEKELY J., Chem.Engng..Sci. 20,141,(1965)
- (14) DANCKWERTS P.V. Ind.Eng.Chem.,43,1460 (1951)
- (15) KISHINEVSKII M.K. Journal of Aplied Chem.(U.S.S.R.) 38,95,(1965)
- (16) KISHINEVSKII M.K. y KORMIENKO T.S. Tr.Kshinevskogo Politekhn. Inst. 5,3,(1966)
- (17) VIETH W.R.,PORTER J.H. y SHERWOOD T.K. Ind.Chem.Fundamentals, 2,1,(1954)
- (18) MARANGOZIS J.TRASS O. y Johnson A.I.,Can.Journal of Chem.Engrs 41,195 (1963)
- (19) DANCKWERTS P.V. y KENNEDY A.M.,Trans Instn Chem. Engrs,32,349,(1954)
- (20) RONCO J.J. y COEURET F. Apuntes del Curso "Absorción con Reacción Química" (1968)
- (21) DANCKWERTS P.V. y SHARMA M.M., The Chem. Engr,Oct.,CE244,(1966)
- (22) PINSENT B.R.W.,PEARSON L. y ROUGHTON F.J.W.,Trans.Faraday Soc.52,1512, (1956)
- (23) NIJSING R.A., HENDRIKSZ R.H. y KRAMERS H.,Chem.Engng.Sci.10,88 (1959)
- (24) VAN KREVELEN D.W. y HOFTYZER P.J.Chimie etIndustrie: Numéro Speciale du XXI Congres Internat.de Chimie Indus.Bruxelles,Sept,168,(1948)
- (25) SHARMA M.M. y DANCKWERTS P.V.Brit.Chem.Engng.,15,522,(1970)
- (26) PASIUK-BRONIKOWSKA W,Chem.Engng.Sci.24,1139 (1969)

- (27) MAYFIELD F.D., CHURCH W, GREEN A.LEE C.D. y RASMUSEN R.C. *Ind.Engng.Chem.* 44,2238,(1952)
- (28) PRINCE R.G.H. *Internat.Symposium on Distillation (1960) Inst.Chem.Engrs.*
- (29) PROCTOR J.F. y THAYER V.R. *Chem.Engng.Progr.*58,4,(1962)
- (30) PROCTOR J.F. *Chem. Engng.Progr.*(1963),59,3,47.
- (31) EAGLE R.S. y LEMIEUX E.J. *Chem.Engng.Progr.* 1964,60,10,74.
- (32) ROBIN B.J. *British Chem. Engr.* 4,351,(1959)
- (33) WOOD R.M. *Trans.Instn.Chem.Engrs*,39,313,(1961)
- (34) NORMAN W.S. y GROCOTT G.J. *Trans.Instn.Chem.Engrs.* 39,305,(1961)
- (35) MAJEWSKY J. *British Chem.Engng.* 4,336,(1959)
- (36) GROHSE E.W. y STARK J.*Chem.Engrs.Progr.* 7,59,(1963)
- (37) ELLIS S.M. y MOYADE H.K. *Brit.Chem.ENGNG.*4,342,(1959)
- (38) ENGLISH G.E. y VAN WINKLE M. *Chem. Engng.* 11,241,(1963)
- (39) GERSTER y COL. A.I.Ch. E.Research Committee,Final Report,1958,Univ.of Delaware
- (40) GERSTER J.A., BONNETT E.W. y HERR I.*Chem. Engng.Progrs.*,47,523,621,(1951).-
- (41) HUNT C.A., HANSON D.N. y WILKE C.R. *A.I.Ch.E. Journal*,1,441,(1955)
- (42) ELLIS S.R., BARKER P.E. y CONTRACTOR R.N.*Trans.Chem. Engrs.*21,381 (1960)
- (43) ZNIDERWEG F.J.y HARMENS A.*Chem.Engng.Sci.* 9,89, (1958)
- (44) HASLDEN G.G. y THOROGOOD R.M.*Trans.Instn.Chem.Engrs.*42,81,(1964)
- (45) PORTER K.E. *Trans.Instn.Chem.Engrs*,41,320,(1963)
- (46) HARRIS I.J. y ROPER G.H. *The Can.Journal of Chem.Engrs.*Dec,245,(1962)
- (47) PORTER,K.E.,KING.M.B. y VARSHNLY K.J.*Trans.Instn.Chem.Engrs.*44,T274,(1966)
- (48) KRASUK.J.H. y RONCO.J.J.Tesis F.C.E.N.(U.B.A.)
- (49) SHARMA M.M.,MASHELKAR R.A. y MEHTA V.D.*Brit.Chem.Engng.*14,70,(1969)
- (50) SHARMA M.M. y GUPTA R.K.*Trans.Instn.Chem. Engrs.*45,169,(1967)
- (51) VOGEL A.I. "*Quantitative Inorg.Analysis*" 2nd.ed.1951 (New York;Longman, Croen y Co.).-

NOMENCLATURA

a	Area interfacial por unidad de volumen de dispersión ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
A	Area interfacial efectiva ( $\text{cm}^2$ )
C	Concentración ( $\text{gmol}/\text{cm}^3$ )
$C_0$	Concentración del reactivo en el seno de la solución ( $\text{gmol}/\text{cm}^3$ )
$C_{0in}$	Concentración inicial del reactivo en la solución ( $\text{gmol}/\text{cm}^3$ )
D	Coeficiente de difusión ( $\text{cm}^2/\text{seg.}$ )
G	Caudal de gas ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
H	Solubilidad del $\text{CO}_2$ en la solución ( $\text{gmol}/\text{cm}^3 \text{ atm}$ )
I	Fuerza iónica ( $\text{gion}/\text{l}$ )
$k, k_{II}$	Constante de velocidad de reacción de segundo orden ( $\text{cm}^3/\text{gmol seg}$ )
$k_I$	Constante de velocidad de reacción de primer orden ( $\text{cm}^3/\text{gmol seg}$ )
$k_L$	Coeficiente de transferencia de masa para la fase líquida en ausencia de reacción química ( $\text{cm}/\text{seg}$ )
$k_G$	Coeficiente de transferencia de masa para la fase gaseosa ( $\text{g.mol.}/\text{atm. seg.cm}^2$ )
$k'_L$	Coeficiente de transferencia de masa para la fase líq. con reac. química.
$K_G$	Coeficiente global de transferencia de masa ( $\text{gmol}/\text{atm. seg.cm}^2$ )
L	Caudal de solución ( $\text{kg}/\text{h}$ )
P	Presión total (atm)
R	Velocidad específica de absorción ( $\text{gmol}/\text{cm}^2 \text{ seg}$ )
r	Velocidad de reacción ( $\text{gmol}/\text{cm}^3 \text{ seg.}$ )
t	Tiempo (seg)
T	Temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )
U	Velocidad superficial del gas ( $\text{m}/\text{seg}$ )
y	Fracción molar de $\text{CO}_2$ en la fase gaseosa
$y^*$	Fracción molar de $\text{CO}_2$ en la interfase
z	Factor estequiométrico
$\phi$	Factor de reacción
$(\phi)$	Factor de reacción corresp. a la reac. infinitamente rápida
$\mu$	Viscosidad de la solución (cp).-
$\Sigma_i$	
$\bar{X}$	

Tabla de resultados de las determinaciones experimentales realizadas en:

CELDA AGITADA MAGNETICAMENTE

Las tablas de las paginas 52 hasta 56, muestran las condiciones de operación de las determinaciones, y los valores obtenidos de RA y  $(kDC_0)$ .

Las tablas de las paginas 57 hasta 60, de los valores obtenidos para graficar utilizando la ecuación (18) y la ecuación (11).

Las tablas de las paginas 61 hasta 63, de los valores obtenidos para graficar utilizando la ecuación (13)

La tabla de la pagina 64, es un resumen de los resultados obtenidos de A,  $k_L$ ,  $k_G$ .

Determinación N°	$C_0 \times 10^3$	$C_{CO_2} \times 10^3$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	% $CO_2$ en Gas	Agitación relativa del Liq.	Tiempo de abs. 10 ml. de $CO_2$ seg.	$\frac{R}{mol} \frac{seg}{cm^2}$	$\frac{RA \times 10^6}{cm^2 \frac{seg}{mol}}$	$k D^2$
1	2,00	0,000	289,5	290,5	6,0	1,0	203	2,00	0,130	
2	1,75	0,116	289,5	290,5	6,0	1,0	216	1,93	0,1145	
3	1,50	0,233	289,5	290,5	6,0	1,0	216	1,93	0,100	
4	1,20	0,372	289,5	290,5	6,0	1,0	245	1,70	0,0822	
5	1,00	0,466	289,5	290,5	6,0	1,0	254	1,64	0,0690	
6	0,80	0,559	289,5	290,5	6,0	1,0	273	1,50	0,0568	
7	0,65	0,630	289,5	290,5	6,0	1,0	292	1,39	0,0470	
8	0,50	0,700	289,5	290,5	6,0	1,0	348	1,20	0,0364	
9	0,30	0,793	289,5	290,5	6,0	1,0	511	0,82	0,0220	
10	0,20	0,840	289,5	290,5	6,0	1,0	463	0,90	0,01495	
11	0,10	0,886	289,5	290,5	6,0	1,0	655	0,64	0,0075	
12	2,00	0,000	293,5	295,0	6,0	1,0	178	2,33	0,1860	

Determinación N°	$C_0 \times 10^3$ $\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3}$	$C_{CO_2} \times 10^3$ $\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3}$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	% $CO_2$ en Gas	Agitación relativa del Liq.	Tiempo de abs. de $CO_2$ de 10ml. de $CO_2$ seg.	RA $\times 10^6$ $\frac{\text{gmol}}{\text{seg.}}$	$K D C_0$ $\frac{\text{cm}^2}{\text{seg.}}$
13	1,75	0,116	293,5	295,0	6,0	1,0	182	2,28	0,167
14	1,50	0,233	293,5	295,0	6,0	1,0	187	2,22	0,146
15	1,20	0,372	293,5	295,0	6,0	1,0	201	2,66	0,120
16	1,00	0,466	293,5	295,0	6,0	1,0	217	1,91	0,101
17	0,80	0,559	293,5	295,0	6,0	1,0	214	1,94	0,083
18	0,65	0,630	293,5	295,0	6,0	1,0	229	1,81	0,068
19	0,50	0,700	293,5	295,0	6,0	1,0	236	1,74	0,0533
20	0,30	0,793	293,5	295,0	6,0	1,0	262	1,585	0,0325
21	0,20	0,840	293,5	295,0	6,0	1,0	447	0,927	0,022
22	0,15	0,863	293,5	295,0	6,0	1,0	415	0,998	0,0165
23	0,10	0,886	293,5	295,0	6,0	1,0	598	0,6743	0,011
24	0,00	0,000	293,0	295,0	6,0	1,3	123	3,36	0,184

Determinación No	$\text{cm}^3 \times 10^3$	$\text{cm}^3 \times 10^3$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	% $\text{CO}_2$ en Gas	Agitación relativa del Liq.	Tiempo de abs. de 10ml. de $\text{CO}_2$ seg.	$\frac{\text{gmol}}{\text{seg.}}$	$\frac{\text{seg}}{\text{cm}^2}$	$\text{RA} \times 10^6$	$\text{K D } ^\circ$
	$\frac{\text{cm}^3}{\text{Rmol}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{Rmol}}$	°K	°K	%	—	seg.				
25	1,75	0,116	293,0	295,0	6,0	1,3	125	3,30	0,1670		
26	1,20	0,372	293,0	295,0	6,0	1,3	147	2,81	0,1203		
27	1,00	0,466	293,0	295,0	6,0	1,3	150	2,75	0,1016		
28	0,80	0,559	293,0	295,0	6,0	1,3	166	2,49	0,0830		
29	0,65	0,630	293,0	295,0	6,0	1,3	169	2,44	0,0684		
30	0,50	0,700	293,0	295,0	6,0	1,3	184	2,25	0,0533		
31	0,30	0,793	293,0	295,0	6,0	1,3	243	1,70	0,0325		
32	0,20	0,840	293,0	295,0	6,0	1,3	275	1,50	0,02184		
33	0,15	0,863	293,0	295,0	6,0	1,3	344	1,20	0,0165		
34	0,10	0,886	293,0	295,0	6,0	1,3	394	1,05	0,01101		
35	2,00	0,000	295,5	294,5	6,0	1,3	102,6	4,04	0,2400		
36	1,75	0,116	295,5	294,5	6,0	1,3	118,7	3,49	0,2150		

Determinación No	$\text{CO}_2 \times 10^3$	$\text{CO}_2 \times 10^3$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	% $\text{CO}_2$ en Gas	Agitación Relativa del Liq.	Tempo de abs. de $\text{CO}_2$	$\frac{\text{gmol}}{\text{seg.}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{seg.}^2}$
37	1,50	0,233	295,5	294,5	6,0	1,3	129,2	3,206	0,1880
38	1,20	0,372	295,5	294,5	6,0	1,3	134	3,100	0,1550
39	1,00	0,466	295,5	294,5	6,0	1,3	138	3,000	0,1310
40	0,80	0,559	295,5	294,5	6,0	1,3	165,5	2,533	0,1069
41	0,65	0,630	295,5	294,5	6,0	1,3	171	2,423	0,0880
42	0,30	0,793	295,5	294,5	6,0	1,3	213	2,945	0,0418
43	0,20	0,840	295,5	294,5	6,0	1,3	254,5	1,627	0,0281
44	0,15	0,863	295,5	294,5	6,0	1,3	293	1,414	0,0212
45	0,10	0,886	295,5	294,5	6,0	1,3	401,5	1,032	0,0142
46	2,00	0,000	293,0	295,0	6,0	1,5	84,3	4,897	0,1864
47	1,50	0,233	293,0	295,0	6,0	1,5	94	4,380	0,1464
48	1,20	0,372	293,0	295,0	6,0	1,5	100	4,400	0,1202

Determinación N°	$C_{CO_2} \times 10^3$ $\frac{cm^3}{cm^3}$	$C_{CO_2} \times 10^3$ $\frac{gmol}{cm^3}$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	% $CO_2$ en Gas	Agitación relativa del Liq.	Tiempo de abs. de 10ml. de $CO_2$ seg	$RA \times 10^6$ $\frac{gmol}{seg.}$	$K D C^o$ $\frac{cm^2}{seg.}$
49	1,00	0,466	293,0	295,0	6,0	1,5	111	3,700	0,1015
50	0,80	0,559	293,0	295,0	6,0	1,5	118	3,570	0,0850
51	0,65	0,630	293,0	295,0	6,0	1,5	131	3,140	0,0684
52	0,50	0,700	293,0	295,0	6,0	1,5	155	2,668	0,0533
53	0,30	0,793	293,0	295,0	6,0	1,5	156	2,480	0,0325
54	0,20	0,840	293,0	295,0	6,0	1,5	217	1,906	0,02184
55	0,15	0,863	293,0	295,0	6,0	1,5	237	1,745	0,0165
56	0,10	0,886	293,0	295,0	6,0	1,5	310	1,330	0,01101

Agitación relativa del Liq.	$RA \times 10^6$	$k D C_o$	$\left[ \frac{(RA)^2 d(kDC_o)}{2 \gamma PH d(RA)} \right]^{2/3}$	$\frac{\gamma PA}{RA} \times 10^5$	$\frac{1}{d(kDC_o + k_L^2)} \times 10^5$
	$\frac{gmol}{seg.}$	$\frac{cm^2}{seg.}$	$(\frac{cm^5}{seg^3})^{2/3}$	$\frac{cm^2 seg atm}{gmol}$	$\frac{cm seg^2 atm}{gmol}$
1,0	2,17	0,180	0,570	1,435	1,03
1,0	2,10	0,160	0,500	1,485	1,095
1,0	2,00	0,138	0,430	1,560	1,18
1,0	1,95	0,120	0,365	1,635	1,32
1,0	1,80	0,095	0,290	1,732	1,42
1,0	1,60	0,080	0,242	1,990	1,65
1,0	1,50	0,060	0,177	2,080	1,79
1,0	1,35	0,046	0,140	2,360	2,02
1,0	1,10	0,031	0,089	2,340	2,49
1,0	0,80	0,016	0,050	3,970	2,65
1,0	2,33	0,180	0,695	1,775	1,195
1,0	2,25	0,160	0,610	1,337	1,270
1,0	2,15	0,138	0,520	1,925	1,362

Agitación relativa del Liq.	RA x 10 <sup>6</sup>	k D C <sub>o</sub>	$\left[ \frac{(RA)^2 d(kDC_o)}{2 \gamma PH d(RA)} \right]^{2/3}$	$\frac{YPA}{RA} \times 10^5$	$\frac{1}{H} (kDC_o + k_L^2) \times 10^5$
	g mol / seg	cm <sup>2</sup> / seg.	(cm <sup>5</sup> / seg <sup>3</sup> ) <sup>2/3</sup>	cm <sup>2</sup> seg atm / g mol	cm seg <sup>2</sup> atm / g mol
1,0	1,93	0,095	0,350	2,141	1,640
1,0	1,65	0,060	0,222	2,520	2,045
1,0	1,26	0,031	0,118	3,280	2,780
1,3	3,30	0,168	1,160	1,620	1,232
1,3	3,20	0,157	0,700		
1,3	3,10	0,139	0,620	1,725	1,362
1,3	2,90	0,115	0,505	1,845	1,495
1,3	2,70	0,095	0,430		
1,3	2,50	0,076	0,342	2,140	1,830
1,3	2,30	0,060	0,270	2,390	2,050
1,3	2,00	0,044	0,207	2,670	2,380
1,3	1,80	0,035	0,162	3,030	2,750
1,3	1,50	0,0235	0,104	3,560	3,180
1,3	1,05	0,010	0,052		

Agitación relativa del Liq.	RA x 10 <sup>5</sup>	k D C <sub>o</sub>	$\frac{(RA)^2 d(kDC_o)^{\frac{2}{3}}}{2 yPH d(RA)}$	$\frac{yPA}{R_L} \times 10^5$	$\frac{1, H(kDC_o + k_L^2)}{x 10^5}$
	gmcl/seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	(cm <sup>5</sup> /seg <sup>3</sup> ) <sup><math>\frac{2}{3}</math></sup>	cm <sup>2</sup> seg <sup>2</sup> atm gmol	cm <sup>2</sup> seg <sup>2</sup> atm gmol
1,3	3,30	0,178	0,800	1,515	1,232
1,3	3,10	0,145	0,670	1,720	1,365
1,3	2,80	0,107	0,485	1,905	1,585
1,3	2,50	0,077	0,363	2,135	1,860
1,3	2,20	0,057	0,245	2,420	2,150
1,3	1,90	0,041	0,178	2,810	2,520
1,3	1,50	0,024	0,106	3,560	3,240
1,5	4,80	0,178	0,8798	1,327	1,195
1,5	4,40	0,145	0,750		
1,5	4,30	0,139	0,706	1,430	1,350
1,5	4,00	0,118	0,621	1,531	1,460
1,5	3,90	0,1085	0,550		
1,5	3,60	0,0930	0,472	1,770	1,640

Agitación relativa del Liq.	$RA \times 10^6$ gmol/seg	$k D C_0$ $\text{cm}^2/\text{seg}^2$	$\frac{(RA)^2 d(kDC_0)^{\frac{2}{3}}}{2 YPH d(RA)}$ $(\text{cm}^5/\text{seg}^3)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{YPA}{RA} \times 10^5$ $\frac{\text{cm}^2 \text{ seg atm}}{\text{gmol}}$	$\frac{1}{H(kDC_0 + k_L^2)} \times 10^5$ $\frac{\text{cm seg}^2 \text{ atm}}{\text{gmol}}$
1,5	3,20	0,0725	0,366	1,990	1,840
1,5	2,90	0,057	0,300	2,275	2,110
1,5	2,80	0,054	0,266	2,650	2,440
1,5	2,40	0,039	0,207	3,020	2,910
1,5	2,10	0,028	0,134	3,980	3,625
1,5	1,60	0,015	0,0925	5,30	4,880
1,5	1,20	0,006	0,0550		

Agitación relativa del Liq	RA x 10 <sup>6</sup>	k D C <sub>o</sub>	(RA / yHP) <sup>2</sup>
_____	gmol/seg	cm <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>	cm <sup>6</sup> /seg <sup>2</sup>
1,0	2,00	0,130	2,130
1,0	1,93	0,1145	1,932
1,0	1,93	0,100	1,982
1,0	1,70	0,0822	1,540
1,0	1,64	0,069	1,430
1,0	1,50	0,0568	1,195
1,0	1,39	0,047	1,025
1,0	1,20	0,0364	0,768
1,0	0,82	0,022	0,358
1,0	0,90	0,01495	0,430
1,0	0,64	0,0075	0,218
1,3	3,36	0,184	8,255
1,3	3,30	0,167	7,950
1,3	2,81	0,1203	5,750
1,3	2,75	0,1016	5,520

Agitación relativa del Liq.	RA x 10 <sup>6</sup>	k D C <sub>o</sub>	(RA / yHP) <sup>2</sup>
_____	gmol/seg	cm <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>	cm <sup>6</sup> /s <sup>2</sup> g <sup>2</sup>
1,3	2,49	0,0830	4,530
1,3	2,44	0,0684	4,350
1,3	2,25	0,0533	3,710
1,3	1,70	0,0325	2,110
1,3	1,50	0,02184	1,640
1,3	1,20	0,0165	1,025
1,3	1,05	0,01101	0,805
1,5	4,897	0,1864	17,50
1,5	4,38	0,1464	14,05
1,5	4,10	0,1202	12,30
1,5	3,70	0,1015	10,00
1,5	3,50	0,0850	8,95
1,5	3,14	0,0684	7,20

Agitación relativa del Liq.	RA x 10 <sup>6</sup>	k D C <sub>o</sub>	(RA / YHP) <sup>2</sup>
_____	gmol/seg	cm <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>	cm <sup>6</sup> /seg <sup>2</sup>
1,5	2,668	0,0533	5,20
1,5	2,480	0,0325	4,48
1,5	1,906	0,02184	2,65
1,5	1,745	0,0165	2,22
1,5	1,330	0,1101	1,29

Símbolo	Agitación relativa del Liq.	Temp. Liq	y	A	$k_L$	$k_G$
	_____	°K	_____	cm <sup>2</sup>	cm / seg	$\frac{\text{gmol}}{\text{atm seg cm}^2}$
0	1,0	289,5	0,06	5,30	0,029	$3,1 \times 10^{-5}$
x	1,0 <sup>x</sup>	293,5	0,06	7,15	0,026	"
	1,3	293,5	0,06	9,15	0,048	"
	1,3	295,5	0,06	9,15	0,048	"
+	1,5	293,0	0,06	10,60	0,072	"

x Se usó un agitador corto.

Tablas de resultados de las determinaciones realizadas en

PALTO PERFORADO CON VERTEDEROS

Las tablas de las paginas 66 hasta 70 muestran las condiciones de operación y resultados de las pruebas hidráulicas.

Las tablas de las paginas 71 hasta 74 ,de las distintas condiciones de operación, los valores obtenidos de  $R_a$  y  $(kDCo)$ , y los valores para graficar la ecuación (32).

La tabla de la pagina 75 da los valores para graficar la ecuación (33).

Las tablas de las paginas 76 hasta 78 , da los valores para graficar las ecuaciones (30) y (31).

La tabla de la pagina 79 da los valores para mostrar el efecto de  $G$  y  $L$  sobre  $a$ .-

La tabla de la pagina 80, es un resumen de los resultados obtenidos de  $a$ ,  $k_L$  y  $k_G$  -

Sistema aire-plato seco.

Resultados de la prueba hidráulica

Velocidad del gas en la columna (cm/seg. )	$\Delta P$ plato seco (cm. de agua)
13,9	0,75
19,9	0,75
25,7	1,10
30,4	1,40
35,4	1,85
39,0	2,20
41,4	2,40
42,6	2,56

Sistema aire-agua

Resultado de la prueba hidráulica

Velocidad del gas (cm/seg.)	Veloc.del liq. (lts/min.)	$\Delta P$ plato (cm.de agua)
13,9	3,8	2,9
25,7	"	3,5
36,3	"	4,3
40,6	"	4,7
13,9	4,6	3,0
25,7	"	3,6
36,3	"	4,4
40,6	"	4,8
13,9	8,8	3,1
25,7	"	3,7
36,3	"	4,5
40,6	"	4,7

Sistema aire-agua

Resultado de la prueba hidráulica

Velocidad del gas (cm/seg.)	Veloc. del liq. (lts./min.)	Altura de disper. (cm)
13,9	3,8	5,7
25,7	"	6,0
36,3	"	6,5
40,6	"	6,8
13,9	4,6	6,5
25,7	"	6,7
36,3	"	7,0
40,6	"	7,3
13,9	8,8	7,9
25,7	"	8,0
36,3	"	8,2
40,6	"	8,5

Sistema: aire-soluciones acuosas de Carbonato de Sodio

Resultado de las pruebas hidráulicas

Velocidad del gas: 36,3 cm/seg

Velocidad del líquido: 6,2 lts./min

Tiempo (min )	Conc. $\text{CO}_3\text{Na}_2$ (gr./lts.)	Altura de dispersión (cm.)
0	11,5	6,5
5	"	6,8
10	"	7,2
15	"	8,0
0	22,2	5,6
5	"	5,8
10	"	6,0
15	"	6,2
0	32,2	5,1
5	"	5,3
10	"	5,5
15	"	5,8
0	41,4	4,9
5	"	5,1
10	"	5,3
15	"	5,6

Sistema: aire-soluciones acuosas de Hidroxido de Sodio

Resultado de las pruebas hidráulicas

Velocidad del gas: 36,3 cm/seg

Velocidad del líquido: 6,2 lts./min

Tiempo (min)	Conc. NaOH (gr./lts.)	Alt. disp. (cm)
0	11,3	5,7
10	"	5,7
20	"	5,7
25	"	5,7
0	22,2	5,6
10	"	5,6
20	"	5,6
25	"	5,6
0	32,7	5,6
10	"	5,6
20	"	5,6
25	"	5,6



Determinación No	$C_o$ (inicial) $\times 10^3$	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	L (caudal de solución) Kg/h	$m^3/h$	% $CO_2$ en Gas	$cm^3/cm^3$	$cm^3/cm^3$	$cm^2/seg^2$	$\frac{R \text{ mol}}{cm^3 \text{ seg}}$	$seg^{-2} (Ra/YHP \sqrt{D})^2 \times 10^{-5}$	$seg^{-1} k C_o \times 10^{-4}$
13	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	2,385	0,396	0,2735	2,00		
14	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	2,133	0,5223	0,2525	1,94		
15	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	1,683	0,746	0,2035	1,78		
16	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	1,573	0,7997	0,1965	1,575		
17	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	1,365	0,9035	0,1732	1,630		
18	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	1,080	1,048	0,1405	4,425	7,830	3,423
19	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,983	1,943	0,1285	1,415	7,250	3,136
20	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,897	1,1367	0,1181	1,310	6,95	2,880
21	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,815	1,1765	0,1079	1,275	6,180	2,632
22	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,663	1,2525	0,0890	1,135	5,250	2,166
23	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,591	1,2885	0,0795	1,08	4,76	1,940
24	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,523	1,3225	0,0707	1,027	4,32	1,726
25	2,98	301,5	307	527	5,38	7,4	0,397	1,3855	0,0543	0,895	3,28	1,323

Determinación No	$C_0$ (inicial) $\times 10^3$	Temp. de Líq. °K	Temp. de Gas °K	L (caudal de solución) g/h	G (caudal de gas) g/h	% $CO_2$ en Gas	$C_0 \times 10^3$ g/mol/cm <sup>3</sup>	$C_{CO_2} \times 10^3$ g/mol/cm <sup>3</sup>	$k D_0$ cm <sup>2</sup> /seg <sup>2</sup>	$R a \times 10^6$ g/mol/cm <sup>3</sup> seg	$seg^{-1} cm^{-2} (Ra/YHPD)^2 \times 10^{-5}$	$seg^{-1} \times 10^{-4}$
26	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,708	0,061	0,165	1,815	0,583	0,965
27	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,586	0,123	0,1395	1,642	0,493	0,815
28	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,467	0,183	0,1131	1,570	0,107	0,662
29	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,363	0,235	0,1895	1,350	0,350	0,523
30	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,277	0,279	0,0693	1,190	0,261	0,405
31	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,198	0,318	0,0501	1,005	0,1875	0,293
32	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,133	0,352	0,0341	0,010	0,1222	0,199
33	0,772	300	307	527	5,38	7,4	0,082	0,380	0,0212	0,050	0,080	0,124
34	1,608	303	307	527	5,38	7,3	1,499	0,117	0,4793	1,550	1,240	3,340
35	1,608	303	307	527	2,95	7,3	1,291	0,233	0,4271	1,490	1,010	2,970
36	1,608	303	307	527	2,95	7,3	1,100	0,342	0,3757	1,360	0,870	2,620
37	1,608	303	307	527	2,95	7,3	0,9225	0,445	0,3247	1,390	0,770	2,265
38	1,608	303	307	527	2,95	7,3	0,755	0,543	0,2733	1,195	0,650	1,905

Determinación No	$^{\circ}\text{C}$ (inicial) $\times 10^3$	$^{\circ}\text{C}$ Temp. de Liq.	$^{\circ}\text{C}$ Temp. de Gas	L (caudal de solución) Kg/h	$\text{m}^3/\text{h}$ G (caudal de gas)	% $\text{CO}_2$ en Gas	$\text{gmol}/\text{cm}^3$ $\text{CO}_2 \times 10^3$	$\text{gmol}/\text{cm}^3$ $\text{CO}_2 \times 10^3$	$\text{cm}^2/\text{seg}^2$ $\text{K D } ^{\circ}$	$\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3 \text{ seg}}$ $\text{Ra} \times 10^6$	$\text{seg}^{-1} \text{cm}^{-2}$ $(\text{Ra}/\text{YHP} \sqrt{D})^2 \times 10^{-5}$	$\text{seg}^{-1}$ $\text{K } ^{\circ} \times 10^{-4}$
39	1,608	303	307	527	2,95	7,4	0,603	0,633	0,2239	1,070	0,520	1,560
40	1,608	303	307	527	2,95	7,4	0,468	0,714	0,1778	0,903	0,371	1,240
41	2,300	299	305	527	5,38	7,4	2,100	0,153	0,4100	2,020	3,330	4,100
42	2,300	299	305	527	5,38	7,4	1,725	0,343	0,3500	1,875	2,880	3,500
43	2,300	299	305	527	5,38	7,4	1,370	0,521	0,2880	1,770	2,560	2,880
44	2,300	299	305	527	5,38	7,4	1,050	0,681	0,2280	1,500	1,840	2,280
45	2,300	299	305	527	5,38	7,4	0,768	0,822	0,1710	1,315	1,420	1,710
46	2,300	299	305	527	5,38	7,4	0,525	0,944	0,1195	1,120	1,020	1,195

Determinación No	$C^{\circ}$ (inicial) $\times 10^3$	Temp. de Liq. $^{\circ}K$	Temp. de Gas $^{\circ}K$	L (caudal de solución) Kg/h	G (caudal de gas) $m^3/h$	% $CO_2$ en Gas	$CO_3^{\circ} \times 10^3$ $gmol/cm^3$	$CO_3^{\circ} \times 10^3$ $gmol/cm^3$	$cm^2/seg^2$ $K D^{\circ}$	$\frac{gmol}{cm^3 \text{ seg}}$ $Ra \times 10^6$	$cm^{-1}$ $(Ra/yHP(DKC^{\circ}))_{\frac{1}{2}}$
47	1,825	299,5	304	384	7,85	7,55	1,620	0,3465	0,318	2,050	3,12
48	2,410	299,5	301	384	5,38	7,60	2,235	0,1730	0,430	1,840	2,56
49	2,410	300,0	305	384	3,81	7,65	2,235	0,1455	0,436	1,565	2,08
50	2,550	299,0	305	527	5,38	7,55	2,380	0,1633	0,488	1,750	2,46
51	2,260	299,5	304	672	5,38	7,57	2,1075	0,2425	0,424	1,700	2,45

$C_0$ (inicial) $\times 10^3$	L (caudal de solución)	G (caudal de gas)	$\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3 \text{ seg}}$	$\text{Ra} \times 10^6$	$\text{cm}^2/\text{seg}^2$	$\frac{2}{\sqrt{2}} \left[ \frac{2 \text{d}(\text{Ra})^2 (\text{kDc})^2}{3} \right]^{3/2}$	$\text{seg}/\text{cm}$	$\text{YHPa} / \text{Ra}$	$1/(\text{kDc}^2 + \text{kL}^2)$
$\text{gmol}/\text{cm}^3$	$\text{Kg}/\text{h}$	$\text{m}^3/\text{h}$	$\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3 \text{ seg}}$	$\text{Ra} \times 10^6$	$\text{cm}^2/\text{seg}^2$	$\frac{2}{\sqrt{2}} \left[ \frac{2 \text{d}(\text{Ra})^2 (\text{kDc})^2}{3} \right]^{3/2}$	$\text{seg}/\text{cm}$	$\text{YHPa} / \text{Ra}$	$\text{seg}/\text{cm}$
2,98	527	5,38	1,650	0,179	0,538	2,255	2,320		
2,98	527	5,38	1,500	0,147	0,432	2,480	2,550		
2,38	527	5,38	1,400	0,128	0,367	2,660	2,720		
2,98	527	5,38	1,250	0,103	0,286	2,980	3,020		
2,98	527	5,38	1,100	0,080	0,2255	3,380	3,390		
2,98	527	5,38	0,900	0,055	0,1510	4,130	4,020		
0,772	527	5,38	1,815	0,165	0,302	2,210	2,320		
0,772	527	5,32	1,642	0,1395	0,270	2,460	2,520		
0,772	527	5,38	1,500	0,1131	0,222	2,670	2,800		
0,772	527	5,38	1,350	0,0895	0,175	2,970	3,130		
0,772	527	5,38	1,190	0,0693	0,130	3,360	3,450		
0,772	527	5,38	1,005	0,0501	0,100	4,000	4,000		
0,772	527	5,38	0,810	0,0340	0,075	4,750	4,650		

$C^0$ (inicial) $\times 10^3$	L (caudal de solución)	G (caudal de gas)	$Ra : 10^5$	$K D^2$	$\frac{(Ra)^2 d(KDC)}{2YHP d(Ra)}$	$\frac{seg}{cm}$	$\frac{YHPa}{Ra}$	$\frac{1}{(KDC + K_L)}$
$gmol/cm^3$	kg/h	$m^3/h$	$\frac{gmol}{cm^3 seg}$	$cm^2/seg^2$	$\frac{(cm^2)^{3/2}}{seg}$	$seg/cm$	$seg/cm$	$seg/cm$
1,41	527	5,38	2,150	0,345	0,625	1,695	1,685	
1,41	527	5,38	2,000	0,300	0,550	1,787	1,810	
1,41	527	5,38	1,860	0,260	0,498	1,930	1,940	
1,41	527	5,38	1,770	0,240	0,440	2,005	2,040	
1,41	527	5,38	1,630	0,200	0,363	2,200	2,205	
1,41	527	5,38	1,445	0,160	0,298	2,480	2,455	
1,41	527	5,38	1,250	0,120	0,231	2,965	2,825	
1,41	527	5,38	1,100	0,090	0,1865	3,225	3,230	
1,41	527	5,38	0,950	0,065	0,1345	3,750	3,770	
1,41	527	5,38	0,800	0,044	0,0910	4,450	4,480	
2,98	527	5,38	2,100	0,306	0,880	1,770	1,780	
2,98	527	5,38	1,950	0,257	0,786	1,910	1,950	
2,98	527	5,38	1,800	0,215	0,657	2,065	2,120	

$C_0$ (inicial) $\times 10^3$	L (caudal de solución)	G (caudal de gas)	$\frac{\text{gmol}}{\text{cm}^3 \text{ seg}}$	$\text{cm}^2/\text{seg}^2$	$\left( \frac{\text{cm}^2/\text{seg}}{3} \right)^{3/2}$	seg/cm	$\frac{y_{HPa}}{Ra}$	$\frac{1}{2} \left( \frac{K_D + K_L}{Ra} \right)^2$
1,772	527	5,38	0,650	0,0212	0,039	5,120	5,900	
1,603	527	2,96	1,650	0,4800	0,740	1,430	1,440	
1,608	527	2,96	1,490	0,4270	0,660	1,570	1,550	
1,608	527	2,96	1,380	0,3750	0,580	1,690	1,660	
1,608	527	2,96	1,300	0,3247	0,510	1,790	1,765	
1,608	527	2,96	1,195	0,2733	0,420	1,550	1,940	
1,608	527	2,96	1,070	0,2239	0,360	2,170	2,150	

$C_0$ (inicial) y $10^3$ $g/mol/cm^3$	Temp. de Liq. $^{\circ}K$	Temp. de Gas $^{\circ}K$	L (caudal de solución) $Kg/h$	G (velocidad sup. del Gas ) $m / s$	% $JO_2$ en Gas %	a (3) $cm^{-1}$
1,825	299,5	304	384	17,90	7,55	3,12
2,410	299,0	301	384	12,30	7,60	2,56
2,410	300,0	305	384	8,70	7,55	2,08
2,550	299,0	305	527	12,30	7,55	2,46
2,260	299,5	304	672	12,30	7,57	2,45

$C_0$ (inicial) $\times 10^3$ gmol/cm <sup>3</sup>	Temp. de Liq. °K	Temp. de Gas °K	L (caudal de solución) Kg/h	G (veloc. sup de Gas) de Gas) m / s	%CO <sub>2</sub> en Gas %	a (1)	$K_L \times 10^2$ (1)	a (2)	$K_L \times 10^2$ (2)	Kg $\times 10^6$ (2)
2,980	301,5	307	527	12,30	7,40	4,70	8,50	4,70	8,30	Muy grande
2,300	299,0	305	527	12,30	7,40	2,76	9,50	2,41	10,60	"
1,410	300,5	307	527	12,30	7,40	2,58	10,14	2,17	11,00	"
0,772	300,0	307	527	12,30	7,40	2,37	12,30			
1,608	303,0	307	527	6,74	7,30	1,85	6,48			