

## Tesis de Posgrado

# Absorción de un gas en un líquido acompañado por una reacción química : a) Determinación del exponente del número de Schmidt en una correlación de transferencia de materia b) Areas efectivas en torres de relleno

Yeramian, A. A.

1965

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Yeramian, A. A. (1965). Absorción de un gas en un líquido acompañado por una reacción química : a) Determinación del exponente del número de Schmidt en una correlación de transferencia de materia b) Areas efectivas en torres de relleno. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.  
[http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1254\\_Yeramian.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1254_Yeramian.pdf)

Cita tipo Chicago:

Yeramian, A. A. "Absorción de un gas en un líquido acompañado por una reacción química : a) Determinación del exponente del número de Schmidt en una correlación de transferencia de materia b) Areas efectivas en torres de relleno". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1965.  
[http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1254\\_Yeramian.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1254_Yeramian.pdf)

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

CATÁLOGO

**Absorción de un gas en un líquido acompañado  
por una reacción química**

- a) Determinación del exponente del número de Schmidt en una correlación de transferencia de materia
- b) Areas efectivas en torres de relleno.

**Tesis**

Para optar al título de Doctor de la Universidad  
de Buenos Aires

presentado por el Lic. A. A. YERAMIAN

**Julio 1965**

# ABSORCION DE UN GAS EN UN LIQUIDO ACOMPAÑADO POR UNA REACCION QUIMICA

Resumen del trabajo presentado por el Lic. A.A. Yeramián para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires.

El trabajo se divide en dos partes. En la primera parte se establece por vía experimental el exponente del número adimensional de Schmidt en la correlación de transferencia de materia. Surge de un estudio previo que dicho exponente define al mismo tiempo la relación que existe entre el coeficiente de transferencia de materia, fijada en una expresión de tipo cinético, con la difusividad del molecular. Este estudio se hace para un sistema controlado exclusivamente por la película líquida o sea donde la etapa controladora reside exclusivamente en la fase líquida.

Un suscinto examen de los distintos modelos teóricos para este tipo de transferencia indica un completo desacuerdo en el valor del exponente según las suposiciones que implican dada uno de ellos. Se busca un desarrollo teórico que se acomode al modelo experimental en que se va a trabajar y este desarrollo con las condiciones de contorno respectivas lleva a un exponente de 0,5. Posteriormente se examinan los distintos valores del exponente del número de Schmidt que surgen de determinaciones experimentales. Se observa que todos los valores carecen de un mínimo de rigurosidad que permita asegurar con certeza el valor que indican. Generalmente en los trabajos experimentales debido a lo engorroso del procedimiento se toma como exponente del número de Schmidt el valor teórico más afín al modelo teórico preconizado en la ocasión.

Se hace un estudio previo del sistema más conveniente para el

trabajo y se elige el sistema triple de agua, glicerina y carbonato. La influencia de la reacción química sobre la transferencia es despreciable en el sistema. Se hacen 43 corridas donde el número de Schmidt varía entre 590 y 3.800 y se representa en un gráfico doble logarítmico en función del cociente entre el número de Sherwood y el número de Reynolds elevado este último a la potencia de 0,45.

Este exponente surge de un trabajo anterior realizado en el mismo equipo por el Dr. Julio Krasuk. La relación de los puntos así representados indica un exponente de 0,50 - 0,03. Este exponente coincide con las predicciones de la teoría de la penetración.

En la segunda parte de este trabajo aprovechando la correlación de transferencia de materia completada en la primera parte del trabajo se intenta determinar un coeficiente de efectividad para área de transferencias o valores de lo que en la literatura se conoce como área efectiva en una torre de relleno, para el caso de una absorción de un gas acompañada por una reacción química lenta o moderadamente rápida. Se intenta utilizar el gráfico de Van Krevelen modificado en la oportunidad. A tal efecto se define un nuevo grupo adimensional a partir del  $Da_{II}$  al que se lo multiplica por el cociente entre  $a_w/a$ , área irrigada y área efectiva para una absorción física. Se observa que el cociente  $K_L'a/K_La$  se desvía en función de  $Da_{II}a_w/a$  de la curva original de Van Krevelen en función del número de Reynolds observándose una coincidencia plena con la curva original a altos valores del número de Reynolds. La desviación se hace mayor a medida que bajan los valores de dicho número adimensional. Finalmente se verifica una fórmula propuesta por Yoshida. Durante esta parte del trabajo se determinan siguiendo un método de observación, valores de área irrigada y área efectiva para el caso de absorción física siguiendo modelos enunciados para este tipo de relleno por W. Norman y J. Mullin.

Determinación del exponente del número adimensional de Schmid  
El valor obtenido es 0,50.

Si bien no se llega a obtener el coeficiente de efectividad d  
relleno se demuestra la dependencia de la efectividad del área  
en función del número de Reynolds que posteriormente permitir  
el enunciado de otros modelos.

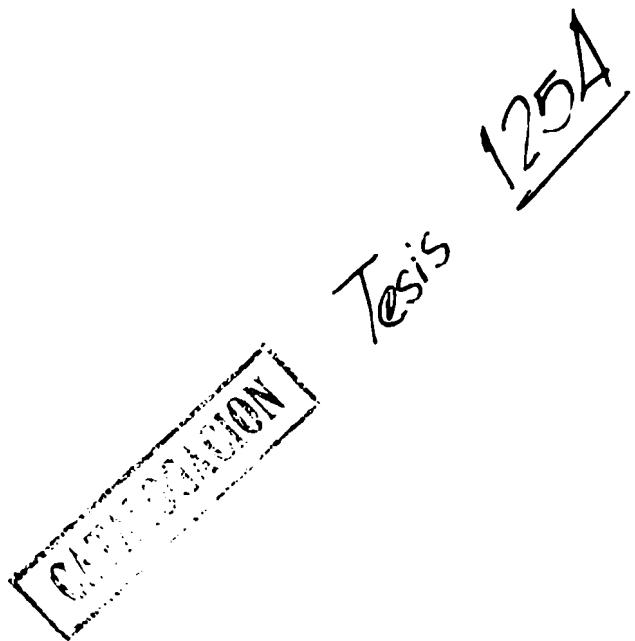
El estudio del problema de áreas efectivo debe tender hacia u  
estudio de problemas de mezclado y homogeneidad hidrodinámica  
en la columna que debe dar mejores soluciones al problema.

AV  
PA

Agradecimientos

Agradezco a R. Zuccarelli  
por los consejos que me dió  
durante la realización del  
trabajo.

A. Yeramian



## ABSORCION DE UN GAS EN UN LIQUIDO EN UNA TORRE DE RELLENO.

### PARTIC A)

Determinación del componente del número adimensional de Schmidt en una corriente de transferencia de materia en una torre de relleno

#### Introducción

Al encarar el diseño de muchos equipos industriales se deben examinar cuidadosamente los fenómenos básicos, los que caracterizan al equipo posteriormente en su rendimiento. El estudio de estos fenómenos básicos se hace a través de los llamados fenómenos de transferencia, que pueden caracterizar todo el proceso o la operación, de ser la etapa cinéticamente más lenta.

El estudio de estos fenómenos de transferencia se hace desde una época de la física y la fisico-química, y al ser trasladados desde la escala de laboratorio a la escala de los equipos industriales se utilizan criterios de similitud, de ahí la aparición de los métodos de análisis dimensional y las correlaciones generalizadas. En las torres de relleno, a pesar de todos los estudios realizados, no se ha podido verificar un modelo que satisfaga integralmente los mecanismos de transferencia.

Estos fenómenos se han estudiado a través de una expresión cinética que fija la dependencia entre la cantidad de materia o energía transferida con un gradiente de la propiedad representativa de dicha magnitud. Aparecen, en estas expresiones, coeficientes de proporcionalidad que indican la velocidad específica y son conocidos bajo el nombre de coeficientes de transferencia. Se supone desde un primer momento una similitud entre los mecanismos de los diferentes fenómenos de transferencia, y así es que comienzan a aparecer en la literatura tecnológica las primeras analogías. Reynolds, en 1874 establece una primera analogía entre la transferencia de calor y la de cantidad de movimiento. Prandtl y Taylor, con pocos años de diferencia, introducen por separa-

de los conceptos de resistencias en serie para la transferencia de calor y de cantidad de movimiento, y por ultimo Chilton y Colburn amplian estos conceptos introduciéndolos en la transferencia de materia.<sup>(17), (18), (22), (24)</sup>

Los factores  $j_H$  y  $j_D$  para la transferencia de calor y transferencia de materia son proporcionales a potencias de números adimensionales de Prandtl y Schmidt, respectivamente. El exponente del número de Schmidt en las correlaciones de transferencia de materia surge al suponer un mismo mecanismo en la transferencia de calor y en la transferencia de materia. El valor de 0,33 obtenido como exponente del número de Prandtl en la transferencia de calor, es utilizado de acuerdo a este concepto, como exponente del número de Schmidt, sin embargo, no encuentra confirmación en los resultados experimentales. Estas diferencias, se encuentran mucho más marcadas cuando se trata de una transferencia en una interfase líquido-gas y la etapa controladora es la transferencia en la fase líquida.

Las correlaciones de transferencia de materia, generalmente son formadas por los números adimensionales de Sherwood, Reynolds y Schmidt. Los exponentes de los números de Reynolds y Schmidt son los que caracterizan el fenómeno puesto que el número de Schmidt, a través de su exponente, analiza el mecanismo intrínseco del fenómeno y el número de Reynolds fija la relación del patrón fluidodinámico del medio. El concepto físico del número de Schmidt es dado como la relación entre la cantidad de materia transferida por circulación de la fase, frente a la cantidad de materia transferida por un mecanismo molecular. Es necesario conocer el exponente del número de Schmidt puesto que al mismo tiempo queda fijada la relación entre el coeficiente de transferencia y la difusividad molecular en el medio. Esta relación, discutida desde un punto de vista teórico a través de modelos cuyo estudio se presenta en el punto siguiente, no se ha podido establecer, sin embargo desde un punto de vista experimental.

#### Teorías y Modelos de Transferencia de Materia

##### Teoría de las dos películas

La teoría de las dos películas enunciada en 1923 por Whitman se basa en los siguientes postulados: a) Existe un estado de equilibrio en cada una de las fases; b) No hay resistencia de tipo difusional apreciable en la interfase; c) Las dos fases se encuentran en equilibrio en todos los puntos de contacto; d) La presencia de un estado estacionario en la interfase. (24)

Whitman presenta el siguiente modelo fluido dinámico: Existe en cada fase una zona, cerca de la interfase, cuyo estado dinámico es diferente del de la fase. La extensión de esta zona e en los términos del autor, el espesor de la capa, depende del estado dinámico del seno de la fase. Mientras en el seno de la fase donde predomina, por ejemplo, un estado turbulento, los gradientes de concentración son anulados por los torbellinos propios a ese estado fluido dinámico, en las capas marginales estos gradientes tienen una existencia real y de ellos depende el proceso de transferencia.

Se observa que para una interfase gas-líquido se introduce por primera vez el concepto de resistencias en serie, ya familiar en la transferencia de calor o cantidad de movimiento. El coeficiente de transferencia total se obtiene sumando las inversas de los coeficientes de cada zona marginal; obteniéndose de esta forma las inversas de un coeficiente total para ambas zonas. La relación entre el coeficiente de transferencia y la difusividad postulada por esta teoría es lineal. El coeficiente de transferencia se define como el cociente entre la difusividad del material transferido y el espesor de la zona donde predomina el mecanismo molecular. Esta relación no se ha podido verificar en forma experimental; los resultados obtenidos indican una relación menor entre el coeficiente de transferencia y la difusividad. En este momento, la contribución de esta teoría al desarrollo de un modelo para la transferencia de materia es la de haber sido la primera que ha postulado una separación de las resistencias en dos películas y se la puede admitir como una primera aproximación.

#### Teoría de la zona límite.

Esta teoría al igual que la anterior supone que en la interfase fluido-

fluído se forma una capa límite cuyo espesor es fijado por un punto donde el valor de la magnitud transferida alcanza el 99% del valor que tiene en el centro de la fase turbulenta. Las ecuaciones diferenciales que surgen al hacer los balances de materia y energía son de difícil resolución con las condiciones de contorno e iniciales que fija esta teoría. Una simplificación sugerida por von Kármán hace que su solución sea más factible. Si se admite un perfil determinado de velocidades en esta capa, y se lo introduce en la ecuación general se obtienen soluciones que indican la relación siguiente:

$$(k_2 = a D^{2/3}) \quad \text{muñ. nro. 15.7.72} \quad (1)$$

dónde  $a$  es un coeficiente de proporcionalidad y  $k_2$  es el coeficiente de transferencia para la película líquida.

Este exponente así obtenido fue admitido por muchos investigadores y en numerosos trabajos aparece en correlaciones de transferencia como exponente del número de Schmidt el valor de  $1/3$ .

En la interfase gas-líquido sin embargo el modelo para adecuarlo a la realidad debe modificarse. Polhausen indica un exponente menor para la difusividad molecular en la ecuación (1). Cuando se da el caso de que la capa límite para las velocidades tiene un valor menor que la capa límite para concentraciones el exponente de  $D$  es menor y es comprendido entre los valores  $2/3$  y  $1/2$ . Este caso se presenta en la interfase líquido-gas y es llamativo de que el límite inferior sostenido por Polhausen coincide con el valor dado por la teoría de la penetración.

#### Teoría de la penetración.

Presentada por Higbie en 1933 y modificada por Danckwerts posteriormente, sostiene una serie de postulados que cambian totalmente la imagen de la interfase planteada por las otras teorías. (4)

No admite un estado estacionario en la interfase. Supone que la superficie de separación entre las dos fases está formada por elementos que se renue-

ván periódicamente, siendo reemplazados por elementos frescos. La duración del período y la forma de renovación de la superficie son las principales diferencias entre Higbie y Danckwerts. Higbie cree que todos los elementos permanecen un mismo período de tiempo en la superficie, llegando todos a una edad límite siendo reemplazadas después. Danckwerts supone que este reemplazo se produce siguiendo un modelo estadístico gaussiano. La aparición de la variable tiempo en la definición del coeficiente de transferencia es necesaria puesto que no se admite un estado estacionario. (3)

La relación entre la difusividad molecular y el coeficiente de transferencia es similar para ambos y se fija la siguiente dependencia:

$$(k_L = f(D^{\frac{1}{2}})) \text{ según } \dots$$

Esta potencia de  $\frac{1}{2}$  para la difusividad no ha sido confirmada en el trabajo experimental de Higbie. Los valores de los coeficientes de transferencia predichos superan los valores experimentales obtenidos en un equipo extremadamente sencillo. Se supone que la diferencia reside en un exponente menor para la difusividad molecular o algún efecto de la turbulencia existente en la entrada de los tubos donde se efectúa la transferencia. Los tiempos de permanencia del líquido en la columna no pueden tener error.

El modelo de Danckwerts define en otra forma el tiempo de contacto y tiene una aplicación mayor en las columnas de relleno. Físicamente es más adecuado suponer un modelo estadístico de renovación de los elementos de superficie. Los estudios con trazadores coloreados en columnas de relleno indican una permanencia distinta en la columna de los elementos de la fase líquida.

Es necesario destacar que, dado que ambos postulan una misma relación entre la difusividad molecular y el coeficiente de transferencia no afectará este trabajo si se sigue una u otra imagen.

Otras teorías se han sumado en los últimos años. De todas ellas la teoría de Toor y Marchalillo es la más interesante puesto que trata de combinar la in-

gen de la teoría de la penetración con la de la teoría de las dos películas.

Esta teoría supone que en un primer momento, en los elementos recién renovados, se cumple la imagen de la teoría de la penetración. A medida que se prolonga su permanencia en la superficie, se produce una estratificación que aproxima el estado real de la interfase a la imagen de la teoría de las dos películas. Los autores han tratado de verificar estos supuestos con datos experimentales, pero los datos que mejor se adecúan a este modelo provienen de la transferencia en una interfase sólido-líquido bastante diferente del que se considera en este caso. (23)

Ejemplo de un cálculo en un modelo geométrico similar al que se utilizará en el trabajo.

Se transcribe a continuación un desarrollo teórico que ha sido propuesto por Riggie en el trabajo original y ha sido retomado por Bird, Stewart y Lightfoot (1). El ejemplo responde al modelo geométrico que corresponde al equipo donde se va a realizar el trabajo experimental, que como se detallará más adelante consiste de un relleno enrejado de madera donde el líquido se escurre a lo largo de una superficie vertical, siendo expuesto simultáneamente al gas a absorber. En el desarrollo que se considera, también estamos en presencia de un líquido que se escurre a lo largo de una superficie vertical siendo expuesto al mismo tiempo al contacto de un gas. Es un caso de transferencia de materia en convección forzada. Se suponen despreciables los efectos finales de turbulencia, y el gas se considera como ligeramente soluble en el líquido, de ahí que se pueda considerar que el control reside en la transferencia en la película líquida. Asimismo esto permite suponer que la viscosidad de la película líquida no varía.

Se hacen los balances de materia en un elemento de volumen en el seno del líquido. Se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{N_{AZ}}{A} \left| \frac{V_{\Delta Z} - N_{AZ}}{A} \right| = \rho \Delta S \cdot V_{\Delta X} + N_{AX} \left| \frac{V_{\Delta S} - N_{AS}}{A} \right| - N_{AX} \left| \frac{V_{\Delta Z}}{A} \right| = 0$$

esta igualdad en condiciones límites se hace:

$$\frac{\partial I_{AB}}{\partial s} + \frac{\partial I_{AK}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Si se introducen en esta ecuación los valores de  $I_{AB}$  proporcionados por la ley de Fick con correcciones en cada dirección, despreciando en la dirección del flujo la contribución de la circulación se llega:

$$I_{AK} = c_A V_z(z) \quad ; \quad I_{AK} = -D_{AB} \frac{\partial c_A}{\partial z}$$

sustituyendo en la ecuación de balance estos dos igualdades se llega a:

$$V_z(z) \frac{\partial c_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \quad (2)$$

La expresión de la velocidad en la fórmula anterior es dada por

$$V_z = V_{\max} (1 - \frac{z}{L})^2$$

Se reemplaza en la ecuación (2) y se obtiene una ecuación diferencial que tiene solución, que fue resuelta por Pigford. En este caso se puede admitir que el gas penetra solamente en forma superficial, de ahí que se puede considerar que el gas disuelto en el líquido se mueve con la misma velocidad superficial  $V_{\max}$  que es constante. En estas condiciones la resolución de la ecuación se simplifica mucho más y se la obtiene fijando las siguientes condiciones de contorno:

Condición 1 para  $s = 0$ ;  $c_A = 0$

Condición 2 para  $z = 0$ ;  $c_A = 0$

Condición 3 para  $z = L$ ;  $c_A = 0$

La resolución de la ecuación

$$V_{\max} \frac{\partial c_A}{\partial s} = D_{AB} \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2}$$

da los siguientes perfiles en la capa considerada:

$$\frac{e_A}{e_{A0}} = 1 - \text{erf} \frac{x}{(4 D_{AB}^2 / v_{max})^{1/2}} = \text{erfc} \frac{x}{(4 D_{AB}^2 / v_{max})^{1/2}}$$

Si se considera esta expresión para obtener un coeficiente de transferencia hay que derivar esta expresión y se llega finalmente a que:

$$k_L = (D_{AB} v_{max} / n)^{1/2}$$

De aquí se ve que la relación entre el coeficiente de transferencia y la difusividad es dada por un exponente de  $\frac{1}{2}$ . Esta relación debe verificarse en forma experimental.

#### Trabajos experimentales anteriores que intentan resolver el problema.

El exponente del número de Schmidt ha sido objeto de varios trabajos experimentales que sin embargo no aclaren mucho la cuestión. Algunos investigadores, en las correlaciones para transferencia de materia en torres de llenado adoptaban como exponente del número de Schmidt al valor de 0,5 o el de 0,33 según la afinidad que tuvieran con la teoría de la penetración o la teoría de la capa límite.

Es evidente, después de haber visto los distintos supuestos y modelos para la transferencia de materia de que el exponente depende de la turbulencia del medio, de las propiedades físicas del medio absorbente, del grado de mezclado axial y radial, del equipo donde se realiza el trabajo que puede fijar un patrón fluido dinámico y de la temperatura del sistema que rige a su vez algunas variables recién mencionadas.

Si se examinan algunos resultados experimentales, tanto de los que atacan el problema tratando de establecer una correlación generalizada como los que encaran una relación directa entre el coeficiente de transferencia y la difusividad molecular, se ve que no existe un acuerdo sobre el problema. En el trabajo experimental de Higbie adjunto a su teoría, como se ha mencionado antes, se observa un desacuerdo entre los resultados obtenidos y los previamente mencionados.

tos según el modelo teórico. El coeficiente de transferencia predicho supera el obtenido por vía experimental. El trabajo de Sherwood y Holloway (19) obtiene un exponente de 0,44 para el número de Schmidt. Este valor se acerca más a los valores de la teoría de la penetración y del trabajo de Polhausen ya mencionado, que sugiere un exponente cuyo valor esté comprendido entre 0,33 y 0,50. La crítica que se puede hacer a este trabajo es que los coeficientes de transferencia se han obtenido en un rango de temperaturas muy grande y en la correlación en que se presentan los datos si bien se tiene un rango muy amplio de números de Schmidt, excluyen otras variables, como la tensión superficial cuya influencia debe aparecer por la variación de temperaturas. D. W. Van Krevelen correlaciona una serie de resultados obtenidos en diferentes equipos por varios investigadores (6). El exponente que obtiene es de 0,33. Sin embargo no existe seguridad de que en todos los casos considerados haya control de la fase líquida. Otra crítica a este trabajo es que si bien tiene un rango grande de números de Schmidt, esto se anula puesto que provienen de equipos diferentes y la variancia de los puntos supera el valor de la regresión. Cada uno de los grupos de puntos, en un gráfico logarítmico tiene una pendiente aproximada de 0,33 pero el conjunto de los puntos se dispersa mucho. Shulman refina los puntos determinados en varios trabajos de autores americanos y obtiene un exponente de 0,5. Los puntos experimentales en el gráfico, que representan un cociente entre el número de Sherwood y el número de Reynolds elevado a la 0,45 en función del número de Schmidt da una pendiente de 0,5. En este caso no se observa una dispersión muy grande puesto que los datos experimentales han sido obtenidos en columnas cuyo relleno ha sido anillos de Raahig e mallas de Berl. Al encararse el problema de las áreas efectivas, algunos investigadores vuelven sobre el tema pero con un interés marginal. Yoshida trabaja con un sistema de dióxido de carbono que es absorbido en metanol y agua. El exponente del número de Schmidt que obtiene es de 0,5 para valores de Reynolds superiores a 100. Para valores de Reynolds menores de 100 el exponente se hace a su vez menor. Yoshida obtiene este exponente representando  $\frac{S_w}{L} = f \left( \frac{C^0 - C}{C^0 - C_2} \right)$  en función de Reynolds. K. Onda y colaboradores obtienen

otro valor para el exponente del número de Schmidt absorbiendo dióxido de carbono y hidrógeno en agua. El valor del exponente es de 0,5. (21), (25).

Al examen de todos estos trabajos indica un valor que oscila entre 0,33 y 0,50 y en consecuencia un exponente de 0,66 ó 0,50 para la difusividad en su relación con el coeficiente de transferencia. Se observa sin embargo una mayor aproximación para el valor de 0,50 en las condiciones de trabajo usuales en columnas de relleno.

Se observa asimismo la necesidad de un rango amplio de valores para el número de Schmidt. La obtención de este rango debe surgir de un examen cuidadoso de todas las posibilidades de variación de este número.

#### Selección del sistema experimental y algunas otras consideraciones previas.

lo necesario, como paso previo, seleccionar un sistema que permita obtener un rango amplio de valores del número de Schmidt.

El número adimensional de Schmidt por su definición depende de la viscosidad cinemática del medio absorbente y de la difusividad del gas en el mismo medio. Como se trata de dilucidar el mecanismo del proceso cuando la etapa controladora es la transferencia del gas a través de la fase líquida, se deben variar las magnitudes antes mencionadas para un número de Schmidt definido para este medio.

Se concluye que existen dos posibilidades de variar el número de Schmidt:

- a) Variar la difusividad del gas en el medio absorbente cambiando la naturaleza del gas a absorberse (técnica seguida por K.Onda y colaboradores); b) Variar la viscosidad cinemática del medio absorbente lo cual modifica a la vez los valores de la difusividad que es función de la viscosidad del medio.

Se examinaron en tablas los valores de las propiedades antes mencionadas y se transcribe a continuación una tabla de Perry (3a. edición inglesa, pág. 540) que trae una serie de valores de difusividades de los gases más accesibles en agua a 20°C

GAS	DIFUSIVIDAD. $10^5$ $\text{cm}^2/\text{seg}$	$\mu^2$ de Schmidt
-----	---	--------------------

$\text{CO}_2$	1,77	558
$\text{O}_2$	1,80	557
$\text{H}_2\text{O}$	1,51	665
$\text{NH}_3$	1,76	570
$\text{CL}_2$	1,22	824
$\text{H}_2$	5,13	196
$\text{N}_2$	1,64	613

Se nota la proximidad de los valores de las difusividades de los diferentes gases en agua. Es evidente que las posibilidades de obtener un amplio rango de valores del número de Schmidt se reducen si se trata de variar la naturaleza del gas a absorberse. La única difusividad un poco diferente es la del hidrógeno pero con solo dos puntos no se puede dilucidar el problema.

Queda como única posibilidad, variar el medio absorbente, lo cual, como se ha dicho, tiene la ventaja de permitir variar al mismo tiempo la difusividad del gas.

Se elige como sistema de trabajo finalmente aquél en que el gas absorbido reacciona químicamente con una solución alcalina puesto que se presenta un contrapunto interesante al acompañar este estudio con una reacción química, que modifica a su vez el modelo de transferencia en la interfase. Se elige como medio absorbente una solución triple de carbonato de sodio en glicerina y agua. Al variar la concentración de glicerina en el sistema se obtiene un amplio rango de valores de número de Schmidt. La reacción química entre el dióxido de carbono y el carbonato es muy lenta debido a las bajas concentraciones de ion carbídrilo y como se forma con los productos de reacción (bicarbonato de sodio) un sistema Buffer, se puede controlar fácilmente el factor químico. Rotaciones posteriores indican que el factor químico para los puntos obtenidos es muy cercano a uno (debajo del error experimental) de ahí que la vigencia de los datos se pueda extender para el caso de la absorción física.

Existen en la literatura una serie de trabajos que han utilizado un sistema similar. D.W. Van Krevelen absorbe  $\text{CO}_2$  en soluciones de glicerina en columnas de pared mojada (6). Sherwood, T.K. y Walter, J.F. desorben  $\text{CO}_2$  de soluciones de glicerina (20).

Por último se hace notar que se trabaja a un valor del número de Reynolds

constante o con poca variación puesto que su influencia se ha determinado en un trabajo anterior en el mismo equipo. De esta forma se evitan problemas de variación del área efectiva, puesto que se trabaja con coeficientes volumétricos.

### Trabajo Experimental

#### Descripción del equipo. (27)

El equipo de absorción en que se ha realizado este trabajo consiste de una torre de lucite, en cuyo interior se ha colocado el relleno. Sobre el relleno circulan en contracorriente la fase líquida y la fase gaseosa. El relleno consiste de enrejados de madera de las siguientes dimensiones: ancho: varía según la tablita de 12 pulgadas a 6,5 pulgadas; largo: 4,2 pulgadas y espesor de una pulgada. El enrejado consta de 7 tablillas unidas a un eje común. En la columna se encuentran 9 enrejados colocados girados respecto del eje en 60 grados. El diámetro de la columna es de 31,5 cm. y la altura es de 91,5 cm. La fase líquida se encuentra en un depósito constituido por un tanque de unos 500 litros de capacidad. Una bomba centrífuga de 1 H.P. de potencia y 2.800 revoluciones por minuto la hace recircular en todo el equipo. La fase líquida penetra en la columna por la parte superior y atraviesa una placa circular perforada que la redistribuye sobre el relleno. Una vez en la parte inferior de la columna vuelve al depósito de donde se reinicia el ciclo.

El gas (aire-dióxido de carbono) se impulsa con un ventilador Austin AP 15 con un motor de 1/3 HP y 2.800 revoluciones por minuto. El dióxido de carbono penetra en el sistema proveniendo de un tubo y su caudal se mide con un integrador acoplado al equipo. Se utiliza un manómetro de brida de orificio calibrado previamente para obtener el caudal de líquido. El líquido manométrico es mercurio. Otra brida de orificio mide el caudal de gas (aire-dióxido de carbono); en este caso el líquido manométrico es agua.

### Obligación de los datos y forma de funcionamiento del equipo.

El modo en que funciona el equipo se describe a continuación: Se recirculan ambas fases a caudales establecidos. Se integra al equipo dióxido de carbono a un caudal constante. (En el balance de materia se considera estado estacionario a partir del momento en que se ha estabilizado el caudal de dióxido de carbono). El caudal constante de dióxido se obtiene calentando el tubo y la válvula controladora con estufas eléctricas. El estado estacionario se establece después de unos 15 a 25 minutos. Se controlan las temperaturas de ambas fases a intervalos de tiempo a la entrada y a la salida de la columna.

El análisis de la fase gaseosa se hace con un aparato de Great y con un balance de materia se llega al coeficiente de transferencia volumétrico, global sobre toda la columna. Se admite la existencia de un estado estacionario en la columna que se verifica observando la constancia con el tiempo de la composición de la fase gaseosa a la salida de la columna, manteniéndose todas las demás variables. Al mismo tiempo se extraen muestras de la fase líquida que se analizan con una volumetría con ácido clorhídrico. El mayor error que se comete en todas estas mediciones es el que corresponde a la composición de la fase gaseosa que varía de un 2,5% a un 3%. Otros errores tienen menor incidencia sobre el resultado final, o como en el caso de la estimación de algunas constantes como la constante de Henry el error es del mismo orden que el caso anterior. Otro error que se puede haber cometido proviene de perturbaciones del estado estacionario durante el lapso en que se hacen las mediciones. Se toma como criterio de la estabilidad del estado estacionario además de las verificaciones antes mencionadas la estabilidad del caudal de dióxido de carbono, única cantidad que puede variar mayormente. En las determinaciones donde se observa variación de este caudal se interrumpe la corrida desechándose los datos ya obtenidos. Una vez verificado un nuevo estado estacionario se reanudan las lecturas.

Las soluciones de carbonato-bicarbonato se analizan por volumetría con indicador de heliantina y fenolftaleína sucesivamente. Se utiliza ácido clorhídrico 0,5N. Las concentraciones de íon  $\text{OH}^-$  se determinan con un potenciómetro

tro Beckman. Los coeficientes de actividad se obtienen de Robins y Stokes (18). Los valores de la concentración de  $\text{OH}^-$  se comparan con los datos del análisis volumétrico y se verifican bastante bien. Se puede producir cierto error en los valores de los coeficientes de actividad cuando aumenta la concentración de glicerina en el sistema, pero como las concentraciones de  $\text{OH}^-$  no son afectadas por la glicerina (se la puede considerar inerte) se adoptan las concentraciones obtenidas como si fuera solución de carbonato y bicarbonato en agua en lo referente a los coeficientes de actividad.

#### Estimaciones y determinaciones de las propiedades físicas del sistema.

Para calcular los números adimensionales antes mencionados se tienen que conocer las propiedades físicas del sistema en las condiciones de trabajo. Algunas de estas propiedades han sido determinadas, otras han sido estimadas utilizando en estos casos relaciones cuyo error se conoce. La viscosidad de la fase líquida, para cada determinación del coeficiente de transferencia, se obtiene sobre muestra extraída de la columna con la ayuda de un viscosímetro de Ostwald. Las densidades de las soluciones se obtienen de la misma manera con una balanza de Mohr.

Las difusividades del anhídrido carbónico en las soluciones se obtienen con la ayuda de la fórmula de Stokes-Einstein. Los datos bases para la difusividad del  $\text{CO}_2$  en soluciones de glicerina en agua se obtienen en dos trabajos, uno de Othmer y col. (15) y otro de K.Ogata (13). Estos autores presentan curvas de variación de la difusividad del  $\text{CO}_2$  con el incremento del porcentaje de glicerina en la solución. Con estos valores, conociendo la viscosidad de la solución y la temperatura de trabajo se obtienen valores de la difusividad del  $\text{CO}_2$  en las soluciones triples de carbonato en glicerina y agua.

El coeficiente de Henry para poder pasar de  $K_{\text{H}}^{\text{a}}$  a  $k_{\text{H}}^{\text{a}}$  se estima con la ayuda de una fórmula propuesta por D.W. Van Krevelen para la determinación del coeficiente de Henry en soluciones de electrolitos y no electrolitos (5). Las constantes de la fórmula se obtienen del mismo artículo (5).

Se han hecho estimaciones del factor de ionización para el sistema y se uti-

liso para tal fin la expresión para la constante cinética propuesta por .../ Denckwerts:

$$\ln k = 13.000/4,57 T - 13,40$$

Esta fórmula se obtiene considerando como reacción más lenta la que ocurre entre el  $\text{CO}_2$  y el ión hidrile.

Los coeficientes de transferencia se obtienen utilizando una fórmula que proporciona el valor para toda la columna. Como se ha analizado preferentemente la fase gaseosa la fuerza impulsora total será dada por un gradiente de presiones parciales de  $\text{CO}_2$ . Este cálculo no nos da el coeficiente para la fase líquida, pero como la contribución de la fase gaseosa debe ser muy pequeña en comparación con la de la fase líquida se adopta el coeficiente de transferencia global como igual al de la película líquida.

$$k_L a = k_0 a / K = (H/V \cdot K) \cdot (y_2 - z_1)_{\text{eq}} + k_L a$$

A partir de estos valores se calcula el número de Sherwood así definido:

$$Sh = k_L a \cdot l^2 / D_{AB}$$

$l$  es una longitud característica del equipo: el espesor de la tablita del enrejado.

El número adimensional de Reynolds se calcula a partir de los datos de caudal de líquido, viscosidad del líquido a la temperatura a la cual se hace la determinación, la densidad del líquido, la sección ocupada por el relleno en la columna y el espesor de la tablita del relleno como medida de longitud característica del equipo.

$$Re = L \cdot l \rho / \mu \cdot S$$

El otro número adimensional, el número de Schmidt, se calcula como se lo ha definido en la introducción de este trabajo.

Resultados experimentales, tablas, gráficos.

Se realizan en total 43 corridas. En ellas se ha variado el número de Schmidt de 650 a 3850. El número de Schmidt se representa en un gráfico doble logarítmico en función del cociente de los otros dos números adimensionales o sea  $Sh/Re^{0,45}$ . El exponente 0,45 para el número de Reynolds proviene de un trabajo experimental anterior realizado en el mismo equipo por los doctores J. Engstrik, J.H. Ronco y R. Cunningham. La pendiente que se obtiene en el gráfico indica un exponente de  $0,50 \pm 0,03$ . El coeficiente de correlación de Pearson indica un valor de 0,98. La dispersión de los valores del cociente de los números de Sherwood y Reynolds a la 0,45 da un valor de 0,41. La variación de la pendiente es de 0,018.

Analizando por zonas los datos obtenidos, se observa que hasta un valor de 2.000 del número de Schmidt la pendiente es de mayor inclinación, la que se va compensando a medida que se van incrementando los valores del número de Schmidt. Esto coincide en parte con los resultados de Yoshida (25) que observa una misma tendencia de sus datos pero en otro rango de valores del número de Schmidt. Para valores mayores de número de Schmidt la inclinación va menguando y el valor del exponente sobre el rango total antes mencionado es el de 0,50. De las tablas se puede observar que se ha trabajado para un rango de valores del número de Reynolds prácticamente muy estrecho y que corresponderían a un flujo laminar. Las discontinuidades del relleno de la columna sin embargo deben haber originado turbulencias, de ahí que sea difícil que se hayan podido establecer perfiles de la propiedad transferida. Este hecho invitaría, por las consideraciones antes mencionadas, que el resultado obtenido se pueda extender para equipos cuyo patrón fluido-dinámico observe igual o mayor turbulencia que en este caso. Esto permitiría extender el resultado a columnas cuyo relleno sea por ejemplo anillos de Rashig o monturas de Berle.

SEGUNDA PARTE

Determinación de un coeficiente de efectividad del relleno de una columna de absorción de un gas en un líquido sometida por una reacción química.

En esta segunda parte del trabajo se intenta, mediante el uso del gráfico teórico de Van Krevelen, determinar un coeficiente que indique el grado de efectividad del relleno en una columna de absorción en presencia de una reacción química.

Desde el primer momento del estudio de la absorción, el problema de las áreas interfaciales ha sido uno de los más arduos. La definición de los coeficientes volumétricos permite, al englobar en el coeficiente volumétrico de transferencia las áreas de transferencia interfaciales, simplificar el problema. Sin embargo, las necesidades de obtener correlaciones, que representen adecuadamente los fenómenos que ocurren dentro de los equipos de absorción hace que se trate de obtener valores de las áreas interfaciales. El término de área efectiva surge porque se observa que no toda el área interfacial manifiesta igual efectividad para la absorción. En el caso de una absorción física se observa que el valor del área realmente efectiva para el fenómeno de transferencia es muchas veces menor que la que corresponde al fenómeno en sentido inverso: la vaporización de un gas disuelto en el seno de un líquido.

La reacción química incrementa la efectividad del área interfacial hasta alcanzar para velocidades muy grandes de reacción los valores del área interfacial total, o sea el área efectiva para la vaporización. El modelo teórico sugerido por varios investigadores supone un incremento en los valores de la efectividad del área con el incremento de la velocidad de la reacción química desde los valores correspondientes para absorción física hasta los valores que corresponden para la vaporización.

En los primeros intentos de separar del coeficiente volumétrico el valor del área efectiva se tratan de determinar los valores del área irrigada

del relleno. Uno de los primeros trabajos sobre el tema, el trabajo de Mayo y colaboradores, utiliza un relleno de papel prensado sobre el cual el área irrigada queda marcada al utilizar como líquido absorbente una solución de un colorante. (8). El relleno de papel prensado tenía las mismas dimensiones que los rellenos habituales. Van Krevelen, en uno de sus trabajos sobre el tema, considera todo el área irrigada como área efectiva para la absorción, lo que posteriores resultados demuestran como incierto, al menos para la absorción física.

Shulman también determina valores del área irrigada utilizando un relleno de naftaleno. Determina en primer lugar un coeficiente de transferencia volumétrico para la sublimación del naftaleno, sin circulación de líquido. Posteriormente conociendo el coeficiente individual de sublimación del naftaleno hace circular el líquido a varios caudales y obtiene de los coeficientes volumétricos de transferencia del naftaleno valores de áreas irrigadas para cada caudal de líquido. Shulman relaciona los valores de área efectiva con los valores de retención de líquido en la columna. (2i)

Al hacer un estudio con trazadores coloreados observa que hay partículas de líquido que tienen una permanencia mucho más prolongada en la columna que la mayor parte del líquido. Define dos tipos de retención, una estática y otra dinámica, siendo la suma de las dos la retención total de líquido en la columna.

Si se consideran que los elementos de mayor permanencia en la columna tienen una probabilidad mayor de saturarse del gas, estos elementos rápidamente se vuelven inefectivos para la absorción. La reacción química prolonga, al impedir la saturación, la efectividad de estos elementos. De estos consideraciones se hace evidente que los elementos que corresponden a la retención dinámica son los que corresponden al área efectiva para la absorción física y los que corresponden a la retención total al área efectiva en el caso de una reacción química rápida.

Yoshida trabaja en los últimos años sobre este tema utilizando áreas de referencia. Determina los valores de los coeficientes de transferencia para rellenos, cuya área efectiva se puede determinar fácilmente. Después, en las

mismas condiciones fluido-dinámicas en otra columna cuya área efectiva quiere determinar, obtiene los coeficientes volumétricos. La comparación de ambos valores debe dar la relación de efectividad de un relleno a otro. Finalmente Norman anuncia un método muy especial para obtener mediante una determinación visual del relleno, el área irrigada y el área efectiva para absorción física. Al relleno sobre el cual trabaja es el de los enrejados de madera. Observa sobre la tablilla del relleno dos zonas de circulación del fluido. El grado de turbulencia en una de estas zonas es muy grande; en la otra zona el líquido se escurre en movimiento laminar. Considera a la primera zona como totalmente efectiva para absorción física. Ambas zonas son efectivas para la absorción con reacción química veloz, aumentando la efectividad de la zona laminar con la velocidad de reacción. Se observa que distintos postulantes llegan por diferentes caminos a conclusiones muy parecidas, estudiando las condiciones dinámicas de la columna. Se nota que el patrón no debe ser muy diferente y en este momento se puede predecir la tendencia de los valores de las áreas efectivas con la velocidad de reacción, sin poder dar una relación cuantitativa de cómo varía el valor de dicha área efectiva con el grupo químico adimensional que relaciona las velocidades de los fenómenos difusionales y químicos, el segundo grupo de Dahmehler. (20), (11), (12)

Utilización del Gráfico de Van Krevelen para obtener una ecuación de efectividad para el área interfacial en una interfase líquido-gas en presencia de una reacción química.

Al integrar la ecuación diferencial que surge del balance de materia en un elemento de volumen en la interfase líquido-gas, considerando la influencia de una reacción química, Van Krevelen y Hoflyzer (5) posibilitan la obtención a través de un diagrama generalizado, de los coeficientes de transferencia, en presencia de una reacción química, conociendo los valores de los coeficientes de transferencia para la absorción física en las mismas condiciones dinámicas.

Este diagrama generalizado no se puede utilizar en los casos en que no se

esté en presencia de elementos diferenciales o todo el elemento considerado se encuentre en las mismas condiciones físicas. En las columnas con relleno, esta condición se cumple a altos caudales, cuando la columna se encuentra inundada.

En el gráfico de Van Krevelen, se presenta en papel doble logarítmico el cociente de los coeficientes individuales de transferencia con reacción química y sin reacción química, en función del grupo químico conocido como segundo grupo de Densihler que agrupa la velocidad específica de reacción química, la concentración del reactivo en el seno del líquido, la difusividad del gas en el líquido, todos estos factores elevados a la potencia de un medio y divididos por el coeficiente de transferencia para absorción física. La curva que se obtiene es una asíntota al eje de los abscisas para valores inferiores de 0,1 del grupo químico, para valores entre 0,1 y 2 se convierte en una paraboloida, y para valores mayores de 2 toma la forma de una recta de  $45^{\circ}$  de inclinación que prolongada pasaría por el origen de las coordenadas (curva límite de Hatta).

En las columnas de relleno, si se cumplen las condiciones antes mencionadas, se puede utilizar este gráfico para obtener un valor del coeficiente de efectividad del relleno. Si se representa en el gráfico original, en lugar del cociente de los coeficientes de transferencia, el cociente de los coeficientes volumétricos y en el eje de los abscisas se reemplaza el número adimensional que se encontraba representado originalmente por un grupo así definido:  $(Da_{11})_T \cdot Da_{11} \cdot (a/a_0)$ , siendo  $a_0$  un área de referencia, se obtienen una serie de puntos en el gráfico de Van Krevelen que no coincidirán con la curva original.

Los puntos representados en esta forma se van a encontrar desplazados en la zona de la recta de  $45^{\circ}$  por un valor que es igual al cociente de  $a^*/a_0$ , el área efectiva para absorción con reacción química dividida por el área de referencia que para el caso se puede tomar como el área total expuesta del relleno. Esto se puede demostrar de la siguiente forma: en la zona de la recta de  $45^{\circ}$   $K_L^* a^*/K_L a = (k \cdot C_{OB} \cdot a D_{AB})^E a^*/K_L a$ , de donde se representa el miembro de la izquierda obtenido a través de datos experimentales en función de  $///$

$(k \cdot C_{OB} \cdot D_{AB})^{\frac{1}{2}} a_y / K_L a$  donde se ha reemplazado en la igualdad anterior el área efectiva  $a'$  por  $a_y$  (área de referencia). Se observa que en el gráfico original de Van Krevelen los puntos experimentales que se representan aparecen desplazados por un valor de  $a'/a_y$ . Si se traza la paralela a la recta de  $45^\circ$  desde la ubicación en el gráfico donde es el punto experimental, en el punto donde esta línea corta la ordenada igual a la unidad se obtendrá en el eje de las ordenadas el valor del cociente  $a'/a_y$ , de donde si se conoce el valor de  $a_y$  se obtiene el valor de  $a'$ .

Sobre la recta de  $45^\circ$  al mismo tiempo se pueden controlar las valores de área irrigada obtenidas por medios físicos (inspección visual, etc.) tomando como área de referencia el valor del área irrigada. En este caso los puntos deben coincidir con la recta original de  $45^\circ$ .

Fuera de la zona de la recta de  $45^\circ$  en el gráfico de Van Krevelen, no se puede utilizar esta técnica. La aparición de una tangente hiperbólica en la fórmula del factor de reacción no permite obtener una relación sencilla por el desplazamiento de la curva original. Ioshida (26) propone una fórmula que permite calcular aproximadamente el valor de  $K'_L a'$  en la zona entre los valores de 0,2 y 5 del grupo  $(k \cdot C_{OB} \cdot D_{AB})^{\frac{1}{2}} K_L$ . Esta fórmula se basa en las mismas consideraciones hechas por Shulman dividiendo los elementos líquidos en la columna en estancos y en movimiento. En una comunicación privada de un trabajo efectuado en la Universidad de La Plata, no publicado aún, se efectúa un desarrollo basado en la fórmula anteriormente mencionada. En dicho desarrollo si se define como grupo  $D_{y,y}$  al grupo  $(k \cdot C_{OB} \cdot D_{AB})^{\frac{1}{2}} K_L$  se llega a que el cociente  $K'_L a' / K'_L a = D_{y,y} / \tan h D_{y,y} + D_{y,y} (a_y - a)$ . Esta ecuación si bien no da un valor al desplazamiento de la curva original del gráfico de Van Krevelen indica que el desplazamiento dependerá del valor del número de Reynolds puesto que el segundo término del miembro de la igualdad de la igualdad anterior depende de las condiciones fluido dinámicas del medio. La diferencia ( $a_y - a$ ) es mayor a valores bajos del número de Reynolds de donde surge que a bajos valores de Reynolds se observará una desviación mayor de la curva original.

### Trabajo experimental.

Esta parte del trabajo en su fase experimental consistió en dos partes: 1) Una serie de corridas donde se determinó el coeficiente de transferencia para la absorción de  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$ , soluciones muy diluidas; y 2) Determinación de valores de áreas irrigadas del relleno de la columna.

En la parte 1) se ha seguido en la determinación de los coeficientes de transferencia una técnica muy similar al de la primera parte del trabajo. Los coeficientes de transferencia se obtienen con la ayuda de un balance de materia en la fase gaseosa. Las concentraciones de  $\text{OH}^-$ , que se utilizarán en la estimación de los grupos adimensionales definidos en la parte introductoria teórica ( $R_{\text{eff},T} = (k_0 \cdot D_{AB})^{1/2} a_g/k_L a$ ), se obtienen de dos titulaciones, sobre muestras aparte, en donde se determina la alcalinidad total, y concentración de ión  $\text{OH}^-$ . En el caso de concentración de  $\text{OH}^-$  se precipita todo el carbonato presente con cloruro de bario. La difusividad del  $\text{CO}_2$  se estima con la ayuda de la fórmula de Stokes y Einstein habiéndose determinado previamente la viscosidad del sistema con la ayuda de un viscometro de Ostwald. Los valores de los coeficientes de transferencia de volumétricos para la absorción física se obtienen de la correlación de la parte mencionada en la parte primera del trabajo.

$$Sh = 20 Re^{0.45} Sc^{0.50}$$

Si bien esta correlación nos da valores para los coeficientes individuales para la fase líquida tal como se dijo en la primera parte, los valores de  $k_L a$  no deben diferir de los valores de  $K_L a$  por la poca influencia observada de la película gaseosa tanto en el trabajo anterior hecho con el mismo equipo y el mismo sistema por J. Krusuk, J.W. Renco y R. Cunningham, como en una determinación hecha con ayuda de técnicas estadísticas en un trabajo realizado en el departamento.

Las relaciones así obtenidas de  $K_L a'/K_L a$  trasladadas al gráfico original de Van Krevelen muestran una desviación de la curva original. Esta desviación ya prevista en la fórmula obtenida a partir de la de Yoshida es mayor a

pequeños valores del número de Reynolds y se vuelve cada vez menor al aumentar el número de Reynolds. Se explica que a valores grandes de Reynolds la diferencia ( $a_y - a$ ) tiende a valores muy bajos llegando a anular el segundo término del miembro de la izquierda, término que da justamente la desviación de la curva original.

En la representación en el gráfico de Van Krevelen se ha utilizado el grupo tecnológico  $(k \cdot G_{OH}^{-1} D_{AB})^{1/2} a_y/a$  definido en un trabajo anterior ( $\times$ ). La verificación observada permite asegurar la utilidad de la fórmula de Yoshida en el rango de valores del grupo tecnológico que se ha trabajado. Asimismo permite verificar aunque sea cualitativamente la dependencia de las desviaciones de los valores de  $K'_L a'/K_L a$  de la curva original de los valores de Reynolds. O sea que  $a'/a$  es a su vez función del número de Reynolds verificándose también el concepto de Shulman que para reacciones no muy veloces ya existe una diferencia en los valores de  $a'$  y  $a$ .

En el punto b) de esta segunda parte, se hace un intento de obtener valores de áreas irrigadas en esta columna a diferentes caídas de líquidos. Como se ha dicho ya, existen en la literatura diferentes intentos para determinar valores de áreas irrigadas. Eliminando las técnicas ultramodernas de obtener valores de áreas irrigadas con la ayuda de técnicas electrónicas ninguna de los métodos ha podido dar valores muy exactos, salvo la técnica de Shulman. La técnica seguida en este trabajo trata de combinar un método de estimación visual con una estimación de tipo topográfico siguiendo un mapa de la ubicación del relleno en la columna. En primera instancia se observan diferentes elementos del relleno para establecer su grado de irrigación según su ubicación en la columna. Se establece de esta forma una serie de sectores circulares de igual irrigación. Las extensiones de dichos sectores se determinan midiendo la longitud del arco que limita la zona, siendo conocido el diámetro de la sección de la columna. Se considera, hecho admitido en la literatura (10), que el líquido que irriga un sector de la columna en un piso determinado, irriga el piso del relleno inmediatamente inferior. En cada uno de los sectores de diferentes irrigación, se estima la superficie irrigada de cada elemento de relleno, conocien-

de valores para un elemento de relleno considerado como representativo de todo la zona. Estos valores se obtienen a través de mediciones directas sobre los enrejados de madera. Una vez obtenidos estos valores se los traslada sobre un mapa que da la ubicación del relleno en la columna. Aquí se delimitan sectores de igual irrigación y con los valores de irrigación de los elementos representativos se obtiene el área total irrigada. Este método se repite a diferentes columnas y se obtienen valores para el área irrigada para toda una gama de condiciones en las condiciones de trabajo habituales de la columna.

#### Conclusiones de la segunda parte del trabajo y Conclusiones finales.

El propósito inicial de esta parte del trabajo ha sido encontrar un método para separar el coeficiente volumétrico de transferencia en sus componentes: coeficiente de transferencia y área efectiva por unidad de volumen. Se había pensado utilizar con este propósito el gráfico de Van Krevelen e interesaba particularmente la zona del gráfico que incluye las reacciones lentes a moderadamente veloces. Con tal fin se completa la correlación que nos da valores de  $K_L^*$  y se hacen determinaciones de valores  $K_L^*$  a<sup>\*</sup> en la zona antes mencionada. Sin embargo la definición misma del factor de reacción, según Van Krevelen (5) impide encontrar un método gráfico sencillo que permita obtener a<sup>\*</sup> en función de un valor de área de referencia. Esta definición incluye una tangente hiperbólica cuyo ancho no se puede separar y que finalmente incluye valores de área efectiva. En estas circunstancias se recurre a una fórmula aproximada de Ioshida que una vez reelaborada permite predecir valores del cociente  $K_L^*/K_L a^*$ . Los resultados experimentales concuerdan cualitativamente con los predichos por esta fórmula. La desviación media es de un 12%. Las desviaciones además concuerdan con lo predicho por esta fórmula e sea que son función del número de Reynolds. Estas desviaciones figuran en la fórmula en el término de corrección, función del área irrigada y del área efectiva, para la absorción física. Más aún estas desviaciones no se comprueban a altos valores del número de Reynolds donde los valores de área efectiva para absorción física

ca se igualan a los de área irrigada. Se hace notar la utilidad de las curvas paralelamente desplazadas de la curva de Van Krevelen, curvas obtenidas de valores experimentales y que son además función del número de Reynolds, que permiten predecir el comportamiento de la columna en la zona de la reacción lenta o moderadamente rápida.

Un análisis un poco más profundo de estos resultados indica que la definición de área efectiva incluye una serie de variables que fundamentalmente son los que en definitiva gobiernan el fenómeno. La expresión que permite calcular  $K_g'$  incluye el área interfacial. El concepto físico de que la parte de este área no sea efectiva, que origina la definición anterior, tiene poca base desde un punto de vista real. No deja de ser una definición que permite caracterizar globalmente el fenómeno de transferencia en una torre de absorción. Los resultados obtenidos refirman lo antes dicho. Es difícil imaginar que haya dos áreas interfaciales para un mismo grado de irrigación del relleno, una en el caso de absorción física y otra para el caso de absorción con reacción química. Llama más la atención que estas diferencias desaparecen cuando se alcanzan altos valores de  $Re_{\text{number}}$ . Se supone que a estos altos valores de Reynolds la columna alcanza cierta uniformidad del patrón fluido dinámico que predomina en ella. Este hecho trasciende el problema de un problema de efectividad de áreas a un problema de mezclado, saturación de elementos y uniformidad fluido dinámico.

Concretando las conclusiones que se sacan de los resultados experimentales son:

- a) Verificación cualitativa y cuantitativa dentro del margen antes mencionado. Esta fórmula tiene relativa utilidad práctica debido a la aparición del valor de área efectiva física que es nada más que una definición.
- b) Trasado de curvas empíricas que predicen el comportamiento de la columna y las desviaciones del valor  $K_g' a' / K_g a$  de los valores predichos para reacciones lentes o moderadamente rápidas a diferentes Reynolds.
- c) Un estudio posterior sobre este problema debe orientarse hacia modelos de mezclado y de distribución de los coeficientes de transferencia en la columna y simplificar en mayor grado posible el problema.

Luz  
M

## ONOMÁSTICA

a: área efectiva para absorción física.

a': área efectiva para absorción con reacción química.

a<sub>0</sub>: área total expuesta del relleno utilizada como área de referencia.

a<sub>w</sub>: área irrigada total del relleno.

D: coeficiente de la ley de Fick o difusividad.

D<sub>AB</sub>: difusividad del gas A en el líquido B

C<sub>A</sub>: concentración del gas A en el seno de la fase gaseosa.

C<sub>Ai</sub>: concentración del gas en la interfase.

d: espesor de la película líquida que se desliza a lo largo de la pared.

$$Ra_{11} = (k \cdot C_{OH^-} \cdot D_{AB})^{1/2} / K_L \text{ grupo segundo de Dalmatikler}$$

C<sub>OH^-</sub>: concentración de íon hidróxilo en la fase líquida.

K<sub>L</sub>: coeficiente total volumétrico para toda la columna de transferencia de masa para el caso de absorción física.

K'<sub>L</sub>a': coeficiente total volumétrico de toda la columna de transferencia de masa para el caso de absorción acompañada por una reacción química.

K: coeficiente de transferencia de masa.

L: caudal de líquido.

l: espesor de la tablilla de madera del relleno.

N<sub>As</sub>: cantidad de gas A transferida en dirección s

N<sub>Ax</sub>: cantidad de gas A transferida en dirección x

S: sección ocupada por el relleno en la columna

Re: número adimensional de Reynolds definido como  $\frac{\rho \cdot L}{\mu \cdot g}$ .

Sc: número adimensional de Schmidt definido como  $\frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}}$

Sh: número adimensional de Sherwood definido como  $\frac{\mu \cdot D_{AB}}{K' \cdot a' \cdot l^2}$

Letras griegas

$\mu$ : Viscosidad de la fase líquida

$\rho$ : Densidad de la fase líquida

Subíndices:

A: nombre del gas a absorberse

B: nombre del reactivo en la fase líquida que va a reaccionar con el gas.

x: dirección normal a la dirección de circulación del fluido.

s: dirección de circulación de la fase líquida.

## Bibliografia

1. R.B.Bird, Stewart, S.E.Lightfoot, "Transport Phenomena" J.Wiley and Sons 1960 p. 537.
2. Colburn, A.F., Milton, T.H. I.E.C. 26, 1183, (1934)
3. Denetwerts, P.V. I.E.C. 43, 1460, (1951)
4. Higbie, R. Trans. Am. Inst. of Chem. Engrs., 31, 365, (1935).
5. De J. Van Krevelen, P.J. Hefttyser, Sur la solubilite des gres en liquides. Articulo presentado en el XXI Congreso Internacional de Quimica Industrial.
6. De J. Van Krevelen, P.J. Hefttyser, Rec. des Trab. Chimiques, 67, 563-586, (1948)
7. De J. Van Krevelen, P.J. Hefttyser, Rec. des Trab. Chimiques, 66, 49-70 (1947).
8. Mayo, F., Hunter, T.C., y Nash, A.R., J. Soc. Chem. Ind. 54, 375, (1935).
9. Hickley, H.J., Sherwood, T.K. y Reed. C. "Applied Mathematics in Chemical Engineering".
10. Gilliland, E.R., Butt, W.H. Inst. Chem. Engrs. 38, 308, (1960).
11. Neuman, W.S. Trans. Inst. of Chem. Engrs 29, 226, (1951).
12. Norman W.H. Absorption, Distillation and Cooling Towers Longmans 1961, capitulo 7.
13. K.anda "Memories of the faculty of engineering Nagoya University vol.13, n° 1, (1961).
14. K.anda, N. Sada, Murase, Y., A.I.Chem. Journal 5, 235-239, (1959)
15. Othmer, D.P., Thakar, M.S. I.E.C., 45589, (1953).
16. Brandst, L.S. Physik. 11, 1072, (1910).
17. Reynolds, O. Proc. Manchester Lit. and phil. Soc. 8, (1874).
18. Robinson and Stokes "Electrolyte Solutions" Butterworths 1959.
19. Sherwood, T.K. y Holloway, F.A. Trans. Am. Inst. of Chem. Engrs., 36, 21 (1939).
20. Sherwood and Pigford "Absorption and Extraction".
21. Gilliland, E.R., Proulx, A.Z., C.F. Ullrich, J.O. Zimmerman, A.I.Chem. Jour. 1, 253, (1955)
22. Taylor, G.I., B.Mt. Adviso Ry. C.R.D. Aeronaut. Reports and Mem. 272, 423, (1916).
23. Poer, H.L., Marchalio, J.M., A.I.Chem. Journal 4, 97, (1958)
24. Whitman, W.G., I.E.C. 16, 1215, (1924)

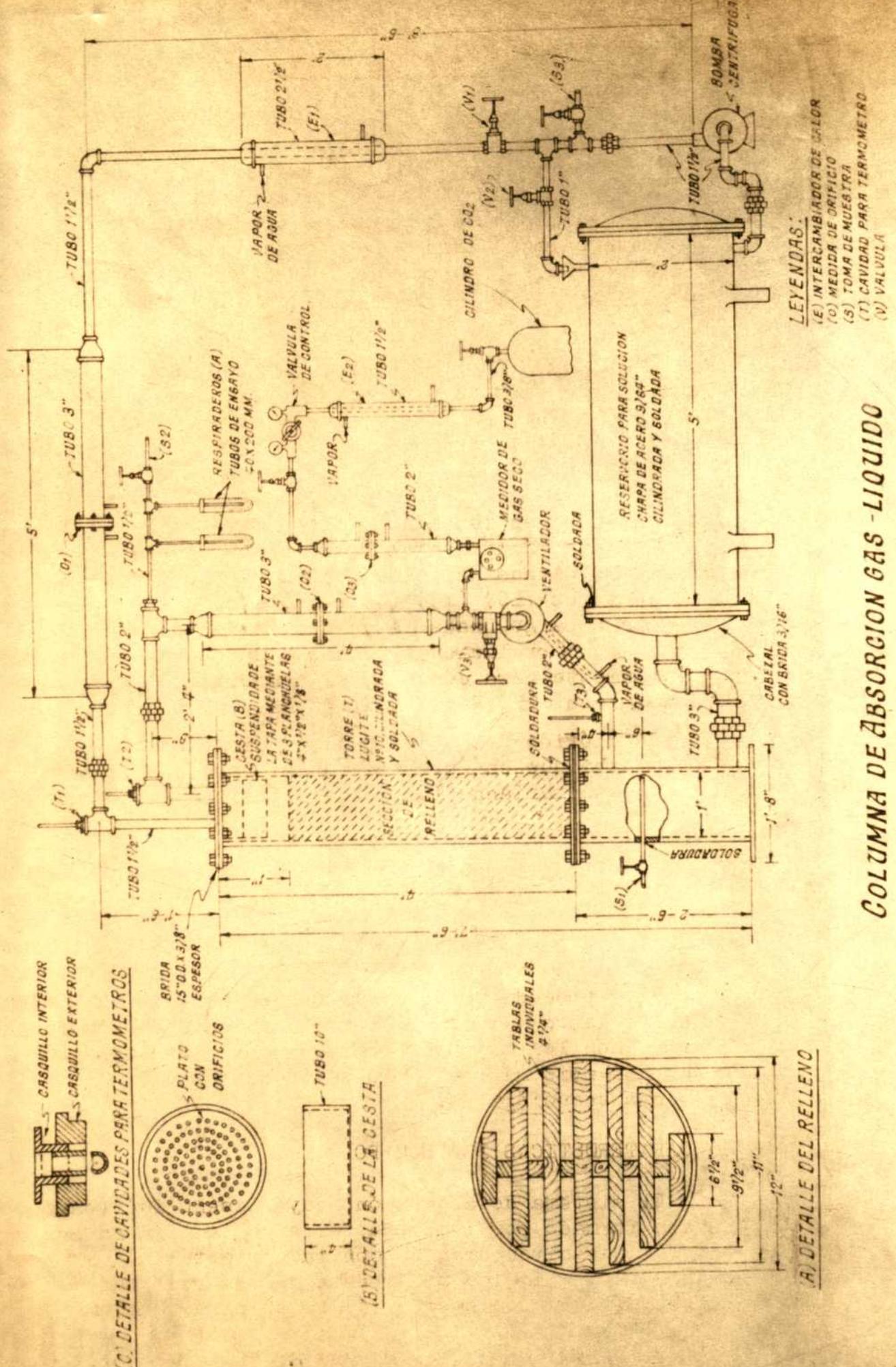
///...

///...2-

25. Yoshida. F, Koyanagi. T; I.S.C, 50, 365, (1958).
26. Yoshida. F., Mifura. Y; A.I.Ch.E.Jour. 9, 331, (1963).
27. Kinserman. O, Levine ; Chem.Engineering.Equipment", Ind,Research Service (1951), p.413
28. International Critical Tables Mc.Graw and Mills (1927)
29. J.Perry "Chemical Engineering Handbook" 3a edicion.

PLANTILLAS

- Página 14. Primer renglón; donde dice Robins leer Robinson.
- Página 15. Segundo renglón; donde dice Bankerets agregar que la constante fue determinada por Laidhurst en un trabajo original del año 1919.
- Página 21. 24 renglón; el segundo término del miembro de la ecuación es  $\frac{a_w - a}{a}$ .
- Página 23. (x) se refiere a un trabajo a publicarse del Dr. J.J. Ronco y colaboradores efectuado en la Universidad de La Plata.
- Página 25. 24 renglón; después de mencionado agregar fórmula de Yoshida.



COLUMNAS DE ABSORCION GAS-LIQUIDO

(E) INTERCRANÍABORDE DE OÍLOR  
 (G) MEDIDA DE ORIFICIO  
 (S) TOMA DE MUESTRAS  
 (T) CAVIDAD PARA TERMÓMETRO  
 (V) VALVULA

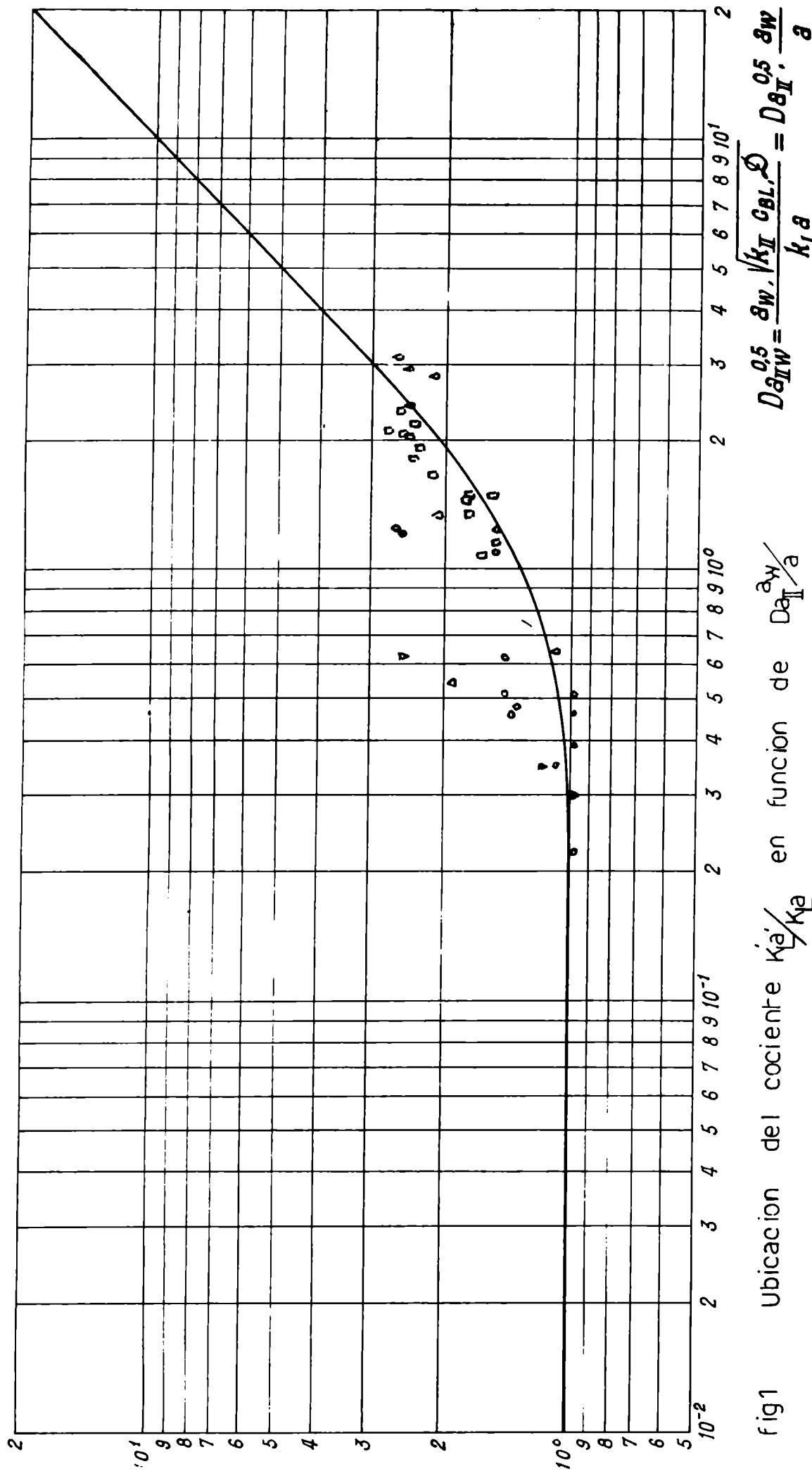


fig 1

Ubicacion del cociente  $\frac{k'_L s'}{k_L d}$  en funcion de  $D_a \frac{T_w^{0.5}}{\sqrt{k'_L C_D}}$

en relacion con la curva original de VAN KREVELEN

$$D_a T_w^{0.5} = \frac{\delta_w}{k_L} \frac{\sqrt{k'_L C_D}}{\delta_w} = D_a \frac{0.5}{k_L \delta} \frac{\delta_w}{\delta}$$

Re      0    300 - 500  
      □    500 - 700

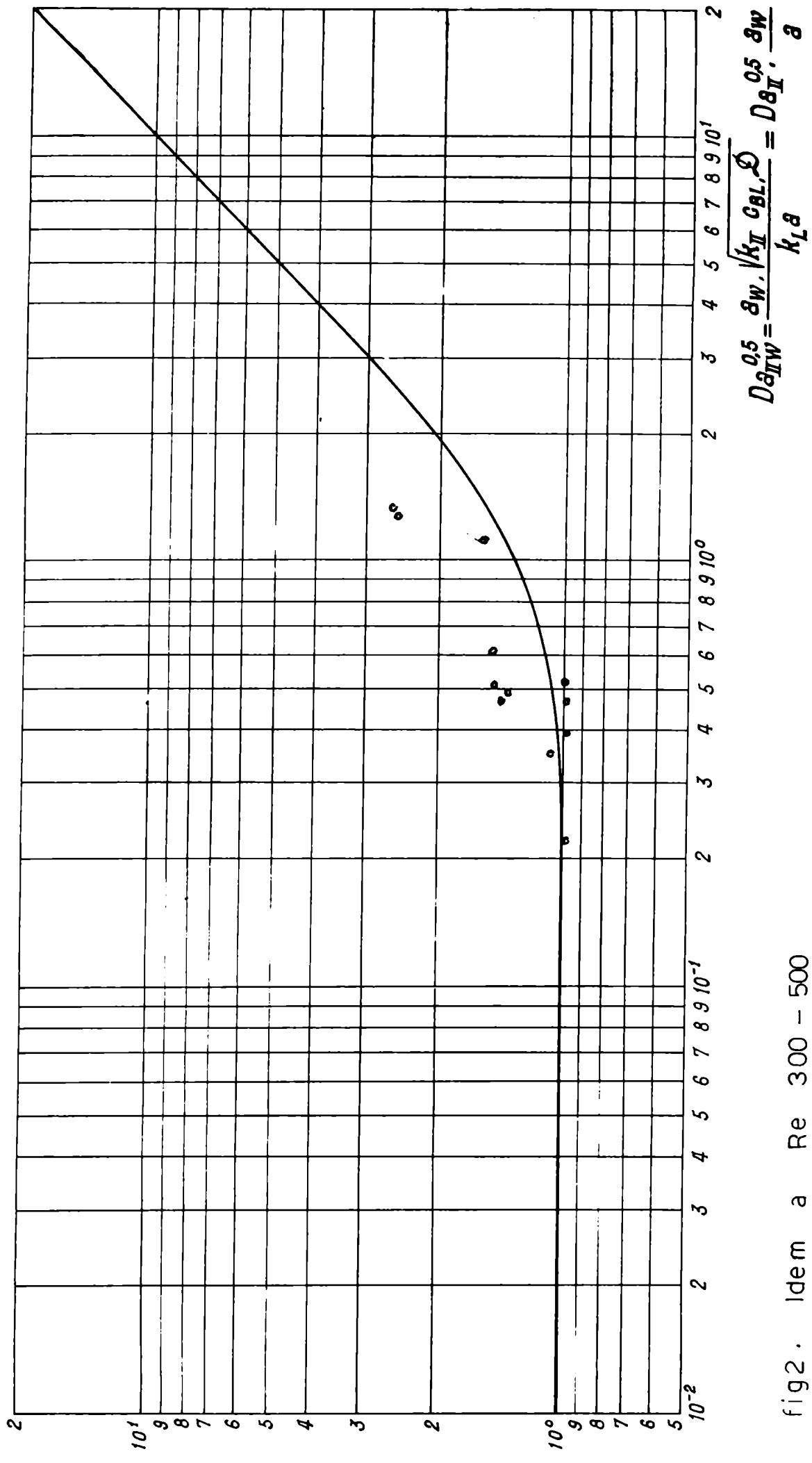


fig2 . Idem a Re 300 - 500

$$\frac{K'_L \delta'}{K_L \delta}$$

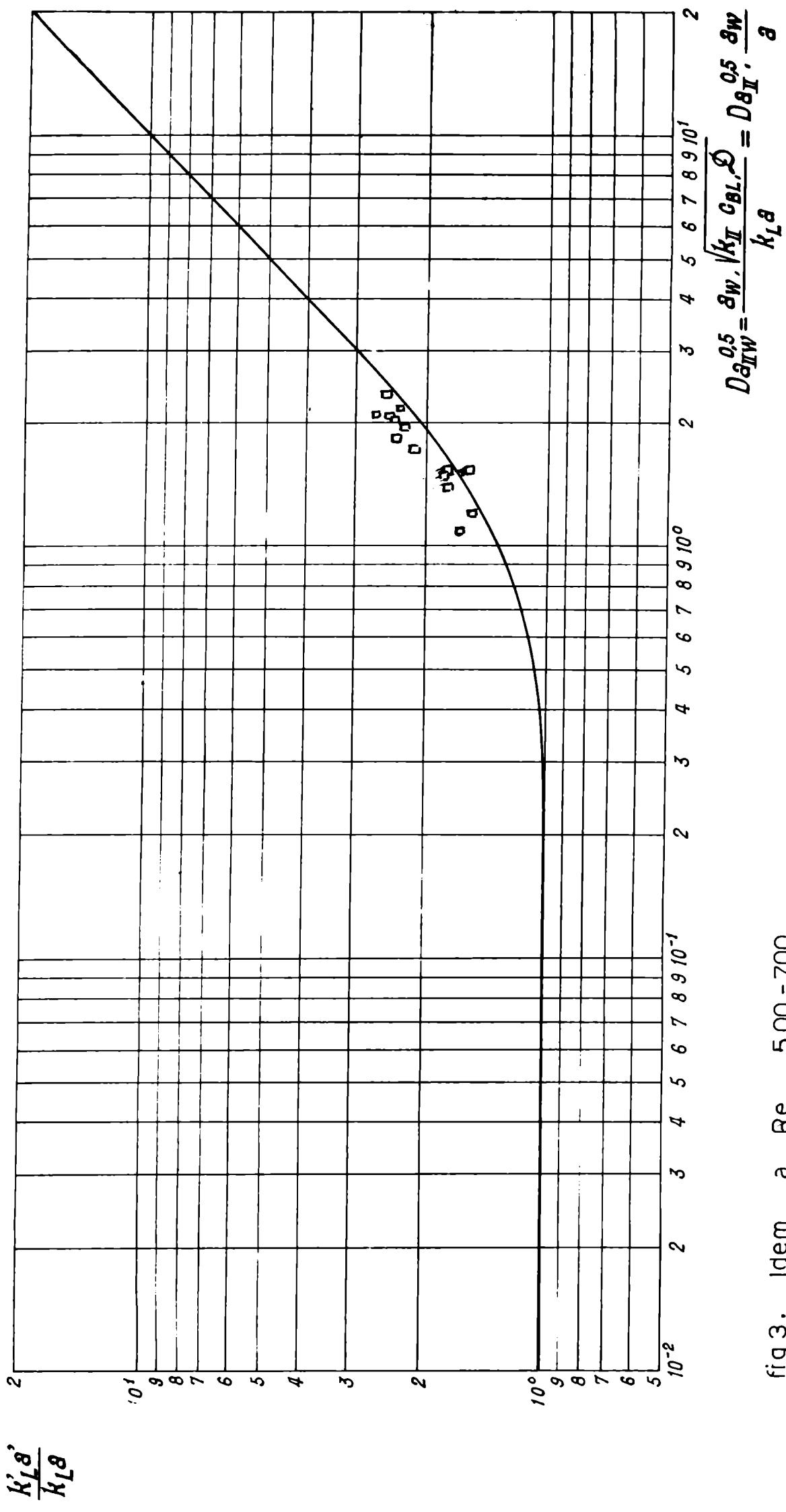
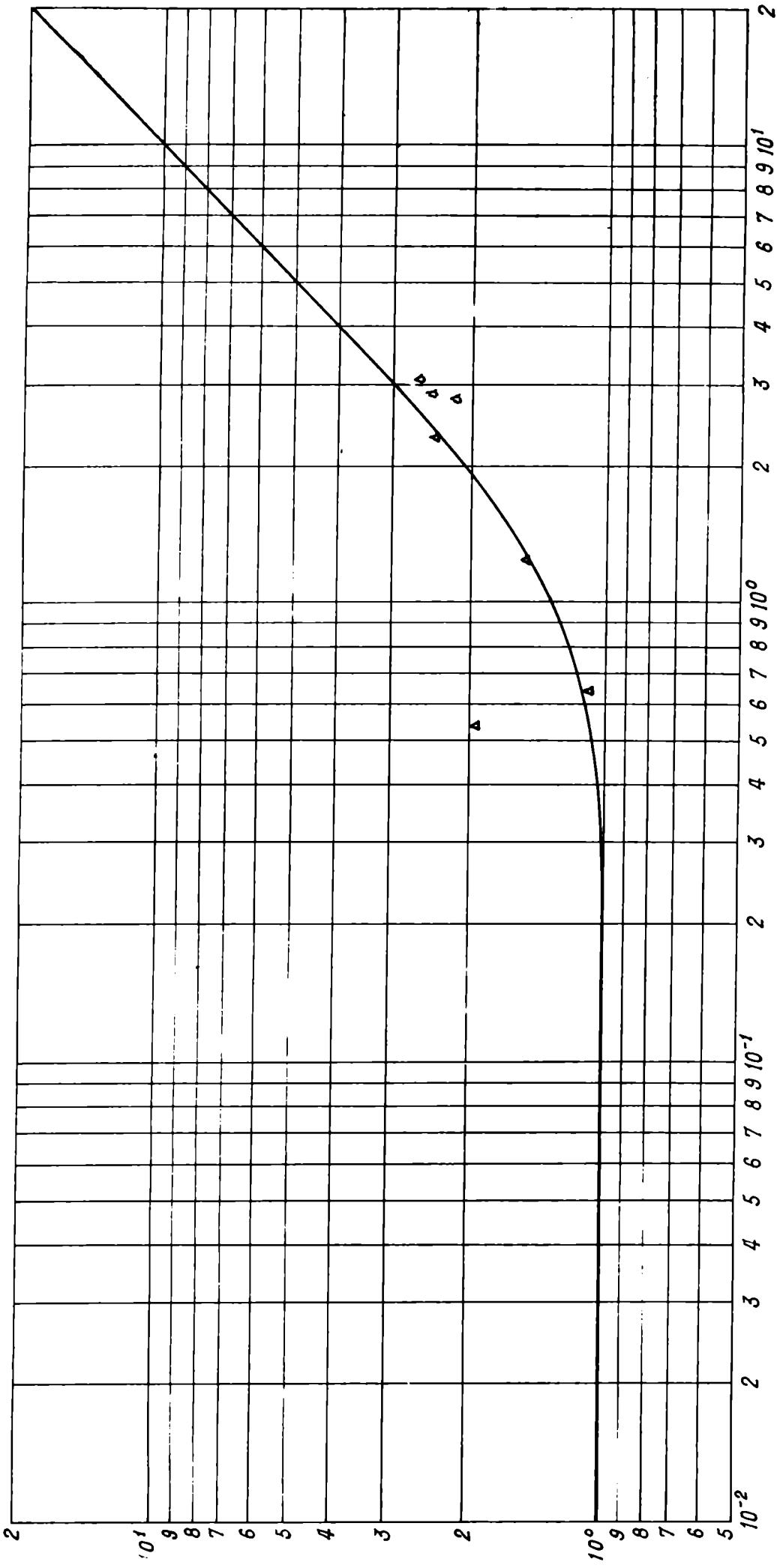


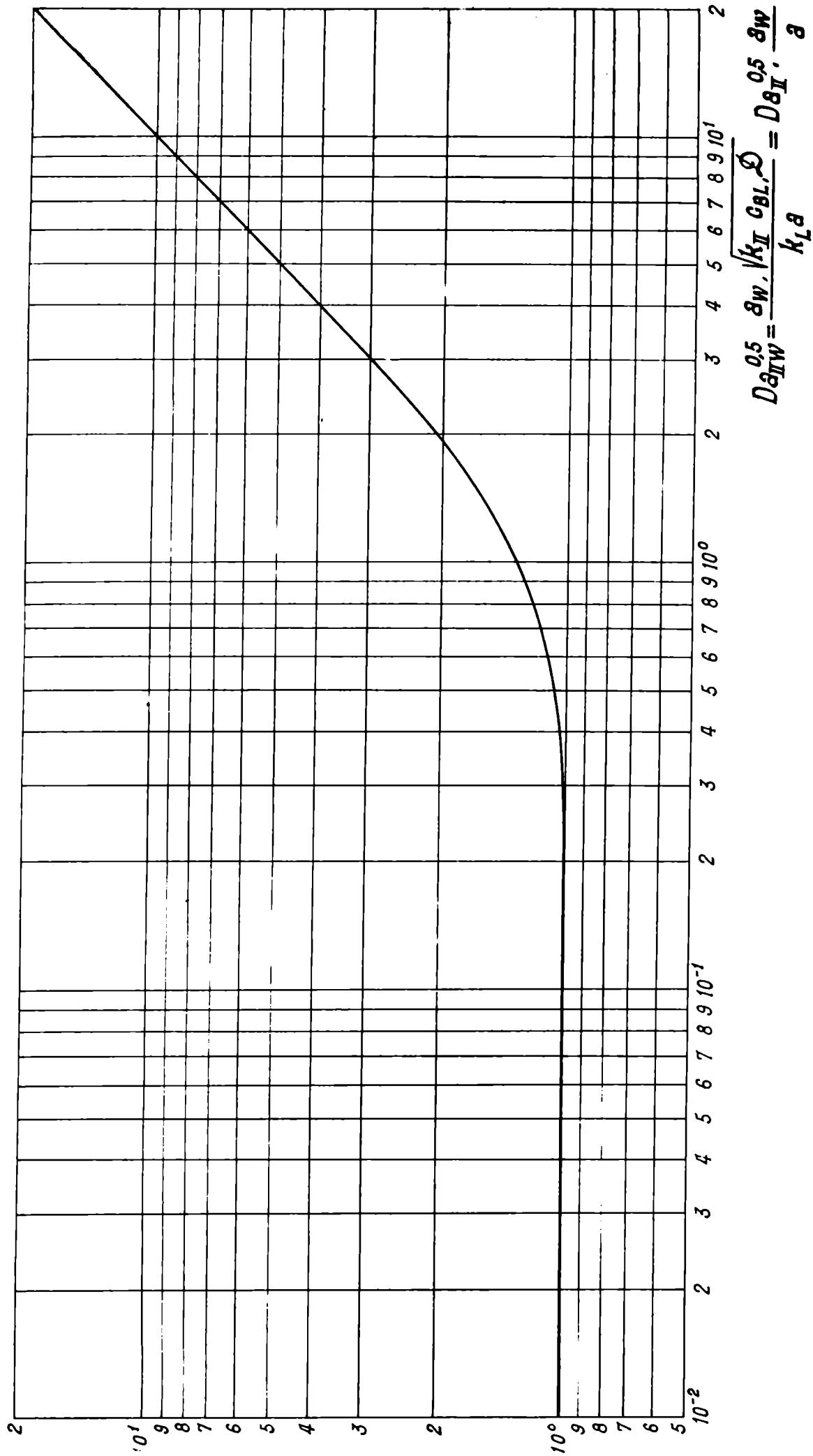
fig 3. Idem a Re 500 - 700



$$D \theta_{II}^{0.5} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{II}} \sqrt{k_{II} C_{BL} Q} = D \theta_{II}^{0.5} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta}$$

fig 4 . Idem a Re 700-850

$\frac{k'_L}{k_L}$



$$\frac{K'_L \varrho'}{K_L \varrho}$$

$$D g_I W = \frac{\partial W}{\partial g_I} \sqrt{k_{II} c_{BL} \mathcal{Q}} = D g_{II}^{0.5} \cdot \frac{\partial W}{\partial g_I}$$

Tabla de corridas para el exponente del no. de SCHMIDT

Nº de Experiencias	NOH x 10 <sup>-4</sup>	NCO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	NCO <sub>3</sub> H	Temp. Gas de Salida °K	Caudal m <sup>3</sup> /hora Gas de Salida	Temp. CO <sub>2</sub> que entra °K	Caudal CO <sub>2</sub> que entra m <sup>3</sup> /hora	% CO <sub>2</sub> en Gas de Salida	Temp. Líquido °K	Caudal Líquido m <sup>3</sup> /hora	Presión Atmosf. mm Hg	K <sub>L</sub> <sup>a</sup>	Sherwood	Schmidt	Reynolds	Difusiv. m <sup>2</sup> /hora x 10 <sup>5</sup>
1	4,64	0,150	0,02	298,3	11,1	293,3	0,595	12,7	297,3	1,76	759,4	64,3	7,437	712	365	0,540
2	4,31	0,143	0,03	298,3	11,1	293,3	0,568	11,7	297,3	1,76	759,4	66,3	7,694	712	365	0,540
3	3,11	0,134	0,05	298,3	11,1	293,3	0,620	14,0	297,3	1,76	759,4	61,4	7,127	712	365	0,540
4	2,50	0,13	0,06	298,3	11,1	293,3	0,608	13,2	297,3	1,76	759,4	63,6	7,378	712	365	0,540
5	1,44	0,10	0,11	298,3	11,1	297,3	0,453	11,0	298,3	1,91	750,5	59,9	7,140	796	366	0,524
6	1,44	0,10	0,12	298,3	11,1	297,3	0,435	11,0	298,3	1,91	750,5	59,6	7,101	796	366	0,524
7	1,29	0,10	0,12	298,3	11,1	297,3	0,490	11,7	298,3	1,91	750,5	60,5	7,217	796	370	0,524
8	1,15	0,09	0,13	298,3	11,1	298,3	0,432	10,7	298,3	1,91	750,5	59,8	7,140	796	368	0,524
9	1,24	0,09	0,09	299,3	11,1	299,3	0,840	19,7	299,3	2,13	759,0	64,8	9,013	1,076	351	0,449
10	1,11	0,08	0,11	299,3	11,1	299,3	0,822	18,7	299,3	2,13	759,0	66,8	9,189	1,076	351	0,449
11	1,01	0,07	0,14	299,3	10,2	299,3	0,846	18,7	299,3	2,13	759,0	69,4	9,649	1,076	351	0,449
12	0,81	0,06	0,15	300,3	10,2	300,3	0,846	18,6	299,3	2,13	759,0	70,6	9,809	1,076	351	0,449
13	0,72	0,06	0,17	300,3	10,2	300,3	0,882	19,9	299,3	2,13	759,0	70,7	9,827	1,277	351	0,449
14	1,35	0,15	0,16	302,3	10,3	303,3	0,802	18,5	300,3	2,63	759,0	69,5	10,835	1,277	398	0,415
15	1,09	0,14	0,18	302,3	10,3	303,3	0,798	16,8	300,3	2,63	759,0	74,9	11,279	1,277	398	0,415
16	0,90	0,14	0,19	302,3	10,2	304,3	0,774	18,8	300,3	2,63	759,0	66,4	10,043	1,277	398	0,415
17	1,85	0,13	0,20	302,3	10,2	304,3	0,745	17,9	300,3	2,63	759,0	67,8	10,216	1,754	398	0,415
18	1,65	0,19	0,17	301,8	11,7	305,3	0,643	15,2	299,3	2,46	760,0	68,7	12,129	1,754	315	0,354
19	1,40	0,19	0,18	301,8	11,7	305,3	0,664	15,9	299,3	2,46	760,0	68,8	12,040	1,754	315	0,354
20	1,32	0,18	0,19	301,8	11,7	305,3	0,658	15,7	299,3	2,46	760,0	68,6	12,111	1,754	315	0,354
21	1,32	0,17	0,20	301,8	11,7	305,3	0,642	16,1	299,3	2,46	760,0	65,9	11,747	1,752	315	0,354
22	1,19	0,17	0,21	302,3	11,7	307,3	0,614	14,8	299,3	2,46	760,0	68,8	12,076	1,752	315	0,354
23	4,19	0,16	0,22	302,3	11,7	307,3	0,645	16,3	299,3	2,46	760,0	66,4	11,765	2,400	315	0,354
24	3,90	0,29	0,09	295,3	12,6	295,3	1,220	33,4	294,3	2,85	760,0	60,4	12,620	2,400	315	0,294
25	3,37	0,27	0,11	295,3	12,6	295,3	1,254	32,9	294,3	2,85	760,0	62,6	13,077	2,400	315	0,294
26	2,42	0,26	0,14	295,3	12,6	295,3	1,275	34,1	294,3	2,85	760,0	60,7	12,691	2,400	315	0,290
27	2,42	0,24	0,16	295,3	12,6	295,3	1,267	34,0	294,3	2,85	760,0	61,5	12,847	2,400	315	0,290
28	2,42	0,24	0,18	295,3	12,6	295,3	1,254	34,3	294,3	2,85	760,0	60,4	12,634	2,400	315	0,290
29	2,16	0,23	0,19	295,3	12,6	295,3	1,248	34,2	294,3	2,85	760,0	60,3	12,596	2,554	315	0,290
30	2,67	0,23	0,16	295,3	11,7	294,3	1,470	38,4	297,3	3,36	756,2	64,3	14,026	2,554	328	0,290
31	2,37	0,21	0,18	295,3	11,7	294,3	1,476	38,9	297,3	3,36	756,2	63,7	13,886	2,554	328	0,290
32	1,91	0,20	0,20	295,3	11,7	294,3	1,495	38,5	297,3	3,36	756,2	65,4	14,259	2,554	328	0,290
33	1,70	0,19	0,22	295,3	11,7	294,3	1,545	38,9	297,3	3,36	756,2	65,7	14,322	2,554	328	0,290
34	1,60	0,19	0,24	295,3	11,7	294,3	1,565	39,6	297,3	3,36	756,2	66,3	14,462	2,554	328	0,290
35	1,65	0,25	0,31	291,3	11,1	288,3	1,048	24,5	291,3	4,02	769,2	63,9	17,436	3,867	360	0,229
36	1,58	0,24	0,33	292,3	11,1	289,3	0,970	25,0	291,3	4,02	769,2	60,2	16,362	3,867	360	0,229
37	1,32	0,22	0,36	292,3	11,1	289,3	0,978	25,9	291,3	3,78	769,2	59,3	16,250	3,855	340	0,229
38	1,18	0,22	0,37	294,3	10,8	290,3	1,018	26,0	292,3	3,78	769,2	54,4	14,890	3,855	334	0,227
39	1,10	0,21	0,39	294,3	10,8	291,3	1,038	30,4	292,3	3,78	769,2	54,0	14,850	3,855	334	0,227
40	0,80	0,18	0,24	296,3	12,0	290,3	1,190	27,9	295,3	1,14	753,1	56,9	6,167	657	234	0,577
41	0,73	0,15	0,27	297,3	12,5	293,3	1,011	27,1	296,3	1,14	753,1	53,4	5,767	657	234	0,577
42	0,57	0,15	0,29	297,3	12,5	293,3	0,975	27,2	296,3	1,14	753,1	53,3	5,756	657	234	0,577
43	0,50	0,12	0,34	297,3	12,5	293,3	1,245	31,1	296,3	1,14	753,1	55,3	5,972	657	234	0,577

Tabla de corridas para áreas efectivas

Nº de Experiencias	Análisis		Gas de Salida		CO <sub>2</sub> Admitido		% CO <sub>2</sub>	Líquido	Presión Atmosférica	K' L <sup>a'</sup>	Nºs Adimensionales			K <sub>L</sub> <sup>a</sup>	Difusiv. 10 <sup>5</sup>	1 / hora	F <sub>R</sub> K <sub>L</sub> <sup>a'</sup>	0,5 aw	Da <sub>II</sub> <sup>a</sup>
	N OH	N CO <sub>3</sub>	T (°K)	Caudal m <sup>3</sup> /hora	T (°K)	Caudal m <sup>3</sup> /hora					En gas de salida	Temp (°K)	Caudal m <sup>3</sup> /hora	mm Hg	1 / hora	Sherwood	Reynolds	Schmidt	
1	0,06	0,21	295,8	11,0	295,8	0,696	4,20	294	2,70	759,9	153,0	14.870	581,1	588,4	0,643	86,9	1,76	1.08	
2	0,05	0,21	295,8	11,0	295,8	0,840	9,20	294	1,68	759,9	101,7	9,900	367,0	572,1	0,642	69,6	1,46	0,62	
3	0,04	0,23	295,8	11,0	295,8	0,642	6,40	294	1,68	759,9	108,4	10.568	365,1	568,9	0,641	69,6	1,55	0,51	
4	0,02	0,25	295,8	10,5	295,8	0,654	6,30	294	2,77	759,9	109,0	10.064	827,5	567,0	0,640	99,2	1,09	0,64	
5	0,28	0,06	291,3	12,7	293,3	1,032	4,30	292	1,77	760,2	189,8	19.969	379,0	623,0	0,594	68,4	2,77	1,39	
6	0,27	0,07	291,3	12,7	293,3	1,072	4,80	292	1,77	760,2	182,5	19.202	379,0	623,0	0,594	68,7	2,66	1,36	
7	0,25	0,08	291,3	12,7	293,3	1,23	4,70	292	2,85	760,2	204,9	21.508	610,0	623,0	0,594	88,7	2,42	2,04	
8	0,24	0,09	291,3	12,3	293,3	1,24	4,80	292	2,85	760,2	202,2	21.275	610,0	627,0	0,594	85,7	2,39	2,03	
9	0,19	0,11	291,3	12,3	293,3	1,52	4,50	292	3,66	760,2	216,7	22.916	719,0	627,0	0,591	91,2	2,37	2,21	
10	0,30	0,08	290,3	15,0	289,0	0,826	3,80	292	2,66	762,2	201,6	21.252	567,9	625,0	0,591	82,6	2,44	2,20	
11	0,14	0,21	292,3	15,0	289,0	1,135	6,30	292	3,20	762,2	194,6	20.510	684,3	621,1	0,591	89,3	2,17	1,77	
12	0,09	0,28	292,3	15,0	289,0	1,140	7,20	293	3,53	762,2	196,0	20.657	752,2	623,0	0,593	93,1	2,11	1,48	
13	0,03	0,34	293,3	15,0	283,0	0,975	22,10	293	3,90	762,2	184,0	15.947	826,2	640,0	0,593	97,2	1,57	1,27	
14	0,02	0,35	293,3	15,0	291,0	1,143	4,30	293,5	1,34	762,2	57,2	6.111	276,6	640,0	0,591	59,1	0,96	0,30	
15	0,16	0,20	291,3	11,2	291,0	0,740	4,30	293,5	2,67	769,0	154,0	15.938	569,6	629,0	0,592	82,6	1,87	1,58	
16	0,14	0,21	292,3	11,2	288,3	0,722	4,30	293,8	2,72	769,0	153,9	15.945	573,3	635,4	0,591	82,5	1,86	1,60	
17	0,13	0,23	292,3	11,2	288,8	0,716	5,00	293	2,91	769,0	156,2	14.500	614,3	641,0	0,587	83,1	1,63	1,57	
18	0,11	0,24	292,3	13,5	288,8	0,825	9,00	295	2,10	769,0	115,7	12.361	441,8	644,0	0,585	73,3	1,58	1,14	
19	0,09	0,24	295,3	12,1	288,8	0,683	4,90	297	1,33	769,0	145,0	16.660	258,0	751,0	0,544	59,0	2,50	0,73	
20	0,03	0,28	297,8	12,4	292,8	0,787	11,20	298	1,48	764,0	88,5	9.415	361,0	641,0	0,592	62,0	1,42	0,47	
21	0,03	0,31	298,8	12,1	293,3	0,731	8,90	298	2,41	764,0	107,7	10.879	623,0	502,0	0,618	82,3	1,84	0,55	
22	0,02	0,31	299,3	12,1	294,3	0,626	9,10	298	1,77	764,0	89,7	9.060	385,0	502,0	0,618	63,3	1,41	0,48	
23	0,01	0,31	299,3	12,4	294,3	0,653	13,30	298	1,77	764,0	70,1	7.080	385,0	502,0	0,618	63,3	1,10	0,36	
24	0,005	0,32	299,3	12,1	294,3	0,604	14,70	298	1,77	764,0	62,2	6.282	385,0	502,0	0,618	63,3	0,98	0,23	
25	0,11	0,15	298,3	11,7	297,3	0,767	3,70	298	2,83	759,2	198,5	19.570	630,0	562,0	0,639	85,4	2,32	1,89	
26	0,08	0,16	298,3	11,7	297,8	0,673	4,72	298	2,83	759,2	154,5	15.350	625,4	562,0	0,619	86,5	1,79	1,50	
27	0,05	0,18	298,3	11,7	298,8	0,671	5,90	298	2,83	759,2	125,2	12.480	623,4	573,0	0,627	86,5	1,44	1,20	
28	0,03	0,19	299,3	12,0	299,3	0,693	14,60	298	1,03	759,2	67,3	6.765	227,3	573,0	0,627	55,0	1,22	0,35	
29	0,03	0,25	297,3	11,6	296,3	0,807	16,60	297	1,73	766,2	67,0	7.053	364,8	633,0	0,594	67,8	0,98	0,48	
30	0,02	0,26	297,3	12,0	297,3	0,780	16,60	297	1,73	766,2	67,0	7.053	364,8	633,0	0,594	67,8	0,98	0,39	
31	0,02	0,26	299,3	12,0	299,3	0,840	18,30	297	1,73	766,2	67,3	6.837	376,4	593,0	0,615	69,1	0,97	0,41	
32	0,01	0,27	296,3	12,0	299,3	0,810	19,70	298	1,73	766,2	60,2	6.837	376,4	593,0	0,615	69,1	0,90	0,29	
33	0,30	0,10	297,3	12,1	293,3	0,630	2,80	298	3,51	760,1	248,7	26.014	740,0	633,0	0,597	93,7	2,66	3,10	
34	0,28	0,12	297,3	12,1	293,8	0,670	2,30	297	3,54	760,1	244,5	25.574	740,2	636,0	0,599	94,2	2,57	2,94	
35	0,26	0,13	298,3	12,1	294,3	0,660	2,90	297	3,51	760,1	212,1	22.221	740,0	636,0	0,597	94,0	2,26	2,88	
36	0,23	0,15	298,3	12,4	294,8	0,520	2,60	297	2,58	760,1	193,8	20.736	528,0	664,0	0,584	80,7	2,40	2,26	
37	0,19	0,17	298,3	12,1	294,8	0,780	3,30	297	2,62	760,1	212,5	23.098	528,0	682,0	0,575	80,3	2,63	2,04	
38	0,17	0,19	298,3	12,1	294,8	0,740	4,00	297	2,62	760,1	186,3	20.347	527,0	691,0	0,572	80,3	2,34	1,90	

Determinaciones de área irrigada y área física

Determinación	Caudal $m^3/hr$	Reynolds	$a_w/a$	$a_w/a_t$
-	-	-	-	-
1	1, 92	407	1, 44	0, 42
2	2, 40	527	1, 59	0, 61
3	2, 90	615	1, 37	0, 75
4	3, 40	721	1, 31	0, 92
5	3, 90	827	1, 22	0, 93

fig 5. Representacion de las corridas para el exponente no. de SCHMIDT

