

## Tesis de Posgrado

# Estudio del comportamiento fluidodinámico de reactores catalíticos

Stegmüller, Rolando

1986

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:**

Stegmüller, Rolando. (1986). Estudio del comportamiento fluidodinámico de reactores catalíticos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1964\\_Stegmuller.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1964_Stegmuller.pdf)

**Cita tipo Chicago:**

Stegmüller, Rolando. "Estudio del comportamiento fluidodinámico de reactores catalíticos". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1986. [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_1964\\_Stegmuller.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1964_Stegmuller.pdf)

**EXACTAS** UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



**UBA**

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FLUIDODINAMICO DE REACTORES  
CATALITICOS

Rolando Stegmüller

Tesis presentada para optar al título de

"DOCTOR EN QUIMICA"

(Orientación Química Industrial)

Director: Dr. Norberto Oscar Lemcoff

A mis padres

A mi esposa

## Agradecimientos

Deseo agradecer al Dr. N.O. Lemcoff por la dirección del presente trabajo, como también por su continuo aporte a mi formación en el campo de la investigación científica.

Asimismo, agradezco a la Dra. A.L. Cukierman el haberme guiado continuamente a través del análisis crítico en los diferentes obstáculos que se presentaron en la realización del trabajo, y al CONICET por las sucesivas becas que me acordara, así como el apoyo económico, que posibilitó la construcción de los equipos experimentales. En la misma han colaborado asiduamente el Sr. F. Cabrera, el Ing. J. Manso y mi familia, a quienes dejo expresada mi gratitud.

Finalmente mi agradecimiento a todos los compañeros y personal del Departamento de Industrias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales quienes, a través de su amistad y apoyo, siempre me han brindado un lugar agradable para la realización de mis tareas.

## INDICE

	Página
<u>CAPITULO I</u>	
I. Objetivos	1
I.1. Introducción general	1
I.2. Trazadores	7
I.3. Modelos de macromezclado	9
I.3.1. Modelos diferenciales	10
I.3.1.1. Modelo de dispersión de un parámetro	10
I.3.1.2. Modelo con cortocircuito de un parámetro	16
I.3.1.3. Modelo modificado de celdas mezcladas de dos parámetros	18 18
I.3.1.4. Modelo de flujo cruzado de dos parámetros	18
I.3.1.5. Modelo de tiempo de retardo de dos para- metros	23
I.3.1.6. Modelo de flujo pistón con intercambio de tres parámetros (PDE)	24
I.3.2. Modelo de etapas	25
I.3.2.1. Modelo de tanques agitados en serie	26
I.3.2.2. Modelo de flujo inverso	26

	Página
I.4. Tratamiento matemático de los resultados experimentales obtenidos	27
I.5. Ajuste de modelos de flujo	32
I.5.1. Método de análisis por momentos	33
I.5.2. Ajuste de los parámetros por cuadrados mínimos	35
I.5.3. Método de análisis en el campo transformado de Laplace	36
I.5.4. Método de análisis por los momentos pesados en el campo transformado de Laplace	40
I.5.5. Método de análisis por convolución en el dominio del tiempo real	41

## CAPITULO II

II. Reactor de lecho fijo	43
II.1. Introducción	43
II.2. Antecedentes bibliográficos	44
II.3. Parte experimental	49
II.3.1. Equipo	49
II.4. Condición de operación	56
II.5. Modo de operación	59

	Página
II.6. Determinación de la porosidad del lecho relleno	60
II.7. Resultados obtenidos	60
II.7.1. Tratamiento de los resultados	60
II.7.2. Cuantificación de la información experimental	61
II.7.3. Cálculos realizados	63
II.7.4. Análisis de los resultados	64

### CAPITULO III

III. Reactores de lecho mojado	69
III.1. Introducción	69
III.1.1. Regímenes de flujo en reactores de lecho mojado	71
III.1.2. Distribución de la fase líquida	76
III.1.3. Retención de líquido	78
III.2. Mezclado en un reactor de lecho mojado	90
III.2.1. Modelos de flujo	92
III.2.2. Antecedentes bibliográficos	98
III.3. Parte experimental	109
III.3.1. Descripción del equipo	111
III.3.1.1. Reactor de lecho mojado	111
III.3.1.2. Sistema de inyección del trazador	

	Página
III.3.1.3. Sistema de análisis del trazador	115
III.3.1.4. Sistema de alimentación	117
III.3.1.5. Sistema de regulación y medición de caudales	118
III.3.2. Condiciones de operación	119
III.3.3. Modo de operación	121
III.4. Resultados experimentales	123
III.4.1. Retención de la fase líquida	124
III.4.1.1. Comparación de los resultados con literatura	129
III.4.2. Modelo de dispersión axial	134
III.4.2.1. Comparación de los resultados con literatura	141
III.4.3. Modelo de flujo cruzado	145
III.4.3.1. Comparación de los resultados con literatura	156

#### CAPITULO IV

IV. Conclusiones	163
IV.1. Lecho fijo	163
IV.2. Lecho mojado	164
APENDICE A1 Estimación de parámetros en ecuaciones no lineales	169

	Página
APENDICE A2 Determinación de las viscosidades absolutas de las soluciones empleadas	172
APENDICE A3 Evaluación del coeficiente de difusión del KCl en soluciones de sacarosa en agua	176
APENDICE A4 Resultados experimentales obtenidos	182
NOMENCLATURA	233
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	237

## CAPITULO I

### I. Objetivos

Cuando se lleva a cabo el diseño de un reactor resulta de fundamental importancia conocer el rendimiento del mismo. Puesto que éste está estrechamente relacionado con el tipo de flujo que existe en el reactor, se hace necesario el conocimiento del perfil de velocidades. Sin embargo, dada la dificultad experimental involucrada en la medición de dichos perfiles, fundamentalmente en el caso de reactores de flujo complejo, se recurre a la caracterización del flujo mediante estudios de distribución de tiempos de residencia (DTR).

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento fluidodinámico de dos tipos de reactores a través de las curvas de DTR obtenidas mediante las técnicas de estímulo-respuesta. En la primera parte se analiza la fase gaseosa de un reactor de lecho fijo cuya relación de diámetro de tubo a diámetro de partícula es pequeña. En la segunda parte, se estudia el comportamiento fluidodinámico de la fase líquida en un reactor de lecho mojado.

#### I.1. Introducción general

Se define como función de distribución de tiempos de re-

sidencia a la función que describe la distribución de valores del tiempo que los elementos de volumen de fluido han permanecido dentro de un sistema. Se define como elemento de volumen de un fluido a un volumen del mismo, lo suficientemente pequeño como para ser considerado puntual, pero que contiene un determinado número de moléculas distribuidas en forma homogénea para que en el mismo existan propiedades físicas y químicas uniformes.

Una vez obtenida la curva de DTR se propone un modelo de flujo para explicar el comportamiento del sistema. Un modelo de flujo es una descripción matemática de las características del flujo y del mezclado e involucra un determinado número de parámetros característicos. Estos tratan de cuantificar los fenómenos físicos responsables del mezclado dentro del sistema. Los procesos de mezclado se clasifican en dos tipos (Wen y Fan, 1975): macromezclado y micromezclado.

El macromezclado considera los tiempos de retención de los elementos de volumen del sistema. El micromezclado tiene en cuenta la comunicación entre los distintos elementos de volumen. Para cada tipo de mezclado los autores citados definen condiciones límite. Asimismo, definen un caso particular de macromezclado, frecuentemente aplicado a numerosos sistemas, denominado retromezclado. Este considera que el mezclado transversal (mezclado en dirección

perpendicular a la dirección del flujo) es completo y que el mezclado en dirección axial es parcial.

Es posible definir dos funciones de distribución relacionadas entre sí:

$E(t)$ : función de distribución de edades de los elementos de fluido a la salida del sistema. Se define de manera tal que  $E(t)dt$  es la fracción de elementos de fluido en la corriente de salida que permanecieron en el sistema un tiempo entre " $t$ " y " $t + dt$ ".

Debido a que la suma de todas las fracciones de elementos de fluido debe ser igual a la unidad, se cumple que:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{I-1}$$

$F(t)$ : función de distribución de edades acumulativas de elementos de fluido en la salida. Representa la fracción de elementos de fluido que permanecieron en el sistema tiempos menores o iguales a " $t$ ".

Se cumple que:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad \text{I-2}$$

///

o 
$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad I-3$$

Para obtener las curvas de DTR se recurre generalmente a las técnicas de estímulo-respuesta. Estas se basan en introducir un cambio en la concentración de un compuesto trazador en la corriente de entrada al sistema y analizar la correspondiente respuesta en la corriente de salida del mismo. En general se examinan las respuestas del sistema a estímulos del tipo pulso, pulso imperfecto, escalón creciente y decreciente, rampa, sinusoidal, etc.

La señal tipo pulso consiste en introducir a un tiempo de referencia " $t_0$ " y en forma instantánea un pequeño volumen de una sustancia trazadora. El tiempo de inyección debe ser prácticamente nulo, es decir, mucho menor que el tiempo medio de residencia del sistema, definido como  $t_m = V/F_v$ , donde  $V$  es el volumen del sistema y  $F_v$  el caudal volumétrico que pasa a través del mismo. Si  $Q$  es la cantidad de trazador inyectado y " $C$ " la concentración de trazador en la corriente de salida, se tiene que:

$$E(t) = \frac{C(t)}{Q/F_v} \quad I-4$$

La inyección de una señal pulso es, en general, más conveniente, especialmente cuando se trata de realizar estudios en

reactores comerciales en operación.

La señal tipo escalón se obtiene cambiando, en un determinado instante " $t_0$ ", la alimentación del sistema desde una fuente a otra que suministra igual caudal de fluido con idénticas propiedades físicas pero que contiene un trazador con concentración " $C_0$ ". Si " $C$ " es la concentración de dicha sustancia en la corriente de salida, la relación  $C/C_0$  representa la fracción de elementos de fluido cuya edad dentro del sistema es menor que  $t-t_0$ , tiempo a partir del cambio de fuentes de alimentación, es decir, corresponde a la función  $F(t)$ .

Debe señalarse que si bien las técnicas de estímulo-respuesta permiten caracterizar de la forma más adecuada el comportamiento fluidodinámico de un sistema, cuando el mismo se aleja del flujo ideal, la información obtenida puede enmascarar una serie de efectos ajenos al mezclado de los fluidos en el sistema e inherentes al método experimental en cuestión. Es importante tener en cuenta que la no uniformidad del perfil de velocidades y los métodos de inyección y detección pueden tener un efecto significativo sobre la naturaleza de la curva de DTR. Varios autores (Levenspiel y col., 1970; Levenspiel y Turner, 1970; Turner, 1971) han evaluado estos inconvenientes teóricamente. En función de esto introdujeron diversas mejoras experimentales en la obtención de las cur-

vas de DTR tales como la ubicación de las sondas de detección, forma de las mismas, tipo de distribuidores de los fluidos en la alimentación, etc.

En general es experimentalmente imposible introducir en el sistema una señal pulso ideal o función delta de Dirac. No obstante en la mayoría de los trabajos se supone este tipo de señal en la entrada del sistema. Cuando no puede hacerse esta suposición es necesario conocer con exactitud dicha señal de entrada. A tal efecto se determina la curva de DTR a una cierta distancia del punto de inyección del trazador. Esta posición dentro del sistema define el plano de entrada y la curva de DTR allí obtenida, la función de entrada al sistema.

Asimismo se determina una curva de DTR en un punto cercano a la salida del sistema. Este definirá el plano de salida y la curva allí obtenida será la curva de respuesta a la señal medida en el plano de entrada. La porción del sistema comprendida entre ambos planos se denomina "tramo de pruebas". Para obtener la curva de DTR característica de dicho tramo de pruebas existen diversos métodos matemáticos, los cuales desafectan de la curva de respuesta los efectos del apartamiento de la idealidad de la curva de entrada.

Observando las curvas de DTR pueden detectarse ciertas ano-

malías en el flujo, tales como canalización, espacios muertos y cortocircuitos. Cuando estos efectos son inevitables debe recurrirse a un modelo de micromezclado que ajuste adecuadamente estas curvas. En el caso de un reactor catalítico de lecho relleno, se trata de minimizar estos efectos mediante un diseño adecuado del distribuidor de fluido a la entrada del sistema o por la ubicación de una zona de relleno con una alta pérdida de carga previa al tramo de pruebas. La canalización y el cortocircuito son negativos en todo reactor de flujo continuo con un relleno catalítico ya que impiden un uso efectivo de todo el catalizador. Los poros de éstos, así como los espacios muertos que se producen en la zona de contacto entre partículas causan colas pronunciadas en las curvas de DTR.

## I.2. Trazadores

Para que los resultados experimentales obtenidos a partir de la técnica de trazadores describan adecuadamente la DTR de un sistema con fluidos reaccionantes, la selección del trazador debe ser cuidadosamente considerada. Esto dependerá del sistema, si es gaseoso o líquido, si involucra más de dos fases y si al mismo tiempo se produce una reacción química. Los requisitos básicos que deben reunir un trazador pueden resumirse de acuerdo a:

1. El trazador debe ser miscible y tener propiedades físicas similares a las de la corriente principal del fluido del sistema en estudio.
2. Debe poder ser detectado con exactitud en pequeñas concentraciones.
3. La introducción del mismo no debe perturbar las líneas de flujo de la corriente principal del fluido.
4. Es importante que la concentración del trazador pueda ser fácilmente analizada y que la señal sea linealmente proporcional a la concentración.
5. Cuando en un sistema hay sólidos presentes, tales como en el caso de los reactores catalíticos, es importante evitar procesos de adsorción y desorción.
6. Para sistemas multifásicos, el trazador no debe transferirse de una fase a otra; así, por ejemplo, un trazador gaseoso usado en un reactor gas-líquido no deberá ser absorbido por la fase líquida y un trazador usado para determinar curvas de DTR de la fase líquida no deberá ser volátil.
7. La sonda de detección del trazador debe causar la menor perturbación en las líneas de flujo. En este sentido un trazador radioactivo tiene mayores ventajas que otros trazadores.

Wen y Fan (1975) y Shah (1979) llevaron a cabo una amplia

recopilación de los trazadores empleados en las diferentes fases de diversos sistemas multifásicos.

Hasta aquí se ha analizado como las experiencias con trazadores y las funciones de distribución de edades pueden usarse para caracterizar el comportamiento fluidodinámico de un equipo. La técnica puede emplearse para verificar o predecir el rendimiento de equipos preexistentes. Sin embargo, en diseño de reactores, o en cambios de escala de equipos, las curvas de DTR no son de utilidad directa, ya que no puede obtenerse una relación de las mismas para diversos tipos de equipos y condiciones operativas sino a través del desarrollo de algún modelo matemático que describa adecuadamente el comportamiento fluidodinámico del sistema en consideración. El ajuste del modelo se realiza a través de sus parámetros característicos que pueden ser correlacionados para varias condiciones de flujo y geometrías del equipo.

En el próximo capítulo se presenta una recopilación bibliográfica y discusión de los diversos modelos matemáticos desarrollados a tal efecto y sus posibles aplicaciones a distintas clases de equipos.

### I.3. Modelos de macromezclado

Los modelos de macromezclado pueden dividirse globalmente

en dos grupos:

- a. Modelos diferenciales
- b. Modelos en etapas

Suponiendo estado estacionario, en general los modelos diferenciales originan ecuaciones diferenciales, mientras que los modelos en etapas originan ecuaciones algebraicas. Los parámetros que describen el macromezclado en ambos grupos de modelos pueden ser relacionados entre sí. Los modelos propuestos presentan diferentes complejidades. Los más simples involucran un solo parámetro característico mientras que los más complejos contienen cuatro o más parámetros.

### I.3.1. Modelos diferenciales

#### I.3.1.1. Modelo de dispersión de un parámetro

En este modelo todos los procesos de mezclado se describen mediante un término del tipo de la ley de Fick, sin tener en cuenta los mecanismos reales del mezclado. La constante de proporcionalidad asociada a dicho término se denomina "coeficiente de dispersión axial". Asimismo, se supone despreciable el efecto de la dis-

persión radial, asumiendo que ésta es total. Esto es válido (Levenspiel y Smith, 1957) en sistemas en los que la relación de diámetro de columna a longitud de columna es pequeña o en aquellas que presentan flujo turbulento. Debido a que este modelo sólo contiene un parámetro, su simplicidad lo convirtió en el modelo más empleado en el diseño. La ecuación diferencial que lo describe resulta de un balance de masa en un elemento del sistema y es de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - U \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{I-5}$$

- $E_z$  : coeficiente de dispersión axial
- $U$  : velocidad real del fluido
- $z$  : coordenada axial del sistema

Adimensionalizando esta ecuación diferencial y ordenando las variables se tiene:

$$\frac{\partial C^*}{\partial \theta} = \left(\frac{E_z}{UL}\right) \frac{\partial C^{*2}}{\partial z^{*2}} - \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \quad \text{I-6}$$

$$C^* = C/C_0 \quad z^* = z/L \quad \theta = tU/L$$

$C_0$  : concentración característica que depende de la señal de entrada del trazador

///

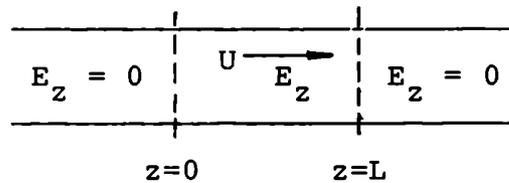
L : longitud característica

Aparece aquí un grupo adimensional:  $E_z/UL$  denominado número de dispersión. La inversa del mismo se denomina "número de Peclet" (Pe). Este es el parámetro característico del modelo y mediante el mismo se trata de cuantificar los procesos de mezclado en el sistema. Los valores extremos de este parámetro son:  $Pe = 0$ , indica que el retromezclado (ver I-1) es total y se tiene en el caso de un tanque idealmente agitado (TCIA); en cambio cuando  $Pe = \infty$ , no hay retromezclado y se tiene flujo pistón ideal (FPI).

Para resolver la ecuación diferencial de este modelo y obtener el perfil de concentración en el sistema es necesario establecer las condiciones iniciales y de contorno. A tal efecto deben analizarse las condiciones de mezclado en las zonas de entrada y salida al sistema o a la sección del mismo definida como tramo de pruebas. Esto da origen a una serie de posibilidades (Wen y Fan, 1975) según que el coeficiente de dispersión axial en la zona previa al plano de entrada y posterior al plano de salida del tramo de pruebas sea nulo o tome un cierto valor  $E_z$  igual o distinto al del sistema en estudio. Para todas las combinaciones se ha podido obtener la solución de la ecuación del modelo en el campo transformado de Laplace. Sólo en el caso en el que antes y después del tramo de

///

pruebas se cumple que  $E_z = 0$ , y que se denomina sistema cerrado-cerrado, se ha podido resolver analíticamente la ecuación diferencial del modelo y obtener la función  $C(t,z)$  del sistema. Esta función representa la curva teórica de la distribución de tiempos de residencia.



Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$\text{en } z = 0 \quad U C_{z \rightarrow 0^+} - U C_{in} = E_z \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z \rightarrow 0^+} \quad \text{I-7a}$$

$$\text{en } z = L \quad \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=L} = 0 \quad \text{I-7b}$$

y para el caso de inyectar una señal delta de Dirac la condición inicial resulta:

$$\text{en } z = 0 \quad C_{in} = C_o \delta(t) \quad \text{I-8}$$

Carlslaw y Jaeger (1947) propusieron la función de dis-

///

tribución de Gauss como una solución aproximada para este sistema, válida para valores altos del número de Péclet, o sea, cuando el sistema no se aparta demasiado de la hipótesis de flujo pistón ideal. Según esto, se tiene la siguiente expresión de la concentración a la salida del sistema:

$$C^*(\theta) = \frac{1}{2\sqrt{\theta\pi}(E_z/UL)} \exp \left[ -\frac{(1-\theta)^2}{4(E_z/UL)} \right] \quad \text{I-9}$$

Asimismo, se han calculado la media y la varianza de esta función, obteniéndose:  $\bar{\theta} = 1$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe} \quad \text{I-10}$$

Cuando para el sistema rigen otras condiciones de contorno, la media y la varianza también pueden ser calculadas. Las expresiones obtenidas pueden encontrarse en Wen y Fan (1975).

Levenspiel y Smith (1957) establecen las condiciones de aplicabilidad del modelo de mezclado axial. Dichas condiciones están dadas por las suposiciones simplificantes hechas en el planteo y resolución de la ecuación diferencial: se supone que  $E_z$  es constante en el sistema e independiente de la posición axial. Esto es

///

válido para las siguientes dos condiciones:

1. La velocidad del fluido y el mezclado son uniformes. En flujo a través de tubos vacíos esta condición deja de ser válida para números de Reynolds ( $Re$ ) bajos debido al desarrollo de un perfil de velocidades parabólico. A altos números de  $Re$  se desarrolla un perfil plano de velocidades con lo cual puede suponerse la validez de la hipótesis. En lechos rellenos de sólidos puede esperarse que lo anterior sea válido aún a bajos números de  $Re$ , aunque en algunos trabajos se han detectado apreciables variaciones de la velocidad con la posición radial, es decir, alejamiento del perfil plano de velocidad (Schwartz y Smith, 1953; Harai, 1954).
2. La otra condición para la cual el modelo es aplicable, a pesar de no haber velocidad uniforme, se cumple cuando la dispersión radial (debida a difusión molecular, turbulencia, etc.) es lo suficientemente grande como para asegurar una concentración uniforme de trazador en cualquier sección transversal del sistema. Esta afirmación surge del tratamiento matemático del modelo de dispersión axial en un sistema en el que el perfil de velocidades es conocido; por ejemplo, en un tubo vacío por el que circula un fluido en régimen laminar. Para este sistema se observa (Aris, 1956) que existe un doble efecto de la difusión molecular sobre el coeficiente de dispersión axial efectivo:

///

$$E_z = D_M + \frac{R^2 U^2}{48 D_M}$$

I-11

El segundo término de esta expresión se debe al efecto de difusión radial del trazador.

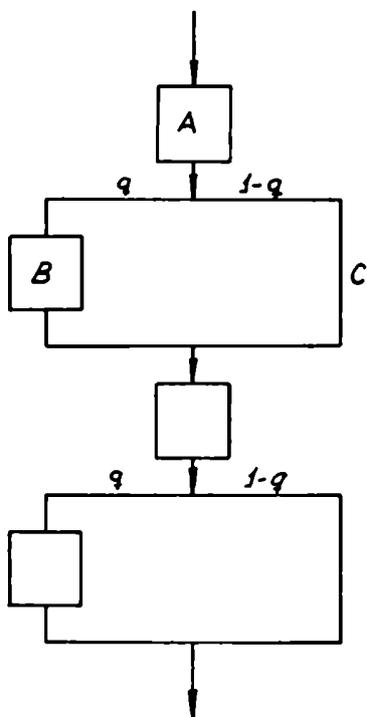
#### I.3.1.2. Modelo con cortocircuito de un parámetro

El modelo de dispersión axial es adecuado para describir curvas de DTR en los casos en que pueden minimizarse las no uniformidades del flujo en la dirección radial, por ejemplo, en un reactor de lecho relleno con alta relación de diámetro de lecho a diámetro de partícula. Según Stephens (1966) ésta debe ser de 25:1.

No obstante, el modelo de mezclado deberá también describir adecuadamente el proceso físico real en el sistema. Observando las curvas de DTR de determinados reactores, como por ejemplo, los de lecho mojado, Michell y Furzer (1972) afirman que las hipótesis del modelo de dispersión axial dejan de ser válidas. Describen entonces el flujo como una película en régimen laminar que se desliza sobre una serie de elementos del relleno con zonas de mezclado y de cortocircuito en cada punto de contacto entre partículas. Las regiones de película laminar se suponen en flujo pistón y el líquido en las zonas estancas se supone perfectamente mezclado por efec-

///

tos hidrodinámicos. Esquemáticamente este modelo se describe según:



A : zona de película laminar.

B : zona estanca de fluido perfectamente mezclado.

C : cortocircuito.

q : fracción de flujo

Es importante destacar que en este modelo se ha tenido en cuenta tanto el macromezclado como el micromezclado (producido entre la película y las zonas estancas en los puntos de contacto) en el reactor. Asimismo se supone que el mezclado en dichos puntos se deba a efectos hidrodinámicos y no difusivos como se postula frecuentemente. Si bien se encontró que el modelo ajusta adecuadamente los resultados experimentales, el mismo no ha sido probado para sistemas con rellenos porosos en los que la proporción de zonas estancas es apreciable.

I.3.1.3. Modelo modificado de celdas mezcladas de dos parámetros.

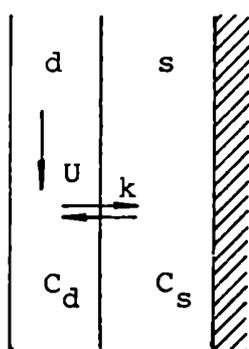
Este modelo, desarrollado por Deans y Lapidus (1960) y modificado por Deans (1963), se basa en el modelo de tanques agitados en serie; se supone que cada tanque contiene regiones estancas y dinámicas y el retromezclado resulta del intercambio de materia entre ambas regiones. Cuando el número de celdas es grande el modelo puede expresarse por ecuaciones diferenciales parciales. Este modelo requiere dos parámetros arbitrarios: "f", la fracción del fluido estanco, y "k", el coeficiente de transferencia de masa entre ambas regiones, que describe la magnitud del retromezclado.

I.3.1.4. Modelo de flujo cruzado de dos parámetros.

Conceptualmente es similar al anterior. Se basa en suponer que la fase fluída se divide en dos fracciones: una estanca y otra en flujo pistón. Suponiendo un lecho relleno, los posibles lugares en los que se tienen zonas estancas son en la parte posterior de las partículas de relleno, en los intersticios entre partículas y entre el relleno y la pared del reactor. Se considera que puede intercambiarse materia entre regiones de fluido estancas y en movimiento.

Así pueden plantearse las siguientes ecuaciones diferenciales:

///



$$\emptyset \frac{\partial C_d}{\partial t} + U \frac{\partial C_d}{\partial z} + k (C_d - C_s) = 0 \quad \text{I-12}$$

para fase dinámica

$$(1 - \emptyset) \frac{\partial C_s}{\partial t} - k (C_d - C_s) = 0 \quad \text{I-13}$$

para la fase estanca

en donde  $\emptyset$  es la fracción de fluido que escurre en flujo pistón y  $k$  es el coeficiente de intercambio de materia entre ambas fases;  $U$  es la velocidad media intersticial del fluido y  $C_d$ ,  $C_s$  son las concentraciones de trazador en las fases móvil y estanca. Se ha propuesto una solución aproximada para este modelo basada en el trabajo de Klinkenberg (1946). En éste se estudia el empleo de soluciones aproximadas a sistemas de ecuaciones que describen la transferencia de calor en estados transientes. Los resultados obtenidos se pueden aplicar al problema de transferencia de masa. Para su tratamiento matemático se realizan las siguientes suposiciones:

1. La forma del sistema es tal que el problema puede reducirse a una sola dimensión.
2. No hay conducción de calor (dispersión de materia) en la dirección axial.

///

3. En cualquier sección transversal, la velocidad de transferencia de calor (transferencia de materia) es proporcional a la diferencia entre las temperaturas medias del fluido y sólido (concentraciones medias del trazador en las fases dinámica y estanca del fluido).

Las ecuaciones diferenciales se simplifican introduciendo la altura adimensional "Y" y el tiempo adimensional "Z", corregido por desplazamiento. En el caso de transferencia de materia se los define según:

$$Y = \frac{k' a H}{U} \quad \text{I-14}$$

$$Z = \frac{k' a K}{(1-\emptyset)} \left( t - \frac{\emptyset H}{U} \right) \quad \text{I-15}$$

donde:

H : altura del lecho

t : tiempo

U : velocidad real del fluido sobre el relleno

$\emptyset$  : fracción de fluido en la fase dinámica

$1-\emptyset$  : fracción de fluido en la fase estanca

a : área de relleno/volumen de lecho

k' : coeficiente de transferencia de masa (*volumen/área.tiempo*) calculado por diferencia de concentración en la fase móvil.

K : coeficiente de partición (relación entre la concentración en fase móvil con la de la fase estanca en equilibrio)

En función de estos parámetros el sistema se reduce a las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{\partial C_s}{\partial Z} = C_d - C_s = - \frac{\partial C_d}{\partial Y} \quad \text{I-16}$$

El conjunto de condiciones de contorno más simple se establece suponiendo una señal escalón en la entrada del reactor, es decir variando la concentración de entrada del trazador desde  $C = 0$  hasta  $C_0$  en el instante  $t_0$ . La solución exacta del sistema involucra funciones de Bessel y ha sido evaluada numérica y gráficamente (Schumann, 1929; Furnas, 1930). En el trabajo de Klinkenberg (1946) pueden verse distintos perfiles de  $T_d/T_0$  y  $T_s/T_0$  en función de  $Z$  e  $Y$ , que por analogía son iguales a los perfiles  $C_d/C_0$  y  $C_s/C_0$ . Walter (1945) propuso una solución aproximada:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\sqrt{Z} - \sqrt{Y}} e^{-u^2} du = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(\sqrt{Z} - \sqrt{Y})] \quad \text{I-17}$$

donde  $\text{erf}(p) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^p e^{-u^2} du \quad \text{I-18}$

Se observa que los perfiles de  $C_d/C_0$  y  $C_s/C_0$  de la solución exacta se encuentran desplazados en  $\frac{1}{2}Z$  por encima y por debajo, respectivamente, de dicha solución aproximada. Para ajustar esta dis-

///

crepancia se ha corregido el límite superior de integración en la ecuación I-17. Tomando entonces como límite superior la expresión  $\sqrt{Z} - \sqrt{Y} + \frac{1}{b\sqrt{Z}}$  para ambos perfiles, se consigue un ajuste más adecuado. Asignando al parámetro "b" el valor 8, se llega al siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\frac{C_d}{C_o} \sim \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\sqrt{Z} + \frac{1}{8\sqrt{Z}} - \sqrt{Y} + \frac{1}{8\sqrt{Y}})] \quad \text{I-19}$$

$$\frac{C_s}{C_o} \sim \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\sqrt{Z} - \frac{1}{8\sqrt{Z}} - \sqrt{Y} - \frac{1}{8\sqrt{Y}})] \quad \text{I-20}$$

Estas son las soluciones aproximadas en el caso de introducir a la entrada una señal escalón y, por lo tanto, el perfil  $C_d/C_o$  representa la función acumulativa de distribución de tiempos de residencia  $F(t)$ . En el caso de inyectar un pulso a la entrada, la curva de DTR que se obtendrá a la salida será la función  $E(t)$  definida previamente. Si se deriva la ecuación I-19 respecto de "t" se obtiene la siguiente expresión:

$$E(t) = \frac{k t_m}{2\sqrt{\pi} (1-\emptyset)} \{ \exp[-(\sqrt{Z} - \sqrt{Y} + \frac{1}{8\sqrt{Z}} + \frac{1}{8\sqrt{Y}})^2] \} \left[ \frac{(1 - \frac{1}{8\sqrt{Z}})}{\sqrt{Z}} \right] \quad \text{I-21}$$

$$k [(tiempo)^{-1}] = K \cdot a$$

donde  $t_m$  es el tiempo de residencia del sistema y  $\emptyset$  puede definirse

///

(Hoogendorn y Lips, 1965) como  $\emptyset = t_1/t_m$ , siendo  $t_1$  el tiempo para el cual la curva de DTR del sistema se hace distinta de cero, o sea, en caso de inyectar un pulso perfecto de trazador, el instante en que comienza a salir trazador en la corriente de salida. Este modelo ha sido empleado por diversos autores (Ruszkay, 1962; Hochman y Effron, 1969) quienes concluyen que, en comparación con el modelo de dispersión axial, ajusta mejor las curvas de distribución experimentales ya que reproduce en forma más fiel la ubicación de los máximos, el frente abrupto de la curva y el pronunciado efecto de cola que se observa, por ejemplo, en reactores del tipo de lecho mojado.

#### I.3.1.5. Modelo de tiempo de retardo de dos parámetros.

Este modelo se basa en el concepto que los elementos de fluido van sufriendo retrasos de tiempo en su paso a través del sistema. El modelo supone que el fluido circula en flujo pistón, con la salvedad que las moléculas tienen posibilidad de retrasarse en varios puntos a lo largo de su trayectoria. Luego de cada retraso, la molécula se reúne con la corriente de fluido y puede volver a experimentar retrasos a través de todo el sistema. El modelo fue desarrollado por Buffham (1971) y es matemáticamente equivalente al modelo de flujo cruzado; modificando adecuadamente los parámetros característicos se llega a expresiones equivalentes a las de

los parámetros de aquel modelo.

I.3.1.6. Modelo de flujo pistón con intercambio de tres parámetros (PDE).

Fué desarrollado por van Swaaij y col. (1969), y se basa en el mismo concepto que el modelo de flujo cruzado pero suponiendo dispersión axial en la fase móvil del fluido. Esto hace que el modelo presente un parámetro adicional, el coeficiente de dispersión axial (adimensionalizando se tiene el número de Peclet de la fase móvil).

Las ecuaciones básicas se obtienen de un balance de masa del trazador:

$$E_z \frac{\partial^2 C_d}{\partial z^2} - U_d \frac{\partial C_d}{\partial z} - \frac{k}{\epsilon h_L \theta} (C_d - C_s) = \frac{\partial C_d}{\partial t} \quad \text{I-22}$$

para la región dinámica; y

$$- \frac{k}{\epsilon h_L (1 - \theta)} (C_s - C_d) = \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad \text{I-23}$$

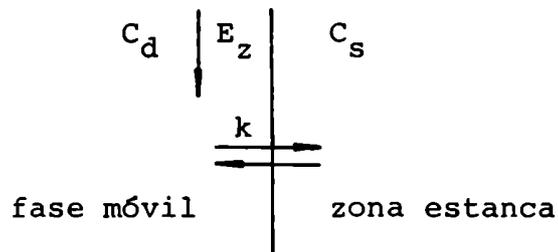
para la región estanca,

$\emptyset$  : fracción del líquido en la fase dinámica

$h_L$  : fracción de volumen de líquido total por unidad de volumen vacío

Esquemáticamente puede representarse según la figura:

flujo pistón - dispersión axial



Como se señaló previamente, la influencia de la microporosidad de los rellenos porosos es la causante del incremento de las zonas estancas y por ende hace que aparezcan colas pronunciadas en las curvas de DTR obtenidas en reactores de lecho relleno. De acuerdo a este modelo, la dispersión axial en la fase móvil y la transferencia de masa entre las fases móvil y estanca, dentro y fuera de las partículas de catalizador, son las responsables de las colas antes mencionadas.

### 1.3.2. Modelos de etapas.

A diferencia de los modelos diferenciales, los modelos por

etapas representan el retromezclado mediante una serie de tanques, a los que se añade un flujo en sentido inverso o una circulación entre los tanques consecutivos. También se ha considerado mezclado incompleto entre tanques.

El número de tanques o etapas, junto con la magnitud del flujo en sentido inverso o la circulación interetapa, caracterizan el retromezclado del sistema.

A continuación se presentarán en forma somera algunos de estos modelos.

#### I.3.2.1. Modelo de tanques agitados en serie.

Es el modelo más simple de tanques en serie. El modelo se representa por una serie de tanques perfectamente mezclados. El grado de retromezclado se caracteriza por el número de etapas. Un incremento en el número de éstas implica una disminución en la magnitud del retromezclado.

#### I.3.2.2. Modelo de flujo inverso.

Este modelo de etapas sobreimpone un flujo en sentido in-

verso al flujo neto a través de la columna. Se lo aplica para describir el retromezclado de dos fases que fluyen en contracorriente. En este modelo la fase dispersa puede ser tratada como una segunda fase continua.

Existen además diversas variantes y mejoras al modelo de tanques en serie. Pueden citarse entre éstos, modelos con tres y cuatro parámetros (van Swaaij y col., 1969; Raghuraman y Varma, 1973; Rao y Varma, 1976).

Además de los modelos diferenciales y en etapas, pueden encontrarse otros modelos en literatura. Existen casos intermedios entre el retromezclado en un sistema diferencial y uno en etapas (por ejemplo, reactores tubulares divididos en serpentines, reactores de columna de burbujas divididos en etapas mediante elementos cortacorrientes, etc.). Estos casos pueden interpretarse mejor si se combinan los modelos diferenciales con los modelos de tanques en serie.

#### I.4. Tratamiento matemático de los resultados experimentales obtenidos.

A los efectos de poder realizar el ajuste de las curvas

de DTR a los diversos modelos matemáticos es necesario procesar las curvas obtenidas al registrar la señal proveniente del sistema de análisis del trazador.

Consideremos que se inyecta una cierta cantidad  $Q$  de trazador en un sistema de volumen  $V$ , a través del cual fluye un fluido con un caudal constante  $F_v$ . Sea  $C_i(t)$  la concentración de la corriente de entrada y  $C_e(t)$  la concentración de la corriente de salida. Debido a que en el sistema no se consume trazador, toda la masa inyectada del mismo debe salir en la corriente de efluente. El balance de materia será pues:

$$\int_0^{\infty} C_i(t) F_v dt = Q = \int_0^{\infty} C_e(t) F_v dt \quad \text{I-24}$$

dividiendo esta igualdad por  $F_v$

$$\int_0^{\infty} C_i(t) dt = \frac{Q}{F_v} = \int_0^{\infty} C_e(t) dt = \text{Area} \quad \text{I-25}$$

Si se grafican las concentraciones del trazador a la entrada y salida en función del tiempo, las áreas bajo las curvas deben ser las mismas. Esto constituye una verificación importante de los resultados experimentales obtenidos.

En la práctica se obtiene una señal emitida por el sistema

de análisis, como función de la concentración. Debido a que la señal es proporcional a la concentración de trazador, las áreas bajo las curvas serán función de las constantes de proporcionalidad. Para salvar este inconveniente es necesario normalizar ambas respuestas. Llamando  $C'_i$  y  $C'_e$  a las respuestas, función de la concentración, obtenidas de las sondas de detección a la entrada y salida del sistema, respectivamente, se obtienen las curvas normalizadas  $X(t)$  e  $Y(t)$  de entrada y salida respectivamente según:

$$X(t) = \frac{C'_i(t)}{\int_0^{\infty} C'_i(t) dt} \quad Y(t) = \frac{C'_e(t)}{\int_0^{\infty} C'_e(t) dt} \quad \text{I-26}$$

$$C'_i(t) = k_i C_i(t) \quad C'_e(t) = k_e C_e(t)$$

$k_i, k_e$  : constantes de las sondas.

Para las mismas se cumple que:

$$\int_0^{\infty} X(t) dt = \int_0^{\infty} Y(t) dt = 1$$

Las curvas  $X(t)$  e  $Y(t)$  pueden además ser expresadas en términos de variables adimensionales:

$$\int_0^{\infty} X(t) dt = \int_0^{\infty} t_m X(t) d\left(\frac{t}{t_m}\right) = \int_0^{\infty} X(\theta) d\theta \quad \text{I-27}$$

///

$$\text{y también } \int_0^{\infty} Y(t) dt = \int_0^{\infty} t_m Y(t) d\left(\frac{t}{t_m}\right) = \int_0^{\infty} Y(\theta) d\theta \quad \text{I-28}$$

donde  $\theta = t/t_m$  es el tiempo adimensionalizado.

En consecuencia:

$$X(\theta) = t_m X(t) \quad Y(\theta) = t_m Y(t) \quad \text{I-29}$$

Las curvas experimentales  $C(t)$  pueden discretizarse determinando los valores  $C(i)$  a intervalos iguales de tiempo. Las integrales antes citadas se evalúan entonces como sumatorias.

Generalmente las curvas de DTR presentan terminaciones (colas) muy prolongadas, en las que los valores de  $C(i)$  se hacen pequeños, cometiéndose en general un error relativo grande en la medición. Pueden hallarse diversos criterios en literatura para el tratamiento de la cola. Sater y Levenspiel (1966), sugirieron reemplazar la cola de las curvas de DTR por una ecuación exponencial. Este método, sin embargo, puede conducir a serios errores. Gomezplata y Brown (1968) hallaron que el tratamiento exponencial llevaba a valores negativos del número de Pe en la aplicación del modelo de dispersión axial. A su vez Edwards y Richardson (1968) corrigieron la cola de las curvas experimentales obtenidas mediante una función

exponencial del tipo

$$C = C_A e^{-k(t-t_A)} \quad \text{I-30}$$

donde  $(t_A, C_A)$  es un determinado punto en la curva de DTR. Para evaluar el factor de decaimiento "k" estos autores proponen considerar dos puntos de la curva experimental:  $(t_A, C_A)$  y  $(t_C, C_C)$  tomados, respectivamente, cuando la altura de la misma es igual a la 1/6 y 1/30 de la altura máxima.

De acuerdo a este tratamiento, las integrales antes citadas toman la siguiente forma discretizada:

$$\text{Area} = \sum_0^n C(i) \Delta t + \frac{C_A}{k} \quad \text{I-31}$$

$$t_m = \frac{1}{\text{Area}} \left[ \sum_0^n C(i) t(i) \Delta t + \frac{C_A}{k} \left( t_C + \frac{1}{k} \right) \right] \quad \text{I-32}$$

Una vez obtenidas las curvas  $X(\theta)$  e  $Y(\theta)$  es posible comenzar el tratamiento matemático de ajuste de los modelos teóricos postulados.

### I.5. Ajuste de modelos de flujo

Se han propuesto diversos métodos de ajuste de modelos teóricos de flujo a las curvas de DTR obtenidas experimentalmente. En todos ellos se trata de determinar el o los parámetros característicos que hagan que la expresión matemática del modelo se ajuste a la curva experimental.

En forma general podemos citar los siguientes:

- a. Método de análisis por momentos
- b. Método de análisis en el campo transformado de Laplace
- c. Método de análisis en el campo transformado de Fourier
- d. Método de análisis por los momentos pesados en el campo transformado de Laplace
- e. Método de análisis por convolución en el dominio del tiempo real.

A continuación se expondrán los fundamentos de cada método y se discutirá su aplicación. Cabe destacar que en todos los casos se supone que se trabaja en un sistema en el cual se inyecta una señal en la corriente de entrada al mismo y se determinan las curvas de DTR en dos posiciones axiales a lo largo del sistema. Queda así definido como tramo de pruebas la porción de sistema comprendida entre ambos puntos de detección.

### I.5.1. Método de análisis por momentos

Este método hace un tratamiento estadístico de las curvas de DTR. Se basa en calcular los momentos de distinto orden y a partir de éstos obtener los parámetros característicos del modelo de flujo propuesto. Se define como momento de orden "k" de una curva de distribución de edades  $Y(t)$  (o  $X(t)$ ), a la siguiente expresión:

$$m_{tYk} = \int_0^{\infty} t^k Y(t) dt \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad I-33$$

donde  $m_{tYk}$  significa: momento de orden k de  $Y(t)$  en el dominio del tiempo. Cuando  $k = 1$  se tiene la media ( $\mu_{tY}$ ) de  $Y(t)$  o primer momento. El segundo momento alrededor de la media de  $Y(t)$  se denomina varianza  $\sigma_{tY}^2$  y se define según:

$$\sigma_{tY}^2 = \int_0^{\infty} (t - \mu_{tY})^2 Y(t) dt = m_{tY2} - \mu_{tY}^2 \quad I-34$$

Asimismo se define el tercer momento alrededor de la media, que caracteriza la asimetría ( $\sigma_{tY}^3$ ), según:

$$\sigma_{tY}^3 = \int_0^{\infty} (t - \mu_{tY})^3 Y(t) dt = m_{tY3} - 3\mu_{tY} \sigma_{tY}^2 - \mu_{tY}^3 \quad I-35$$

Puesto que el ajuste de un determinado modelo de flujo se

///

hace en el tramo de prueba, se definen los tres primeros momentos relativos a esta sección como la diferencia entre los correspondientes momentos de la curva de DTR a la salida menos los correspondientes a la curva de DTR a la entrada:

$$\Delta\mu_{tYX} = \mu_{tY} - \mu_{tX} \quad \text{diferencia entre medias}$$

$$\Delta\sigma_{tYX}^2 = \sigma_{tY}^2 - \sigma_{tX}^2 \quad \text{diferencia entre varianzas}$$

$$\Delta\sigma_{tYX}^3 = \sigma_{tY}^3 - \sigma_{tX}^3 \quad \text{diferencia entre momentos de tercer orden}$$

I-36

Los valores de  $\Delta\sigma_{tYX}$ ,  $\Delta\sigma_{tYX}^2$ ,  $\Delta\sigma_{tYX}^3$  dependen de las características y condiciones de operación del sistema. El método de análisis por momentos consiste en relacionar a éstos con los parámetros del modelo. Se necesitan  $n + 1$  momentos para ajustar un modelo de "n" parámetros.

Se trata de un método simple y directo para ajustar un modelo a los resultados experimentales, ya que en general requiere menor tiempo computacional que otros métodos de ajuste. Sin embargo tiene el serio inconveniente de dar demasiado peso a la cola de las curvas de DTR ( $Y(\theta)$  y  $X(\theta)$ ), que es la que corresponde a los valores

///

altos de tiempo. Como puede observarse, los valores de la cola de estas curvas son poco confiables debido a los errores experimentales en la medición de pequeñas concentraciones del trazador. En caso de ser necesario usar momentos de orden superior para ajustar un modelo, este método tiende a ser poco adecuado. Otra desventaja es que los resultados del análisis no proveen información de la bondad del ajuste, a menos que se compare, luego de haber estimado los parámetros, la respuesta del modelo con la respuesta experimental en el dominio del tiempo.

Estos inconvenientes pueden evitarse empleando para el ajuste métodos de cuadrados mínimos.

#### I.5.2. Ajuste de los parámetros por cuadrados mínimos

Este método es menos sensible a los errores cometidos en la medición de la concentración de trazador que los que emplean las varianzas (Clements, 1969). Es aplicable a modelos de más de un parámetro y se lleva a cabo en el dominio del tiempo o en el campo transformado de Laplace (ver I.5.3.). Mediante este procedimiento pueden obtenerse los parámetros característicos del modelo y una estimación cuantitativa de la calidad del ajuste del mismo.

El método es aplicable cuando se conoce una ecuación ex-

plícita de la función  $C(\theta)$  del modelo en cuestión. Esta se ajusta a la curva experimental normalizada y discretizada mediante cuadrados mínimos. Este método optimiza los parámetros característicos del modelo para obtener el menor error en el ajuste.

La función error a minimizar tiene la siguiente forma:

$$\emptyset = \int_0^{\infty} (G(t) - G_M(t))^2 dt \quad \text{I-37}$$

$G(t)$  : función experimental

$G_M(t)$ : función explícita del modelo

El método da igual peso a todos los valores a lo largo de la curva de DTR experimental. Sin embargo el uso de la ecuación matemática de un dado modelo de flujo en el dominio del tiempo puede resultar muy lento, requiriendo un considerable tiempo de computación. Esto puede evitarse si se realiza el ajuste por cuadrados mínimos en el campo transformado de Laplace o de Fourier (Anderssen y White, 1970).

### I.5.3. Método de análisis en el campo transformado de Laplace

Se define como función transformada de Laplace  $\bar{G}(s)$  de la función  $G(t)$  a la que resulta de:

$$\bar{G}(s) = \int_0^{\infty} G(t) e^{-st} dt \quad \text{I-38}$$

Esta integral puede evaluarse en forma discreta según:

$$\bar{G}(s) = \sum_0^n G(t_i) e^{-st_i} \Delta t \quad \text{I-39}$$

Dadas las funciones de entrada y salida experimentales transformadas al campo de Laplace  $\bar{X}(s)$  y  $\bar{Y}(s)$ , respectivamente, estas pueden relacionarse según:

$$\bar{Y}(s) = \bar{X}(s) \cdot \bar{G}(s) \quad \text{I-40}$$

donde  $\bar{G}(s)$  es la función de transferencia entre las funciones de entrada y salida.

En este caso la función " $\emptyset$ " a minimizar es de la misma forma que en el dominio del tiempo:

$$\emptyset = \int_a^b (\bar{G}(s) - \bar{G}(s)_M)^2 ds \quad \text{I-41}$$

donde "a" y "b" son límites que se evalúan según diversos criterios (ver más adelante) siendo  $\bar{G}(s)$  y  $\bar{G}(s)_M$  las funciones de transferencia experimental y del modelo respectivamente, y "s" la variable de Laplace.

///

Forma de emplear este método: en principio debe definirse que tipo de señal se inyecta en la entrada del sistema. Si se inyecta una señal similar a un pulso, y el tiempo de residencia del sistema es grandecomparado con el tiempo de inyección, es admisible considerar que la señal es una delta de Dirac. En tal caso  $\bar{X}(s) = 1$  y  $\bar{G}(s) = \bar{Y}(s)$ , por lo cual la función de transferencia en el dominio del tiempo es igual a la curva de DTR a la salida del sistema:

$$G(t) = Y(t)$$

La forma de la función señal de entrada  $\bar{X}(s)$  puede obtenerse, por ejemplo, por inyección de un trazador aguas arriba de la sección de pruebas y medición de la curva  $C(t)$  a la entrada de dicha sección. A partir de  $\bar{X}(s)$ , y de la función de transferencia asociada al modelo de flujo elegido,  $\bar{G}(s)_M$ , puede obtenerse la función  $\bar{Y}(s)_M$  mediante la ec. I-40. Aplicando cuadrados mínimos entre  $\bar{Y}(s)_M$  y la función  $\bar{Y}(s)$  experimental, obtenida a la salida del tramo de pruebas, es posible optimizar el ajuste del modelo, modificando los parámetros característicos del mismo, contenidos en  $\bar{G}(s)_M$ . Otra forma de realizar el ajuste es por cuadrados mínimos entre la función de transferencia del modelo matemático y la función de transferencia obtenida a partir de los resultados experimentales

según:

$$\bar{G}(s) = \frac{\bar{Y}(s)}{\bar{X}(s)}$$

I-42

El uso de las funciones de transferencia basadas en la transformada de Laplace tiene una serie de ventajas respecto al método de análisis por momentos. Mediante el uso de las funciones de transferencia se puede disminuir el error debido al menor peso que se da a los valores de las colas y lograr un mejor ajuste del resto de la curva. Sin embargo, al ajustar las funciones de transferencia, es necesario, en la práctica, escoger un determinado rango de valores de "s.t<sub>m</sub>" (t<sub>m</sub>: tiempo de residencia medio entre puntos de medición) en el cual realizar la minimización de la función  $\phi$ . Hopkins y col. (1969) estudiaron las características de la función de transferencia del modelo de dispersión axial y analizaron la sensibilidad de la misma frente al parámetro "s.t<sub>m</sub>". De acuerdo a esto aconsejan trabajar en el rango de  $2 < s.t_m < 5$ .

Para valores menores de s.t<sub>m</sub> el modelo no es sensible al parámetro característico, ya que  $\lim_{s.t_m \rightarrow 0} \bar{G}(s.t_m) = 0$ . Por otro lado, para valores de s.t<sub>m</sub> mayores de 5 se está dando mayor peso a la zona de tiempos pequeños, en donde, al igual que en la cola, se cometen errores experimentales considerables en la medición de la concentración del trazador.

///

I.5.4. Método de análisis por los momentos pesados en el campo transformado de Laplace

Ostergaard y Michelsen (1970) proponen un método de ajuste mediante momentos en el campo transformado de Laplace.

Se define como momento de orden "k" de la función C(t) en el campo transformado de Laplace a la siguiente relación:

$$M^{k,s} = \int_0^{\infty} C(t) w_k(s,t) dt = (-1)^n \frac{d^k}{ds^k} (\bar{C}(s)) \quad \text{I-43}$$

donde  $w_k(s,t)$  se definen como funciones peso y son de la forma:

$$w_k(s,t) = t^k e^{-st} \quad \text{I-44}$$

y 
$$\bar{C}(s) = \int_0^{\infty} C(t) \exp(-st) dt \quad \text{I-45}$$

En este trabajo se citan cuatro formas diferentes de obtener los parámetros característicos del modelo a partir del cálculo de los momentos definidos arriba. La ventaja de este método es que puede verificarse rápidamente la validez del modelo. La sensibilidad a errores experimentales en la determinación de las respuestas a los transientes disminuye considerablemente si se usa un rango adecuado de valores de " $st_m$ ". Estos autores, a su vez, rea-

lizan un extenso tratamiento para definir el rango óptimo del parámetro  $s.t_m$  obteniendo rangos diferentes para cada una de las cuatro formas planteadas para obtener los parámetros.

La mayoría de los autores citados en la sección I.5.) estudian diversos métodos de ajuste de datos empleando solamente el modelo de dispersión axial.

Anderssen y White (1970) extienden los estudios a modelos de mayor complejidad. Analizan los métodos de ajuste de parámetros mediante funciones de transferencia y determinan el comportamiento de las funciones peso  $w_k(t,s)$  aplicadas a las curvas de DTR. Encuentran una gran simplificación en el ajuste de los parámetros mediante este método, como así también una considerable mejora en relación a otros métodos. No obstante, hacen una evaluación de los errores a los que lleva la aplicación de cada método de ajuste y concluyen que el mejor ajuste se obtiene en el dominio del tiempo como se explicará en la siguiente sección.

#### I.5.5. Método de análisis por convolución en el dominio del tiempo real

Un método generalmente citado en bibliografía (Anderssen y White, 1970; Michell y Furzer, 1972) es el que ajusta los pará-

metros mediante cuadrados mínimos entre la curva de DTR experimental y aquella obtenida de la integral de convolución según:

$$Y(t) = \int_0^t X(\tau) \cdot G(t - \tau) \cdot d\tau \quad \text{I-46}$$

en donde  $X(t)$  es la señal de entrada al sistema y  $G(t)$  es la función de DTR del modelo. Debido a la complejidad matemática que presentan las expresiones de estas funciones en el dominio del tiempo real, este método requiere un tiempo de computación mayor que todos los descriptos anteriormente. En un trabajo de Fahim y Wakao (1982) se realiza una revisión de todos los métodos de ajuste y se comparan los parámetros obtenidos en cada uno. Concluyen que el método más confiable es el que ajusta en el dominio del tiempo y discuten la precisión de los métodos alternativos comparando con los resultados obtenidos en el primero. La mayor exactitud obtenida se debe a que se elimina el error introducido por las funciones peso que, por sus características, ponderan determinadas zonas de las curvas de DTR.

## CAPITULO II

### II. Reactor de lecho fijo

#### II.1. Introducción

En esta parte del trabajo se realizará el estudio del comportamiento fluidodinámico de la fase gaseosa en un reactor de lecho fijo. A tal efecto se emplearán las técnicas de estímulo-respuesta para obtener las curvas de DTR características del sistema. Estas curvas se ajustarán luego a las curvas de un modelo matemático y los parámetros característicos que resulten de este procedimiento serán correlacionados en función de las variables operativas.

El tipo de lecho fijo a estudiar es el de pequeñas relaciones de diámetro de tubo a diámetro de partícula ( $1 < d_t/d_p < 10$ ). Dentro de este tipo de reactores se encuentran los denominados de una única fila de partículas sólidas, que resultan de utilidad en la determinación de coeficientes de transporte en sólidos relativamente grandes, tales como ciertas pastillas catalíticas comerciales.

Se ha observado que el comportamiento de los reactores con relaciones de diámetro de tubo a diámetro de partícula cercanos a

///

la unidad es similar al que se encuentra en aquellos con relaciones mayores de 10 (Scott, Lee y Papa, 1974).

En este trabajo se estudió el comportamiento fluidodinámico de un reactor de lecho fijo para relaciones de  $d_t/d_p$  en el rango de 1,16 a 9,67 empleando rellenos de geometría esférica, cilíndrica y anillos Raschig.

Si bien la bibliografía referente a estos tipos de reactores no es muy extensa, se citarán algunos trabajos centrando el análisis en la parte experimental de los mismos.

## II.2. Antecedentes bibliográficos

Edwards y Richardson (1968) realizaron un estudio sobre dispersión axial en fase gaseosa en un reactor de lecho relleno con partículas no porosas cuya relación  $d_t/d_p$  era mucho mayor de 10. Para llevar a cabo las mediciones se empleó argón como trazador y el análisis de la respuesta se realizó mediante un ionizador de radiación gamma.

La columna utilizada estaba compuesta por una sección de entrada y una sección de pruebas. Trabajando de esta forma no era necesario suponer que en el punto de inyección se generaba un pulso. La respuesta obtenida a la salida de la sección de entrada se consideró como señal de entrada a la sección de pruebas.

La inyección se realizó directamente en la corriente principal de gas. El volumen inyectado se determinó a partir de medidas de la presión inicial y final en el cilindro que contenía el trazador. Los autores afirman que esta forma de inyectar permite lograr una buena reproducibilidad de la señal de entrada. Los resultados experimentales obtenidos se ajustaron al modelo de dispersión axial mediante el método de los momentos. A fin de disminuir el error de medición en la zona de la cola de las curvas de respuesta, las mismas se ajustaron con una función de decaimiento exponencial a partir de un cierto tiempo de corte.

Se comprobó la efectividad del ajuste del modelo de dispersión axial reconstruyendo la curva de salida a partir de la ecuación matemática del modelo, la curva de entrada a la sección de pruebas, la velocidad media de flujo y el coeficiente de dispersión calculado. Mediante este cálculo se encontró una buena concordancia con la curva experimental.

Los valores de Peclet obtenidos se correlacionaron con el número de Reynolds encontrándose que para números de Reynolds altos el número de Peclet tiende a dos.

Urban y Gomezplata (1969) determinaron los coeficientes de dispersión axial en lechos rellenos para bajos números de Reynolds en fase gaseosa. Emplearon para esto dos puntos de medida

en un lecho relleno de esferas. Estos puntos determinaban una sección de pruebas de 1,54 metros de longitud y 10 cm de diámetro. La señal del trazador inyectada era un pulso. Se utilizaron tres tamaños de relleno, los cuales correspondían a una relación  $d_t/d_p$  de 6,4; 17 y 66, respectivamente.

Las mediciones de la concentración del trazador se realizaron con dos celdas de conductividad térmica. El gas portador, nitrógeno, se alimentaba en la base de la columna. Una válvula solenoide instalada en la línea de alimentación cerca de la entrada a la columna permitía inyectar el pulso de gas trazador. La columna se construyó en acrílico y estaba formada por varios tramos, de manera de poder modificar su longitud.

La celda de detección inferior estaba situada sobre un tramo de relleno de 60 cm de longitud, diseñado para obtener una distribución radial uniforme del pulso y reducir las imperfecciones en la forma del mismo. A su vez había un pequeño tramo de relleno encima de la celda de detección superior. El efecto dispersivo de estas celdas era despreciable ya que no se observaban diferencias significativas de las varianzas relativas por unidad de longitud ( $\Delta\sigma^2/L$ ) al variar ésta entre 0,6 y 1,5 metros.

Sarma y Haynes (1974) llevaron a cabo un trabajo sobre la determinación de coeficientes de difusión en zeolitas empleando un método de estímulo-respuesta en un equipo de cromatografía.

En el mismo se reemplazó la columna cromatográfica por un cilindro que contenía el relleno a analizar. La inyección del trazador se realizaba por medio de una válvula de seis vías. El análisis de la respuesta se llevó a cabo mediante una celda de conductividad térmica.

Estos autores desarrollaron un modelo que explica la dispersión axial del lecho de zeolitas a través de una difusión en macroporos y otra en microporos, teniendo en cuenta interacciones del tipo molécula de gas-pared del poro. Debido a las pronunciadas colas observadas en las respuestas a los pulsos del trazador, el ajuste del modelo se realizó minimizando las desviaciones cuadráticas entre los resultados experimentales y los del modelo.

Scott, Lee y Papa (1974) realizaron mediciones de coeficientes de transporte para reacciones heterogéneas gas-sólido en un reactor cuya relación  $d_t/d_p$  estaba comprendida entre 1,1 y 1,4. Los autores encontraron que el comportamiento fluidodinámico de los reactores con esta relación de diámetros es similar al observado en aquellos en los que la misma es mayor que 10. Las experiencias se llevaron a cabo en una columna de 0,94 cm de diámetro interno y el análisis se realizó con un detector de conductividad térmica de alta velocidad de respuesta. Se emplearon rellenos de geometría esférica de 0,70 y 0,87 cm de diámetro.

Los coeficientes de difusión efectiva y de transporte de materia se obtuvieron a partir del análisis de Fourier de la respuesta del sistema a una señal pulso en la entrada y suponiendo válido el modelo de Kubin y Kucera (1965). Para obtener los parámetros característicos de las curvas de respuesta experimentales, se aplicó el método de los momentos pesados propuesto por Ostergaard y Michelsen (1970) y modificado por Anderssen y White (1970). Los valores de los coeficientes obtenidos son corroborados a partir de correlaciones desarrolladas por otros autores, cuyos estudios se realizaron en reactores con relaciones de  $d_t/d_p$  mayores que 10.

Hsiang y Haynes (1977) estudiaron la dispersión axial en un reactor similar al empleado por Sarma y col. (1974) pero utilizando un detector de mayor sensibilidad. De esta forma lograban disminuir en buena parte la prolongada cola de las curvas de respuesta debida a la eliminación de los efectos térmicos inherentes al funcionamiento de los detectores de conductividad térmica.

Se estudió el comportamiento fluidodinámico en un rango de relaciones de diámetros de tubo a partícula entre 1,1 y 10. Para relaciones de 1,1 a 1,4 los valores del coeficiente de dispersión axial obtenidos concuerdan con los predichos por Edwards y Richardson (1968) para relaciones de  $d_t/d_p$  mayores que 10. Para relaciones de diámetros entre 1,4 y 10 los valores discrepan significativamente con los anteriores.

Para desprestigiar los efectos del flujo no desarrollado en la entrada y salida del reactor, se trabajó con una relación de longitud de lecho a diámetro de partícula mayor que 50. Se verificó la reproducibilidad de los datos obtenidos vaciando y llenando el reactor en forma reiterada con el mismo relleno. Se concluyó que las desviaciones estaban dentro del error experimental. Las curvas experimentales se ajustaron con el modelo de flujo cruzado. Este, ya descrito anteriormente, postula una fase móvil y otra estanca de fluido entre las que se transfiere masa. La resistencia a la transferencia es la responsable de la dispersión en la dirección axial del lecho. El ajuste de los parámetros se realizó a través de la curva de distribución de tiempos de residencia en el campo transformado de Laplace.

Para el sistema en estudio los autores aseguran que la aplicación del modelo de dispersión axial es tan aceptable como la del modelo de flujo cruzado. Ambos modelos predicen curvas aproximadamente gaussianas para bajos grados de dispersión axial.

### II.3. Parte experimental

#### II.3.1. Equipo

Se compone básicamente de un sistema de regulación de flu-

///

jo de gas, un sistema de inyección del trazador, la columna rellena y el sistema de análisis (Figura II-1).

El sistema de regulación de flujos está formado principalmente por dos válvulas caudalostáticas Moore 63BU-L cuyo rango de operación es de 0-2700 cm<sup>3</sup>/min. Estas válvulas necesitan para su correcto funcionamiento, un suministro de gas a presión constante. Esto se consigue mediante un manoreductor ubicado a la salida del tubo de gas (nitrógeno). Este manoreductor era del tipo Matheson 310 4A. Debía tenerse sumo cuidado en el correcto funcionamiento de este instrumento por la gran sensibilidad de las válvulas caudalostáticas a las oscilaciones de la presión de suministro del gas. La presión de trabajo a la salida de este instrumento se estableció en 2,7 Bar, asegurándose una caída de presión a través de las válvulas caudalostáticas mayor que 0,34 Bar, que es el mínimo recomendado por sus fabricantes.

Asimismo se ubicó un filtro y secador para el gas antes de las válvulas caudalostáticas para evitar posibles obstrucciones en las válvulas aguja de las mismas. El filtro fue construido en acrílico. Consta de un tubo de 20 cm de longitud con dos tapas rosca- das que, por medio de O-Rings, aprisionan en cada uno de sus extremos una placa de bronce sinterizado, cuya porosidad es de 10-15 micrones. El interior del tubo se llenó con sílica-gel. El gas circulaba en sentido ascendente para disminuir posibles taponamientos

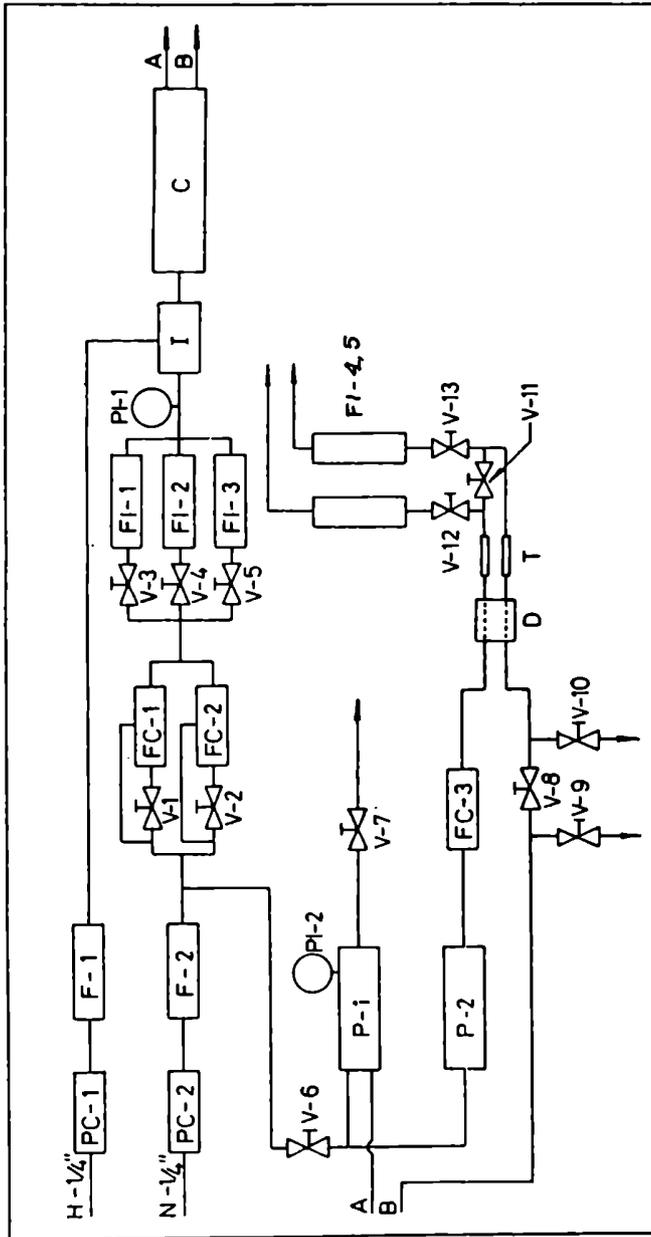


Figura II-1: Diagrama de flujo

- |           |                                   |                    |  |
|-----------|-----------------------------------|--------------------|--|
| C         | : columna rellena                 | P-2                | : pulmón con baffles                     |
| D         | : detector de conductividad       | PC- 1,2            | : válvulas presostáticas                 |
| F- 1,2    | : filtro y secador de gases       | PI- 1,2            | : manómetros                             |
| FC- 1,2,3 | : válvulas caudalostáticas        | T                  | : tubos capilares                        |
| FI- 1,2,3 | : flotámetros                     | V- 1,2             | : válvulas aguja de regula-<br>ción fina |
| FI- 4,5   | : caudalímetros de burbuja        | V- 3,4,4,8,9,10,11 | : válvulas on/off                        |
| I         | : sistema de inyección            | V- 6,7,12,13       | : válvulas aguja                         |
| P- 1      | : recipiente igualador de presión |                    |  |

de las placas de bronce.

El sistema de medición de caudales, ubicado a continuación de las válvulas caudalostáticas consta de un conjunto de tres flotámetros que pueden ser conectados alternativamente por medio de válvulas si/no con asientos de teflón. Es importante aclarar que se trata de utilizar en todo momento, válvulas exentas de cierres engrasados. En las recién descritas el cierre en el vástago se realiza mediante O-Rings.

El conjunto de caudalímetros se eligió de forma tal de poder medir caudales entre 0-20 l/min calibrados en un rango de presiones de 0-0,4 Bar.

A continuación se ubicó el sistema de inyección, a la menor distancia posible de la base de la columna. El mismo fue diseñado de forma tal de no interrumpir en ningún momento el flujo gaseoso principal. Este factor es importante para conseguir un buen funcionamiento del detector, que es sumamente sensible a las variaciones de flujo y a golpes de presión, y así poder asegurar que el estudio del comportamiento fluidodinámico en la columna se realiza en estado estacionario. El sistema de inyección consta de un cilindro de aluminio de un litro de capacidad con tapas a presión y juntas de Neoprene. Este cilindro se carga con gas trazador a una presión determinada y se comunica con la línea principal de suministro de gas a la columna mediante una válvula solenoide. En el momento de inyectar, ésta es accionada y permite que circule gas trazador

desde el cilindro hacia la línea principal, es decir, se sobreinyecta el trazador.

Esta forma de inyectar puede introducir serios inconvenientes en relación a los transientes. Se observó que si la presión en el cilindro era considerablemente mayor que en la línea de nitrógeno, se producía un incremento de caudal en el momento de inyectar. Esto haría que el trazador llegase al detector en un tiempo mucho menor que el que correspondería a un funcionamiento estacionario, calculado a partir de las mediciones de los flotámetros.

Además, otro inconveniente es debido a la señal que se produce como consecuencia del golpe de presión en el momento de accionar la válvula. En las corridas correspondientes a altos caudales se corre el riesgo de que este pico se superponga con la señal de respuesta del pulso. Para poder controlar este inconveniente, se instalaron sendos manómetros de rama en U: uno en la línea de  $N_2$ , en la zona de inyección y el otro en el cilindro de inyección. Mediante este arreglo puede conocerse con precisión la presión en la línea de gas portador y establecer, en consecuencia, la presión de  $H_2$  en el cilindro de inyección, de tal forma que ésta sea sólo algo superior a la de la línea de  $N_2$ .

Controlando la presión en el cilindro de inyección, se consigue una buena reproducibilidad en las sucesivas inyecciones. Estos manómetros pueden ser usados a rama abierta o cerrada según

la magnitud de las presiones. Entre el cilindro de inyección y el manómetro se instaló una válvula aguja que permite ajustar la presión de  $H_2$  a los valores requeridos. Se estableció que para inyectar en un intervalo de aproximadamente 0,1 s, un volumen de trazador que representa un 0,002% del caudal máximo a emplear en el equipo a una presión de 1,03 Bar, la variación de presión en el cilindro es de sólo  $0,9 \times 10^{-3}$  Bar. Esto es importante ya que así es posible tener la válvula solenoide más tiempo abierta sin que el caudal del trazador que ingresa al reactor se modifique en forma apreciable. El suministro de  $H_2$  al sistema de inyección se realiza a través de un manoreductor colocado a la salida del tubo de  $H_2$  y un elemento filtrante y secador de características iguales a las descritas para el instalado en la línea de nitrógeno.

La columna se construyó en tubo de acrílico; sus dimensiones son las siguientes:

Dimensiones de la columna

Diámetro interno: 2,9 cm

Longitud : 150,3 cm

La tapa está provista de dos orificios para la salida del gas: uno de pequeño diámetro que se conecta directamente al detec-

///

tor, y el otro, por el que ventea la mayor parte del gas. Este se conecta a una válvula aguja a fin de poder regular la presión dentro de la columna. El sentido de flujo de gas es ascendente. A fin de lograr una distribución uniforme del gas sobre toda la sección de la columna se coloca una placa de bronce sinterizada de  $50\mu$  en la base de la misma.

Como rellenos se emplearon esferas de vidrio , cilindros y anillos Raschig de PVC. Los diámetros de los diversos rellenos se variaron de forma tal que la relación de  $d_t/d_p$  esté en el rango de 1,1 a 10.

El sistema de detección, formado por una celda de conductividad térmica, está montado directamente sobre la tapa de la columna y, debido a su gran sensibilidad, fue necesario aislarlo térmicamente, introduciéndolo en una caja de poliestireno expandido.

Asimismo es necesario un estricto control de los caudales que pasan a través de las ramas del detector. Estos deben ser de  $5 \pm 3 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

A fin de evitar fluctuaciones se colocó una válvula caudalostática en la rama de referencia y una válvula aguja a la salida de la rama de análisis. Por esta última circula el gas proveniente de la columna. La constancia de caudal en esta rama está gobernada por el sistema de regulación a la entrada de los caudalímetros. Para disminuir, en lo posible, las perturbaciones introdu-

cidas por la inyección, se ubican sendos capilares en las dos ramas del detector, como puede apreciarse en el diagrama de flujo, los que atenúan los golpes de presión. Los caudales que pasan por la celda de conductividad se miden mediante sendos caudalímetros capilares cuya calibración se realizó con caudalímetros de burbuja.

La ventaja de emplear este tipo de caudalímetros es la de tener una medida continua del caudal. Esto permite determinar rápidamente posibles interrupciones del flujo en alguna de las ramas durante la operación, las que ocasionarían el deterioro de los termistores de la celda. La celda de conductividad térmica (Gow-Mac 10-470) es alimentada por una fuente de corriente constante y que se establece en 14 mA. La señal eléctrica que se produce por variación de la resistencia en los termistores es amplificada y suministrada como potencial variable a un registrador Houston (Super Scribe<sup>TM</sup> Series 4900).

#### II.4. Condiciones de Operación

En todos los ensayos realizados se empleó nitrógeno (calidad 4 bandas; 99,99% de pureza) como gas principal. Como gases trazadores se ensayó con CO<sub>2</sub>, Ar, e H<sub>2</sub>. Los dos primeros tienen una difusividad, respecto del nitrógeno, baja, por lo que serían aconsejables. Sin embargo, al ser su conductividad térmica muy se-

mejante a la del  $N_2$ , se tiene una sensibilidad muy baja para su detección mediante la celda de conductividad térmica. En la Tabla II-1 se detallan las constantes físicas características de los distintos gases

TABLA II-1

Constantes físicas características de diversos gases

Gas	$\lambda$	$D_{X/N_2}$	$\mu$
$N_2$	$2,59 \times 10^{-4}$		0,0176
$CO_2$	$1,66 \times 10^{-4}$	0,163	0,0145
Ar	$1,77 \times 10^{-4}$	0,194	0,0223
$H_2$	$18,3 \times 10^{-4}$	0,674	0,0088

$\lambda$  : conductividad térmica; (Watt/m °K)

$D_{X/N_2}$  : difusividad del gas respecto del  $N_2$  ( $cm^2/s$ )

$\mu$  : viscosidad (cp)

El hidrógeno, si bien tiene la desventaja de tener una alta difusividad respecto del nitrógeno, tiene la ventaja de diferir muchísimo en conductividad térmica.

Entonces, empleando hidrógeno como gas trazador se obtienen respuestas aceptables inyectando muy pequeñas cantidades. Esto es importante ya que provoca una menor distorsión en las líneas de flujo del reactor. Asimismo permite trabajar con menores sensibilidades del registrador, con lo que los ruidos en la línea de base son significativamente menores.

///

En todos los ensayos se trabajó a temperatura ambiente y presión algo superior a la atmosférica: 0,20 Bar.

Se trabajó con un caudal de gas de 15-4000 cm<sup>3</sup>/min. El relleno empleado era no poroso y de diferentes geometrías y tamaños. Sus características se detallan en la Tabla II-2.

TABLA II-2  
Características de los rellenos empleados

Geometría	Diámetro (cm)	Porosidad*	Porosidad**	$d_t/d_p$
	2,5	0,513		1,16
	1,6	0,674		1,81
Esferas	1,0	0,430	0,470	2,90
	0,5	0,390	0,400	5,80
	0,3	0,380	0,370	9,67
	0,96	0,464	0,450	3,02
Cilindros	0,50	0,381	0,370	5,80
Anillos	0,96	0,544		3,02
Raschig	0,5	0,480		5,80

\* valores obtenidos experimentalmente

\*\* valores según Max Leva, "Fluidization" (1959)

## II.5. Modo de operación

La presión de entrada del equipo se lleva a 2,7 Bar y se establece un caudal arbitrario ( $\sim 30 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) de nitrógeno. Se ajusta entonces la presión de trabajo dentro del reactor mediante la válvula aguja a la salida del mismo en 0,20 Bar. Se observa que a esta presión se minimizan los ruidos de la línea de base en el registrador.

Una vez fijada la presión, se ajustan los caudales de las dos ramas del detector de conductividad en  $5 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Este caudal es función de la presión del equipo, por lo que, a medida que se varía el caudal, esta presión debe mantenerse constante, con lo que los caudales en el detector automáticamente se mantienen constantes. A continuación se suministra corriente a la celda de conductividad y se va controlando la señal de base en el registrador, eligiendo la sensibilidad más adecuada.

Se presuriza el cilindro de inyección y se ajusta la presión de manera que sea levemente superior a la de la línea de nitrógeno ( $3 \times 10^{-3} \text{ Bar}$ ) y se va ensayando hasta obtener una respuesta adecuada a la salida del reactor. Se realizan varios ensayos con cada caudal. Cada vez que éste se varía, es necesario esperar a que el sistema llegue a estado estacionario. Esto se corrobora cuando la línea de base no tiene deriva.

La velocidad de carta del registrador se elige de forma tal que la señal de respuesta presente una pendiente de crecimiento de aproximadamente  $45^\circ$ .

#### II.6. Determinación de la porosidad del lecho relleno

Al término de cada conjunto de corridas experimentales con un determinado tipo de relleno se determinó la porosidad del lecho. A tal efecto se disponía de un tramo de columna de igual diámetro que la anterior, que se rellenaba con las partículas en cuestión. Se la pesaba con el relleno y también después de inundarla con agua destilada. Con estos datos, y conociendo el volumen total del lecho se calculó la porosidad para cada relleno. Todas las porosidades se obtuvieron como promedio de 10 mediciones. Los valores obtenidos se compararon con valores extraídos de tablas para relaciones de diámetro de tubo a diámetro de partícula similares, observándose una buena concordancia (Tabla II-2).

#### II.7. Resultados obtenidos

##### II.7.1. Tratamiento de los resultados experimentales

Las respuestas a las señales inyectadas en la base del

reactor son proporcionales a la concentración del trazador a la salida del mismo.

Como se explicó en la sección (I.4) las curvas experimentales obtenidas se discretizaron y adimensionalizaron de acuerdo a las ecs. I-27 a I-29. A partir de las mismas se calcularon los momentos de 1° y 2° orden.

Los tiempos medios de residencia, " $t_m$ ", se evaluaron a partir de los caudales y el volumen efectivo del lecho relleno según:

$$t_m = \frac{V \epsilon}{F_v}$$

V : volumen de lecho relleno

$\epsilon$  : porosidad de lecho relleno

$F_v$  : caudal volumétrico del gas

### II.7.2. Cuantificación de la información experimental

Analizando las curvas de respuesta obtenidas se observó que éstas son relativamente simétricas, semejantes a una distribución gaussiana. Debido a ésto se consideró adecuado emplear el modelo de dispersión axial para cuantificar el mezclado axial en el reactor.

///

Por las características del sistema en los puntos de inyección y análisis puede considerarse a éste como un sistema cerrado-cerrado. Asimismo, comparando los tiempos medios de residencia con los tiempos de apertura de válvula, puede suponerse una señal delta de Dirac como inyección al sistema. Esto significa que se considera a la curva de salida del sistema directamente como curva de DTR.

De acuerdo a estas suposiciones se calcularon los números de Peclet con el método de los momentos para tener una primera estimación de los parámetros y de la validez del modelo. Se observó que si bien los números de Peclet obtenidos tenían valores elevados, lo cual indica una dispersión axial pequeña, la dispersión de datos obtenidos en idénticas condiciones experimentales era considerable. Al adimensionalizar las curvas obtenidas en iguales condiciones experimentales no se observaban mayores diferencias en la primera parte, pero sí las había en sus colas.

Teniendo en cuenta la imprecisión de las medidas en esta zona y la fuerte dependencia que la varianza tiene con la cola de la curva, se calcularon los números de Peclet a partir de los máximos de las curvas de DTR. Este método no tiene en cuenta la cola de las curvas. En su aplicación se emplean datos como la altura máxima y el área bajo la curva, cuyos errores relativos son mínimos. La expresión analítica que vincula el número de Peclet con el valor

máximo de la curva de DTR se obtiene derivando la función  $C(\theta)$  (Ecuación I-9). El método de ajuste a través del máximo de las curvas de DTR ha sido empleado por diversos autores (Michell y Furzer, 1972; Crine y col., 1983).

### II.7.3. Cálculos realizados

Si se parte de la ecuación del modelo de dispersión axial, se deriva y se calcula el máximo, puede verse que su expresión es una función del número de Peclet. En forma adimensional resulta:

$$C(\theta)_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{Pe/\pi} \quad \text{II-1}$$

$$Pe = \frac{U \cdot L}{E_z}$$

Si se define el número de Peclet de partícula como  $Pe_p = \frac{U \cdot d_p}{E_z}$  y se reemplaza  $C(\theta)_{\max}$  por su expresión en el dominio del tiempo resulta:

$$C(t)_{\max} = C(\theta)_{\max} \frac{\text{Area}}{t_m}$$

Area: área bajo la curva de DTR y

$$Pe_p = \frac{4 \pi d_p}{L} \left( \frac{t_m C(t)_{\max}}{\text{Area}} \right)^2 \quad \text{II-2}$$

///

Para verificar el método de ajuste de datos se reemplazaron los números de Peclet calculados en la ecuación del modelo obteniéndose una buena reproducibilidad de las curvas de DTR experimentales.

Asimismo se observó una baja dispersión entre los distintos resultados obtenidos en iguales condiciones operativas. Los valores de Peclet así obtenidos concuerdan con los datos de bibliografía (Scott y col., 1974; Hsiang y Haynes, 1977).

#### II.7.4. Resultados

Los resultados para partículas esféricas de distintos tamaños se representan en la Figura II-2 como números de  $Pe_p$  en función del número de  $Re_p$ . Es importante remarcar que se encontró una muy buena reproducibilidad de los números de  $Pe_p$  (desviaciones del 5%) al vaciar y volver a llenar el reactor con el relleno. Esto concuerda con los resultados presentados por Scott y col. (1974) y Hsiang y Haynes (1977) para columnas de diámetro pequeño.

Los valores del número de Peclet determinados para números de Reynolds bajos, es decir, aquellos donde la dispersión está controlada por la difusión molecular, se ajustan mediante una única curva con excepción de aquellos correspondientes a esferas de 2,5 cm

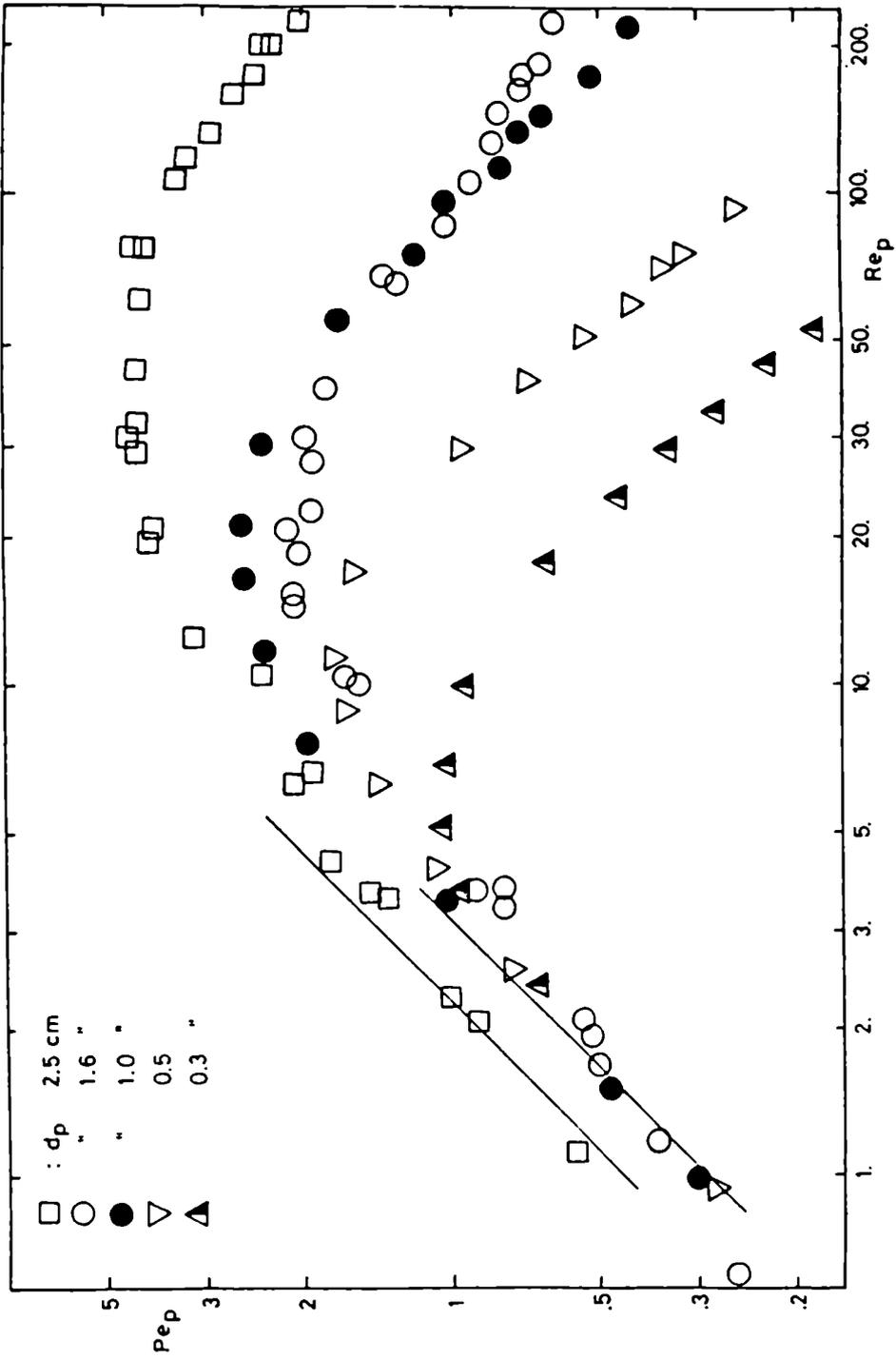


Figura II-2: Número de Peclet en función del Réynolds para esferas de diferente diámetro.

de diámetro. Esto puede atribuirse a la interacción del perfil de velocidad generado por la distribución del relleno y el mezclado radial debido a la difusión.

Unicamente los resultados que corresponden a la relación de  $d_t/d_p$  de 1,16 muestran un comportamiento similar al esperado para lechos de gran diámetro, en concordancia con las conclusiones encontradas por los autores antes citados. Para todas las otras relaciones de  $d_t/d_p$ , los números de  $Pe_p$  son menores que los que predicen las correlaciones convencionales para lechos rellenos.

En la Figura II-3 se representan los resultados como número de  $Pe_p$  en función del número de Reynolds para diferentes geometrías y tamaños de partícula. Puede observarse que a bajos números de Reynolds, el número de  $Pe_p$  es independiente de la geometría y del tamaño de partícula. Asimismo, el máximo de las curvas disminuye con el tamaño del relleno. A fin de correlacionar los resultados experimentales para números de  $Pe_p$  menores que 1 y altos números de Reynolds, se aplicó un método de regresión pseudo no lineal (Friedlander y Lemcoff, 1981; ver Apéndice A1) y se obtuvo la siguiente correlación:

$$Pe_p = 241,4 Re_p^{-0,86} (d_t/d_p)^{-1,57} \quad \text{II-3}$$

$20 < Re_p < 200$

Se observó un muy buen ajuste de los resultados siendo el

///

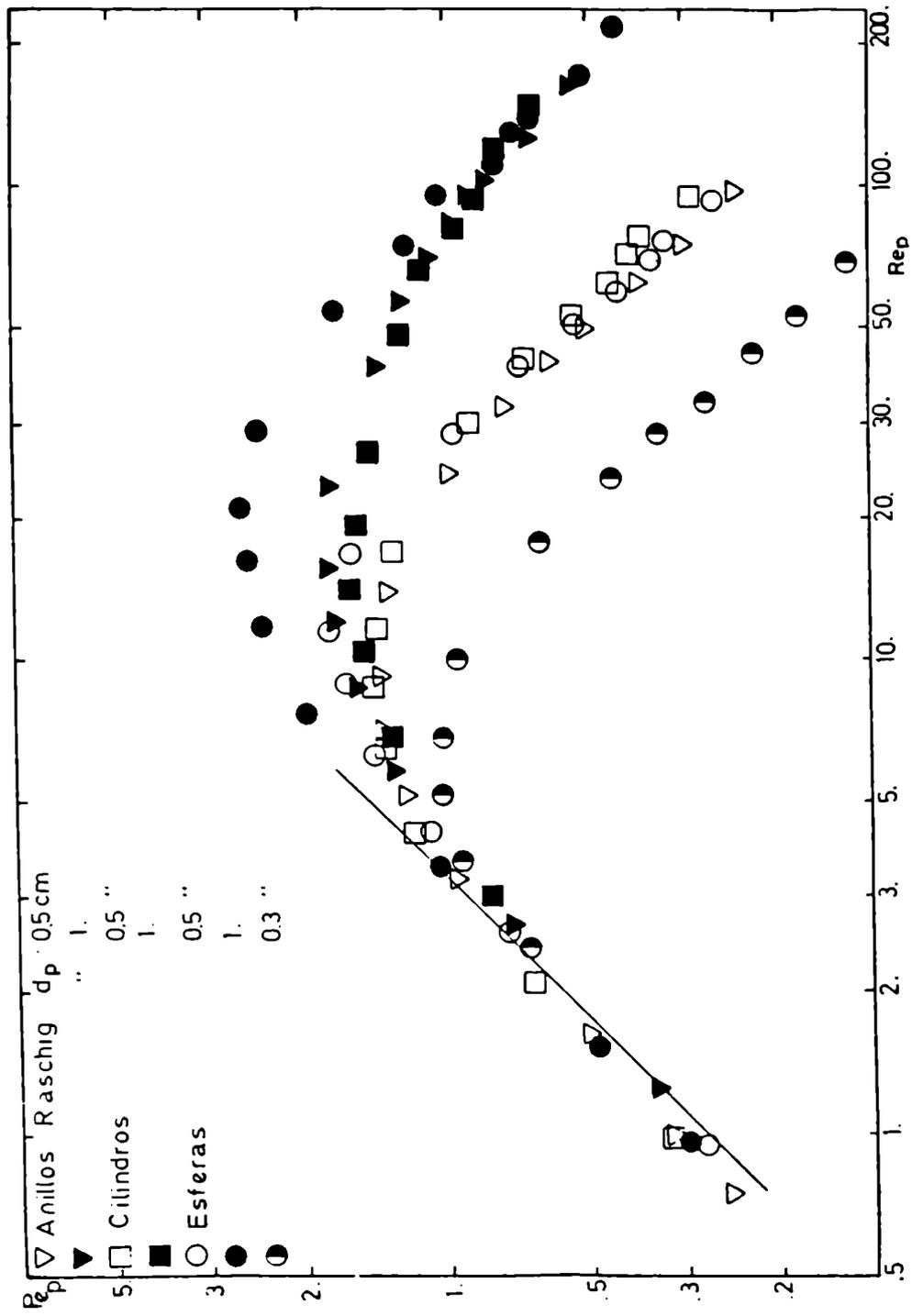


Figura II-3: Número de Peclet en función del Reynolds para rellenos de diferente geometría y tamaño.

error relativo del 9,7%. A partir de esta correlación surge que el coeficiente de dispersión axial puede expresarse como:

$$E_z \sim d_p^{0,29} U_G^{1,86} \quad \text{II-4}$$

El valor del exponente de la velocidad está dentro del rango encontrado por Hsiang y Haynes (1977). Estos consideran un modelo de flujo de dos corrientes y suponen una velocidad finita cerca de la pared y que el fluido en el seno del lecho está estanco. En estas condiciones, el exponente de la velocidad está comprendido entre 1 y 2. Un valor cercano a 1 sugiere que el efecto de la pared no es significativo mientras un valor cercano a dos indica canalización, o que el flujo en la pared es rápido y laminar. Asimismo, si el flujo en el lecho se considera como dos corrientes separadas que fluyen en cocorriente a distintas velocidades con un intercambio continuo de materia entre ambas fases, se encuentra una dependencia similar del coeficiente de dispersión axial con la velocidad (Lerou y col., 1980).

## CAPITULO III

### III. Reactores de lecho mojado

#### III.1. Introducción

Los reactores de lecho mojado se emplean para llevar a cabo reacciones que involucran tres fases: gas, líquido y sólido. Las fases gaseosa y líquida fluyen en cocorriente descendente a través del lecho del sólido. Este puede estar directamente involucrado en la reacción, o servir para mejorar determinados procesos físicos dentro del reactor, como el mezclado, la transferencia de calor, o aumentar la superficie de contacto.

Ambos fluidos se alimentan en la zona superior del reactor a través de un distribuidor. El líquido escurre sobre el relleno por el efecto de la gravedad hasta la base del mismo, donde es recolectado y separado de la fase gaseosa.

Este tipo de reactores se utiliza principalmente en la industria petroquímica en procesos tales como: hidrodeshulfuración catalítica, hidrocraqueo de fracciones pesadas, hidrotratamiento de aceites lubricantes, etc. Frecuentemente se los emplea en forma de lechos múltiples. Esto posibilita la inyección de la fase gaseosa entre los lechos a fin de lograr un adecuado control de la tempera-

tura. Asimismo, es posible redistribuir el líquido al pasar de un lecho a otro.

Debido a sus características fluidodinámicas, este tipo de reactores suele presentar altos grados de conversión. El uso de los mismos se ha visto incrementado debido al considerable ahorro de energía de bombeo en su funcionamiento. Esto se debe a que, tanto el gas como el líquido, atraviesan el relleno en cocorriente y en sentido descendente, impulsados por efecto de la gravedad.

En esta parte del trabajo se estudió el comportamiento fluidodinámico de la fase líquida de un reactor de lecho mojado. A tal efecto se determinaron las curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR) en diferentes condiciones operativas.

Puesto que de la revisión bibliográfica surgió que la mayor parte de los trabajos se restringen al estudio del sistema aire-agua, en el presente trabajo se modificaron las propiedades físicas de la fase líquida (viscosidad, densidad y tensión superficial) y se analizó la influencia de las mismas sobre el comportamiento fluidodinámico del reactor. A partir de los resultados experimentales obtenidos, se caracterizó la fase líquida del reactor mediante un modelo de flujo, analizándose la confiabilidad en la aplicación del mismo. Los parámetros característicos del modelo se correlacionaron con las variables operativas para establecer en forma cuanti-

tativa la influencia de las mismas sobre el comportamiento del reactor.

### III.1.1. Régimen de flujo en reactores de lecho mojado

En los reactores de lecho mojado las características de mezclado y los procesos de transporte dependen fuertemente del régimen de flujo reinante. Los regímenes de flujo son función de las velocidades del gas y del líquido, de las propiedades físicas de los mismos y del tamaño y geometría del relleno. De acuerdo a esto han sido clasificados en: flujo con fase continua de gas; flujo pulsante; flujo spray y flujo de burbuja (Satø y col., 1973; Charpentier y Favier, 1975; Chou y col., 1977).

En flujo continuo de gas, el líquido escurre sobre el relleno en forma de películas discontinuas, canales o gotas (junto a la fase gaseosa continua). La región continua de gas comprende los regímenes líquido laminar-gas laminar y líquido laminar-gas turbulento.

A medida que se incrementa la velocidad del gas, las fuerzas de arrastre sobre el líquido aumentan la velocidad del mismo hasta un punto en que éste comienza a escurrir en régimen turbulento. Se produce entonces la separación de partículas de líquido,

que se desplazan como tapones o gotas a través de los canales que se forman entre partículas del relleno. Este comportamiento es característico de la transición entre el régimen de la fase continua de gas y el régimen pulsante.

Si se sigue incrementando la velocidad del gas, las partículas de líquido adquieren un tamaño tal que obstruyen canales libres del relleno, provocando un aumento del flujo en otros canales en los que, por lo tanto, aumenta la posibilidad de separación de partículas de líquido y bloqueo de los canales. Esta perturbación se manifiesta en el reactor en forma de ondas o pulsos que avanzan a través del mismo. La formación de estos pulsos comienza en la parte inferior del lecho en donde la velocidad del gas es ligeramente mayor debido a la menor presión. Aumentando la velocidad del gas, se observa que los pulsos se forman cerca del tope del relleno y se desplazan a través del mismo. Si se aumenta aún más la velocidad del gas, crecen las fuerzas de arrastre entre ambas fases y los pulsos son cada vez más frecuentes, hasta que en un instante se vuelven difusos. Se llega así al régimen spray, en el cual la fase gaseosa es continua y transporta la fase líquida suspendida en forma de una niebla (Satterfield, 1975; Shah, 1979).

La mayoría de los estudios en bibliografía tratan de establecer las condiciones de flujo para las que el sistema pasa de un tipo de régimen de flujo a otro. Estas condiciones de flujo, que

representan la transición entre regímenes, se encuentran definidas en los mapas de flujo presentados por diversos autores.

Tosun (1984) estudió las condiciones de transición entre regímenes de flujo en un lecho mojado que opera con sistemas no espumantes. Para ello empleó diversos sistemas líquido-gas logrando así cubrir un importante rango de densidad, viscosidad y tensión superficial de ambos fluidos, como también de peso molecular de gas. La influencia de estas variables físicas se muestra en un mapa de flujo de velocidad másica del gas en función de la velocidad másica del líquido (Figura III-1). Se trató luego de unificar todas las zonas de transición y clasificar así a todos los regímenes de flujo en aquellos de baja y alta interacción. A tal efecto se representaron las condiciones que marcan los límites entre regímenes de flujo en función de las coordenadas de Baker (Figura III-2):

$$Y = \frac{L}{G} \lambda \psi$$

$$x = \frac{G}{\lambda}$$

donde:

$$\psi = \left( \frac{\xi_{H_2O}}{\xi_L} \right) \left[ \left( \frac{\mu_L}{\mu_{H_2O}} \right) \left( \frac{\delta_{H_2O}}{\delta_L} \right)^2 \right]^{1/3}$$

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\delta_G}{\delta_{H_2O}} \right) \left( \frac{\delta_L}{\delta_{aire}} \right) \right]^{1/2}$$

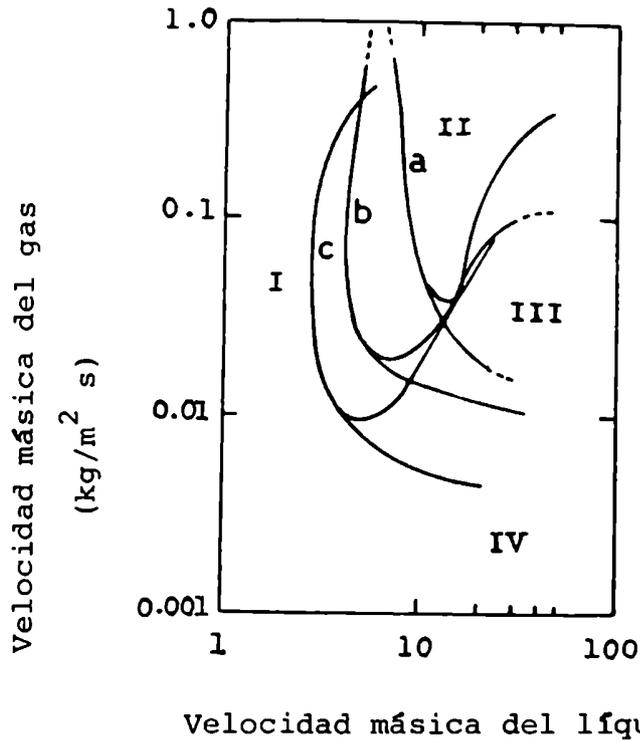
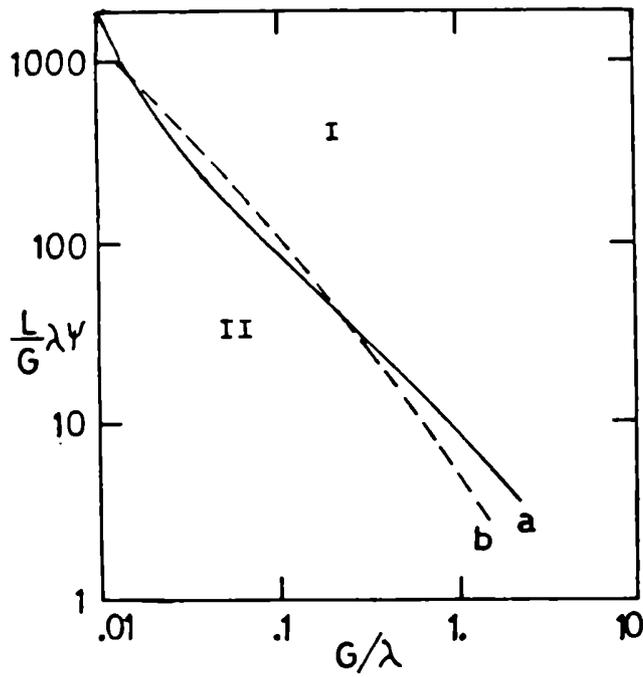


Figura III-1: Zonas de transición entre los distintos regímenes de flujo. Efecto de la viscosidad y tensión superficial del líquido (Tosun, 1984)

- a : sistema aire-agua;  $\mu_L = 1,0 \text{cp}$ ;  $\xi_L = 72 \text{ dina/cm}$
- b : sistema He-glicerina;  $\mu_L = 5,0 \text{cp}$ ;  $\xi_L = 69 \text{ dina/cm}$
- c : sistema He-mezcla ternaria;  $\mu_L = 5,9 \text{cp}$ ;  $\xi_L = 30 \text{ dina/cm}$

Regímenes de flujo

- I : flujo continuo de gas
- II : flujo pulsante
- III : flujo disperso de burbuja
- IV : flujo continuo de líquido



I : zona de alta interacción

II: zona de baja interacción

a : Tosun, 1984

b : Charpentier y Favier, 1975

Figura II-2 : Zona de transición entre flujo de alta y baja interacción (Tosun, 1984)

La importancia de conocer el régimen de flujo del reactor aparece fundamentalmente en problemas asociados con cambios de escala. Asimismo, la reproducibilidad de los resultados obtenidos a partir de ensayos en el reactor va a depender de la uniformidad del tipo de flujo a lo largo del mismo.

### III.1.2. Distribución de la fase líquida

La distribución del líquido en un reactor de lecho mojado ha sido estudiada teórica y experimentalmente por numerosos autores (Satterfield, 1975; Gianetto y col., 1978). En general interesa conocer la proporción de líquido que migra hacia la pared del reactor y escurre junto a la misma. Esto resulta perjudicial para lograr una alta conversión en el reactor ya que tiene igual efecto que una corriente de cortocircuito que no tiene contacto con el relleno catalítico. Se ha encontrado (Satterfield, 1975) que la proporción de flujo de pared crece hasta un valor constante que se establece para una longitud de reactor de 0,3 a 0,6 metros y que la misma depende fuertemente de la relación de diámetro de columna a diámetro de partícula. A medida que esta relación aumenta, el flujo de pared disminuye. Se considera aceptable en estos reactores pro-

porciones menores del 10% como flujo de pared. Se encuentra bastante dispersión en las relaciones de diámetro de columna a partícula informadas en bibliografía para mantener la proporción de flujo de pared por debajo de esta cota. Los valores encontrados varían entre 12 y 25% y dependen de las propiedades del líquido y de las formas de las partículas (Herskowitz y Smith, 1983).

Asimismo, es importante conocer la longitud de lecho necesaria para que el perfil de velocidades del líquido alcance una distribución estable. Esta longitud de relleno depende de la forma y tamaño del mismo, de las propiedades físicas del líquido y del gas y del diseño del distribuidor de líquido. En todos los trabajos experimentales se trata de minimizar los efectos debidos a las zonas de flujo parcialmente desarrollado. Estos efectos, también llamados efectos de entrada y salida son importantes en las zonas extremas del relleno. Es por eso que se aconseja que las curvas de DTR se determinen a una cierta distancia de las mismas. En otros casos se trata que el tramo de pruebas del reactor sea lo suficientemente largo para que los efectos de entrada y salida se hagan despreciables. Urban y Gomezplata (1969) aplicaron este criterio empleando un lecho relleno cuya relación de longitud de tubo a diámetro de partícula era mayor que 50.

### III.1.3. Retención de líquido

La retención de líquido es uno de los parámetros más estudiados en columnas rellenas y en reactores de lecho mojado. En base a ésta se han correlacionado los datos relativos a los procesos de transferencia de materia en columnas de absorción y destilación (Furnas y Bellinger, 1938; Onda y col., 1959), la caída de presión en lechos rellenos, el mojado efectivo en rellenos catalíticos y el rendimiento de reactores de lecho mojado (Cooper y col., 1941; Shulman y col., 1955).

Se define como retención total de líquido a la fracción de volumen vacío de reactor ocupada por el líquido:

$$h_{TL} = \frac{\text{volumen de líquido en el lecho}}{\text{volumen de lecho vacío}}$$

La retención total de líquido en un lecho relleno ( $h_{TL}$ ) puede dividirse en una fracción dinámica o retención operativa de líquido ( $h_{dL}$ ) y otra estática ( $h_{sL}$ ). En rellenos porosos la retención estática se compone de una fracción interna, en el interior de los poros, y otra externa, formada por los meniscos en los puntos de contacto entre las partículas de relleno. Según esta descripción, podemos escribir la siguiente expresión:

///

$$h_{TL} = h_{dL} + h_{sL}^i + h_{sL}^e \quad \text{III-1}$$

$h_{sL}^i$  : retención estática interna de líquido

$h_{sL}^e$  : retención estática externa de líquido

Cada una de estas retenciones puede ser determinada con relativa facilidad a partir del método de libre drenado, también denominado estático. La retención estática es la fracción de líquido retenida por el relleno cuando se interrumpe la alimentación de líquido al reactor y se lo deja drenar libremente.

La fracción dinámica,  $h_{dL}$ , formada por el líquido que escurre alrededor de las partículas de relleno, se determina a partir del volumen de líquido que drena del relleno del reactor a partir del instante en el que se interrumpe la alimentación al mismo. Existen numerosos trabajos en los que la retención de líquido ha sido determinada por este método (Jesser y Elgin, 1943; Otake y Okada, 1953; Mohunta y Laddha, 1965; Specchia y Baldi, 1977).

Posteriormente se han desarrollado métodos dinámicos para determinar la retención de líquido en lechos rellenos. Estos consisten en aplicar las técnicas de estímulo-respuesta y, a partir de las curvas de DTR obtenidas, calcular la retención de líquido:

$$h_{TL} = \frac{F_L \cdot t_m}{V} \quad \text{III-2}$$

///

$F_L$  : caudal volumétrico de líquido  
 $t_m$  : tiempo medio de la curva DTR  
 $V$  : volumen del reactor vacío

La retención así obtenida es la retención total de líquido (Hochman y Effron, 1969; Bennett y Goodridge, 1970; Hofmann, 1975; Turek y col., 1978).

Según la ec. III-1 vemos que la  $h_{TL}$  se compone de dos partes:  $h_{dL}$ , función de la velocidad de líquido, y  $h_{sL}$ , independiente de dicha variable. Esto hace que en general se presenten correlaciones independientes para cada una de las retenciones de líquido. En los trabajos que emplean las técnicas de estímulo-respuesta, el valor de  $h_{dL}$  se obtiene por diferencia entre  $h_{TL}$  y  $h_{sL}$ . A tal efecto varios autores toman el valor de  $h_{sL}$  de la bibliografía (van Swaaij y col., 1969; Hochman y Effron, 1969). Hochman y Effron (1969) toman un valor estimativo de 0,33; Bennet y Goodridge (1970) estiman este parámetro por extrapolación de los valores experimentales de  $h_{TL}$  para  $Re_L = 0$ .

Algunos autores (Friebe, 1966; Charpentier y col., 1968; Hofmann, 1975) consideran inadecuado dividir la retención total de líquido en una fracción dinámica y otra estática ya que durante el funcionamiento del reactor la fracción estanca del líquido puede no

ser igual a la cantidad de líquido que queda retenida en el relleno del reactor, determinada por el método estático. Hofmann (1975) sostiene que la fracción de líquido estanca dentro del reactor en funcionamiento puede llegar a ser la tercera parte de la que se determina por libre drenado. En consecuencia propone dividir la retención total en una porción activa o en movimiento y otra inactiva, ambas determinables por métodos dinámicos. Estos son de mayor complejidad experimental que el método estático y es posible ver que, para numerosos fines prácticos, es más adecuado emplear la definición original de las distintas retenciones de líquido. Sin embargo, cuando quiere determinarse la conversión de un reactor de lecho mojado es conveniente emplear valores de la retención activa e inactiva, en donde esta última también es calculada por métodos dinámicos a partir del ajuste de modelos de más de un parámetro a las curvas de DTR obtenidas. A tal fin se recurre al modelo de flujo cruzado, ya que tiene en cuenta la presencia de zonas muertas en la fase líquida. Este modelo contiene un parámetro característico  $\emptyset$ , que tiene en cuenta la relación entre las retenciones activa e inactiva del líquido:

$$\emptyset = \frac{h_{aL}}{h_{TL}} = 1 - \frac{h_{iL}}{h_{TL}} \quad \text{III-3}$$

$h_{iL}$  : retención inactiva

///

$h_{aL}$  : retención activa

En este caso se calculan los valores de  $\theta$  y  $h_{TL}$  para diversas condiciones operativas y, a partir de estos valores se obtiene  $h_{iL}$ , aplicando un método de cuadrados mínimos.

Los valores de retención total de líquido obtenidos por el método dinámico han sido comparados con aquellos obtenidos por el método estático en numerosos trabajos (Van Swaij y col., 1969; Bennett y Goodridge, 1970; Schwartz y Roberts, 1973) pudiendo observarse una muy buena concordancia. En la Figura III-3 se muestra la comparación realizada por Schwartz y Roberts (1973), quienes encuentran que las diferencias no superan el 7% para los caudales máximos empleados.

La retención estática de líquido se correlaciona generalmente en función del número de Eötvös:

$$Eö = \delta_L \cdot g \cdot d_p^2 / \xi_L \quad \text{III-4}$$

donde:  $\delta_L$  = densidad del líquido

$g$  = aceleración de la gravedad

$d_p$  = diámetro nominal de partícula

$\xi_L$  = tensión superficial del líquido

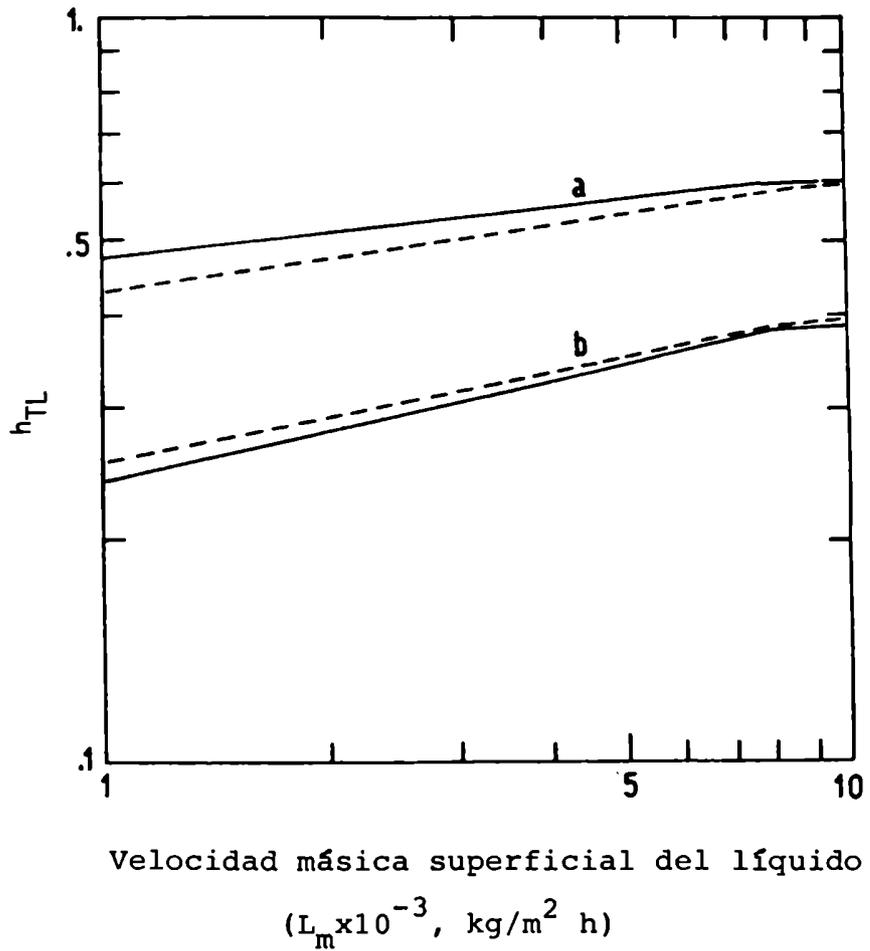


Figura III-3 : Retención total de líquido como función de la velocidad másica superficial del líquido (Schwartz y Roberts, 1973)

a: relleno poroso

b: relleno no poroso

— método del trazador

--- método de libre escurrido

Según van Swaaij y col. (1969) es posible calcular esta fracción de retención según la siguiente expresión:

$$h_{sL} = 0,063 E \sigma^{-0,06} \quad \text{III-5}$$

En la Figura III-4 se representa gráficamente esta correlación. Puede observarse que la retención estática es mayor en sólidos porosos y disminuye al aumentar la tensión superficial del líquido. Algunos autores han estimado este parámetro para diversos sistemas (Hoogendorn y Lips, 1965; Hochman y Effron, 1969; Schwartz y col., 1976).

Para el cálculo de la retención dinámica del líquido se han propuesto básicamente tres tipos de correlaciones en función de:

1. la velocidad del líquido y propiedades de los fluidos
2. grupos adimensionales tales como: número de Reynolds, número de Galileo y parámetros del relleno
3. parámetro de Lockhardt-Martinelli:  $X = \Delta P_L / \Delta P_G$

donde :  $\Delta P_L$  : caída de presión en fase líquida si el líquido fluyera sólo

$\Delta P_G$  : caída de presión en fase gaseosa si el gas fluyera sólo

///

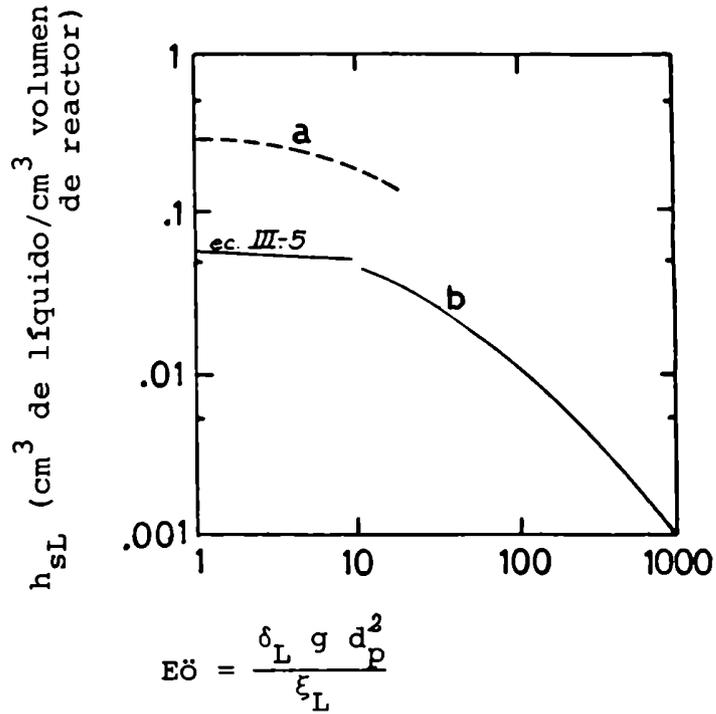


Figura III-4 : Retención estática en función del número de Eötvös  
(van Swaaij y col., 1969).

a : catalizador poroso

b : catalizador no poroso

La mayoría de los trabajos publicados presentan correlaciones de la retención dinámica de líquido en función de grupos adimensionales. En general todas son de la forma:

$$h_{dL} = \alpha (Re_L)^\beta (Ga_L)^\gamma (\bar{a} \cdot d_p)^\eta \quad \text{III-6}$$

en donde los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\eta$  difieren según los autores y las condiciones experimentales escogidas.

Las correlaciones más empleadas y recomendadas (Shah, 1979) para el cálculo de retención dinámica de líquido son las obtenidas por Otake y Okada (1953). Estos trabajaron con rellenos de anillos Raschig y monturas Berl. Los datos de retención para relleno esférico fueron tomados del trabajo realizado por Jesser y Elgin (1943). Asimismo emplearon diversos líquidos con lo que lograban variar la viscosidad en un rango de 1 a 10 cp. Estos autores trabajaron con flujo de líquido descendente sin flujo de gas y obtuvieron distintas correlaciones para partículas de relleno de diferentes geometrías y rango de  $Re_L$ ; generalizan el uso de las mismas a sistemas de cualquier tamaño y geometría incorporando un grupo adimensional de geometría,  $\bar{a} \cdot d_p$ .

Las expresiones obtenidas son:

$$h_{dL} = 21,2 Re_L^{0,51} Ga_L^{-0,44} (\bar{a} \cdot d_p) \quad Re_L < 10 \quad \text{III-7}$$

///

$$h_{dL} = 1,294 Re_L^{0,676} Ga_L^{-0,44} (\bar{a} \cdot d_p) \quad 10 < Re_L < 2000 \quad \text{III-8}$$

$Ga_L$  : número de Galileo del líquido :  $(d_p^3 \cdot g \cdot \delta_L^2 / \mu_L^2)$

$Re_L$  : número de Reynolds del líquido:  $(\delta_L \cdot U_{OL} \cdot d_p / \mu_L)$

$U_{OL}$  : velocidad superficial del líquido

$\bar{a}$  : superficie total de contacto del líquido/volumen de la columna

Hochman y Efron (1969) trabajaron con esferas de vidrio de 0,84 cm y el sistema aire-metanol, obteniendo la siguiente expresión:

$$h_{dL} = 0,00445 Re_L^{0,76} \quad 4 < Re_L < 100 \quad \text{III-9}$$

Specchia y col. (1977) emplearon un lecho mojado de 7 cm de diámetro y 150 cm de longitud. Como rellenos utilizaron esferas de 0,60 cm y cilindros de 0,54 cm. Variaron la viscosidad del líquido entre 1,0 y 2,3 cp. La correlación obtenida es:

$$h_{dL} = 3,86 Re_L^{0,545} Ga_L^{-0,42} \left( \frac{\bar{a} \cdot d_p}{\epsilon} \right)^{0,65} \quad 0,3 < Re_L < 100 \quad \text{III-10}$$

Turek y col. (1978) presentan la siguiente correlación

///

de la retención dinámica de líquido en lechos mojados:

$$h_{dL} = 2,13 \operatorname{Re}_L^{0,36} \operatorname{Ga}_L^{-0,24} X_G \quad 0 < \operatorname{Re}_L < 2$$

$$X_G = 1 - 0,32 \operatorname{Re}_G^{0,25} \quad \text{si } \operatorname{Re}_G < 1 \quad \text{III-11}$$

$$X_G = 0,68 \quad \text{si } \operatorname{Re}_G > 1$$

Esta tiene en cuenta una dependencia con la velocidad del gas cuando la misma es pequeña. No fue posible obtener mayor información acerca de las condiciones experimentales en las que se obtuvo esta correlación.

Clements (1976) desarrolló un modelo matemático para el cálculo de la retención dinámica del líquido; en la correlación final obtenida interviene la tensión superficial:

$$h_{dL} = a' (\operatorname{Re}_G \operatorname{We}_G / \operatorname{Re}_L)^n \quad \begin{array}{l} 0,07 < \operatorname{Re}_L < 530 \\ 0,5 < \operatorname{Re}_G < 4100 \end{array}$$

donde 
$$\operatorname{We}_G = \frac{U_{OG}^2 d_p \delta_G}{\xi_L} \quad \text{III-12}$$

$U_{OG}$  = velocidad superficial del gas

Esta ecuación se verificó experimentalmente para sistemas aire-aceite de siliconas observándose un ajuste adecuado. La principal dependencia con la tensión superficial está en el exponente "n".

Davidson (1959) desarrolló un modelo teórico para el cálculo de la retención de líquido. Este modelo, denominado "de las superficies aleatorias", considera los efectos viscosos, las fuerzas gravitacionales y el tamaño de partícula. Los resultados fueron corroborados experimentalmente por Michell y Furzer (1972) y Schwartz y col. (1976). Según Davidson se cumple que:

$$h_{dL} \propto Re_f^{0,30} Ga_L^{-1/3} \bar{a} \cdot d_p \quad 0 < Re_f < 3000 \quad \text{III-13}$$

donde  $Re_f$ , es el número de Reynolds definido en base a la velocidad real en la película que escurre sobre las partículas de relleno.

Si bien algunos autores discrepan en el valor del exponente del número de Reynolds, existe coincidencia para el exponente del número de Galileo del líquido. Otras correlaciones, obtenidas para diferentes sistemas de fluidos, se hallan resumidas por Shah (1979).

Entre los trabajos que obtienen correlaciones en función

del parámetro de Lockhardt-Martinelli se pueden citar las de Larkins y col. (1961) y la Abbott y col. (1967). Estos últimos obtuvieron la siguiente expresión:

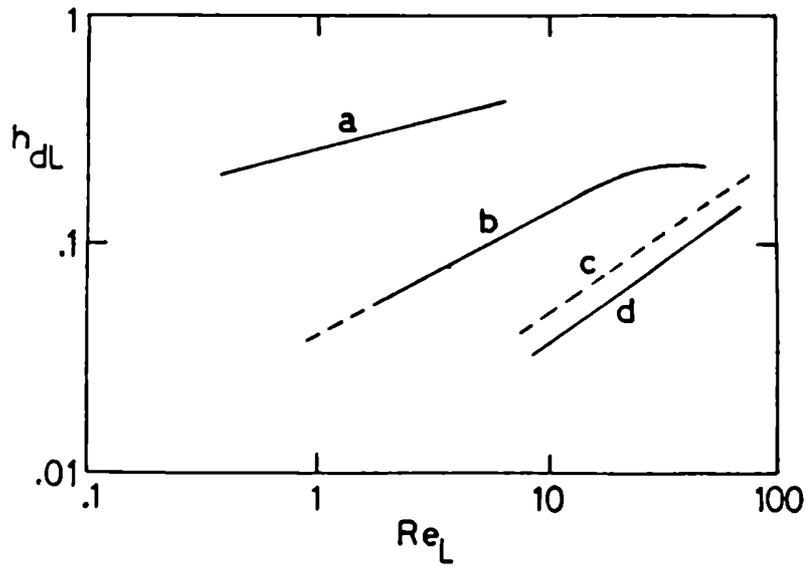
$$\log h_{TL} = -0,44 + 0,40 \log X - 0,120 (\log X)^2 \quad \text{III-14}$$

Del análisis realizado se encuentra que existen en literatura numerosas correlaciones para la retención de líquido en reactores de lecho mojado, siendo las discrepancias entre los valores predichos por las mismas significativas. A pesar de esto, se observa en forma general, que ésta aumenta al aumentar la velocidad del líquido y es independiente de la velocidad del gas (Hochman y Efron, 1969). Asimismo, se encuentra que un aumento del número de Galileo disminuye la retención del líquido. En la Figura III-5 se representan los valores de  $h_{dL}$  en función del número de Reynolds de líquido obtenidos por distintos autores en diversos sistemas (Shah, 1979).

### III.2. Mezclado en un reactor de lecho mojado

Con el objeto de caracterizar el comportamiento fluido-dinámico de un reactor de lecho mojado en régimen continuo de gas

///



- a : Schwartz y col. (1976)
- b : Ross (1965)
- c : Mohunta y Laddha (1965)
- d : Hochman y Efron (1969)

Figura III-5: Retención dinámica de líquido como función del número de Reynolds del líquido (Shah, 1979).

se han aplicado diversos modelos de flujo. Entre los más empleados se encuentran el modelo de dispersión axial de un parámetro y el modelo de flujo cruzado de dos parámetros.

### III.2.1. Modelos de flujo

El modelo más simple que permite describir la fluidodinámica de la fase líquida en un reactor de lecho mojado es el modelo de dispersión axial. De acuerdo a la literatura (Shah, 1979; Baldi y col., 1979), el mismo ha sido aplicado en numerosos trabajos con el fin de hallar el número de Peclet para una dada dispersión de un trazador dentro del sistema. En cada uno de estos trabajos se estudió el comportamiento de un reactor de lecho mojado para algún caso particular en el que se modificaban distintas variables tales como caudales, tipo y tamaño del relleno, formas del distribuidor, etc. Sin embargo en la mayoría de los casos el sistema de fluidos empleados fue aire-agua.

De acuerdo a Hofmann (1975) puede observarse que el número de Peclet de la fase líquida, en condiciones de escurrido descendente, es considerablemente menor que si el flujo a través del lecho relleno fuese monofásico (Figura III-6); esto implica que la dispersión en flujo continuo de gas es mayor. En condicio-

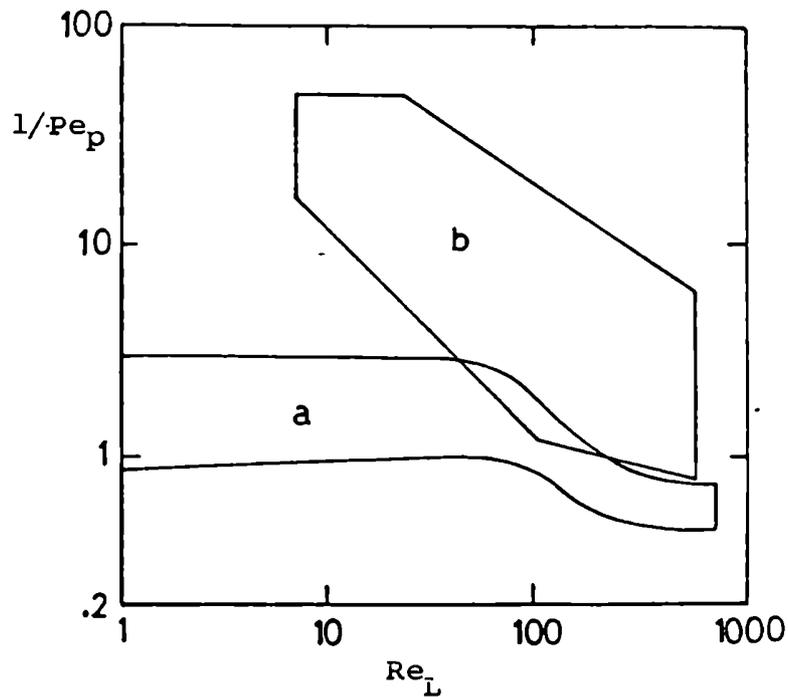


Figura III-6: Relación del  $Pe_p$  y  $Re_L$  para flujo de una fase y flujo de dos fases en régimen continuo de gas (Hofmann, 1975)

a : flujo monofásico ; lecho inundado

b : flujo de dos fases en régimen continuo de gas

nes de flujo monofásico, para bajos números de Reynolds de líquido, el Peclet del líquido toma valores entre 0,5 y 1,0, mientras que en escurrido de dos fases su valor está comprendido entre 0,1 y 0,2.

Unicamente a altos números de Reynolds de líquido ( $100 < Re_L < 1000$ ) los números de Peclet para ambos sistemas se hacen comparables y alcanzan un valor asintótico de aproximadamente dos.

En forma análoga a la retención del líquido, el Peclet de la fase líquida ha sido correlacionado en función del Reynolds del líquido y el número de Galileo del líquido. Varios autores señalaron la baja influencia del número de Reynolds de la fase gaseosa sobre el Peclet del líquido (Hochman y Effron, 1969; Schwartz y Roberts, 1973).

Es importante destacar que el modelo de dispersión axial no contempla la existencia de zonas estancas que causan pronunciadas colas en las experiencias con trazadores, especialmente cuando se emplean sólidos catalizadores porosos como relleno. Schiesser y Lapidus (1961) mostraron el efecto de la porosidad del lecho sobre las curvas de DTR y por lo tanto sobre el coeficiente de dispersión axial.

Van Swaaij y col. (1969) observaron que la dispersión axial del líquido depende de la relación entre la retención diná-

mica y la retención estática del líquido ( $h_{dL}/h_{sL}$ ) cuando ésta tiene valores menores que ocho (Figura III-7). Esta dependencia fue estudiada empleando rellenos poco mojables obtenidos por tratamientos con aceites siliconados; se lograba de esta manera disminuir apreciablemente la retención estática del líquido. Comparando las curvas de DTR obtenidas empleando estos rellenos con aquellas que resultan de utilizar rellenos mojables, pudo observarse la influencia de las zonas estancas sobre la dispersión; para rellenos no mojables las curvas de DTR eran considerablemente más simétricas y con mucho menos cola. En consecuencia, los valores de Peclet se veían fuertemente incrementados, en especial, a bajos caudales; en estas condiciones la transferencia de materia entre regiones estancas y móviles del líquido es muy lenta y resulta ser la principal causa de la dispersión de las curvas de DTR. Para números de  $Re_L$  mayores, los valores de Peclet resultan similares para ambos rellenos y se considera que la dispersión en las curvas de DTR es causada por mecanismos similares a los que se producen en flujo monofásico a través de un relleno. Estos son de menor complejidad y comprenden la separación de las líneas de flujo por las partículas y mezclado en las cavidades entre las mismas.

Este efecto de mezclado en las regiones estancas dio lugar a la aplicación de modelos que consideraban la presencia de las

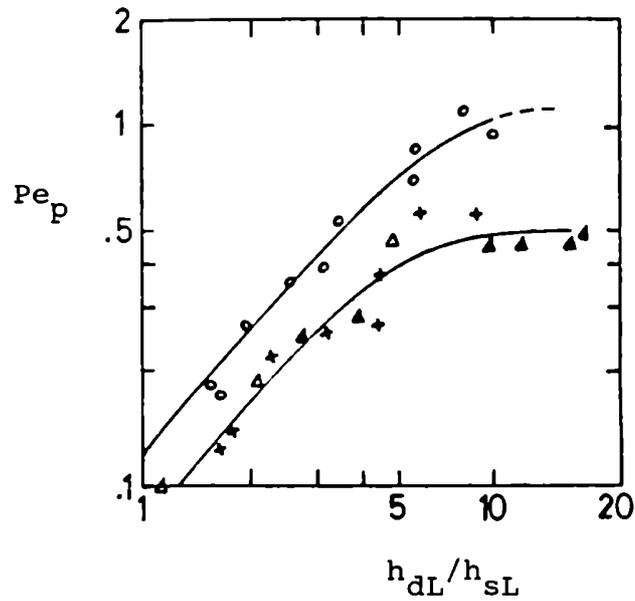


Figura III-7: Dispersión axial como función de la relación de retención dinámica a retención estática de líquido (van Swaaij y col., 1969)

- : anillos Raschig,  $d_p = 2,2$  cm, mojables
  - + : anillos Raschig,  $d_p = 0,64$  cm, mojables
  - △ : anillos Raschig,  $d_p = 1,03$  cm, mojables
  - ▲ : anillos Raschig,  $d_p = 1,03$  cm, no mojables
- diámetro interno de la columna : 10 cm

mismas. El modelo de flujo cruzado postula la presencia de zonas estancas que intercambian materia con la fracción dinámica del líquido. Numerosos autores (Hoogendorn y Lips, 1965; Hochman y Effron, 1969) muestran en sus trabajos un mejor ajuste de las curvas de DTR al aplicar este modelo. Por lo tanto se consigue describir en forma más realista los procesos que dan lugar al mezclado dentro del reactor.

Asimismo, se han hecho varias modificaciones a este modelo. Entre ellas puede citarse la de Van Swaaij y col. (1969) que supone dispersión axial en la fase móvil de líquido y la de Kin-Mun Kan y Greenfield (1983) que supone un perfil de concentraciones en las zonas estancas. Sin embargo, a pesar de llegar a una descripción más realista del flujo con este tipo de modelos, no se ha descalificado el uso del modelo de dispersión axial, especialmente en el diseño de reactores de escala comercial, en los que el retromezclado es relativamente pequeño y puede suponerse válido un mecanismo dispersivo similar al que ocurre en el flujo monofásico (Specchia y col., 1969). La principal ventaja del modelo de dispersión axial es su simplicidad y por ello en muchos trabajos se sigue describiendo el flujo en los reactores de lecho mojado mediante este modelo. En general se afirma que mediante su aplicación se llega a resultados más conservativos en la predicción del ren-

dimiento del reactor que aplicando modelos más complejos (Schwartz y Roberts, 1973).

### III.2.2. Antecedentes bibliográficos

Hoogendorn y Lips (1965) estudiaron el comportamiento fluidodinámico de la fase líquida en un equipo de escala industrial de 40 cm de diámetro, relleno con anillos Raschig de 1,27 cm, para el sistema aire-agua y que operaba en régimen de burbuja y flujo continuo de gas. Para ello emplearon la técnica de estímulo-respuesta inyectando un pulso de trazador.

A partir de los momentos de las curvas de DTR determinaron los números de Peclet y estudiaron la influencia del número de Reynolds del líquido y de los distribuidores del líquido y gas sobre dichos parámetros. En flujo continuo de gas, las curvas de DTR presentaban colas pronunciadas; las mismas se atribuyeron a la retención estática del líquido y en base a ésta justificaron la aplicación del modelo de flujo cruzado. Los parámetros característicos del mismo se calcularon a partir de los momentos de la curva, obteniéndose una buena concordancia entre las curvas experimentales y las que resultan a partir del modelo. Sin embargo, en este trabajo no se lleva a cabo un análisis detallado de la influencia de

las variables operativas sobre los parámetros calculados.

Hochman y Effron (1969) estudiaron la fluidodinámica en las dos fases de un lecho mojado en régimen continuo de gas. El mismo consistía en una columna de 15 cm de diámetro. El sistema de fluidos empleado era metanol-nitrógeno, utilizándose como trazadores helio y KSCN para las fases gaseosas y líquida, respectivamente. Las señales de trazador en el líquido se analizaron por conductividad eléctrica, mientras que las señales en el gas se analizaron por conductividad térmica. Las sondas de conductividad eléctrica se construyeron de forma tal de simular la geometría del relleno y se ubicaron en dos posiciones distintas, aguas abajo del punto de inyección. Esto permitía conocer la forma de la señal de entrada a la sección de pruebas, definida por la distancia entre las dos sondas (200 cm). Los caudales máximos empleados fueron de 11,3 l/min de metanol y 92,2 l/min de nitrógeno.

Se ajustaron las curvas de DTR obtenidas para la fase gaseosa con el modelo de dispersión axial. Se estudió la influencia de los números de Re de ambas fases sobre el número de Peclet de la fase gaseosa obteniéndose la siguiente correlación:

$$Pe_G = 1,8 Re_G^{-0,7} 10^{-0,005 Re_L} \quad \begin{matrix} 4 \leq Re_G \leq 37 \\ 0 \leq Re_L \leq 100 \end{matrix} \quad \text{III-15}$$

Para la fase líquida el ajuste se llevó a cabo con el

///

modelo de dispersión axial y con el modelo de flujo cruzado. Se estudió también la influencia de los números de Re de ambas fases sobre los parámetros característicos de ambos modelos, y se encontraron las siguientes correlaciones:

Modelo de dispersión axial:

$$Pe_L = 0,034 Re_L^{0,5} 10^{0,003 Re_G} \quad \begin{array}{l} 4 \leq Re_L \leq 100 \\ 0 \leq Re_G \leq 37 \end{array} \quad \text{III-16}$$

Modelo de flujo cruzado:

$$\emptyset = 0,52 Re_L^{0,080} 10^{0,001 Re_G} \quad \text{III-17}$$

$$k = 0,010 Re_L^{0,6} \quad [k]=s^{-1} \quad \text{III-18}$$

Michell y Furzer (1972) estudiaron el mezclado axial en un reactor de lecho mojado y los describieron mediante el modelo de dispersión. Emplearon un lecho de 150 cm de longitud y 5 cm de diámetro, relleno con anillos Raschig de 0,64 cm. Como fluidos se utilizó el sistema aire-agua. Las curvas de DTR se obtuvieron mediante la inyección de un pulso de trazador al que consideraron como función delta de Dirac. El ajuste del modelo de flujo se realizó mediante: a) método de los momentos y b) minimizando la fun-

///

ción diferencia entre la curva experimental y la del modelo en el dominio del tiempo. En el primer método se observaron desviaciones del 33% en los parámetros, obtenidos en iguales condiciones operativas, mientras que en el segundo caso estas desviaciones eran del 5%. Estos autores publicaron varias correlaciones que tienen en cuenta la dependencia del número de Peclet del líquido con el número de Re y el número de Galileo. Se puede citar:

$$Pe_p = 4,3 (Re_L/h_{dL})^{0,5} Ga_L^{-1/3} \quad \text{III-19}$$

Otra correlación publicada por estos autores es:

$$Pe'_p = 1,00 (Re'_L)^{0,7} Ga_L^{-0,32} \text{ con } 50 < Re'_L < 8000 \quad \text{III-20}$$

Tanto el  $Pe'_p$  y  $Re'_L$  están definidos en función de la velocidad intersticial del líquido.

Schwartz y Dudukovic (1976) emplearon las técnicas de estímulo-respuesta para determinar la eficiencia de contacto del relleno y retención de líquido en un reactor de lecho mojado. Las experiencias se llevaron a cabo en un lecho relleno de 30 cm de longitud y 1,35 cm de diámetro. El relleno eran partículas porosas y no porosas de 0,06 cm de diámetro. Para determinar la reten-

ción de líquido emplearon un trazador que no era adsorbido por el relleno. Sin embargo, para determinar la eficiencia de contacto realizaron experiencias con trazadores adsorbibles.

Colombo y col. (1976) determinaron el mojado interno y la difusividad en partículas porosas como función de la velocidad de flujo de líquido en un reactor de lecho mojado. Las experiencias se realizaron en una columna de 3 cm de diámetro interno y una altura de relleno de 100 cm. Se emplearon dos trazadores: uno no adsorbible, KCl (3M), y otro adsorbible por el relleno, ZnSO<sub>4</sub> (2,5M). Como señal se inyectó un escalón decreciente. Señalaron como causas de error del método las debidas a la cola en la curva de respuesta; sin embargo justificaron su aplicación ya que sólo usaron los momentos de orden cero y uno, en los que dicha zona de la curva no ejerce demasiado peso.

Buffham y Rathor (1978) investigaron el efecto de la viscosidad sobre el coeficiente de dispersión axial del líquido en un lecho mojado. Para ello variaron la viscosidad entre 1,0 cp y 7,5 cp pero observaron que la misma ejercía poca influencia sobre el coeficiente de dispersión axial. Correlacionaron el  $Pe_p$  como una función del número de Froude según:

$$Pe_p = 0,45 Fr_L^{0,27}$$

III-21

///

donde

$$Fr_L = \frac{U_{OL}^2}{d_p g} = Re_L^2 Ga_L^{-1}$$

$U_{OL}$ : velocidad superficial del líquido

La dependencia del  $Pe_p$  con el  $Re_L$  y el  $Ga_L$  concuerda bien con las correlaciones previamente publicadas por Hochman y Effron (1969) y Michell y Furzer (1972).

Kobayashi y col. (1979) estudiaron el efecto de las propiedades físicas de la fase líquida sobre las características del flujo en los reactores de lecho mojado. Se empleó un reactor de 2,6 cm de diámetro y 300 cm de longitud. Los rellenos utilizados eran esferas de 0,22 y 0,37 cm de diámetro. Como fase líquida emplearon agua y soluciones de glicerina de distinta concentración, variando la viscosidad entre 1,0 cp y 6,4 cp. Encontraron que el caudal del líquido para el cual el sistema cambiaba de régimen continuo de gas a pulsante era fuertemente dependiente de la viscosidad. A medida que ésta aumentaba, dicho caudal disminuía. A partir de las curvas de DTR calcularon la retención de líquido y el número de Peclet; ambos fueron correlacionados en función de los números de Re y Ga del líquido. Las expresiones obtenidas para el régimen continuo de gas son:

///

$$h_{dL} = 6,3 \cdot 10^2 \operatorname{Re}_L \operatorname{Ga}_L^{-1} \cdot 10^{-1,4} \cdot 10^{-3} \operatorname{Re}_G \quad \text{III-22}$$

$$5 \leq \operatorname{Re}_L \leq 200$$

y

$$\operatorname{Pe}_L = 60 \operatorname{Re}_L'''^{0,63} \operatorname{Ga}_L^{-0,73} \quad \text{III-23}$$

definiendo

$$\operatorname{Re}_L''' = \frac{U_{OL} \rho_L d_p}{\mu_L h_{dL} \left(1 - \frac{4d_p}{6d_t} (1 - \epsilon_B)\right)}$$

Como puede observarse, en la correlación de  $\operatorname{Pe}_L$  existe una fuerte dependencia con la viscosidad del líquido. Asimismo, esta correlación indica que para un cierto valor del  $\operatorname{Re}_L$ , el  $\operatorname{Pe}_L$  depende fuertemente del tamaño de partícula. En régimen de alta interacción, estos autores encontraron que el  $\operatorname{Pe}_L$  se hace similar al que se obtiene en flujo de una sola fase.

Lerou y col. (1980) estudiaron la dispersión axial en la fase líquida con el reactor funcionando en régimen pulsante. El equipo experimental consistía en una columna de acrílico de 6,3 cm de diámetro interno, rellena con esferas de vidrio de 0,26 cm de diámetro. La longitud total del lecho era de 177 cm. Como fluidos emplearon el sistema aire-agua. Las curvas de DTR se determinaron inyectando pulsos de solución de KCl (1N) a través de una aguja hipodérmica en el centro de la columna y a 10 cm por debajo del tope del relleno. El análisis de las respuestas se realizó por con-

ductividad eléctrica en cuatro posiciones axiales diferentes. Como celdas de conductividad se usaron pares de alambre de cobre cuyos extremos no estaban aislados. Estos autores explican el comportamiento fluidodinámico del reactor mediante un modelo que divide la fase líquida en dos fracciones: una desplazándose a mayor velocidad que la otra con intercambio de materia entre ambas. Presentan los resultados obtenidos como gráficos de las varianzas de las curvas de DTR en función de la velocidad superficial de líquido y explican las características de los mismos en función de los parámetros del modelo. No calculan ni correlacionan estos parámetros en función de las variables de operación. Concluyen que en este tipo de régimen la dispersión axial es mucho menor que en el régimen de flujo continuo de gas.

Sicardi y col. (1980) estudiaron el efecto que tiene el método de tratamiento estadístico de las curvas de DTR sobre los parámetros que caracterizan a los modelos de flujo cruzado y de flujo cruzado con dispersión axial (PDE). Los métodos de evaluación de parámetros utilizados fueron el método de los momentos y el método de los cuadrados mínimos. Se observó una gran sensibilidad de los parámetros característicos con la forma de evaluación. Las experiencias se llevaron a cabo con dos trazadores de diferente difusividad. No se observó diferencia significativa en los valores de los parámetros. El equipo utilizado es idéntico al de Colombo

y col. (1976), empleando cilindros no porosos como relleno. Asimismo se analizó la sensibilidad de cada parámetro frente al método de evaluación para diferentes rangos de las variables operativas.

Mills y Dudukovic (1981) estudiaron la fracción mojada externa y la retención dinámica de líquido en un lecho relleno que opera en régimen continuo de gas. Se desarrolló una correlación que describe el comportamiento de estos parámetros en función de una señal de trazador. Se usó un trazador no adsorbible, en el caso de determinar la eficiencia de mojado externo, y uno adsorbible, en el caso de estudiar el mojado interno. Se empleó un equipo de laboratorio que consistía básicamente en un reactor de vidrio (1,35 cm de diámetro y 40 cm de longitud), utilizando como relleno alúmina porosa con un diámetro de partícula medio de 0,072 cm. Como fluidos se emplearon helio y exano. Los trazadores utilizados eran diversos compuestos orgánicos y sus concentraciones se analizaban mediante un refractómetro. Se trabajó con los siguientes caudales máxicos superficiales:

$$\text{fase líquida: } 0,146 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < L_M < 3,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{fase gaseosa: } 1,190 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < G_M < 1,98 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Se llevaron a cabo experiencias en régimen continuo de gas con el

///

relleno inundado y se estableció la distorsión introducida en el sistema debido a las secciones de entrada y salida. A partir de las mediciones en el lecho totalmente inundado se calcularon los coeficientes de difusividad reales en la partícula catalítica. Luego, en los ensayos en régimen continuo de gas, se determinó la efectividad del mojado.

Tosun (1982) estudió la influencia de la velocidad de flujo de gas sobre la dispersión axial en un lecho mojado. A tal efecto se empleó una columna de 5 cm de diámetro y 90 cm de altura. El relleno era de 0,2 cm de diámetro y el sistema de fluidos era agua-aire. Como trazador se inyectó una solución de 0,2% de NaCl en forma de pulso, tratando de simular una función delta de Dirac. La respuesta se analizó mediante celdas de conductividad eléctrica. Se realizaron sucesivas corridas con distintos caudales de líquido y aumentando para cada uno de ellos el caudal de gas, de manera de cubrir los regímenes de flujo desde fase gaseosa continua hasta régimen pulsante. Así se observó una cierta dependencia del  $Pe_p$  con el caudal de gas. Sin embargo, ésta no era una función continua sino creciente en algunas regiones y decreciente en otras por lo que no pudo establecerse ninguna correlación.

Más recientemente, Herskowitz y Smith (1983) presentaron una recopilación de publicaciones cuyo enfoque está dirigido a la

///

determinación de factores de efectividad en lechos catalíticos con régimen continuo de gas. Se citan correlaciones que permiten estimar las retenciones de los fluidos y la pérdida de carga en el lecho en función de las variables de operación. Asimismo, correlacionan el  $Pe_p$  en función de grupos adimensionales que involucran las diversas variables del sistema.

Kin-Mun Kan y Greenfield (1983) modificaron el modelo de flujo cruzado. Suponen que los compartimientos estancos no están perfectamente mezclados y postulan un perfil de concentraciones dentro de los mismos. El mezclado dentro de estas zonas está relacionado a un parámetro  $E_z$  que tiende a la difusión molecular de una de las especies, si este es el mecanismo que predomina, y tiende a infinito, si están totalmente mezclados. La porción de líquido en movimiento se supone en flujo pistón. Esto da lugar a un modelo de tres parámetros:  $h_T$ , la retención total del líquido,  $\emptyset$ , la fracción de retención dinámica de líquido ( $h_{dL}/h_T$ ) y  $S_g$ , un parámetro que contiene  $E_z$  (ver más adelante). Emplearon como reactor una columna de 2,5 cm de diámetro interno y variaron la longitud entre 50 y 80 cm. Como relleno se emplearon esferas de vidrio de 0,05 cm y 0,1 cm de diámetro. Trabajaron con el sistema aire-agua variando los respectivos números de Reynolds entre:

$$6 \leq Re_G \leq 100$$

$$0,5 \leq Re_L \leq 10$$

///

Analizaron la influencia de estas variables sobre los parámetros del modelo postulado. A partir de los resultados obtenidos correlacionaron la retención total según la siguiente expresión:

$$h_{TL} = 8,5 \text{ Re}_L^{0,15} \text{ Re}_G^{-0,25} \text{ Re}_{G_{\max}}^{0,014} \quad \text{III-24}$$

donde  $\text{Re}_{G_{\max}}$  es el máximo número de Reynolds de partícula de la fase gaseosa. Asimismo observaron que el parámetro  $\phi$  es independiente de las variaciones de flujo de la fase líquida y gaseosa y establecieron para el mismo un valor de 0,73. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Matsuura y col. (1976) (0,75 a 0,90) y con Hochman y Effron (1969) (0,65 a 0,85), aunque estos últimos observaron cierta dependencia con las velocidades de los flujos.

Respecto del parámetro  $S_g$ , encontraron que éste era independiente de la difusividad molecular de los diferentes trazadores empleados. Por lo tanto, concluyeron que la contribución de la difusión molecular al mezclado en las zonas estancas puede despreciarse.

### III.3. Parte Experimental

De acuerdo a los objetivos planteados, el trabajo se di-

///

vidió en cuatro etapas:

1. diseño y construcción de un equipo de escala laboratorio que permitía inyectar una señal pulso en un reactor de lecho mojado y analizar el mismo a la salida.
2. obtención de las curvas de DTR para diferentes condiciones de operación del reactor.
3. cálculo de los parámetros característicos de los modelos de flujo empleados para el ajuste de las curvas de DTR.
4. correlación de los parámetros obtenidos en 3. en función de las variables operativas.

El diseño del equipo se realizó en base a la información recopilada de la bibliografía. Asimismo, para el dimensionamiento del reactor se tuvieron en cuenta las relaciones de longitud de lecho a diámetro de partícula y de diámetro de lecho a diámetro de partícula, que deben cumplirse a fin de poder desprejar, en el primer caso, los efectos de entrada y salida, y en el segundo, poder suponer un perfil uniforme de velocidad.

Los caudales a emplear se definieron en base a los mapas de flujo (Fig. III.1.) de manera que el sistema operase en régimen de flujo continuo de gas. En base a esto se dimensionó el sistema de regulación y medición de caudales.

///

### III.3.1. Descripción del equipo

El mismo se componía básicamente de las siguientes partes:

1. reactor de lecho mojado
2. sistema de inyección del trazador
3. sistema de análisis del trazador
4. sistema de suministro de los fluidos
5. sistema de regulación y medición de los caudales

En la Figura III-8 se presenta el diagrama de flujo del equipo.

#### III.3.1.1. Reactor de lecho mojado

Se construyó en acrílico y sus dimensiones se detallan en la Tabla III.1.

Tabla III-1

Diámetro interno	:	70 mm
Longitud total	:	240 cm
Longitud del relleno	:	180 cm
Longitud del tramo de pruebas	:	120,5 cm

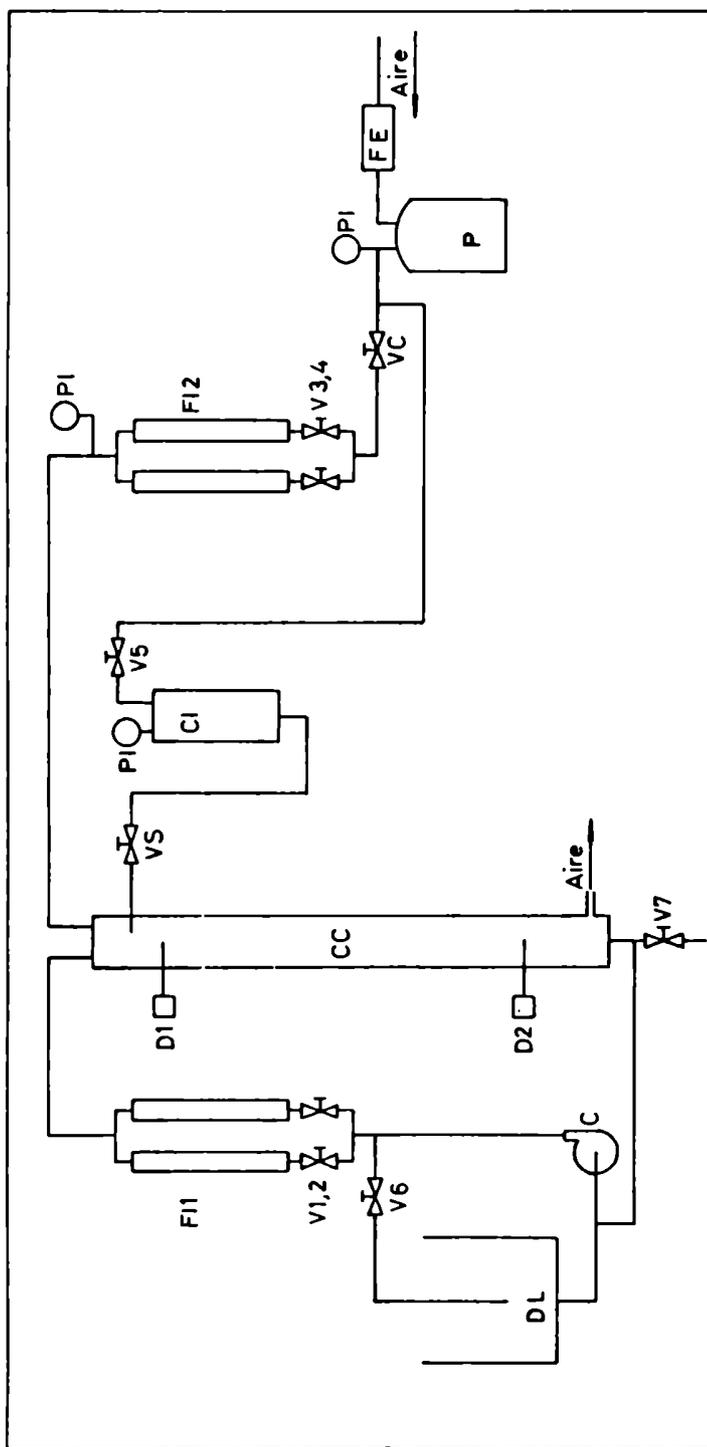


Figura III-8: Diagrama de flujo del equipo

- |       |                           |      |                       |    |                |
|-------|---------------------------|------|-----------------------|----|----------------|
| C     | : bomba centrífuga        | FI2  | : caudalímetro de gas | VC | : válvula con- |
| CC    | : columna rellena         | FE   | : filtro              |    | troladora de   |
| CI    | : cilindro con trazador   | P    | : pulmón              |    | gas            |
| D 1,2 | : detectores              | PI   | : manómetros          |    |                |
| DL    | : depósito de líquido     | V(i) | : válvulas si/no      |    |                |
| FI1   | : caudalímetro de líquido | VS   | : válvula solenoide   |    |                |

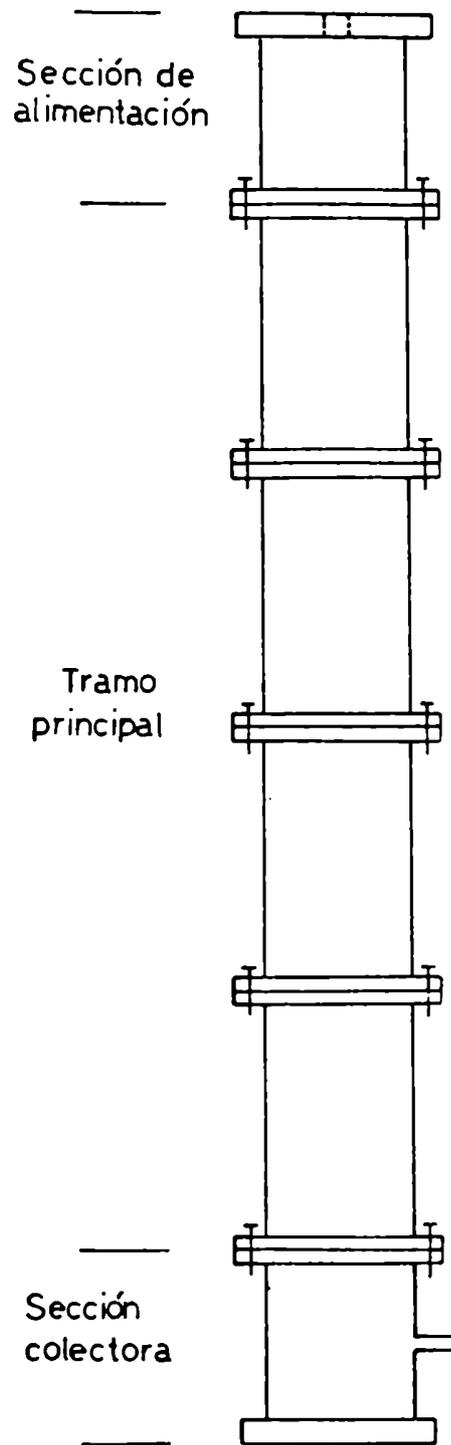


Figura III-9: Esquema del reactor

Un esquema del mismo se presenta en la Figura III-9. Como puede observarse, está formado por diferentes secciones, las que se unen mediante encastrados macho-hembra y bridas atornilladas en los extremos. En la sección superior se ubicó el distribuidor de alimentación del líquido y la alimentación del gas.

El distribuidor de líquido se construyó en acrílico. Sus características geométricas se detallan en la Figura III-10. En la base del mismo se realizaron ocho perforaciones de 1 mm de diámetro. Para obtener una buena distribución de líquido sobre el relleno es necesario que haya una pérdida de carga pronunciada en el distribuidor.

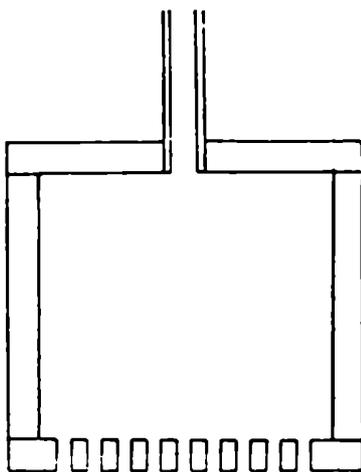


Figura III-10: Distribuidor de líquido

En la sección inferior se colocó una placa perforada

///

transversal de acero inoxidable, que actúa como soporte del relleno, dejando pasar además a ambos fluidos. Los mismos son separados en esta sección; el gas se ventea y el líquido fluye a un depósito desde el cual vuelve a ser alimentado al reactor.

En las secciones intermedias se encuentra el relleno del lecho. Se emplearon dos tipos de relleno: esferas y cilindros, ambos de 0,5 cm de diámetro. Se trabajó así con una relación de diámetro de tubo a diámetro de partícula de 14.

#### III.3.1.2. Sistema de inyección del trazador

La inyección se realizaba mediante una aguja hipodérmica ubicada en el centro de la columna, a 10 cm por debajo del tope del relleno.

El trazador empleado era una solución de KCl (1N) que se suministraba desde un recipiente presurizado a través de una válvula solenoide comandada por un timer. La presión dentro del recipiente se controlaba mediante un presostato (FR67).

#### III.3.1.3. Sistema de análisis del trazador

El análisis de la respuesta del sistema al pulso del

trazador se realizó por conductividad eléctrica, ubicando las sondas de detección en dos puntos dentro del lecho del reactor. La primera se ubicó a 20 cm y la segunda a 140,5 cm aguas abajo del punto de inyección. Esto define una longitud del tramo de pruebas de 120,5 cm.

Las sondas de conductividad eléctrica se esquematizan en la Fig. III-11.

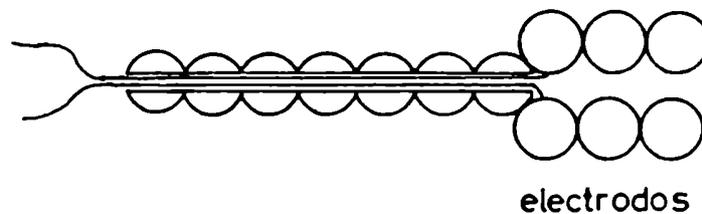


Figura III-11: Sonda de detección

Como puede observarse en esta figura se trató de simular la geometría del relleno y así introducir la menor perturbación en las líneas de flujo. Cada sonda estaba formada por dos partes: una formada por bolillas de latón niqueladas y la otra por bolillas de plástico. La primera constituía los electrodos de la celda de conductividad y la segunda alojaba los cables conectados a dichos electrodos. La zona de electrodos se ubicó en el eje de la columna. La

conductividad en las celdas se midió en forma continua con un conductímetro de dos canales. Cada canal estaba compuesto por un puente de Wheatstone que operaba a 1 KHz, y un filtro variable. Este sistema permitía minimizar los efectos de polarización eléctrica en los electrodos de las celdas y además reducir los pulsos de las señales obtenidas, provocados por las variaciones de la masa de líquido en el espacio entre electrodos.

Además, el conductímetro transformaba las señales de conductividad de las sondas en una diferencia de potencial, la cual se graficaba en un registrador potenciométrico de dos canales (Houston Super Scribe<sup>TM</sup> series 4900).

#### III.3.1.4. Sistema de alimentación

Fase líquida: El líquido era impulsado por una bomba centrífuga desde un depósito de 100 litros de capacidad hacia el tope de la columna. Según cálculos estimativos de pérdida de carga en el equipo, para obtener un caudal máximo de aproximadamente 15 l/min de líquido con un caudal de 50 l/min de gas se requería una potencia nominal de 1/8 HP. El cuerpo de la bomba era de polipropileno y el rotor de neopreno con eje de acero inoxidable. Estos materiales se eligieron debido a las propiedades corrosivas de

las soluciones de KCl sobre los materiales de acero común.

Fase gaseosa: El aire era provisto por un compresor. A fin de amortiguar las variaciones bruscas de presión se ubicó un pulmón de 15 l en la línea de flujo de gas. El funcionamiento intermitente del compresor hacía que la presión de trabajo varíe entre 3 y 6 atm; esta variación se controlaba con un regulador de presión Matheson N° 70.

#### III.3.1.5. Sistema de regulación y medición de caudales

Fase líquida: el caudal de esta fase se regulaba mediante una corriente de bypass. Tanto en la línea principal como en la línea de retorno del líquido al depósito se colocaron sendas válvulas aguja. Se lograba así constancia en todo el rango de caudales empleados, verificada por la línea de base en el registrador.

El sistema de medición de caudales consistía en dos flotámetros que podían ser conectados alternativamente mediante válvulas esféricas. Se cubría así un rango de caudales de 0,1-6,0 l/min de agua. Para trabajar con caudales mayores se instaló un tubo venturi con mercurio como líquido manométrico. Todos los elementos de medida debían ser calibrados para cada líquido empleado.

Fase gaseosa: el flujo de esta fase se regulaba con una

///

válvula caudalostática del tipo Moore 63 BUL que se alimentaba con la corriente de aire, a presión constante, proveniente del regulador de presión antes descripto. El caudal se midió con un tubo Venturi con  $\text{Cl}_4\text{C}$  como líquido manométrico, que permitía cubrir un rango de caudales entre 1 y 30 l/min de aire a 0,10 Bar de presión relativa.

### III.3.2. Condiciones de operación

En todos los ensayos realizados se trabajó en condiciones de régimen continuo de gas y flujo laminar de la fase líquida.

La viscosidad del líquido se modificó en el rango de 1 a 5 cp empleando soluciones de azúcar de distinta concentración. Se utilizó azúcar ya que sus soluciones presentan comportamiento Newtoniano y además sus conductividades eléctricas se mantienen en valores muy bajos. La formación de hongos se evitó mediante el agregado de una pequeña cantidad de p-metilbenzoato de metilo.

La viscosidad de las soluciones se determinó por el método de escurrimiento a través de un capilar; se empleó un viscosímetro Ubbelohde 200 termostatzado a la temperatura de trabajo. Esta fue de 17°C.

Las densidades de las soluciones se determinaron con

///

una balanza de Mohr. El cálculo de las viscosidades absolutas se describe en el Apéndice A2. Asimismo, se midió la tensión superficial de cada solución con un tensiómetro de Du Nouy. Las propiedades de las soluciones se presentan en la Tabla III-2.

Tabla III-2

Constantes físicas de las soluciones empleadas (17°C)

Solución	$\mu$ (cp)	$\delta$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\xi$ (dina/cm)
1	1,00	1,00	73
2	2,70	1,12	48
3	5,00	1,17	48

En la Tabla III-3 se exponen los rangos de caudales empleados con los distintos líquidos. Estos rangos se estimaron a partir del mapa de flujos, publicado por Tosun (1984), Figura III-1 pues se desea trabajar en régimen continuo de gas.

Tabla III-3

Rango de caudales empleado con cada solución

Solución	$\mu$ (cp)	$F_v$ (mín)	$F_v$ (máx)
1	1,00	300 ml/min	1800 ml/min
2	2,70	67 "	740 "
3	5,00	81 "	225

Puede observarse que el límite máximo de caudal de líquido va disminuyendo a medida que la viscosidad aumenta. En consecuencia, el valor máximo de viscosidad queda determinado por la capacidad de las válvulas aguja de regular adecuadamente caudales muy bajos. Así, para una solución de 7,5 cp, no podía obtenerse constancia de caudal.

El caudal gaseoso se mantuvo constante para todas las experiencias. El valor del mismo se fijó de manera de evitar la inundación del relleno con el máximo caudal de líquido empleado (aproximadamente 10 l/min de aire).

Según bibliografía (Hochman y Efron, 1969; Michell y Furzer, 1972; Schwartz y col., 1976) la fase gaseosa no ejerce mayor influencia sobre el comportamiento de la fase líquida en el régimen de flujo empleado en el presente trabajo. En consecuencia no se varió el caudal de dicha fase.

La presión de trabajo en el reactor era función de los caudales y tomaba valores de 1,10 Bar en el tope de la columna para los caudales máximos y presión atmosférica en la base de la misma.

### III.3.3. Modo de operación

El equipo se operaba de la siguiente forma:

///

Inicialmente se alimentaban caudales de líquido y gas superiores a los estimados a partir de los mapas de flujo (Tosun, 1984) para que el equipo opere en régimen continuo de gas. En caso de emplear agua como fase líquida se establecía el caudal en 2 l/min, mientras que con las soluciones de mayor viscosidad se los establecía en aproximadamente 0,8 l/min. El caudal gaseoso se fijaba en aproximadamente 10 l/min. Se dejaba funcionar el equipo en estas condiciones durante media hora para alcanzar un mojado adecuado en el relleno. Una vez transcurrido ese primer período se reducía el caudal de líquido y se lo llevaba al valor máximo del rango de caudales a emplear en las mediciones.

Esta forma de operar el equipo permitía alcanzar el estado estacionario en un tiempo considerablemente menor. Se consideraba que el equipo funcionaba en estado estacionario cuando en el registrador se observaba una línea de base sin oscilaciones para ambas sondas de detección. Sólo en régimen de flujo continuo de gas es posible observar esta constancia en la línea de base. Esto se debe a que el líquido escurre por el relleno a través de pequeños canales prácticamente sin variar su recorrido en el tiempo. En consecuencia la superficie mojada de los electrodos (sondas) se mantiene constante y por lo tanto se mantiene la constante de cada celda. Si no varía la conductividad de la solución, la señal

///

de la celda permanece constante y en el registrador se observa una línea sin oscilaciones. En estas condiciones es posible detectar las señales sin tener que filtrarlas para eliminar los posibles ruidos. La sensibilidad del registrador se elige en función de la magnitud de la señal inyectada, de manera que el máximo de la curva de respuesta sea prácticamente igual al máximo de escala del registrador. La velocidad de carta se eligió de forma tal que el frente de la curva tenga una inclinación de aproximadamente  $45^\circ$ . Cada medición se realizó por cuadruplicado.

La cota inferior del caudal de líquido estaba determinada por la capacidad de regulación de las válvulas aguja. La presión en el recipiente que contenía al trazador era ligeramente superior a la presión en el tope de la columna. El tiempo de apertura de la válvula solenoide se estableció en 0,1 seg. Haciendo diversos ensayos se vio que la señal inyectada no mostraba sensibilidad a variaciones del tiempo de apertura de la válvula, pero sí se detectó una considerable sensibilidad a las variaciones de presión de dicho recipiente.

#### III.4. Resultados obtenidos y su análisis

A partir de las curvas de DTR obtenidas para las distin-

///

tas condiciones operativas se calculó la retención de líquido del sistema y se caracterizó el comportamiento fluidodinámico del reactor mediante los modelos de dispersión axial y de flujo cruzado. Se calcularon los parámetros característicos de cada modelo y se los correlacionó en función de las variables operativas.

#### III.4.1. Retención de la fase líquida

Trabajando en las condiciones operativas descritas en III.3.2., se calcularon las retenciones de la fase líquida a partir de los tiempos medios de las curvas de DTR según la ecuación

$$h_{TL} = \frac{t_m F_v}{V}$$

$t_m$  : tiempo medio de residencia en el tramo de pruebas

$F_v$  : caudal volumétrico del líquido

$V$  : volumen total en el tramo de pruebas

En la Figura III-12 se representaron los valores de retención total en función del número de Reynolds con la viscosidad como parámetro. Se observa que para una dada viscosidad la reten-

///

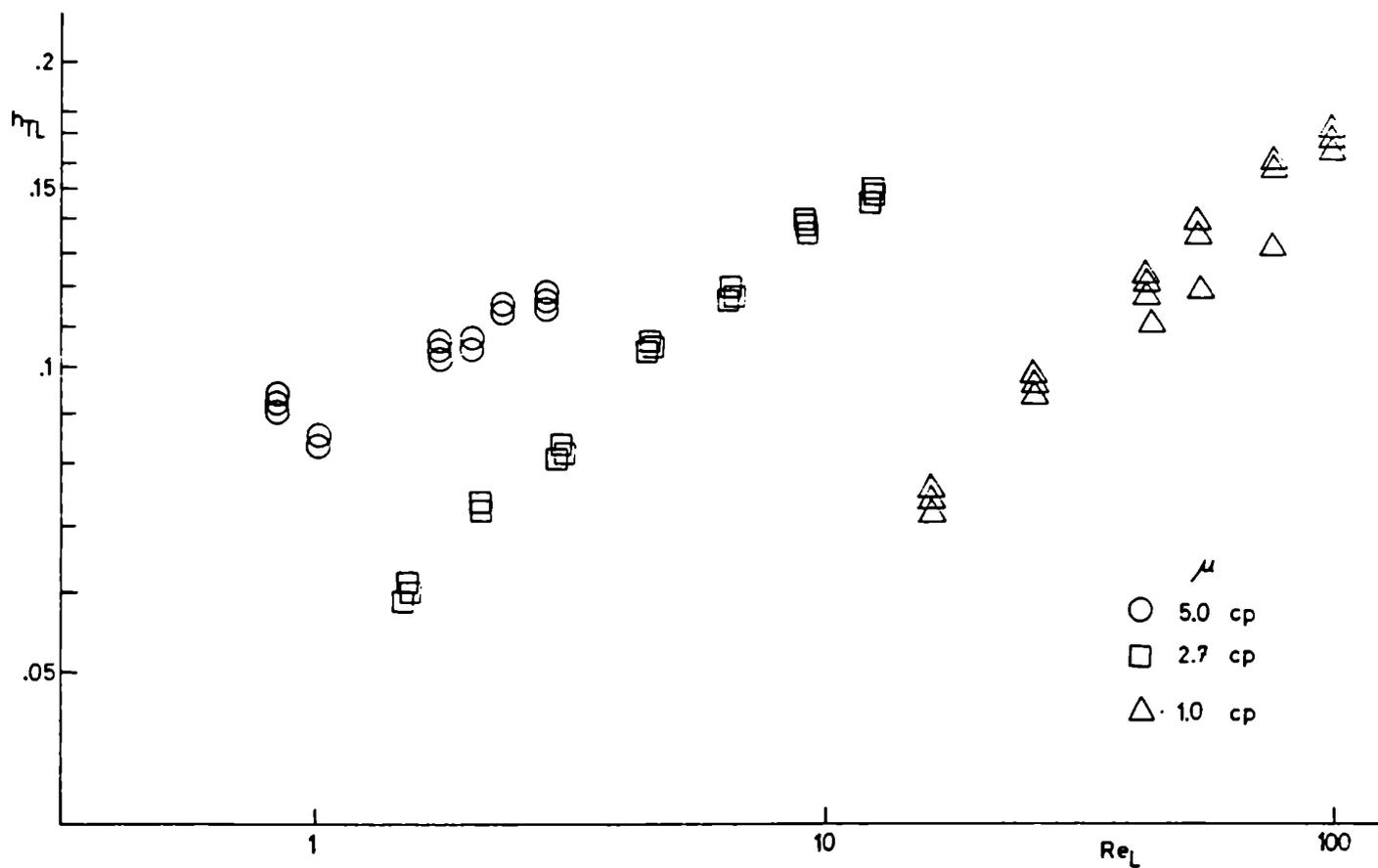


Figura III-12: Retención total de líquido en función del número de Reynolds del líquido

tención crece con el  $Re_L$ . Además, a igual  $Re_L$  la retención aumenta con la viscosidad.

Como se explicó en la Sección III.1.3 y según la ecuación III-1 se cumple que:

$$h_{TL} = h_{dL} + h_{sL}$$

en donde  $h_{dL}$  es función de la velocidad del líquido, como también de sus propiedades físicas, mientras  $h_{sL}$  es función del tipo de relleno, la porosidad y la tensión superficial. Los valores de  $h_{sL}$  se calcularon para cada tipo de relleno a partir de los valores del parámetro  $\emptyset$  del modelo de flujo cruzado (Sección III.4.3) realizando una regresión lineal, sobre la ecuación:

$$\emptyset = 1 - \frac{h_{sL}}{h_{TL}}$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:

esferas	$h_{sL} : 0,030 \pm 0,004$
cilindros	$h_{sL} : 0,038 \pm 0,004$

No se observó una dependencia significativa con la vis-

cosidad del líquido.

A continuación, se obtuvieron los valores de  $h_{dL}$  a partir de la ecuación III-1 y se correlacionaron con el  $Re_L$  y el  $Ga_L$ . La correlación obtenida para  $h_{dL}$  es la siguiente:

$$h_{dL} = 26,3 Re_L^{0,58} Ga_L^{-0,56} \quad \begin{array}{l} 0,8 < Re_L < 150 \\ 0,67 \times 10^5 < Ga_L < 1,3 \times 10^6 \end{array} \quad \text{III-25}$$

siendo los errores de los coeficientes respectivamente:

$$\sigma_\alpha = 6,8 \quad \sigma_\beta = 0,015 \quad \sigma_\gamma = 0,02$$

El error de la correlación es del 13% (Fig. III-13). Los coeficientes de esta correlación se calcularon mediante un método de regresión pseudo-no lineal (Friedlander y Lemcoff, 1981). No fue posible realizar experiencias en un rango más amplio de las variables debido a que el sistema dejaba de operar en régimen de fase gaseosa continua.

A fin de analizar el efecto de la tensión superficial sobre la retención, se introdujo la misma como parámetro en el cálculo de regresión. Se obtuvo la siguiente expresión:

$$h_{dL} = 38,5 Re_L^{0,58} Ga_L^{-0,53} \xi_L^{-0,20} \quad \text{III-26}$$

///

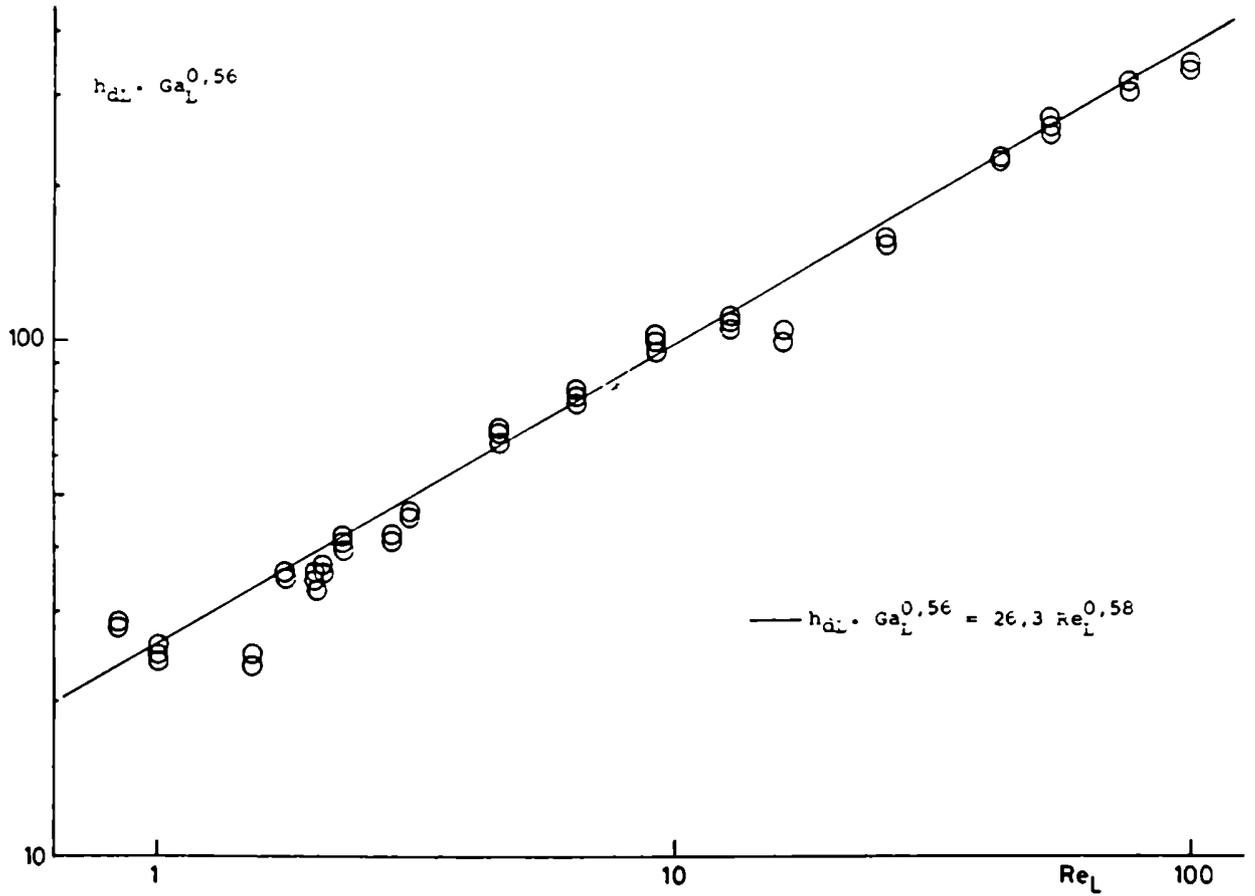


Figura III-13: Ajuste de los resultados experimentales de  $h_{dL}$  a la correlación obtenida (Ec. III-4-1-2)

siendo los errores de los coeficientes:

$$\begin{array}{ll} \sigma_{\alpha} = 16 & \sigma_{\beta} = 0,015 \\ \sigma_{\gamma} = 0,031 & \sigma_{\delta} = 0,14 \end{array}$$

El error de la correlación es del 13%.

Se encuentra entonces que para el rango de valores de tensión superficial empleado en este trabajo no se obtiene una dependencia significativa con la misma. El exponente es  $-0,20$ , y el valor cero está incluido en el intervalo  $\delta \pm 2 c_{\delta}$ . Además, ni el error de los coeficientes, ni el error de la correlación disminuyen. Por lo tanto, resulta que la inclusión de la tensión superficial no mejora el cálculo de la retención, lo que estadísticamente hace justificable su exclusión.

#### III.4.1.1. Comparación de los resultados con literatura

A fin de verificar los valores de retención que surgen de aplicar la correlación desarrollada en este trabajo, se llevó a cabo una comparación con correlaciones de bibliografía ya presentada en la Sección III.1.3. En la Tabla III-4 se presentan los valores de retención experimentales obtenidos en el presente trabajo

///

y aquellos obtenidos por diversos autores, para un determinado rango de  $Re_L$ .

Tabla III-4

Valores de retención de líquido obtenidos por diferentes autores  
(fase líquida: agua)

$U_{OL}$ (cm/s)	0,13	0,21	0,31	0,43	0,61	0,80
$Re_L$	16,2	25,7	42,8	54,1	76,3	100,1
$h_{dL}$ (exp)	0,044	0,066	0,092	0,103	0,130	0,140
$h_{dL}$ (Otake)	0,064	0,088	0,124	0,145	0,183	0,220
$h_{dL}$ (Specchia)	0,123	0,158	0,209	0,240	0,290	0,330
$h_{dL}$ (Turek)	0,098	0,116	0,139	0,151	0,171	0,189

$h_{dL}$  (exp) : datos experimentales obtenidos en el presente trabajo.

Se observa que los valores estimados a partir de la correlación de Otake y Okada (1953) son los que más se aproximan a los obtenidos en el presente trabajo, excepto a altos caudales. Las diferencias pueden deberse a que estos autores trabajaron en condiciones de fase gaseosa estanca. Es posible que el flujo gaseoso adicional ejerza una fuerza de arrastre sobre la fase líquida

que hace que el volumen de líquido retenido por el relleno disminuya.

Si se compara la correlación propuesta por Otake y Okada (1953) con la de este trabajo se observan algunas diferencias en la dependencia con el número de  $Re_L$  y el  $Ga_L$ . Observando los exponentes del  $Re_L$ , vemos que Otake y Okada obtienen valores distintos según el rango del  $Re_L$  (ecs. III-7 y III-8).

$$h_{dL} \propto Re_L^{0,51} \quad Re_L \leq 10 \quad \text{III-27}$$

$$h_{dL} \propto Re_L^{0,676} \quad Re_L > 10 \quad \text{III-28}$$

En este trabajo se propone una única correlación, obtenida por ajuste de valores de  $h_{dL}$  en un rango de  $Re_L$ :  $0,8 < Re_L < 150$ , es decir, en un intervalo que superpone parte de los dos rangos de  $Re_L$  en que Otake y Okada separaron el comportamiento de su sistema. Esto explicaría el valor intermedio del exponente del  $Re_L$  obtenido en este trabajo:

$$h_{dL} \propto Re_L^{0,58}$$

Asimismo, pueden encontrarse diversos trabajos en los

///

que los autores presentan una única correlación para un amplio rango de valores de  $Re_L$ , obteniendo dependencias entre  $h_{dL}$  y el  $Re_L$  similares a la hallada en este trabajo:

$$\text{Specchia y Baldi (1977)} \quad h_{dL} \propto Re_L^{0,545} \quad 0,3 \leq Re_L \leq 3000 \quad \text{III-28}$$

$$\text{Jesser y Elgin (1943)} \quad h_{dL} \propto Re_L^{0,54} \quad 1,7 \leq Re_L \leq 1200 \quad \text{III-29}$$

En la literatura también se encuentran trabajos en los que se obtienen valores del exponente del  $Re_L$  mayores a los anteriormente presentados. Debe tenerse en cuenta que en estos casos se emplearon sistemas distintos a los utilizados en el presente trabajo.

Elgin y Weiss (1939), con fase de gas estanca, obtienen:

$$h_{dL} \propto Re_L^{0,75} \quad 34 \leq Re_L \leq 700 \quad \text{III-30}$$

Hochman y Effron (1969), obtienen para el sistema  $N_2$ -metanol:

$$h_{dL} \propto Re_L^{0,76} \quad 4 \leq Re_L \leq 80 \quad \text{III-31}$$

Respecto de la dependencia de  $h_{dL}$  con el número de Ga-

///

lileo puede hallarse en la literatura una amplia gama de valores:

Otake y Okada (1953)	$h_{dL} \propto Ga_L^{-0,44}$	
Davidson (1959)	$h_{dL} \propto Ga_L^{-1/3}$	
Mohunta y Laddha (1965)	$h_{dL} \propto Ga_L^{-0,50}$	III-32
Satterfield y Way (1971)	$h_{dL} \propto Ga_L^{-0,33}$	
Specchia y Baldi (1977)	$h_{dL} \propto Ga_L^{-0,42}$	

A su vez numerosos autores se inclinan por aceptar el valor propuesto por Otake y Okada (Sater y Levenspiel, 1966; Michell y Furzer, 1972; Schwartz y Roberts, 1973).

La dependencia de  $h_{dL}$  con el  $Ga_L$  ha sido estudiada por Otake y Okada para un amplio rango de  $Ga_L$ :  $10^2 < Ga_L < 10^9$ . Emplearon mezclas de líquidos, con las que podían variar adecuadamente la viscosidad. En el presente trabajo el  $Ga_L$  sólo pudo variarse en el rango:  $0,67 \times 10^5 < Ga_L < 1,3 \times 10^6$  debido a las limitaciones que imponía el régimen de fase gaseosa continua. Sin embargo, el exponente del  $Ga_L$  obtenido:  $-0,56$ , da una dependencia que cae dentro del margen de error obtenido por Otake y Okada.

En todos los trabajos de bibliografía se encuentra que la retención de líquido aumenta con la viscosidad. En general, en las correlaciones citadas, el exponente del  $Ga_L$  es:  $-0,4$  a  $-0,5$ .

En general es posible correlacionar la mayoría de los valores de la retención de líquido de la forma general presentada. Queda de manifiesto que algunas variables específicas, no consideradas en uno u otro trabajo, pueden ejercer un efecto considerable sobre los valores de los coeficientes de la correlación general.

#### III.4.2. Modelo de dispersión axial

El cálculo del  $Pe_p$  se realizó con diferentes métodos descritos previamente (Sección I.5). Se aplicó el método de los momentos, el método del máximo de las curvas de DTR, el método de ajuste de curvas en el campo transformado de Laplace y el método de ajuste de curvas en el dominio del tiempo, empleando la integral de convolución. Los valores obtenidos mediante algunos de estos métodos de ajuste se presentan en la Tabla III-5.

Como era de esperar, al aplicar el método de los momentos se observó, en general, la mayor dispersión de resultados, debido al peso que el método da a los valores de la cola de la curva de DTR, valores que poseen un gran error experimental. Asimismo los valores del  $Pe_p$  son los más bajos, consecuencia también de la incidencia que tiene la cola en el momento de segundo orden, en base al cual se calcula el  $Pe_p$ .

///

Tabla III-5

Comparación de los  $Pe_p$  obtenidos por distintos métodos de ajuste

Experiencia	$Re_L$	$Pe_p$		
		Método de momentos	Método del máximo	Método de convolución
1.1	16,2	0,11	0,29	0,26
1.2	16,2	0,10	0,27	0,24
1.3	16,2	0,12	0,29	0,22
1.4	16,2	0,10	0,30	0,26
2.1	25,7	0,09	0,38	0,28
2.2	25,7	0,14	0,37	0,25
2.3	25,7	0,12	0,36	0,25
2.4	25,7	0,14	0,37	0,25
3.1	42,3	0,16	0,44	0,37
3.2	42,3	0,22	0,44	0,42
3.3	42,3	0,12	0,44	0,33
3.4	42,3	0,22	0,43	0,37
4.1	54,1	0,19	0,44	0,41
4.2	54,1	0,17	0,45	0,48
4.3	54,1	0,19	0,47	0,42
4.4	54,1	0,18	0,47	0,37

///

Tabla III-5 (continuación)

5.1	76,3	0,23	0,49	0,36
5.2	76,3	0,23	0,48	0,46
5.3	76,3	0,20	0,47	0,40
5.4	76,3	0,19	0,48	0,38
6.1	100,1	0,21	0,47	0,39
6.2	100,1	0,22	0,44	0,37
6.3	100,1	0,20	0,45	0,35
6.4	100,1	0,24	0,45	0,40

Se encuentra que los valores correspondientes al cálculo del  $Pe_p$  a partir del máximo son los más altos. Esto se debe a que este método no tiene en cuenta la cola de la curva, por lo que ésta no incide en el cálculo de la dispersión axial; sólo considera la posición del máximo y la forma de la curva en las inmediaciones del mismo. Al aplicar este método se está suponiendo, además, que en algún lugar del sistema se inyecta un pulso perfecto ya que en ningún momento se toma en cuenta el efecto de la no idealidad de la señal pulso de entrada.

Los números de  $Pe_p$  obtenidos por ajuste mediante convolución en el dominio del tiempo, presentan valores intermedios entre los anteriores. Esto se debe a que en este método la cola no tiene una ponderación mayor que el resto de la curva, por lo que no afecta a la dispersión como en el método de los momentos. Sin embargo, al considerarse la cola, se obtienen valores menores y con una mayor dispersión entre las distintas experiencias en iguales condiciones que en el método que emplea el máximo de la curva de DTR.

No se muestran los números de  $Pe_p$  obtenidos por el método de ajuste en el campo transformado de Laplace ya que sus valores son fuertemente dependientes del parámetro "s". Al emplear este método se observó una baja sensibilidad de la función error

a minimizar respecto del número de Peclet.

Como resultado de este análisis, se decidió evaluar el número de Peclet realizando el ajuste entre la curva de DTR, calculada por convolución de la curva de entrada a la sección de pruebas del reactor con la ecuación del modelo, y la curva experimental de respuesta a la salida de dicho tramo de pruebas.

Los valores de Pe obtenidos se presentan en la Figura III-14 como función del  $Re_L$  para líquidos con distinta viscosidad. Para cada valor de ésta los valores de Peclet crecen al aumentar el  $Re_L$ . También se observa que a igual  $Re_L$  el  $Pe_p$  aumenta con la viscosidad. Se aplicó el método de regresión pseudo no lineal (Friedlander y Lemcoff, 1981) a estos resultados, obteniéndose una correlación en función del  $Re_L$  y del  $Ga_L$  del tipo:

$$Pe_p = a Re_L^b Ga_L^c$$

Los valores de los coeficientes y sus respectivos errores son:

$$a = 2,3 \pm 1,8$$

$$b = 0,26 \pm 0,04$$

$$c = -0,21 \pm 0,05$$

III-33

El error de esta correlación es del 22% (Fig. III-15)

///

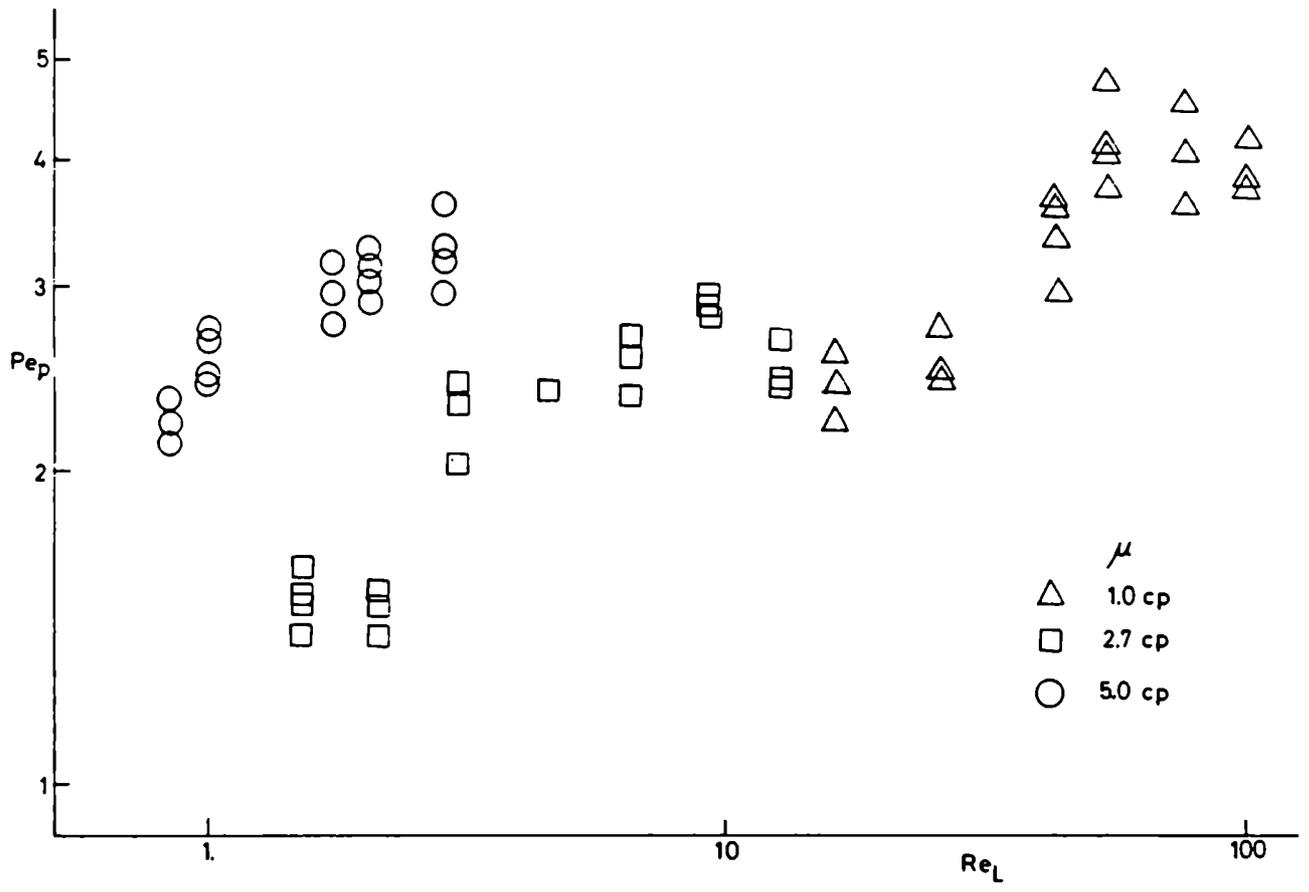


Figura III-14: Número de Peclet de partícula en función del número de Reynolds de líquido con la viscosidad

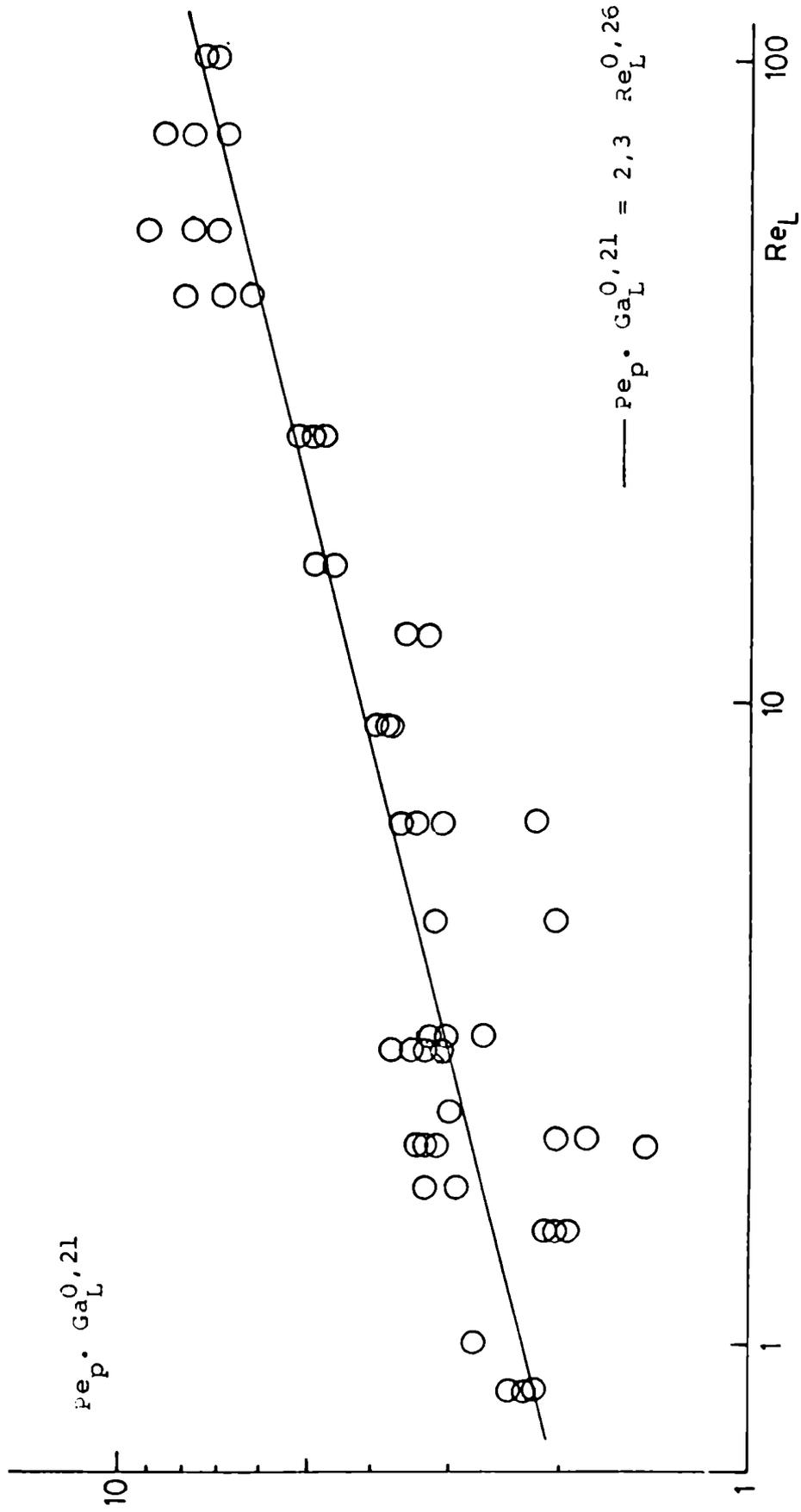


Figura III-15: Ajuste de los resultados experimentales de  $Pe_p$  a la correlación obtenida (Ec. III-33)

III.4.2.1. Comparación de los resultados con literatura

En general los trabajos hallados en bibliografía presentan correlaciones del  $Pe_p$  en función del número de Reynolds definido en base a la velocidad intersticial ( $Re'_L$ ). En la mayoría de ellos se encuentra una dependencia del tipo:

$$Pe_p \propto (Re'_L)^{0,5} \quad \text{III-34}$$

En el presente trabajo se expresó el número de  $Pe_p$  en función del Reynolds definido en base a la velocidad superficial ( $Re_L$ ).

Con fines comparativos se transformó la ecuación III-33 y se la expresó en función del  $Re'_L$  mediante la expresión de la retención de líquido obtenida (Ecuación III-25). Teniendo en cuenta que:

$$Re'_L = \frac{Re_L}{h_{dL}}$$

reemplazando se llega a:

$$Pe_p = 30,62 (Re'_L)^{0,62} Ga_L^{-0,55} \quad \text{III-35a}$$

///

A partir de esta ecuación se puede demostrar que:

$$Pe_p \propto U_L^{0,62} \mu^{0,49} \quad \text{III-35b}$$

Observando las expresiones presentadas en la revisión bibliográfica aparecen algunas diferencias en los valores de los exponentes de los números adimensionales ( $Re'_L$ ,  $Ga_L$ ). Esto puede deberse a que la expresión III-35a fue obtenida por transformación de la ecuación III-33 como se explicó más arriba.

Algunos autores (Michell y Furzer, 1972) aceptan como exponente del número de Galileo el valor  $-1/3$ , probablemente por analogía con correlaciones obtenidas para coeficientes de transferencia de materia. Esto, si bien no introduce mayor error, lleva también a coeficientes diferentes en el resto de la ecuación.

Con excepción de Buffham y Rathor (1978) y Kobayashi y col. (1979), el resto de los trabajos hallados en bibliografía, y que introducen el  $Ga_L$  en sus correlaciones, no variaron la viscosidad de líquido, y se restringen al sistema aire-agua. Las variaciones de  $Ga_L$  que aparecen en sus trabajos se deben principalmente a que emplearon como relleno partículas de distinto diámetro, por lo tanto es poco confiable la dependencia con el  $Ga_L$  que ellos plantean.

Buffham y Rathor (1978) no observaron dependencia del

///

$Pe_p$  con la viscosidad del líquido y correlacionaron este parámetro en función del número de Froude. Estos autores trabajaron en un rango de viscosidad de 1 a 10 cp y emplearon anillos Raschig como relleno.

Por otra parte, Kobayashi y col. (1979) variaron la viscosidad entre 1,0 y 6,4 cp empleando esferas como relleno y observaron una dependencia considerable con esta variable. Según los mismos

$$Pe_p = 60 Re_L^{0,63} Ga_L^{-0,73} \quad 0,5 \leq Re_L \leq 100 \quad \text{III-36}$$

Se observa una buena concordancia en la dependencia del  $Pe_p$  con el  $Re_L$  y el  $Ga_L$  de esta expresión y las obtenidas en el presente trabajo.

Las discrepancias entre las correlaciones de otros autores y la que se obtuvo en este trabajo son típicas de las comparaciones entre los parámetros del modelo de dispersión axial, citadas por diversos autores (Co y col., 1971; Michell y Furzer, 1972; Shah, 1979; Schwartz y col., 1976). Lo que se encuentra generalmente es que las tendencias observadas por diferentes autores son similares (signo de los exponentes), pero que los valores numéricos son diferentes, o sea, en las correlaciones del tipo de la ley de la potencia se tienen constantes y exponentes distintos.

Asimismo, se observa que todas las correlaciones halladas en bibliografía, incluso la que se presenta en este trabajo, estiman el  $Pe_p$  con un error no menor del 20%:

Dunn y col. (1962)	: 34%
Sater y Levenspiel (1966)	: 25%
Stephens (1968)	: 25%
Hochman y Efron (1969)	: 34%
Michell y Furzer (1972)	: 30%

Esto resulta de una dispersión importante de los valores de los parámetros del modelo en experiencias llevadas a cabo en condiciones similares.

Debe hacerse notar que al realizar el ajuste de la curva experimental se observaba que los  $Pe_p$  obtenidos dependían fuertemente del rango de tiempos adimensionales en el que se realizaba la minimización de la función error. La misma mostraba menos sensibilidad a variaciones del número de Peclet que al rango del tiempo en el cual se la minimizaba. Por lo tanto se puede inferir que no es una buena descripción del fenómeno físico real que se presenta en el sistema.

El principal inconveniente se presenta en la reproduc-

ción del frente abrupto y la cola pronunciada en las curvas de DTR, es decir, la asimetría de las curvas. Surge entonces la necesidad de buscar modelos de más de un parámetro, que tengan en cuenta este hecho. Esto llevó a aplicar el modelo de flujo cruzado que explica ambos fenómenos a través del intercambio de masa entre la fase estanca y la fase móvil de fluido.

#### III.4.3. Modelo de flujo cruzado

Como se explicó anteriormente (sección I.3.1.4), este modelo caracteriza el flujo de la fase líquida mediante dos parámetros: "k" y " $\emptyset$ ". La evaluación de los mismos se realizó con el mismo método de ajuste de modelos que en el caso del cálculo del número de Peclet.

En las Figuras III-16 y III-17 se representaron los valores del parámetro "k" en función del número de  $Re_L$  para las tres soluciones empleadas y geometrías esférica y cilíndrica, respectivamente. Se lo correlacionó con el  $Re_L$  y el número de Schmidt (Sc), por analogía con las correlaciones comúnmente halladas para coeficientes de transferencia de materia. A tal fin se empleó el método de regresión pseudo no lineal (Friedlander y Lemcoff, 1981) obteniendo la siguiente expresión:

///

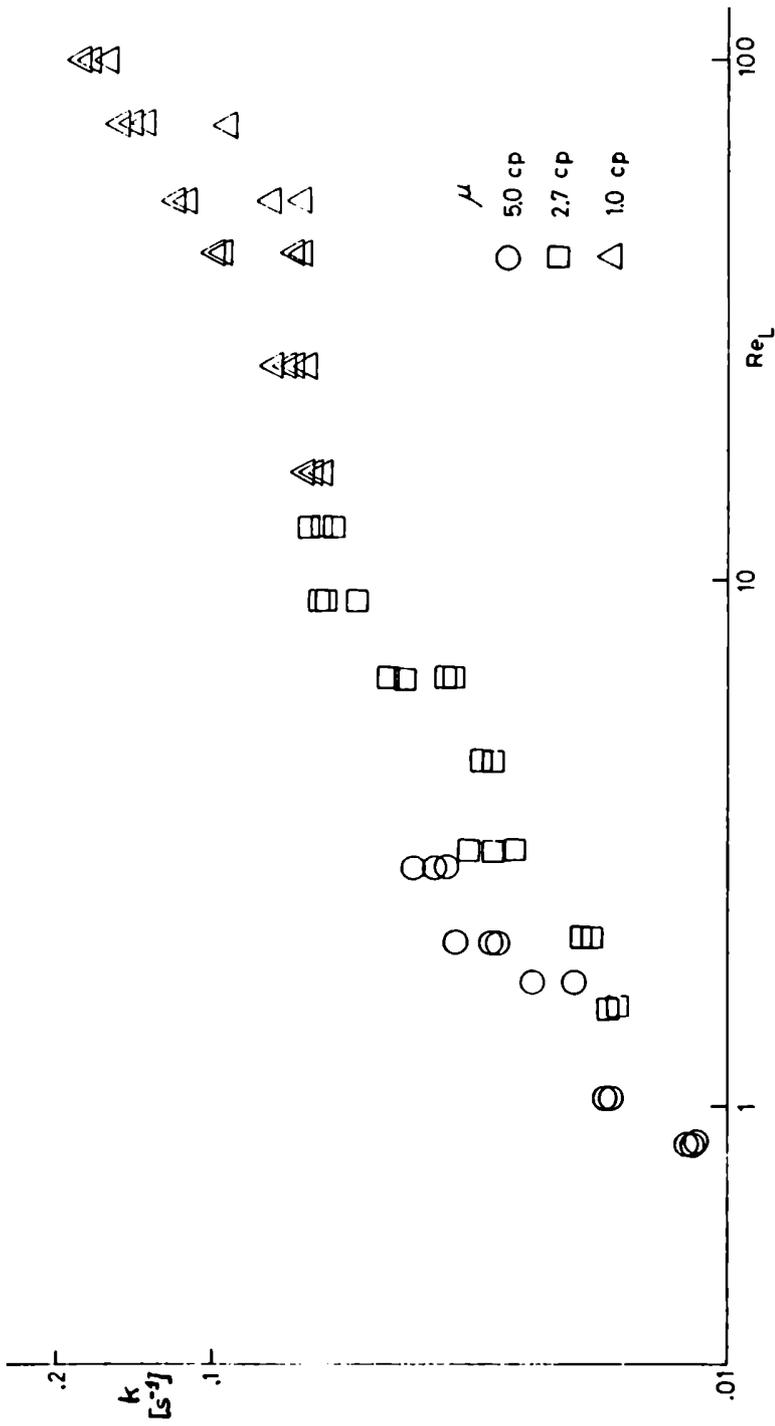


Figura 111-16: Parámetro  $k$  del modelo de flujo cruzado en función del número de Reynolds del líquido con la viscosidad como parámetro (Esferas)

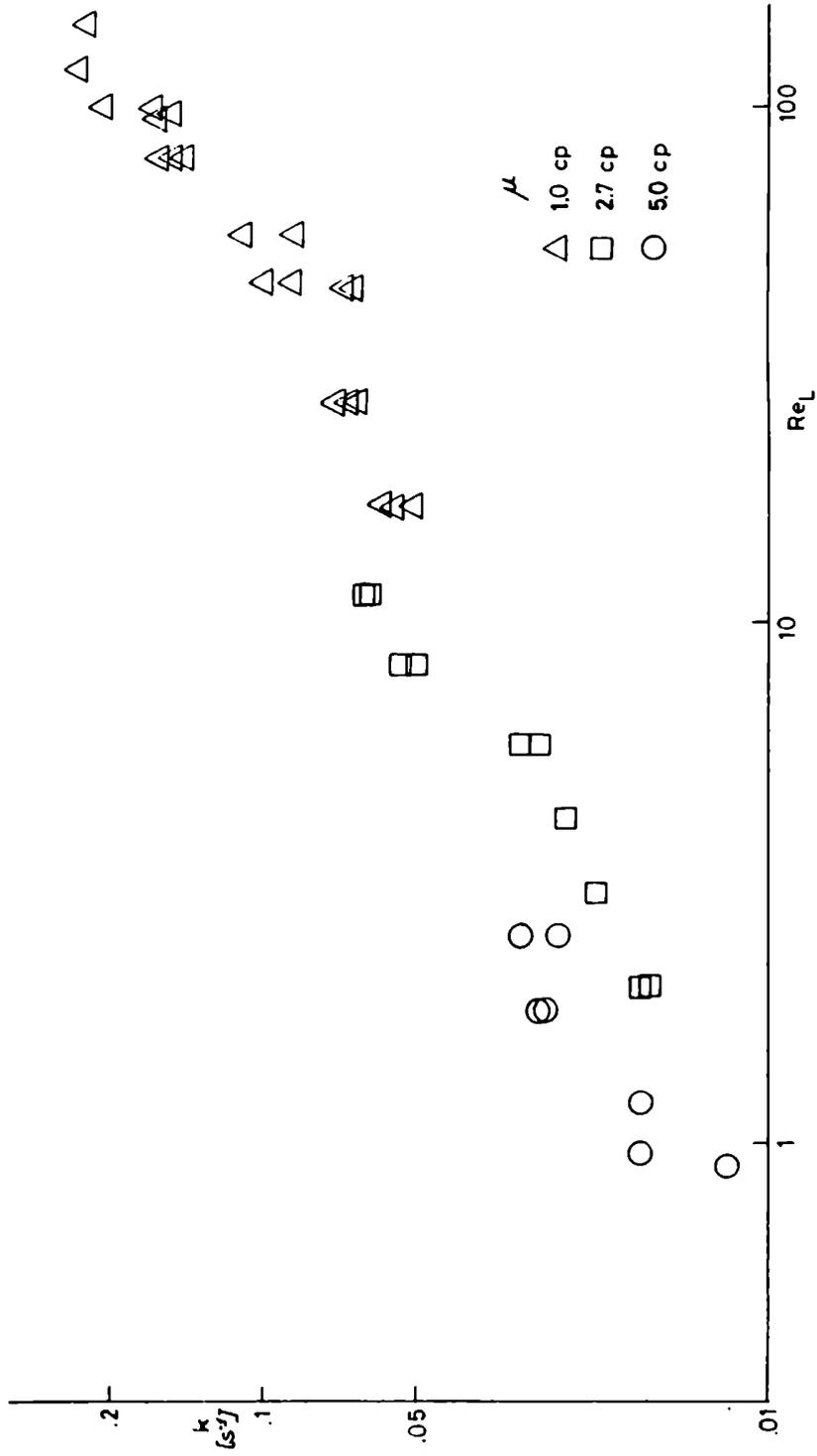


Figura III-17: Parámetro  $k$  del modelo de flujo cruzado en función del número de Reynolds del líquido con la viscosidad como parámetro (Cilindros)

$$k = 8,1 \times 10^{-4} \text{Re}_L^{0,72} \text{Sc}^{0,33}$$

III-37

$$[k] = \text{s}^{-1}$$

Los errores de los respectivos coeficientes son:

$$\sigma_a = 0,5 \times 10^{-4} \quad \sigma_b = 0,02$$

El error de la correlación es del 16%. El exponente del Sc fue tomado como 0,33 por analogía con correlaciones de coeficientes de transferencia de materia. Para el cálculo del número de Sc ( $\mu/\rho \cdot D_M$ ) es necesario conocer la difusividad " $D_M$ " del trazador en el líquido empleado. En el Apéndice A3 se describe el procedimiento realizado para estimar dicho coeficiente de difusión.

En la Figura III-18 se representaron los valores del parámetro " $\emptyset$ " en función del  $\text{Re}_L$ . Si bien se observa una pronunciada dispersión de los valores obtenidos, puede apreciarse una leve tendencia creciente con el número de Reynolds. Puesto que la alta dispersión de valores generaría una correlación con elevados errores en los parámetros, se calculó a partir de los resultados obtenidos, un valor medio, siendo el mismo:

$$\emptyset = 0,69 \pm 0,07$$

Por otra parte, analizando la expresión matemática de

///

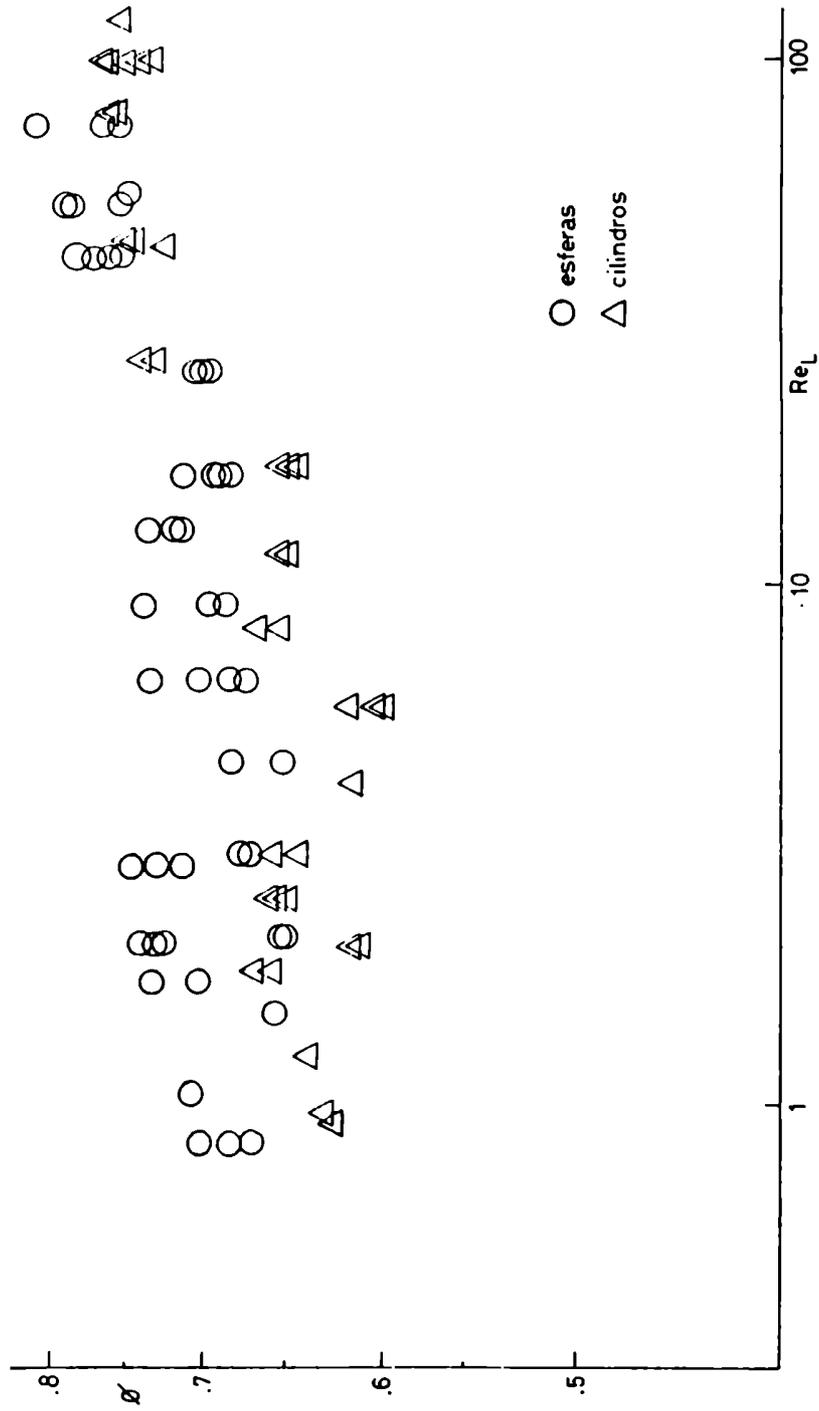


Figura III-18: Parámetro  $\phi$  del modelo de flujo cruzado como función del número de Reynolds de líquido

este modelo, se observa que la varianza de las curvas de DTR, que es función de ambos parámetros, es muy sensible a " $\theta$ ":

$$\sigma^2 = \frac{2(2 - \theta)^2}{k \cdot t_m} \quad \text{III-38}$$

donde:  $t_m$ , tiempo medio del sistema.

Entonces se consideró conveniente describir el mezclado en nuestro sistema en términos de  $2/\sigma^2$ , parámetro éste, calculado a partir de " $\theta$ ", " $k$ " y " $t_m$ " según la ecuación III-38.

En la Figura III-19 se muestran los resultados obtenidos para  $2/\sigma^2$ , en función del  $Re_L$  con la viscosidad como parámetro. Se observa que el retromezclado se hace menor para números de  $Re_L$  crecientes y que, para igual número de  $Re_L$ , decrece al aumentar la viscosidad. Esto concuerda con los resultados obtenidos con el modelo de dispersión axial.

Asimismo, se comparó la bondad del ajuste de este modelo con la del modelo de dispersión axial. Con tal motivo, en la Figura III-20 se muestran las curvas correspondientes a los dos modelos y la curva experimental para un determinado ensayo. Como puede verse, el ajuste de la curva, que resulta del modelo de flujo cruzado es mejor que el que corresponde al modelo de dispersión axial. Asimismo, las sumas de residuos resultantes de minimizar la función

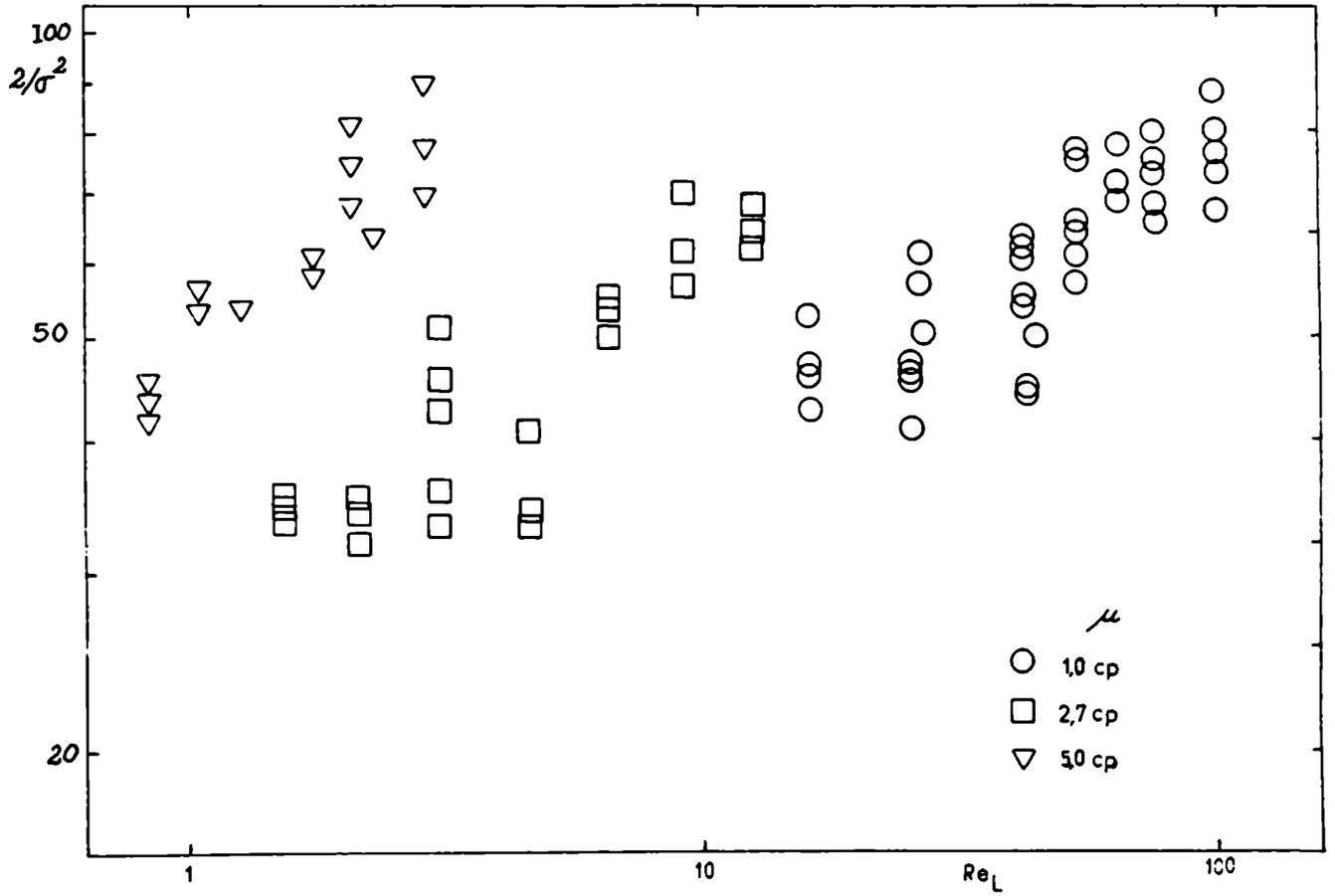


Figura III-19: Parámetro  $2/\sigma^2 = \frac{k \cdot t_m}{(1-\rho)^2}$  en función del  $Re_L$  con la viscosidad como parámetro y relleno de esferas y cilindros

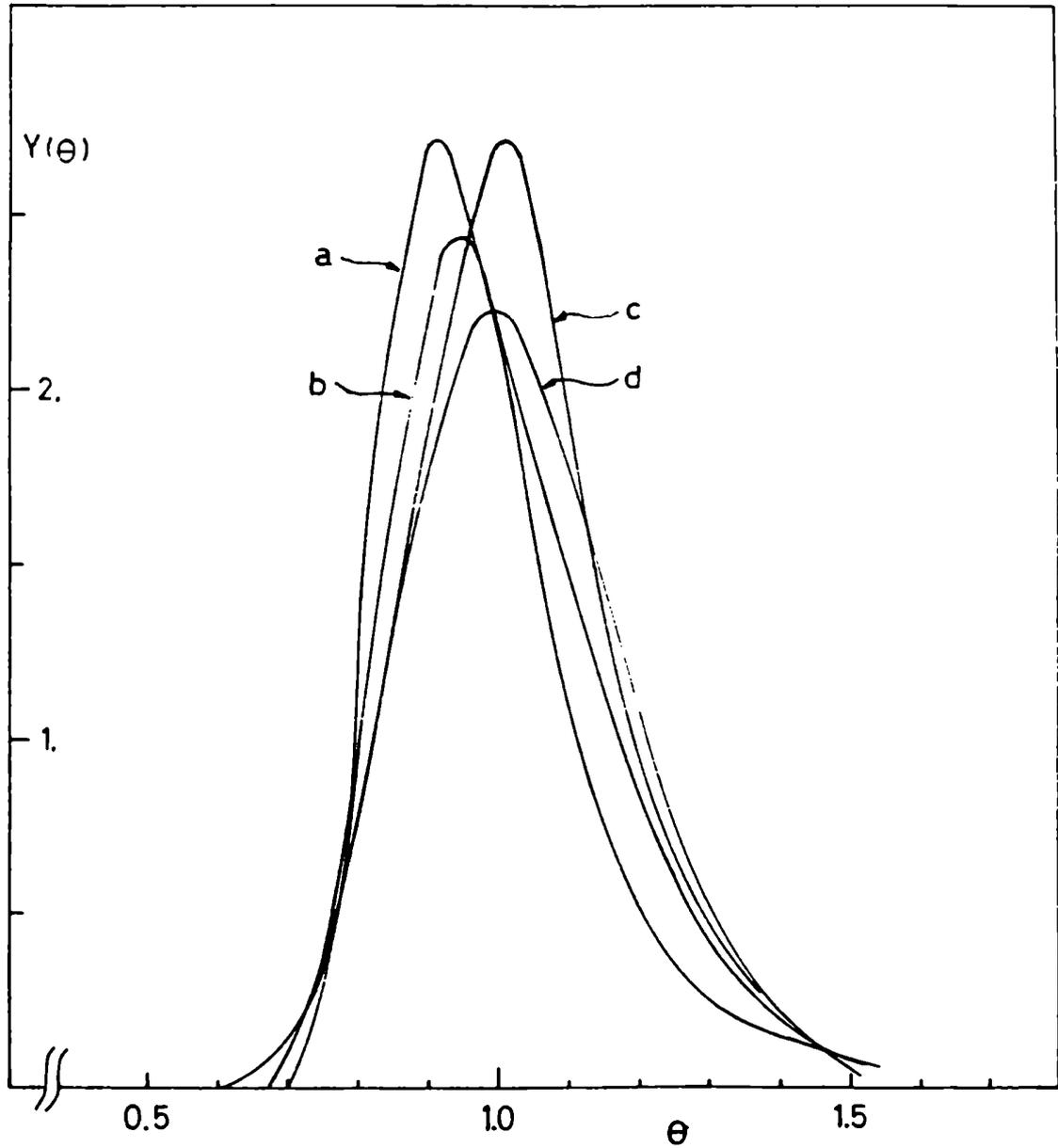


Figura III-20: Comparación de una curva experimental con las que resultan de aplicar el modelo de dispersión axial y el modelo de flujo cruzado en el ajuste de la misma.

a : curva experimental

b : curva del modelo de flujo cruzado

c : curva del modelo de dispersión axial ( $Pe_L = 100$ )  
ídem ( $Pe_L = 77$ )

$$\text{donde } Pe_L = Re_p \frac{L}{d_p}$$

error eran del orden de 0,4-0,8, mientras que los valores obtenidos al ajustar las curvas de DTR con el modelo de dispersión axial oscilaban entre 1,5 y 2,5. Esto indica una mejor representación de los resultados experimentales mediante el modelo de flujo cruzado.

A los efectos de mostrar la baja sensibilidad a los parámetros, en el ajuste con el modelo de dispersión axial, se muestran curvas cuyos números de  $Pe_p$  son diferentes. No se observan, salvo en la zona del máximo, un ajuste marcadamente distinto entre ellas. Al realizar el ajuste se encuentra que la función error tiene mayor sensibilidad a los parámetros que al rango de tiempos tomado para ajustar el modelo.

Los resultados obtenidos para  $2/\sigma^2$  fueron correlacionados en función de  $Re_L$  y  $Ga_L$  para estudiar la influencia de la velocidad y viscosidad sobre el mezclado, y poder realizar comparaciones cuantitativas con el modelo de dispersión y con los resultados obtenidos por otros autores.

La expresión que se obtuvo para esferas es la siguiente:

$$2/\sigma^2 = 2,82 \times 10^3 Re_L^{0,33} Ga_L^{-0,37} \quad \text{III-39}$$

donde los errores en los coeficientes son respectivamente:

$$\sigma_a = 1,4 \times 10^3 \quad \sigma_b = 0,04 \quad \sigma_c = 0,05$$

///

Esta correlación reproduce los resultados experimentales con un 18% de error.

Para cilindros se obtuvo la siguiente correlación:

$$2/\sigma^2 = 365 \text{Re}_L^{0,40} \text{Ga}_L^{-0,24} \quad \text{III-40}$$

donde los errores en los coeficientes son respectivamente:

$$\sigma_a = 400 \quad \sigma_b = 0,045 \quad \sigma_c = 0,07$$

El error de la correlación es del 24% (Fig. III-21).

Como puede observarse, se obtiene una mayor dispersión de resultados en el caso de cilindros que para esferas.

Empleando la expresión obtenida para la retención dinámica de líquido, podemos expresar el parámetro  $2/\sigma^2$  de las expresiones anteriores en función del número de Reynolds definido en base a la velocidad intersticial o real del líquido. Se llega entonces a:

$$\text{esferas} \quad 2/\sigma^2 = 7,5 \times 10^4 (\text{Re}'_L)^{0,78} \text{Ga}_L^{-0,80} \quad \text{III-41}$$

$$\text{cilindros} \quad 2/\sigma^2 = 1,96 \times 10^4 (\text{Re}'_L)^{0,95} \text{Ga}_L^{-0,77} \quad \text{III-42}$$

///

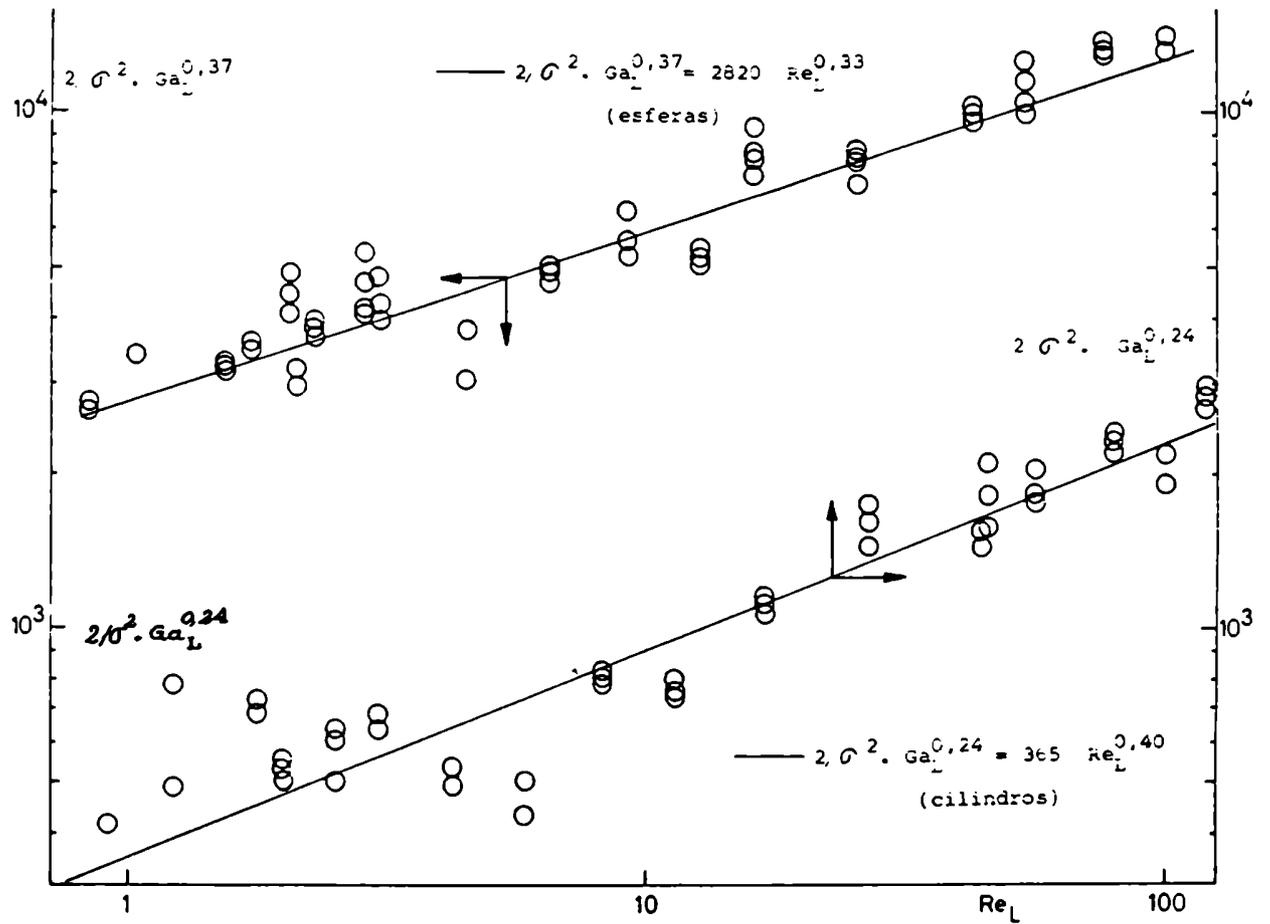


Figura III-21: Ajuste de los resultados experimentales de  $2/\sigma^2$  según el modelo de flujo cruzado a la correlación obtenida

### III.4.3.1. Comparación de los resultados con la literatura

A partir de la correlación obtenida para el parámetro  $2/\sigma^2$  con esferas (Ec. III-41) se obtuvo la siguiente dependencia con la velocidad intersticial y la viscosidad:

$$2/\sigma^2 \propto U_L^{0,78} \mu^{0,82} \quad \text{III-43}$$

Como ya se describió (Sec. I.3.1.1), el parámetro  $2/\sigma^2$  es igual al número de  $Pe_L$  en el caso de aplicar el modelo de dispersión. Es por lo tanto posible comparar la ecuación III-43 con la obtenida en el caso de realizar el ajuste con el modelo de dispersión axial (Ec. III-35b). Se observa una funcionalidad similar con la velocidad pero no con la viscosidad. La diferencia puede atribuirse al inadecuado ajuste del modelo de dispersión axial a las curvas experimentales. Haciendo un análisis idéntico a partir de la expresión publicada por Kobayashi y col. (1979) se llega a que:

$$Pe_p \propto U_L^{0,63} \mu^{0,83} \quad \text{III-44}$$

En este caso se observa una excelente concordancia en la dependencia con la viscosidad.

A fin de comparar los valores de "k" obtenidos en este trabajo con los de otros autores, en la Tabla III-5 se presentan los correspondientes a dos caudales de líquido.

Tabla III-5

Comparación de los valores de k o HUT obtenidos por diferentes autores que aplicaron el modelo de flujo cruzado

$F_L$ (ml/min)	$Re_L$	$k_{exp}$	$HUT_{exp}$	$k(1)$	HUT (2)	HUT (3)
475	25,7	0,075	43 cm	0,070	43 cm	44 cm
1850	100,1	0,178	32 cm	0,159	32 cm	34 cm

exp: presente trabajo

(1): Hochman y Efron (1969)

$$HUT = U_L/k$$

(2): van Swaaij y col. (1969)

$$U_L = \text{velocidad interticial}$$

(3): Hoogendorn y Lips (1965)

del líquido

Se observa una excelente concordancia con los valores obtenidos por Hochman y Efron (1969), quienes presentaron una correlación (Ec. III-18) en la cual se observa una dependencia similar de "k" con el número de Reynolds, definido en base a la velocidad superficial del líquido, a la hallada en este trabajo.

Asimismo, la expresión de "k" obtenida en el presente trabajo (Ec. III-37) muestra dependencias similares con el  $Re_L$  y  $Sc$  a la presentada por Specchia y col. (1978), quienes estudiaron la transferencia de materia del líquido al relleno esférico en un reactor de lecho mojado.

Van Swaaij y col. (1969) emplearon el modelo de flujo cruzado con dispersión axial para describir la fluidodinámica de la fase líquida. Los parámetros característicos calculados por ellos fueron el Peclet de la fase móvil,  $\alpha$ , la relación de retención estática a retención dinámica y  $N$ , el número de unidades de transferencia definido como:

$$N = \frac{k L}{U_L} \quad \text{III-45}$$

donde:  $L$  : longitud del tramo de pruebas

$k$  : coeficiente de transferencia entre ambas fases de líquido

$U_L$  : velocidad intersticial de la fase líquida dinámica  
( $F/A \cdot h_{dL}$ )

Según esta definición se calculó la altura de la unidad de transferencia:  $HUT = L/N = U_L/k$  para los valores de "k" obteni-

///

dos en este trabajo y se los comparó con los valores de HUT obtenidos por van Swaij y col. para condiciones de operación similares (Tabla III-5), no observándose diferencias significativas. Debe tenerse en cuenta que estos autores emplearon un sistema de características similares en lo que se refiere a las relaciones de  $d_t/d_p$  y  $L/d_p$ . No establecen ninguna correlación que describa la dependencia de  $N$  y  $\alpha$  con las variables operativas ya que sus datos presentan una pronunciada dispersión. Esto puede deberse a que calculan los parámetros a partir de los momentos de 1° y 2° orden. Por otra parte, se encuentra una buena concordancia con los valores obtenidos por Hoogendorn y Lips (1965).

Al presentar el modelo de flujo cruzado se definió el parámetro  $\emptyset$  como la relación entre la retención dinámica y la retención total de líquido. Se lo calculó a partir de la relación:  $\emptyset = t_1/t_m$ , en donde  $t_1$  es el tiempo al cual comienza la curva de DTR y  $t_m$  el tiempo medio de residencia de la misma. A su vez, por definición:

$$\emptyset = \frac{h_{dL}}{h_{TL}} \quad \text{III-46}$$

Se trató de verificar esta igualdad tomando los valores de  $\emptyset$  calculados por ajuste del modelo con los que resultan a partir de las retenciones obtenidas para las experiencias en el sistema aire-agua

///

( $\mu = 1$  cp). A tal efecto fue necesario evaluar la retención estática del líquido. Esta no fue medida directamente sino tomada a partir de trabajos de bibliografía. En éstos es posible observar considerable divergencia entre valores. Tomando la correlación de van Swaaij y col. (1969) (Ec. III-5), se llega a un valor de retención estática de líquido  $h_{sL} = 0,06$ , mientras que según Ross (1965) y Hochman y Effron (1969) se obtiene un valor de  $h_{sL} = 0,03$ .

Como se describió en la sección III.2.3, se determinó  $h_{sL}$  a partir de la regresión de los valores obtenidos de  $\emptyset$  con los valores de la  $h_{TL}$ . Los resultados obtenidos son:

esferas	$h_{sL} = 0,030 \pm 0,004$
cilindros	$h_{sL} = 0,038 \pm 0,004$

Estos resultados concuerdan satisfactoriamente con los hallados en bibliografía (Otake y Okada, 1953; Hochman y Effron, 1969; Bennett y Goodridge, 1970).

A los fines comparativos se recalculó  $\emptyset$  a partir de los valores de retención de líquido según la ecuación III-3. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla III-6 para relleno esférico y distintos números de  $Re_L$ .

///

Tabla III-6

Comparación de los valores de  $\phi$  obtenidos a partir de la relación  $h_{dL}/h_{TL}$  con los que resultan del modelo de Flujo Cruzado (MFC)

	$Re_L$	$h_{TL}$	$\phi_2^*$	$\phi$ (MFC)
1	16,2	0,073	0,59	0,69
2	54,1	0,138	0,75	0,75
3	100,1	0,170	0,82	0,75

$\phi_2^*$  : calculado tomando  $h_{sL} = 0,03$        $\phi^* = \frac{h_{dL}}{h_{TL}}$

Van Swaaij y col. (1969), al ajustar sus curvas de DTR con el modelo de flujo cruzado con dispersión axial, obtuvieron un parámetro  $\alpha$  cuya relación con el parámetro  $\phi$  es la siguiente:

$$\phi = \frac{1}{1 + \alpha} \quad \text{III-47}$$

Haciendo los cálculos correspondientes para los valores de  $\alpha$  obtenidos a caudales de 460 ml/min, se compararon los resultados con los del presente trabajo, observando una buena concordancia (Tabla III-7). Asimismo se compararon con los valores de  $\phi$  obtenidos por Hochman y Effron (1969) para iguales caudales, observando igualmen-

te una buena concordancia (Tabla III-7).

Tabla III-7

Comparación de los valores de  $\emptyset$  obtenidos por diferentes autores

$F_L$ (ml/min)	$\emptyset^*$	$\emptyset(1)$	$\emptyset(2)$
475	0,7	0,6	0,6
1850	0,75	0,8	0,8

\* presente trabajo

(1) van Swaaij (1969)

(2) Hochman y Effron (1969)

## CAPITULO IV

### IV. Conclusiones

#### IV.1. Lecho fijo

Se ha llevado a cabo un estudio del comportamiento fluido-dinámico de la fase gaseosa en un reactor de lecho relleno cuya relación de  $d_t/d_p$  es pequeña ( $1,16 \leq d_t/d_p \leq 10$ ). Para la interpretación de los resultados se aplicó el modelo de dispersión axial.

Se encontró que cuando se utilizan esferas como relleno, sólo los resultados correspondientes a la relación de  $d_t/d_p = 1,16$  presentan un comportamiento similar al observado para reactores de lecho relleno de diámetro grande.

Asimismo, para rellenos de diferente geometría y tamaño, el número de  $Pe_p$  resulta independiente de las características del mismo para bajos números de Reynolds, mientras que para altos números de Reynolds, los valores del número de  $Pe_p$  son independientes de la geometría del relleno. En estas condiciones es posible correlacionar los resultados en función del número de Reynolds y de la relación  $d_t/d_p$ , obteniendo la siguiente ecuación:

$$Pe_p = 241,4 Re_p^{-0,86} (d_t/d_p)^{-1,57}$$

válida para  $20 \leq Re_p \leq 200$

A partir de esta expresión, surge la siguiente dependencia del coeficiente de dispersión con la velocidad y el diámetro de partícula:

$$E_z \propto d_p^{0,29} U_G^{1,86}$$

Según el modelo de las dos corrientes, el exponente de la velocidad indica que existe una considerable canalización en el lecho.

#### IV.2. Lecho mojado

Se ha llevado a cabo un estudio del comportamiento fluidodinámico de la fase líquida de un reactor de lecho mojado (en el mismo se han variado las propiedades físicas del líquido y la geometría del relleno). Se investigó la influencia de la viscosidad del líquido (1-5 cp) y se emplearon como relleno esferas y cilindros de 0,5 cm de diámetro.

Se aplicaron los modelos de dispersión axial y de flujo cruzado, analizando en cada caso la calidad del ajuste.

Se determinó la retención estática en el reactor para ambos tipos de relleno, y se obtuvieron los siguientes valores:

///

$$h_{sL} \text{ (esferas)} : 0,030 \pm 0,004$$

$$h_{sL} \text{ (cilindros)} : 0,038 \pm 0,004$$

Estos resultados se calcularon a partir de los valores del parámetro  $\emptyset$ , obtenido por ajuste de las curvas de DTR con el modelo de flujo cruzado, y de los valores de retención total de líquido. Se observó una leve dependencia de la retención estática con la geometría del relleno pero no con la viscosidad.

Se encontró la siguiente correlación para la retención dinámica del líquido en función del  $Re_L$  y del  $Ga_L$ :

$$h_{dL} = 26,3 Re_L^{0,58} Ga_L^{-0,56} \quad \begin{array}{l} 0,8 \leq Re_L \leq 150 \\ 6,7 \times 10^4 \leq Ga_L \leq 1,3 \times 10^6 \end{array}$$

El error de la misma es del 13%. A partir de esta correlación es posible deducir la siguiente dependencia de la retención dinámica con la velocidad:

$$h_{dL} \propto U_{OL}^{0,58} \mu^{0,54}$$

La dependencia con la velocidad es similar a la obtenida por otros autores (Jesser y Elgin, 1943; Specchia y Baldi, 1977); sin embargo, se observa una mayor dependencia con la viscosidad.

///

Esto probablemente se deba a que los sistemas empleados en los otros trabajos fueron diferentes. Numerosos autores (ver sección III.4.1.1) aceptan directamente el valor obtenido por Otake y Okada (1953).

Las curvas de DTR obtenidas fueron ajustadas mediante los modelos de dispersión axial y de flujo cruzado, encontrándose que el método de ajuste más adecuado era por cuadrados mínimos entre el perfil de concentración experimental y el perfil obtenido a través de la integral de convolución con el respectivo modelo (sección III.4.2).

Con el modelo de dispersión axial se obtuvo la siguiente correlación del  $Pe_p$  en función del  $Re_L$  y del  $Ga_L$ :

$$Pe_p = 2,3 Re_L^{0,26} Ga_L^{-0,21} \quad \begin{array}{l} 0,8 \leq Re_L \leq 150 \\ 6,7 \times 10^4 \leq Ga_L \leq 1,3 \times 10^6 \end{array}$$

El  $Re_L$  está definido en base a la velocidad superficial; esta expresión reproduce los valores experimentales con un 22% de error. Si se la expresa en base a la velocidad intersticial, la expresión anterior toma la siguiente forma:

$$Pe_p = 30,62 (Re'_L)^{0,62} Ga_L^{-0,55}$$

A partir de esta expresión se deduce que el  $Pe_p$  tiene la siguiente

///

funcionalidad con la velocidad y la viscosidad del líquido:

$$Pe_p \propto U_L^{0,62} \mu^{0,49}$$

La dependencia con la velocidad es similar a los valores hallados por otros autores (Sección III.4.2.1).

A diferencia de Buffham y Rathor (1978), pero en coincidencia con Kobayashi y col. (1979), se observó una dependencia con la viscosidad, encontrándose que la dispersión axial disminuiría al aumentar la misma.

Al realizar el ajuste de las curvas de DTR con el modelo de dos parámetros (flujo cruzado) se observó que las sumatorias de los residuos que resultan de minimizar la función error se reducen a aproximadamente 1/3 de los valores obtenidos al realizar el ajuste con el modelo de dispersión axial. Así, el modelo de flujo cruzado da una descripción más adecuada de los fenómenos físicos de mezclado en el sistema. Estos se describieron a través del término  $2/\sigma^2$ , que es función de los dos parámetros característicos del modelo. La ventaja de tomar este término es la de poder comparar las tendencias con el modelo de dispersión axial, cuyo parámetro característico también puede ser descrito a través de los valores de  $2/\sigma^2$ , obtenidos de las curvas experimentales de DTR. Se ob-

///

tuvieron las siguientes expresiones:

$$\begin{array}{ll}
 \text{esferas} & 2/\sigma^2 = 2,82 \times 10^3 \operatorname{Re}_L^{0,33} \operatorname{Ga}_L^{-0,37} & 0,8 \leq \operatorname{Re}_L \leq 150 \\
 \text{cilindros} & 2/\sigma^2 = 365 \operatorname{Re}_L^{0,40} \operatorname{Ga}_L^{-0,24} & 6,7 \times 10^4 \leq \operatorname{Ga}_L \leq 1.3 \times 10^6
 \end{array}$$

Los valores obtenidos para relleno cilíndrico son menores y tienen una dispersión mayor que los que se obtuvieron para esferas. De estas expresiones surgen las siguientes dependencias del mezclado con la velocidad intersticial y la viscosidad:

$$\begin{array}{ll}
 \text{esferas} & 2/\sigma^2 \propto U_L^{0,78} \mu^{0,82} \\
 \text{cilindros} & 2/\sigma^2 \propto U_L^{0,95} \mu^{0,59}
 \end{array}$$

Comparando los resultados obtenidos para esferas con los que obtuvieron Kobayashi y col. (1979) para el mismo relleno, pero mediante el modelo de dispersión, se observa buena concordancia en las funcionalidades con la velocidad real del líquido y con la viscosidad.

El parámetro  $\phi$  no presenta una funcionalidad definida con las variables estudiadas. Puede decirse que existe una leve tendencia creciente con la velocidad del líquido. Sin embargo, debido a la gran dispersión en los resultados, sólo se calculó un valor medio

APENDICE A1

Estimación de parámetros en ecuaciones no lineales

Supongamos un conjunto de resultados experimentales ( $y_j$ ,  $x_j$ ) en los que  $x_j$  son los valores correspondientes a la variable independiente, e  $y_j$  los correspondientes a la variable dependiente. Para establecer una relación cuantitativa entre dichas variables del tipo:

$$y = f(p, x)$$

es necesario estimar los parámetros "p" característicos.

Si la ecuación es no lineal, los parámetros generalmente se estiman mediante técnicas de regresión no lineal. Entre ellas podemos citar el método de cuadrados mínimos no lineales, cuyas ventajas han sido discutidas por Kitrell y col. (1965); Box y Hill (1968); Mezaki y col. (1968). Este método requiere una estimación previa de los parámetros. Cuando el tipo de función "y" es linealizable puede aplicarse el método de regresión pseudo-no lineal desarrollado por Lemcoff (1977), el cual da resultados muy similares a los que resultan de métodos de regresión no lineales

///

(Friedlander y Lemcoff, 1981). Se trata de una regresión lineal pesada iterativa en la que se minimiza la ecuación:

$$S(b) = \sum w_j (z_j - g(y_j, x_j))^2$$

en la cual  $z_j$  son los valores que resultan de aplicar la transformación linealizante a los valores  $y_j$ , y  $g(y_j, x_j)$  es la función que resulta de linealizar  $f(y_j, x_j)$ .

La función de peso se define según:

$$w_j = \frac{\partial g}{\partial f} (\hat{y}_j, x_j)^{-2\alpha} \frac{\partial g}{\partial f} (y_j, x_j)^{-2(1-\alpha)}$$

donde  $\hat{y}_j$  es el valor estimado de la variable dependiente. Lemcoff (1977) sugiere el valor de  $\alpha = 0,75$ .

Puesto que recién es posible conocer los valores de  $\frac{\partial g}{\partial f} (\hat{y}_j, x_j)$  luego de realizada la regresión, se aplica un método iterativo estimando inicialmente la derivada a partir de los valores observados. Las iteraciones se continúan hasta que los resultados de dos cálculos sucesivos coincidan dentro de un error prefijado.

Tomemos la ecuación:

$$f = Pe = a.Re^b.Ga^c$$

aplicando la transformación logarítmica queda:

$$g = \log Pe = \log a + b \log Re + c \log Ga$$

La función peso resulta ser:

$$w_j = (Pe)^{2\alpha} (Pe)^{2(1-\alpha)}$$

Aplicando este método de regresión fueron necesarias entre 3 y 4 iteraciones para obtener convergencia. El criterio de corte empleado fue que los valores sucesivos de la suma de los cuadrados de los errores no difieran en más de  $10^{-5}\%$ .

APENDICE A2

Determinación de las viscosidades absolutas de las soluciones  
empleadas

Para determinar las viscosidades de las soluciones se empleó el método de libre escurrido del líquido en un capilar, usándose un viscosímetro UBBELOHDE 200. El mismo se colocó en un baño termostático a la temperatura de trabajo: 17°C. En estas condiciones se midieron los tiempos de escurrido de un determinado volumen (5ml) de cada solución y de agua destilada a través del capilar. Los valores obtenidos fueron:

Tabla A2-1

Solución	$\delta$ (gr/cm <sup>3</sup> )	tiempo (seg)			
		1	2	3	4
H <sub>2</sub> O (dest) (1)	1,000	11,46	11,45	11,52	11,55
2	1,118	24,79	25,08	25,09	25,15
3	1,173	44,83	44,94	45,00	45,00

Asimismo se determinaron las densidades de cada solución

///

mediante una balanza de Mohr. Los valores obtenidos se indican en la tabla A2-1.

Los tiempos de escurrido tienen la siguiente relación con las viscosidades absolutas:

$$\frac{t_{\text{sol } i}}{t_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\mu_{\text{sol } i} / \delta_{\text{sol } i}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}} / \delta_{\text{H}_2\text{O}}} \quad \text{A2-1}$$

Tomando como viscosidad absoluta del agua a 17°C el valor 0,011 poise (Perry, 5<sup>th</sup> ed.) y como densidad del agua el valor de 1,00 gr/cm<sup>3</sup>, reemplazando en la Ec. A2-1, se obtienen los siguientes valores de viscosidad para las soluciones empleadas:

<u>Solución</u>	<u>μ (poise)</u>
1 (H <sub>2</sub> O dest)	0,011
2	0,027
3	0,050

#### Determinación de la tensión superficial de las soluciones empleadas

Se empleó el tensiómetro de Du Nouy Este se calibró con agua destilada y alcohol etílico, para lo cual se utilizaron los va-

lores de tensión superficial ( $\xi$ ) obtenidos de International Critical Tables, Vol. IV, pag. 449 (1929).

Alcohol etílico:

<u>temp(°C)</u>	<u><math>\xi</math> (aire) (dina/cm)</u>
0	24,0
10	23,1
20	22,3
30	21,4

para interpolar se usó la siguiente ecuación:

$$\xi = (230,56 (1 - \frac{T}{516,2})^{1,45} - 304,34 (1 - \frac{T}{516,2})^2 + 139,76 (1 - \frac{T}{516,2})^3) \pm 0,3 \quad \text{para temperaturas entre } (0 - 240)^\circ\text{C}$$

Así resulta el siguiente valor para alcohol etílico:  $\xi^{17^\circ\text{C}} = 23,5$  dina/cm. Para agua destilada se hallaron los siguientes valores de  $\xi$  para distintas temperaturas: (International Critical Tables, Vol. IV, 1929)

<u>temp(°C)</u>	<u><math>\xi</math> (aire) (dina/cm)</u>
15	73,5
16	73,3
<u>17</u>	<u>73,2</u>
18	73,1
19	72,9

Una vez calibrado el tensiómetro, se midió la tensión superficial de las soluciones obteniendo los siguientes valores:

<u>Solución</u>	<u><math>\xi</math> (dina/cm)</u>
1 (H <sub>2</sub> O dest)	73
2	48
3	48

APENDICE A3

Evaluación del coeficiente de difusión del KCl en soluciones de sacarosa en agua

Según trabajos hallados en bibliografía resulta de cierta complejidad la determinación experimental de coeficientes de difusión de electrolitos en soluciones de otras sustancias (Harned y Nuttall, 1947). Debido a que no es el objetivo del presente trabajo, la determinación de estos coeficientes, se los trató de estimar a partir de valores obtenidos en trabajos de bibliografía.

Harned y Shropshire(1958,1960) han obtenido en diversos trabajos publicados el coeficiente de difusión del KCl en soluciones de sacarosa de distinta concentración. A continuación se resumen los resultados publicados:

Solución 0,25 M de sacarosa (Harned y Shropshire; JACHS 80 (1958), 5682)

$c_{KCl}$ (mol <sub>KCl</sub> /l)	0,00473	0,00486	0,00953	0,0103	0,01077
$D_{KCl}^{25} \times 10^5$ (cm <sup>2</sup> /s)	1,617	1,611	1,592	1,601	1,604

$$\mu_0 = 0,0126 \text{ poise}$$

Solución 0,75 M de sacarosa (Ibid. JACHS 82 (1960), 799)

$c_{\text{KCl}}$ (mol <sub>KCl</sub> /l)	0,00414	0,00454	0,00730	0,0091	0,0136
$D_{\text{KCl}}^{25} \times 10^5$ (cm <sup>2</sup> /s)	1,087	1,082	1,094	1,066	1,074

$$\mu_0 = 0,01972 \text{ poise}$$

Para calcular el coeficiente de difusión del KCl en agua pura puede emplearse la ecuación de Onsager y Fuoss que, para el caso de dilución infinita del electrolito, se convierte en la ecuación límite de Nernst:

$$D_{M_0} = 8,931 \times 10^{-10} \cdot T \left( \frac{\lambda_+^0 \lambda_-^0}{\Lambda^0} \right) \left( \frac{z_+ z_-}{z_+ z_-} \right)$$

En todos los casos la concentración del trazador es muy pequeña, por lo que puede suponerse el coeficiente de difusión correspondiente a dilución infinita.

Arvía y col. (1966) determinaron coeficientes de difusión de SO<sub>4</sub>Cu en soluciones acuosas que contenían entre 0 y 10 mol/l de glicerina. Asimismo midieron las viscosidades, cuyos valores oscilaban entre 0,8 y 52 cp. La temperatura se varió entre 18°C y 41°C. Los valores experimentales cumplen satisfactoriamente con la relación de Einstein-Stokes cuya expresión es la siguiente:

///

$$\frac{D_{M.U}}{T} = \text{cte}$$

Según los autores, los valores de esta relación oscilan respecto del valor medio dentro de un 30% en todo el rango de valores de las variables.

Basándose en estos resultados y considerando que se está trabajando en un sistema similar con condiciones mucho menos extremas, se evaluaron los coeficientes de difusión a partir de la relación  $\frac{D_{M.U}}{T}$ , cuyo valor constante se evaluó a partir de los resultados experimentales de Harned y Shropshire (1958, 1960).

#### Cálculo de la relación $D_{M.U}/T$

\* Agua destilada:

Aplicando la ecuación límite de Nernst con los siguientes valores de las variables se obtiene:

$$T = 290 \text{ K (17°C)}$$

$$\lambda_{K^+}^0 = 73,50$$

$$\lambda_{Cl^-}^0 = 76,35$$

$$z_+ = z_- = 1$$

$$\mu^{17^\circ\text{C}} = 0,00895 \text{ poise}$$

$$\Lambda^0 = \lambda_{K^+}^0 + \lambda_{Cl^-}^0 = 149,9$$

se obtiene:

$$\frac{D_{M.U}}{T} = 5,99 \times 10^{-10}$$

///

\* Solución de sacarosa 0,25 M (dilución infinita de KCl)

$$D_M = 1,617 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu = 0,01125 \text{ poise}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

se obtiene: 
$$\frac{D_M \cdot \mu}{T} = 6,09 \times 10^{-10}$$

\* Solución de sacarosa 0,75 M (dilución infinita de KCl)

$$D_M = 1,087 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu = 0,0197 \text{ poise}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

se obtiene: 
$$\frac{D_M \cdot \mu}{T} = 7,19 \times 10^{-10}$$

Cálculo del coeficiente de difusividad del KCl en las soluciones de sacarosa empleadas

Se observa que la relación  $D_M \cdot \mu / T$  presenta una tendencia creciente con la viscosidad. Debido a que las soluciones de sacarosa empleadas en este trabajo tienen concentraciones mayores que 0,75 M, se tomó el valor de la constante correspondiente a este valor de concentración de sacarosa para estimar los coeficientes de difusión. En la siguiente tabla se resumen los datos de  $D_M$  y del nú-

mero de Schmidt hallados para las soluciones empleadas.

#	c (sac.) (M)	$\delta$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu$ (poise)	$D_M$ (cm <sup>2</sup> /s)	Sc ( $\mu/\delta D_M$ )
1	0,0	1,00	0,01	$1,94 \times 10^{-5}$	156
2	0,88	1,118	0,027	$0,722 \times 10^{-5}$	3345
3	1,25	1,173	0,05	$0,42 \times 10^{-5}$	10150

La temperatura de trabajo era de 17°C.

APENDICE A4

Resultados experimentales obtenidos

Resultados experimentales obtenidos para relleno de geometría esférica y viscosidad de líquido: 1 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido</u> (l/min)
1,01	0,475
1,02	0,475
1,03	0,475
1,04	0,475
2,01	0,790
2,02	0,790
2,03	0,790
2,04	0,790
3,01	1,000
3,02	1,000
3,03	1,000
3,04	1,000
4,01	1,410
4,02	1,410
4,03	1,410
5,03	1,850
5,04	1,850
5,05	1,850
6,01	0,300
6,02	0,300
6,03	0,300
6,04	0,300

///

CORRIDA 1.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0
0.9	1.6
1.6	14.5
2.4	42.0
3.2	86.0
4.0	115.0
4.9	127.0

TIEMPO(S)
15.0
17.5
19.0
19.0
20.0
20.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
95.0	0.0	111.0	52.0	125.6	57.5
96.9	0.1	112.0	97.0	126.4	53.0
97.6	0.5	112.9	102.0	127.2	49.0
99.4	1.0	113.6	109.0	129.0	45.0
99.2	2.0	114.4	106.4	129.8	41.5
100.0	3.5	115.2	107.0	129.6	33.0
100.8	5.5	116.0	107.0	130.4	34.5
101.6	8.5	116.8	105.5	131.2	32.0
102.4	12.0	117.6	103.0	132.0	29.0
103.2	16.5	118.4	100.0	132.8	26.0
104.0	22.0	119.2	96.0	133.6	24.0
104.8	29.0	120.0	92.0	134.4	22.0
105.6	36.5	120.8	87.0	135.2	20.0
106.4	44.5	121.6	82.0	136.0	17.0
107.2	52.0	122.4	77.5	136.8	17.0
108.0	61.0	123.2	72.0	137.6	14.0
108.8	70.0	124.0	67.0	138.4	14.5
109.6	78.0	124.8	62.0	139.2	13.5
110.4	85.5				

CORRIDA 1.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	5.6	129.5	11.2	31.5
0.9	2.7	6.4	106.5	12.0	25.5
1.6	19.0	7.2	90.0	12.8	21.0
2.4	52.0	8.0	75.0	13.6	17.0
3.2	91.0	8.8	60.0	14.4	14.0
4.0	117.0	9.6	49.0	15.2	12.0
4.8	125.5	10.4	39.0	16.0	10.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
99.0	0.0	97.0	127.4
99.8	0.5	101.5	128.4
99.6	1.1	104.5	129.2
100.4	2.0	106.0	130.0
101.2	3.5	107.0	130.8
102.0	5.5	107.0	131.6
102.8	8.5	105.0	132.4
103.6	12.0	103.0	133.2
104.4	16.5	100.0	134.0
105.2	22.0	96.5	134.8
106.0	29.0	92.0	135.6
106.8	36.5	87.5	136.4
107.6	44.0	83.0	137.2
108.4	52.5	78.0	138.0
109.2	61.0	73.0	138.8
110.0	69.5	68.0	139.6
110.8	77.5	63.0	140.4
111.6	85.0	58.0	141.2
112.4	91.5		

CORRIDA 1.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	5.6	122.0
0.9	6.4	111.0
1.6	7.2	96.0
2.4	8.0	80.0
3.2	8.9	64.0
4.0	9.6	50.5
4.9	10.4	40.5

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
94.0	0.0	109.2	92.0	124.4	54.0	139.6	11.5
94.9	0.1	110.0	97.0	125.2	59.0	140.4	10.5
95.5	0.5	110.9	101.5	126.0	64.0	141.2	10.0
96.4	1.0	111.6	104.5	126.8	62.5	142.0	9.5
97.2	2.0	112.4	106.5	127.6	39.0	142.8	8.5
98.0	3.5	113.2	107.0	129.4	35.0	143.0	8.0
98.8	5.5	114.0	107.0	129.2	33.0	144.4	7.5
99.6	8.4	114.8	105.5	130.0	30.0	145.2	7.0
100.4	12.0	115.6	103.5	130.9	27.5	146.0	6.5
101.2	16.5	116.4	102.5	131.6	25.3	146.5	6.2
102.0	22.5	117.2	96.5	132.4	23.5	147.5	6.0
102.8	29.0	118.0	92.5	133.2	21.5	148.4	5.8
103.6	36.5	118.8	89.0	134.0	20.0	149.2	5.5
104.4	44.5	119.6	83.0	134.8	18.5	150.0	5.2
105.2	52.5	120.4	78.5	135.0	17.0	150.8	4.8
106.0	61.3	121.2	73.0	136.4	15.5	151.6	4.5
106.8	70.0	122.0	69.0	137.2	14.3	152.4	4.3
107.6	78.0	122.8	64.0	138.0	13.2	153.2	4.1
108.4	85.0	123.6	59.0	138.8	12.5		

CORRIDA 1.04  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	6.4	112.0	12.0	29.5	17.5
0.9	5.5	7.2	94.0	12.8	24.5	13.4
1.6	26.5	8.0	77.0	13.6	20.5	19.2
2.4	66.5	8.8	63.0	14.4	17.5	20.0
3.2	105.5	9.6	52.5	15.2	15.0	20.3
4.0	126.1	10.4	43.5	16.0	12.8	21.0
4.8	134.6	11.2	35.5	16.8	10.8	22.4
5.6	127.0					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
94.0	0.0	110.0	93.0	126.0	11.1
94.9	0.1	110.8	99.2	126.8	10.5
95.6	0.3	111.6	104.2	127.6	9.8
96.4	0.6	112.4	108.0	128.4	9.1
97.2	1.2	113.2	110.0	129.2	8.5
98.0	2.0	114.0	111.0	130.0	7.9
98.8	3.5	114.8	111.3	130.8	7.2
99.6	5.9	115.6	110.5	131.5	7.0
100.4	8.5	116.4	109.0	132.4	6.6
101.2	12.4	117.2	105.0	133.2	6.1
102.0	17.0	118.0	101.5	134.0	5.6
102.8	22.5	118.8	97.0	134.8	5.0
103.6	29.0	119.6	92.5	135.6	5.2
104.4	36.1	120.4	87.5	136.4	5.0
105.2	44.0	121.2	80.5	137.2	4.7
106.0	53.0	122.0	70.0	138.0	4.5
106.8	61.5	122.8	72.2	138.8	4.4
107.6	70.5	123.6	67.5	139.6	4.2
108.4	79.0	124.4	63.0	140.4	4.1
109.2	86.5	125.2	58.0	141.2	4.0

CORRIDA 2.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	161.0	3.4
0.4	1.7	164.5	5.0
1.2	14.5	137.5	9.6
1.8	51.0	100.0	10.2
2.4	105.0	93.0	10.8
3.0	151.5	64.0	11.4
3.6	178.5	49.0	12.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
100.0	0.0	110.9	107.0	121.6	71.6	132.4	13.5
100.6	0.1	111.4	116.0	122.2	65.0	133.0	12.5
101.2	0.3	112.0	123.0	122.8	60.5	133.6	11.5
101.8	1.0	112.6	128.5	123.4	55.0	134.2	10.5
102.4	2.0	113.2	132.5	124.0	50.0	134.8	10.0
103.0	3.5	113.8	134.5	124.6	45.0	135.4	9.5
103.6	5.8	114.4	135.0	125.2	41.0	136.0	8.5
104.2	9.5	115.0	134.5	125.8	37.2	136.6	8.0
104.9	13.5	115.6	132.0	126.4	34.0	137.2	7.5
105.4	19.0	116.2	129.0	127.0	31.0	137.8	7.0
106.0	26.0	116.8	123.5	127.6	27.7	138.4	6.5
106.6	34.0	117.4	118.0	128.2	25.0	139.0	6.0
107.2	42.5	118.0	111.7	128.8	22.3	139.6	5.5
107.8	53.5	118.6	105.0	129.4	21.0	140.2	5.5
108.4	64.7	119.2	55.4	130.0	19.0	140.8	5.0
109.0	76.0	119.8	51.0	130.6	17.5	141.4	4.2
109.6	87.3	120.4	84.6	131.2	16.0	142.0	4.4
110.2	97.5	121.0	78.0	131.8	14.3		

CORRIDA 2.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.3	166.5	9.0	30.5	13.2	7.5
0.6	0.7	5.4	140.5	5.6	24.0	13.3	6.5
1.2	9.5	6.0	112.5	10.2	19.0	14.4	5.8
1.8	38.5	6.6	67.0	10.8	15.5	15.0	5.0
2.4	91.0	7.2	67.0	11.4	12.5	15.6	4.5
3.0	140.0	7.8	51.0	12.0	10.5	16.2	4.0
3.6	172.5	8.4	39.5	12.6	8.9	16.8	3.7
4.2	179.5						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
100.0	6.0	111.4	111.0	122.2	67.5	133.0	13.0
100.6	0.1	112.0	119.0	122.8	62.0	133.6	12.0
101.2	0.4	112.6	125.5	123.4	56.5	134.2	11.2
101.8	0.9	113.2	129.5	124.0	51.5	134.8	10.4
102.4	1.7	113.8	132.0	124.6	47.0	135.4	9.6
103.0	3.0	114.4	133.5	125.2	43.0	136.0	9.1
103.6	5.0	115.0	133.5	125.8	39.0	136.6	8.5
104.2	7.9	115.6	131.5	126.4	35.0	137.2	8.0
104.9	11.5	116.2	128.5	127.0	32.2	137.8	7.5
105.4	16.5	116.8	124.5	127.6	29.2	138.4	6.9
106.0	22.5	117.4	119.0	128.2	26.5	139.0	6.3
106.6	30.0	118.0	113.0	128.8	24.0	139.6	6.0
107.2	38.0	118.6	107.0	129.4	22.0	140.2	5.6
107.8	48.2	119.2	100.0	130.0	20.1	140.8	5.0
108.4	59.0	119.8	93.0	130.6	18.5	141.4	4.5
109.0	70.0	120.4	86.5	131.2	17.0	142.0	4.0
109.6	81.0	121.0	80.0	131.8	15.5	142.6	3.5
110.2	92.0	121.6	73.5	132.4	14.0	143.2	3.0
110.8	101.5						

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	177.5	7.9
0.6	4.0	157.0	8.4
1.2	24.0	129.0	9.0
1.8	66.0	102.0	9.6
2.4	118.5	75.5	10.2
3.0	161.0	61.0	10.8
3.6	191.0		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
99.0	0.0	109.4	107.0	120.2	72.5	131.0
99.6	0.1	110.0	116.0	120.8	67.0	131.6
99.7	0.2	110.6	123.0	121.4	61.0	132.2
99.3	0.4	111.2	129.0	122.0	55.6	132.8
100.4	1.1	111.9	132.5	122.6	50.6	133.4
101.0	2.1	112.4	135.0	123.2	45.0	134.0
101.5	4.0	113.0	125.5	123.8	42.0	134.6
102.2	6.0	113.6	135.0	124.4	33.2	135.2
102.3	10.0	114.2	132.5	125.0	34.3	135.3
103.4	14.0	114.9	129.5	125.6	32.0	135.4
104.0	19.2	115.4	124.0	126.2	23.9	137.0
104.6	26.0	116.0	118.5	126.8	25.2	137.6
105.2	34.0	116.6	112.0	127.4	24.0	138.2
105.8	43.5	117.2	105.5	128.0	22.0	138.8
106.4	53.5	117.8	99.0	128.6	20.0	139.4
107.0	64.5	118.4	92.5	129.2	18.5	140.0
107.5	75.5	119.0	85.5	129.8	17.2	140.6
108.2	86.0	119.6	79.0	130.4	15.6	141.2
108.9	97.5					

CORRIDA 2.04  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	4.2	190.0	7.9	43.2	11.4
0.6	3.3	4.8	160.5	8.4	37.5	12.0
1.2	19.0	5.4	134.0	9.0	29.3	12.6
1.8	57.5	6.0	106.5	9.6	23.0	13.2
2.4	110.0	6.6	83.0	10.2	18.5	13.8
3.0	156.5	7.2	63.5	10.8	15.2	14.4
3.6	190.5					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
100.0	0.0	112.0	124.0	123.4	57.5	134.3
100.6	0.1	112.6	129.5	124.0	52.5	135.4
101.2	0.4	113.2	133.5	124.6	43.0	136.0
101.8	1.0	113.8	136.0	125.2	43.3	136.6
102.4	2.0	114.4	125.3	125.8	35.5	137.2
103.0	3.6	115.0	136.5	126.4	30.2	137.8
103.6	6.0	115.6	134.5	127.0	33.0	138.4
104.2	9.2	116.2	131.0	127.6	30.0	139.0
104.8	13.4	116.8	126.5	128.2	27.5	139.6
105.4	18.0	117.4	121.0	128.8	25.0	140.2
106.0	25.5	118.0	115.0	129.4	23.0	140.8
106.6	34.0	118.6	108.0	130.0	21.0	141.4
107.2	42.5	119.2	102.0	130.6	19.2	142.0
107.8	53.0	119.8	95.0	131.2	17.0	142.6
108.4	62.5	120.4	89.0	131.8	15.2	143.2
109.0	75.0	121.0	81.5	132.4	15.0	143.8
109.6	86.0	121.6	75.2	133.0	13.3	144.4
110.2	97.0	122.2	69.0	133.6	13.0	145.0
110.8	107.5	122.8	63.0	134.2	12.0	145.6
111.4	118.5					

CORRIDA 3.01  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	3.6	159.0	6.7	10.1
0.5	1.4	3.8	161.5	7.2	11.0
1.0	9.0	4.3	151.5	7.7	11.0
1.4	31.0	4.8	133.5	8.2	11.5
1.9	68.0	5.3	112.0	8.6	12.0
2.4	108.0	5.8	51.0	9.1	12.5
2.9	140.0	6.2	72.5	9.6	

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
112.0	0.0	122.6	140.0	132.6	61.0	142.7
112.5	0.2	123.0	145.5	132.1	56.0	143.2
113.0	0.7	123.5	149.5	133.6	51.7	143.7
113.4	1.3	124.0	152.0	134.1	47.5	144.2
113.9	2.5	124.5	152.5	134.6	43.2	144.6
114.4	4.2	125.0	152.5	135.0	39.5	145.1
114.9	6.4	125.4	150.0	135.5	36.5	145.6
115.4	9.0	125.9	147.0	136.0	33.5	146.1
115.8	12.0	126.4	142.5	136.5	30.5	146.6
116.3	17.5	126.9	137.5	137.0	29.0	147.0
116.8	23.5	127.4	131.5	137.4	26.0	147.5
117.3	31.0	127.8	125.0	137.9	24.0	148.0
117.8	39.1	128.3	119.5	138.4	22.0	148.5
118.2	49.0	128.8	111.3	138.9	20.0	149.0
118.7	59.2	129.3	104.5	139.4	18.3	149.5
119.2	70.0	129.8	97.5	139.8	17.5	149.9
119.7	81.5	130.2	90.5	140.3	16.2	150.4
120.2	92.5	130.7	84.0	140.8	15.0	150.9
120.6	104.0	131.2	77.5	141.3	14.0	151.4
121.1	114.5	131.7	72.0	141.8	13.2	151.8
121.6	124.5	132.2	66.0	142.2	12.2	152.3
122.1	133.0					

CORRIDA 3.02  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	4.3	160.0	8.6	25.0	13.0
0.5	0.4	4.8	146.5	9.1	20.0	13.4
1.0	4.0	5.3	127.0	9.6	16.0	13.9
1.4	17.5	5.8	106.0	10.1	14.0	14.4
1.9	45.4	6.2	66.0	10.6	12.0	14.9
2.4	84.0	6.7	68.0	11.0	11.2	15.4
2.9	121.0	7.2	53.5	11.5	10.7	15.8
3.4	149.0	7.7	41.2	12.0	10.4	16.3
3.8	162.0	8.2	32.0	12.5	10.0	

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
112.0	0.0	123.0	135.2	133.6	61.2	144.2
112.5	0.1	123.5	141.5	134.1	56.6	144.6
113.0	0.2	124.0	146.5	134.6	52.0	145.1
113.4	0.6	124.5	149.7	135.0	49.0	145.6
113.9	1.0	125.0	151.5	135.5	44.0	146.1
114.4	1.8	125.4	152.0	136.0	40.5	146.6
114.9	3.0	125.9	151.0	136.5	37.0	147.0
115.4	4.8	126.4	148.7	137.0	34.0	147.5
115.8	7.1	126.9	145.0	137.4	31.2	148.0
116.3	10.0	127.4	141.0	137.9	29.9	148.5
116.8	14.3	127.8	135.5	138.4	26.5	149.0
117.3	19.3	128.3	129.5	138.9	24.3	149.4
117.8	26.0	128.8	123.0	139.4	22.5	149.9
118.2	32.5	129.3	117.0	139.8	20.4	150.4
118.7	42.5	129.8	110.0	140.3	19.0	150.9
119.2	52.5	130.2	103.0	140.8	17.5	151.4
119.7	63.0	130.7	96.5	141.3	16.2	151.8
120.2	74.0	131.2	90.0	141.8	15.0	152.3
120.6	85.3	131.7	84.0	142.2	14.0	152.8
121.1	96.5	132.2	77.3	142.7	13.5	153.3
121.6	107.0	132.6	72.0	143.2	12.5	153.8
122.1	118.0	133.1	66.5	143.7	11.5	154.3
122.6	129.0					

CORRIDA 3.33  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	146.0
0.5	153.5
1.0	133.5
1.4	111.0
1.9	69.5
2.4	71.5
2.9	56.5
3.4	

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
114.0	0.0	123.6	129.5	132.7	34.3	141.5	16.8
114.5	0.2	124.1	136.7	133.2	73.3	142.4	15.0
115.0	0.7	124.6	143.5	133.7	72.0	142.5	14.0
115.4	1.5	125.0	149.0	134.2	66.0	143.3	12.9
115.9	2.5	125.5	153.0	134.6	40.5	143.3	12.0
116.4	4.1	126.0	154.6	135.1	55.5	144.2	11.2
116.9	6.5	126.5	155.5	135.6	50.5	144.7	10.5
117.4	9.5	127.0	155.0	136.1	46.0	145.2	9.8
117.9	13.7	127.4	153.0	136.6	42.0	145.7	9.0
118.3	18.5	127.9	150.0	137.0	33.2	146.2	8.5
118.9	25.0	128.4	145.2	137.5	35.0	146.6	8.0
119.3	32.1	128.9	140.0	138.0	32.0	147.1	7.5
119.9	41.0	129.4	134.0	138.5	29.5	147.6	7.1
120.2	51.2	129.8	127.0	139.0	27.0	148.1	6.8
120.7	62.0	130.3	120.0	139.4	24.5	148.6	6.5
121.2	73.2	130.8	113.0	139.9	22.5	149.0	6.3
121.7	85.0	131.3	106.0	140.4	20.5	149.5	5.8
122.2	97.0	131.8	99.0	140.9	19.0	150.0	5.4
122.6	108.0	132.2	92.0	141.4	17.5	150.5	5.1
123.1	119.5						

CORRIDA 3.34  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	4.3	155.0	9.2	27.0	12.0	5.5
0.5	2.0	4.8	156.5	8.6	21.0	12.5	5.0
1.0	12.2	5.3	114.5	9.1	16.5	13.0	4.5
1.4	37.0	5.8	93.0	9.6	13.0	13.4	4.0
1.9	75.5	6.2	74.0	10.1	10.5	13.9	4.3
2.4	117.0	6.7	58.0	10.6	3.3	14.4	4.2
2.9	147.5	7.2	45.0	11.0	7.2	14.9	4.2
3.4	164.0	7.7	35.0	11.5	5.0	15.4	4.1
3.8	166.5						

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
112.0	0.0	121.6	119.5	131.2	95.0	140.9	16.5
112.5	0.1	122.1	129.0	131.7	73.5	141.3	15.5
113.0	0.2	122.6	137.0	132.2	72.3	141.3	14.5
113.4	0.7	123.0	144.0	132.6	67.0	142.2	13.0
113.9	1.3	123.5	150.0	133.1	51.5	142.7	12.5
114.4	2.4	124.0	153.5	133.5	56.5	143.2	11.5
114.9	4.0	124.5	155.5	134.1	51.5	143.7	10.5
115.4	6.0	125.0	154.5	134.6	47.5	144.2	10.0
115.9	8.9	125.4	154.8	135.0	43.5	144.5	9.3
116.3	13.0	125.9	153.5	135.5	39.0	145.1	8.6
116.9	17.5	126.4	150.0	136.0	37.0	145.6	8.1
117.3	24.2	126.9	146.5	136.5	34.0	146.1	7.5
117.9	31.5	127.4	138.5	137.0	31.0	146.6	7.0
118.2	40.0	127.8	131.0	137.4	29.0	147.0	6.8
118.7	50.0	128.3	127.0	137.9	26.5	147.5	6.7
119.2	60.5	128.7	120.0	138.4	24.6	148.0	6.0
119.7	72.5	129.2	112.0	138.9	23.0	148.5	5.7
120.2	84.0	129.7	105.5	139.4	21.0	149.0	5.5
120.7	96.0	130.2	99.5	139.9	19.0	149.5	5.1
121.1	107.0	130.7	91.1	140.3	17.0		

CORRIDA 4.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.8	151.5	5.6	49.0
0.4	5.0	3.2	175.9	6.0	39.0
0.8	26.5	3.6	153.0	6.4	31.5
1.2	72.0	4.0	125.5	6.8	25.5
1.6	125.5	4.4	109.5	7.2	20.3
2.0	169.5	4.8	79.5	7.6	17.0
2.4	191.5	5.2	62.5	8.0	13.5

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
110.0	0.0	117.6	85.0	125.2	67.3	132.3
110.4	0.1	118.0	93.0	125.6	62.5	133.2
110.8	0.2	118.4	100.4	126.0	57.9	133.6
111.2	0.3	118.8	106.2	126.4	52.6	134.0
111.6	1.1	119.2	111.0	126.8	48.0	134.4
112.0	2.0	119.6	115.0	127.2	43.7	134.8
112.4	3.5	120.0	117.0	127.6	40.0	135.2
112.8	5.0	120.4	118.0	128.0	37.0	135.6
113.2	7.5	120.8	119.0	128.4	33.5	136.0
113.6	11.0	121.2	116.5	128.8	30.5	136.4
114.0	15.0	121.6	114.0	129.2	28.0	136.8
114.4	20.0	122.0	110.5	129.6	25.5	137.2
114.8	25.7	122.4	106.0	130.0	23.3	137.6
115.2	33.0	122.8	101.5	130.4	21.3	138.0
115.6	40.5	123.2	96.0	130.8	20.0	138.4
116.0	49.5	123.6	90.5	131.2	18.6	138.8
116.4	58.5	124.0	84.5	131.6	17.0	139.2
116.8	67.6	124.4	78.8	132.0	15.0	139.6
117.2	76.1	124.8	73.0	132.4	15.0	

CORRIDA 4.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	3.2	179.0	6.0	41.0	8.8	15.0
0.4	1.0	3.6	161.0	6.4	33.0	9.2	13.0
0.8	9.0	4.0	127.0	6.8	28.0	9.6	11.0
1.2	36.5	4.4	110.5	7.2	24.6	10.0	9.0
1.6	85.0	4.8	88.0	7.6	22.0	10.4	7.5
2.0	135.0	5.2	68.0	8.0	19.6	10.8	6.0
2.4	170.0	5.6	52.0	8.4	17.5	11.2	5.0
2.8	183.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
112.0	0.0	119.2	74.2	126.4	76.0	133.6	15.0
112.4	0.2	119.6	82.3	126.8	70.3	134.0	14.0
112.8	0.4	120.0	89.1	127.2	65.3	134.4	13.0
113.2	0.9	120.4	96.2	127.6	60.5	134.8	12.0
113.6	1.5	120.8	101.5	128.0	55.5	135.2	11.0
114.0	2.2	121.2	105.5	128.4	51.5	135.6	10.0
114.4	3.5	121.6	109.5	128.8	47.2	136.0	9.5
114.8	5.5	122.0	110.5	129.2	43.5	136.4	8.8
115.2	8.0	122.4	111.5	129.6	39.6	136.8	8.0
115.6	11.0	122.8	111.5	130.0	36.0	137.2	7.3
116.0	15.0	123.2	110.0	130.4	33.0	137.6	6.5
116.4	20.5	123.6	107.0	130.8	30.0	138.0	6.2
116.8	26.5	124.0	104.0	131.2	27.0	138.4	5.8
117.2	33.0	124.4	100.5	131.6	24.9	138.8	5.2
117.6	41.0	124.8	96.0	132.0	22.8	139.2	5.0
118.0	49.5	125.2	91.5	132.4	20.5	139.6	4.6
118.4	57.5	125.6	86.5	132.8	17.5	140.0	4.2
118.8	66.0	126.0	81.0	133.2	17.0		

CORRIDA 4.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	3.2	152.0	6.0
0.4	2.5	3.6	158.0	6.4
0.8	16.0	4.0	129.5	6.8
1.2	48.5	4.4	103.3	7.2
1.6	97.0	4.8	61.5	7.6
2.0	146.0	5.2	63.0	8.0
2.4	178.5	5.6	50.0	8.4
2.8	190.0			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
108.0	0.0	116.8	55.0	125.2	40.5
109.4	0.1	117.7	101.5	125.5	45.9
108.9	0.7	117.4	107.0	126.0	41.5
109.2	0.6	118.0	111.0	126.4	39.5
109.6	0.9	118.4	114.0	126.8	35.0
110.0	1.2	118.8	115.5	127.2	31.3
110.4	2.0	119.2	116.0	127.6	27.0
110.8	3.0	119.6	115.5	128.0	25.5
111.2	4.5	120.0	114.0	129.4	24.2
111.5	6.9	120.4	110.5	123.6	22.0
112.0	9.5	120.8	106.8	129.2	20.0
112.4	13.0	121.2	102.5	129.6	18.5
112.8	17.5	121.6	97.5	130.0	17.0
113.2	23.0	122.0	91.6	130.4	15.5
113.6	29.3	122.4	86.5	130.8	14.5
114.0	36.5	122.8	81.0	131.2	13.0
114.4	44.1	123.2	75.5	131.6	12.0
114.8	52.5	123.6	70.0	132.0	11.5
115.2	61.2	124.0	65.0	132.4	10.5
115.6	70.1	124.4	59.4	132.8	10.0
116.0	79.1	124.8	54.5	133.2	9.4
116.4	87.0				

CORRIDA 5.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	3.0	2.4	147.5	4.5	66.5
0.3	0.5	2.7	148.0	4.9	52.0
0.7	7.0	3.1	138.0	5.1	41.0
1.0	21.5	3.4	122.0	5.5	32.5
1.4	60.5	3.8	103.0	5.8	26.0
1.7	101.5	4.1	64.0	6.2	21.0
2.1	133.0				

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
106.0	0.0	111.8	73.0	117.7	76.0
106.3	0.2	112.2	61.0	118.0	71.0
106.7	0.4	112.5	89.0	118.3	65.5
107.0	1.0	112.9	55.0	119.7	60.5
107.4	1.5	113.2	101.0	119.0	56.2
107.7	3.0	113.5	105.0	119.4	50.5
108.1	4.5	113.9	109.0	119.7	45.3
108.4	6.8	114.2	110.5	120.1	41.3
108.7	10.0	114.5	110.5	120.4	38.0
109.1	13.5	114.9	110.0	120.7	34.3
109.4	18.5	115.3	108.0	121.1	31.0
109.8	24.0	115.6	105.0	121.4	28.0
110.1	31.0	115.9	101.5	121.8	25.5
110.5	39.0	116.3	97.5	122.1	23.0
110.8	47.0	116.6	92.0	122.5	21.0
111.1	55.5	117.0	87.0	122.8	19.0
111.5	64.0	117.3	81.0	123.1	17.0

CORRIDA 5.04  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	2.4	4.3
0.3	2.5	2.7	5.1
0.7	12.0	3.1	5.5
1.0	35.5	3.4	5.8
1.4	71.0	3.8	6.2
1.7	106.5	4.1	6.5
2.1	125.0	4.5	6.9

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
106.0	0.0	112.2	76.0	118.0	64.2	123.3
106.3	0.1	112.5	83.0	118.3	59.5	124.2
106.7	0.2	112.9	88.7	118.7	54.5	124.5
107.0	0.8	113.2	93.5	119.0	50.0	124.9
107.4	1.5	113.5	98.0	119.4	45.5	125.2
107.7	2.9	113.9	100.5	119.7	41.5	125.5
108.1	4.2	114.2	101.7	120.1	38.0	125.9
108.4	6.4	114.6	102.0	120.4	34.0	126.2
108.7	9.3	114.9	101.5	120.7	31.0	126.6
109.1	12.9	115.3	100.0	121.1	28.0	126.9
109.4	18.5	115.6	97.0	121.4	25.5	127.3
109.8	23.0	115.9	93.0	121.8	23.0	127.6
110.1	25.5	116.3	89.0	122.1	20.8	127.9
110.5	36.5	116.6	84.5	122.5	19.0	128.3
110.8	44.5	117.0	80.0	122.8	17.5	128.6
111.1	52.5	117.3	74.5	123.1	15.5	129.0
111.5	60.0	117.7	69.5	123.5	14.0	129.3
111.9	68.0					

CORRIDA 5.05  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.4	120.0	4.8	42.5
0.3	2.0	2.7	129.0	5.1	32.4
0.7	10.0	3.1	117.5	5.5	25.3
1.0	31.0	3.4	101.0	5.8	17.7
1.4	63.5	3.8	84.0	6.2	15.0
1.7	96.0	4.1	68.5	6.5	12.0
2.1	120.0	4.5	54.5	6.9	10.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
106.0	0.0	112.5	74.0	119.0	69.5	125.5
106.3	0.2	112.9	79.0	119.4	65.4	125.9
106.7	0.3	113.2	84.0	119.7	62.0	126.2
107.0	0.3	113.5	87.5	120.1	58.5	126.5
107.4	1.2	113.9	90.0	120.4	55.5	126.9
107.7	2.5	114.2	91.5	120.7	52.2	127.3
108.1	3.9	114.6	92.0	121.1	49.4	127.6
108.4	5.9	114.9	92.0	121.4	47.0	127.9
108.7	8.3	115.3	91.0	121.8	45.0	128.3
109.1	11.2	115.6	89.0	122.1	43.0	128.6
109.4	15.4	115.9	86.0	122.5	41.0	129.0
109.8	20.5	116.3	83.0	122.8	39.2	129.3
110.1	26.0	116.6	79.5	123.1	38.0	129.7
110.5	32.0	117.0	75.0	123.5	36.0	130.0
110.8	38.5	117.3	71.0	123.8	34.3	130.3
111.1	46.0	117.7	66.0	124.2	33.5	130.7
111.5	53.0	118.0	62.0	124.5	32.5	131.0
111.8	60.5	118.2	57.5	124.9	31.2	131.4
112.2	68.0	118.7	53.5	125.2	30.5	

CORRIDA 6.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	9.6	35.0	19.2
1.2	0.2	10.7	72.0	20.4
2.4	5.5	12.0	58.0	21.6
3.6	24.0	13.2	47.0	22.7
4.8	58.0	14.4	37.5	24.0
6.0	35.0	15.6	30.0	25.2
7.2	96.0	16.8	24.2	26.4
8.4	95.0	18.0	19.5	27.6

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
76.0	0.0	99.9	87.5	120.4	40.0	142.0
77.2	0.4	100.0	50.5	121.6	37.0	143.2
78.4	0.6	101.2	52.5	122.8	33.5	144.4
79.6	1.0	102.4	53.0	124.0	30.0	145.6
80.8	1.9	103.6	53.0	125.2	24.2	146.8
82.0	3.0	104.8	51.5	126.4	25.5	148.0
83.2	5.1	106.0	69.0	127.6	23.4	149.2
84.4	8.1	107.2	66.0	128.8	21.2	150.4
85.6	12.0	108.4	82.0	130.0	19.3	151.6
86.8	17.0	109.6	79.5	131.2	17.5	152.8
88.0	22.8	110.8	74.5	132.4	16.2	154.0
89.2	30.0	112.0	69.9	133.6	14.3	155.2
90.4	38.0	113.2	65.5	134.8	13.5	156.4
91.6	46.5	114.4	60.5	136.0	12.5	157.6
92.8	55.0	115.6	56.0	137.2	11.5	158.8
94.0	63.3	116.8	52.0	138.4	10.5	160.0
95.2	70.5	118.0	47.5	139.6	10.0	161.2
96.4	77.7	119.2	43.5	140.8	9.2	162.4
97.6	83.2					

CORRIDA 6.02  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	75.5	19.2	15.0	23.2	4.9
1.2	4.5	10.7	60.5	20.4	12.5	30.3	4.2
2.4	25.5	12.0	46.5	21.6	10.7	31.2	4.0
3.6	63.5	13.2	38.5	22.8	9.2	32.4	3.8
4.8	94.0	14.4	31.0	24.0	8.0	33.6	3.3
6.0	105.5	15.6	25.8	25.2	7.0	34.8	3.1
7.2	102.5	16.8	21.0	26.4	6.0	36.0	3.0
8.4	90.5	18.0	17.5	27.6	5.5		

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
74.0	0.0	96.9	52.5	119.4	41.0	140.0	10.2
75.2	0.2	98.0	55.0	119.6	38.0	141.2	9.0
76.4	0.5	99.2	56.5	120.8	35.0	142.4	8.0
77.6	1.1	100.4	57.0	122.0	32.5	143.6	8.5
78.8	2.2	101.6	56.2	123.2	30.0	144.8	8.2
80.0	4.2	102.8	54.0	124.4	27.4	146.0	7.5
81.2	7.1	104.0	51.0	125.6	25.0	147.2	7.2
82.4	10.5	105.2	48.0	126.8	23.0	148.4	6.8
83.6	15.0	106.4	44.0	128.0	21.2	149.6	6.5
84.8	21.0	107.6	39.5	129.2	19.0	150.8	6.0
86.0	27.5	108.8	35.5	130.4	17.0	152.0	5.8
87.2	35.5	110.0	30.5	131.6	16.0	153.2	5.5
88.4	44.0	111.2	26.0	132.8	15.5	154.4	5.2
89.6	53.0	112.4	21.5	134.0	14.5	155.6	4.8
90.8	61.2	113.6	17.0	135.2	13.2	156.8	4.5
92.0	69.1	114.8	12.5	136.4	12.5	158.0	4.2
93.2	76.5	116.0	8.5	137.6	11.5	159.2	4.0
94.4	83.0	117.2	4.0	138.8	10.5	160.4	3.8
95.6	89.5						

CORRIDA 6.04  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	9.4	108.5	16.8
1.2	4.5	9.6	90.0	18.0
2.4	27.5	10.2	73.4	19.2
3.6	68.0	12.0	59.0	20.4
4.8	107.0	13.2	46.5	21.6
6.0	124.0	14.4	37.2	22.8
7.2	123.0	15.6	30.0	24.0

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
74.0	0.0	95.8	101.2	119.6	49.0	142.4	11.0
75.2	0.1	94.0	106.0	120.8	45.0	143.6	10.2
76.4	0.2	93.2	110.0	122.0	41.5	144.8	9.5
77.6	0.5	100.4	112.0	123.2	33.0	146.0	9.0
78.8	1.1	101.6	112.5	124.4	35.0	147.2	8.5
80.0	2.5	102.8	112.5	125.6	32.0	148.4	8.0
81.2	4.2	104.0	110.5	126.8	29.0	149.6	7.6
82.4	7.1	105.2	107.0	128.0	26.7	150.8	7.3
83.6	10.6	106.4	103.0	129.2	23.5	152.0	6.8
84.8	16.0	107.6	99.0	130.4	22.4	153.2	6.4
86.0	22.5	108.8	94.2	131.6	21.1	154.4	6.1
87.2	30.5	110.0	88.9	132.8	19.5	155.6	5.8
88.4	39.0	111.2	83.2	134.0	17.0	156.8	5.5
89.6	48.5	112.4	78.2	135.2	16.0	158.0	5.1
90.8	58.0	113.6	72.8	136.4	15.5	159.2	4.8
92.0	68.5	114.8	67.5	137.6	14.5	160.4	4.6
93.2	78.0	116.0	62.5	138.8	13.5	161.6	4.3
94.4	87.5	117.2	57.8	140.0	12.5	162.8	4.2
95.6	95.0	118.4	53.5	141.2	11.5		

CORRIDA 6.04  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	9.4	60.0	15.6	23.0	22.8
1.2	3.0	9.6	67.5	16.8	14.5	24.0
2.4	17.5	10.2	54.5	18.0	15.0	25.2
3.6	45.0	12.0	44.0	19.2	12.0	26.4
4.8	72.5	13.2	35.0	20.4	10.0	27.6
6.0	82.0	14.4	29.0	21.6	3.5	28.8
7.2	88.5					

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
76.0	0.0	96.4	72.4	116.8	47.0	137.2
77.2	0.2	97.6	77.5	118.0	43.5	138.4
78.4	0.4	98.8	81.3	119.2	40.0	139.6
79.6	0.9	100.0	84.0	120.4	36.5	140.8
80.8	1.6	101.2	85.5	121.6	33.5	142.0
82.0	3.0	102.4	86.0	122.8	30.5	143.2
83.2	5.4	103.6	85.5	124.0	29.0	144.4
84.4	8.5	104.8	84.0	125.2	25.5	145.6
85.6	12.0	106.0	81.5	126.4	23.5	146.8
86.8	17.0	107.2	78.5	127.6	21.5	148.0
88.0	22.5	108.4	75.0	128.8	20.0	149.2
89.2	29.5	109.6	71.0	130.0	17.5	150.4
90.4	36.0	110.8	67.0	131.2	16.4	151.6
91.6	44.5	112.0	63.0	132.4	15.5	152.8
92.8	52.2	113.2	59.0	133.6	14.2	154.0
94.0	59.0	114.4	54.5	134.8	13.2	155.2
95.2	61.5	115.6	50.0	136.0	12.0	

Resultados experimentales obtenidos para geometría esférica y  
viscosidad de líquido: 2,7 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido (l/min)</u>
34,01	0,570
34,02	0,570
34,03	0,570
33,01	0,412
33,03	0,412
33,04	0,412
35,01	0,291
35,02	0,291
35,03	0,291
35,04	0,291
36,01	0,203
36,02	0,203
36,03	0,203
37,01	0,137
37,02	0,137
37,03	0,137
38,01	0,094
38,02	0,094
39,01	0,068
39,02	0,068
39,03	0,068

///

CORRIDA 34.01  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	7.0	122.0	14.4
1.4	2.5	7.6	52.0	16.0
3.2	35.0	11.2	65.0	17.6
4.8	97.0	12.8	42.0	19.2
6.4	129.0			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
128.0	0.0	147.2	70.2	166.4	47.0	185.6
129.6	1.0	148.8	76.2	168.0	35.0	187.2
131.2	2.0	150.4	80.0	169.6	30.4	188.8
132.8	4.0	152.0	91.5	171.2	26.5	190.4
134.4	7.5	153.6	60.5	172.8	25.0	192.0
136.0	12.5	155.2	77.0	174.4	20.0	193.6
137.6	18.5	156.8	73.5	176.0	17.5	195.2
139.2	26.5	158.4	68.5	177.6	15.0	196.8
140.8	35.0	160.0	63.0	179.2	13.2	198.4
142.4	45.0	161.6	57.0	180.8	11.3	200.0
144.0	53.5	163.2	51.5	182.4	10.3	201.6
145.6	62.0	164.8	45.5	184.0	9.2	

CORRIDA 34.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	9.0	131.0	14.4	25.5	20.8
1.4	6.0	9.6	58.0	16.0	19.5	22.4
3.2	52.0	11.2	65.0	17.6	10.5	24.0
4.8	116.0	12.8	42.0	19.2	7.0	25.6
6.4	145.0					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
124.0	0.0	143.2	69.0	162.4	47.5	181.6
125.6	0.8	144.8	74.0	164.0	42.0	183.2
127.2	1.5	146.4	78.5	165.6	36.0	184.8
128.8	3.0	148.0	91.0	167.2	32.0	186.4
130.4	6.0	149.6	82.0	168.8	23.0	188.0
132.0	10.0	151.2	81.5	170.4	24.0	189.6
133.6	15.0	152.8	79.5	172.0	21.2	191.2
135.2	22.5	154.4	75.0	173.6	18.5	192.8
136.8	31.5	156.0	70.0	175.2	16.3	194.4
138.4	40.0	157.6	64.5	176.8	14.0	196.0
140.0	50.5	159.2	59.0	178.4	12.0	197.6
141.6		160.8	53.0	180.0	10.8	

CORRIDA 34.03  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	8.0	126.0	14.4	25.0	20.8	5.3
1.4	9.5	9.6	50.0	16.0	15.5	22.4	4.0
3.2	67.0	11.2	61.0	17.6	11.0	24.0	3.0
4.8	141.0	12.8	39.0	19.2	7.5	25.6	2.5
6.4	150.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
120.0	0.2	150.2	158.4	69.0	177.6	9.5
121.6	0.4	148.8	160.0	43.5	179.2	8.2
123.2	1.0	147.4	161.6	31.0	180.8	7.2
124.8	2.1	149.0	163.2	33.5	182.4	6.2
126.4	4.5	145.6	164.8	29.5	184.0	5.0
128.0	7.4	147.2	166.4	25.5	185.6	5.0
129.6	13.0	148.8	168.0	22.0	187.2	4.5
131.2	19.4	150.4	169.6	19.5	188.8	4.0
132.8	29.0	152.0	171.2	16.5	190.4	3.5
134.4	37.0	153.6	172.8	14.5	192.0	3.0
136.0	46.5	155.2	174.4	12.2	193.6	2.5
137.6	56.5	156.8	176.0	10.5		

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	109.0	14.4	34.0	20.3
1.6	2.0	51.0	16.0	24.0	22.4
3.2	32.0	49.0	17.6	17.0	24.0
4.8	30.0		19.2	12.0	25.5
6.4	109.0				

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
169.0	0.0	190.4	29.5	211.2	24.5	232.0	0.2
169.6	0.2	192.0	32.0	212.8	22.0	233.6	5.5
171.2	0.7	193.6	34.0	214.4	27.5	235.2	5.0
172.9	1.2	195.2	35.5	216.0	19.5	236.8	4.5
174.4	2.2	196.9	36.5	217.6	16.5	238.4	4.0
176.0	3.5	198.4	37.0	219.2	15.0	240.0	3.5
177.5	5.5	200.0	37.0	220.8	13.0	241.6	3.0
179.2	7.9	201.6	36.0	222.4	11.7	243.2	2.8
190.9	10.5	203.2	34.5	224.0	10.7	244.8	2.4
182.4	13.5	204.8	33.0	225.6	9.5	246.4	2.1
184.0	17.0	206.4	31.0	227.2	9.5	248.0	1.5
195.6	20.5	208.0	29.0	228.8	7.3	249.6	1.7
187.2	23.5	209.6	27.0	230.4	6.7	251.2	1.5
188.8	27.0						

CORRIDA 33.03

EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	136.0	17.6	26.5	25.6	5.5
1.6	4.0	11.2	106.0	19.2	19.5	27.2	4.5
3.2	35.0	12.8	78.0	20.8	13.5	28.8	3.5
4.8	96.0	14.4	54.0	22.4	10.0	30.4	3.0
6.4	144.0	16.0	37.5	24.0	7.3	32.0	2.7
8.0	154.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
156.0	0.0	180.0	59.5	204.0	46.5	228.0	5.0
157.6	0.2	181.6	64.5	205.6	41.5	229.6	8.0
159.2	0.5	183.2	68.5	207.2	37.5	231.2	7.5
160.8	1.2	184.8	71.0	208.8	33.0	232.8	6.7
162.4	2.3	186.4	73.0	210.4	30.0	234.4	6.0
164.0	4.1	188.0	73.5	212.0	26.5	236.0	5.4
165.6	6.5	189.6	73.2	213.6	23.5	237.6	5.0
167.2	10.0	191.2	72.0	215.2	21.0	239.2	4.4
168.8	14.0	192.8	70.0	216.8	19.0	240.8	4.0
170.4	19.0	194.4	67.5	218.4	17.5	242.4	3.7
172.0	25.0	196.0	65.0	220.0	15.0	244.0	3.5
173.6	32.0	197.6	61.5	221.6	13.5	245.6	3.1
175.2	39.0	199.2	58.5	223.2	12.0	247.2	2.8
176.8	46.5	200.8	55.0	224.8	11.0	248.8	2.5
178.4	53.5	202.4	50.5	226.4	9.8		

CORRIDA 33.04

EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	127.0	17.6	2.5	25.6	5.0
1.6	5.0	11.2	99.0	19.2	16.0	27.2	4.2
3.2	34.0	12.8	68.0	20.8	12.0	28.8	3.5
4.8	93.0	14.4	47.0	22.4	7.5	30.4	2.7
6.4	132.0	16.0	33.0	24.0	6.5	32.0	2.4
8.0	143.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
152.0	0.0			204.8	30.5	230.4	5.8
153.6	0.4			206.4	27.4	232.0	5.5
155.2	0.6			208.0	25.0	233.6	5.0
156.8	1.0			209.6	22.5	235.2	4.5
158.4	2.0			211.2	20.0	236.8	4.0
160.0	3.5			212.8	17.0	238.4	4.3
161.6	5.5			214.4	14.0	240.0	4.1
163.2	8.0			216.0	11.0	241.6	4.0
164.8	11.0			217.6	8.0	243.2	3.7
166.4	15.0			219.2	5.0	244.8	3.0
168.0	20.0			220.8	2.0	246.4	2.7
169.6	26.0			222.4	0.0	248.0	2.4
171.2	33.0			224.0	0.0	249.6	2.5
172.8	42.0			225.6	0.0	251.2	2.7
174.4	53.0			227.2	0.0	252.8	2.8
176.0	66.0			228.8	0.0	254.4	2.5
177.6	81.0						

CORRIDA 35.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0
2.4	7.0
4.8	35.0
7.2	57.5

TIEMPO(S)
18.2
19.2
21.7

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
120.0	0.0	149.8	62.0	177.6	45.0	206.4
122.4	0.4	151.2	65.5	180.0	40.0	208.2
124.8	1.2	153.6	74.5	182.4	35.0	211.2
127.2	2.6	156.0	78.0	184.8	30.5	213.6
129.6	4.9	159.4	79.1	187.2	27.0	216.0
132.0	8.0	160.8	79.0	189.6	23.5	218.4
134.4	12.5	163.2	77.0	192.0	20.7	220.8
136.8	19.0	165.6	73.0	194.4	18.5	223.2
139.2	26.5	168.0	68.0	196.8	16.0	225.6
141.6	35.0	170.4	63.0	199.2	14.0	228.0
144.0	44.0	172.8	57.0	201.6	12.5	230.4
146.4	53.5	175.2	51.0	204.0	10.5	

CORRIDA 35.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0
2.4	6.0
4.8	73.0
7.2	155.0
9.6	170.0

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
12.0	137.0
14.4	55.0
16.8	66.0
19.2	43.0

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
21.6	23.0
24.0	18.5
26.4	12.0
28.8	8.5

TIEMPO(S)
31.2
33.6
35.0
38.4

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
120.0	0.0	147.3	49.0	177.6	46.0	206.4
122.4	0.2	151.2	56.5	180.0	41.0	208.2
124.8	0.5	153.6	62.0	182.4	36.5	211.2
127.2	1.0	156.0	66.5	184.8	32.5	213.6
129.6	2.2	159.4	70.0	187.2	29.0	216.0
132.0	4.5	160.8	70.5	189.6	25.0	218.4
134.4	7.8	163.2	69.5	192.0	22.0	220.8
136.8	12.0	165.6	67.5	194.4	19.4	223.2
139.2	18.0	168.0	64.5	196.8	16.5	225.6
141.6	25.0	170.4	61.0	199.2	14.5	228.0
144.0	32.5	172.8	55.5	201.6	12.6	230.4
146.4	40.5	175.2	50.5	204.0	11.4	

CORRIDA 35.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0
2.4	8.0
4.8	70.0
7.2	155.0
9.6	194.0

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
12.0	152.0
14.4	109.0
16.8	71.0
19.2	45.0

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
21.6	29.5
24.0	18.5
26.4	12.0
28.8	3.5

TIEMPO(S)
31.2
33.6
36.0
38.4

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
120.0	0.0	147.3
122.4	0.4	151.2
124.8	0.8	153.6
127.2	2.3	156.0
129.6	4.6	159.4
132.0	8.0	160.8
134.4	12.5	163.2
136.8	19.0	165.6
139.2	26.5	168.0
141.6	34.0	170.4
144.0	42.5	172.8
146.4	51.0	175.2

CORRIDA 36.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	12.0	77.5	21.6	20.5	31.2
2.4	6.0	14.4	69.0	24.0	14.0	35.0
4.8	35.0	16.8	43.0	26.4	10.0	36.0
7.2	71.0	19.2	29.5	28.8	7.1	39.4
9.6	85.0					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
148.0	0.0	163.3	78.0	227.2	33.0	265.4	7.5
150.4	0.4	161.7	75.6	225.6	30.0	265.0	6.7
152.8	1.0	163.6	80.0	232.0	27.0	270.4	6.2
155.2	2.0	156.0	90.0	234.4	24.0	272.0	5.9
157.6	4.0	159.4	78.5	236.8	22.0	275.2	5.5
160.0	6.6	200.3	76.0	239.2	20.0	277.6	5.2
162.4	10.0	203.2	72.5	241.6	13.0	290.0	4.8
164.8	15.0	205.6	69.0	244.0	15.0	292.4	4.5
167.2	16.0	209.0	65.5	246.4	14.5	284.8	4.2
169.6	28.0	210.4	61.0	248.8	13.4	287.2	4.0
172.0	35.0	212.8	57.0	251.2	12.0	289.6	3.9
174.4	43.0	215.2	52.0	253.6	11.0	292.0	3.8
176.8	51.0	217.6	48.0	256.0	10.0	294.4	3.5
179.2	56.5	220.0	43.5	258.4	9.3	296.8	3.2
181.6	65.0	222.4	39.6	260.8	8.5	299.2	3.1
184.0	70.0	224.8	36.0	263.2	8.0	301.6	3.0
186.4	74.5						

CORRIDA 37.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	12.0	81.5	24.0	30.5	36.0	7.8
2.4	4.5	14.4	78.0	26.4	20.5	38.4	6.2
4.8	22.0	16.8	67.0	28.8	16.5	40.8	5.0
7.2	48.0	19.2	53.5	31.2	12.5	43.2	4.1
9.6	71.0	21.6	41.0	33.6	10.0		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
176.0	0.0	224.0	67.7	269.6	43.0	315.2	11.0
178.4	0.3	226.4	71.5	272.0	40.5	317.6	10.0
180.8	0.6	228.8	74.5	274.4	39.5	320.0	9.5
183.2	0.9	231.2	76.7	276.8	34.5	322.4	8.7
185.6	1.5	233.6	78.0	279.2	32.2	324.8	8.1
188.0	2.3	236.0	78.5	281.6	30.0	327.2	7.3
190.4	3.6	238.4	78.5	284.0	27.3	329.6	7.2
192.8	5.5	240.8	77.5	286.4	26.0	332.0	6.9
195.2	8.0	243.2	76.0	288.8	24.0	334.4	6.3
197.6	11.0	245.6	74.0	291.2	22.2	336.8	6.0
200.0	14.5	248.0	71.5	293.6	20.5	339.2	5.8
202.4	19.5	250.4	68.5	296.0	19.0	341.6	5.5
204.8	24.5	252.8	65.2	298.4	17.6	344.0	5.1
207.2	29.5	255.2	62.0	300.8	16.5	346.4	4.9
209.6	35.0	257.6	59.0	303.2	15.5	348.8	4.7
212.0	41.0	260.0	55.5	305.6	14.2	351.2	4.5
214.4	47.0	262.4	52.0	308.0	13.0	353.6	4.2
216.8	52.5	264.8	49.0	310.4	12.0	356.0	4.0
219.2	59.0	267.2	46.0	312.8	11.7	358.4	3.8
221.6	63.0						

CORRIDA 35.14  
 EMAL DE ENTRADA

-199-

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	17.0	191.0	24.0	36.0
2.4	7.5	19.4	140.0	26.4	37.4
4.9	72.0	14.3	59.0	28.8	40.3
7.2	191.0	19.2	65.0	31.2	43.2
9.6	215.0	21.6	42.5	33.6	

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
124.0	0.0	157.0	54.0	191.6	210.4
125.4	0.2	155.2	60.5	184.0	212.3
129.7	0.6	157.6	66.0	186.4	215.2
131.2	1.5	160.0	69.5	188.8	217.6
133.6	5.5	162.4	71.0	191.2	220.0
136.0	6.2	164.8	71.0	193.6	222.4
138.4	10.1	167.2	70.0	196.0	224.8
140.0	15.5	169.6	67.0	198.4	227.2
143.2	22.5	172.0	63.0	200.8	229.6
145.6	25.5	174.4	59.0	203.2	232.0
148.0	38.0	176.8	54.0	205.6	234.4
150.4	46.0	179.2	49.0	208.0	

CORRIDA 36.01  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	12.0	159.0	24.0	35.0	36.0
2.4	6.5	14.4	173.0	26.4	25.0	38.4
4.9	52.0	16.8	125.0	28.8	17.5	40.3
7.2	137.0	19.2	85.0	31.2	12.6	43.2
9.6	197.0	21.6	54.0	33.6	9.6	

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
148.0	0.0	186.4	61.7	222.4	39.7	259.4
150.4	0.3	188.8	65.5	224.8	35.2	260.3
152.8	0.5	191.2	68.0	227.2	33.0	263.2
155.2	1.1	193.6	69.5	229.6	30.0	265.6
157.6	2.1	196.0	70.0	232.0	27.5	268.0
160.0	3.7	198.4	69.8	234.4	24.5	270.4
162.4	6.2	200.8	68.7	236.8	22.4	272.3
164.8	9.5	203.2	67.0	239.2	20.5	275.2
167.2	12.5	205.6	64.3	241.6	18.7	277.6
169.6	18.6	208.0	61.4	244.0	17.0	280.0
172.0	24.3	210.4	58.4	246.4	15.5	282.4
174.4	31.2	212.8	54.3	248.8	14.2	284.8
176.8	38.0	215.2	50.5	251.2	13.0	287.2
179.2	45.0	217.6	46.5	253.6	12.0	289.6
181.6	51.0	220.0	43.0	256.0	11.0	292.0
184.0	57.0					

CORRIDA 36.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	12.0	75.0	21.6	20.5	31.2
2.4	4.0	14.4	55.0	24.0	14.5	33.6
4.9	27.0	16.8	42.5	26.4	10.0	36.0
7.2	63.0	19.2	25.5	28.8	7.5	38.4
9.6	90.0					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
148.0	0.0	185.4	64.0	224.8	37.0	263.2
150.4	0.2	187.8	68.5	227.2	33.5	265.6
152.8	0.5	191.2	71.5	229.6	30.5	268.0
155.2	1.2	193.6	73.2	232.0	24.0	270.4
157.6	2.7	196.0	74.0	234.4	25.6	272.8
160.0	4.4	198.4	73.5	236.8	23.5	275.2
162.4	7.0	200.8	71.8	239.2	21.3	277.6
164.8	10.4	203.2	69.5	241.6	19.5	280.0
167.2	15.0	205.6	66.4	244.0	17.0	282.4
169.6	20.0	208.0	63.0	246.4	15.0	284.8
172.0	24.0	210.4	59.0	248.8	13.0	287.2
174.4	28.5	212.8	55.0	251.2	11.0	289.6
176.8	35.0	215.2	51.0	253.6	10.0	292.0
179.2	45.0	217.6	47.5	256.0	11.0	294.4
181.6	50.0	220.0	43.5	258.4	10.0	296.8
184.0	55.5	222.4	40.3	260.8	9.5	

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	14.0	26.4	26.0
2.4	2.0	16.0	28.0	19.5
4.9	14.0	17.0	31.2	14.5
7.2	40.0	46.0	33.6	11.0
9.6	56.0	35.0	36.0	3.5
12.0	72.0			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
190.0	0.0	223.0	70.5	273.6	43.5	219.2
132.4	0.2	230.4	73.6	276.0	40.5	221.0
184.7	0.5	232.8	76.6	278.4	34.0	224.0
197.2	1.0	235.2	79.5	280.8	35.0	226.4
199.6	1.6	237.6	79.5	283.2	32.5	220.4
192.0	2.0	240.0	80.0	285.6	30.5	231.2
194.4	4.7	242.4	79.5	288.0	28.3	233.6
196.8	7.0	244.8	78.5	290.4	26.0	236.0
199.2	9.6	247.2	77.0	292.8	23.9	238.4
201.6	13.0	249.6	74.6	295.2	22.0	240.8
204.0	17.0	252.0	72.1	297.6	20.5	243.2
206.4	22.0	254.4	69.5	300.0	19.0	245.6
208.8	27.8	256.8	66.5	302.4	17.5	248.0
211.2	33.4	259.2	63.0	304.8	16.2	250.4
213.6	39.3	261.6	60.0	307.2	15.0	252.8
216.0	45.0	264.0	56.5	309.6	14.0	255.2
218.4	51.0	266.4	53.0	312.0	13.0	257.6
220.8	57.0	268.8	50.0	314.4	12.3	260.0
223.2	62.2	271.2	46.7	316.8	11.5	262.4
225.6	66.5					

CORRIDA 37.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	14.4	11.5	26.4	25.5	32.4	6.5
2.4	1.2	16.9	73.0	28.8	19.0	40.8	5.2
4.9	9.5	17.2	60.0	31.2	14.0	43.2	4.2
7.2	32.0	21.6	47.0	33.6	10.5	45.6	3.5
9.6	60.5	24.0	35.0	36.0	3.3	48.0	3.0
12.0	79.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
184.0	0.0	229.6	71.0	275.2	46.5	220.8	11.5
186.4	0.3	232.0	74.5	277.6	43.5	223.2	10.8
188.8	0.8	234.4	77.5	280.0	40.5	225.6	10.2
191.2	1.4	236.8	79.7	282.4	39.0	228.0	9.5
193.6	2.4	239.2	81.0	284.8	35.0	230.4	9.0
196.0	3.9	241.6	81.8	287.2	32.5	232.8	8.5
198.4	5.9	244.0	81.0	289.6	30.5	235.2	7.5
200.8	8.5	246.4	81.0	292.0	29.5	237.6	7.2
203.2	11.5	248.8	79.8	294.4	26.2	240.0	7.0
205.6	15.0	251.2	78.0	296.8	24.4	242.4	6.5
208.0	19.5	253.6	75.5	299.2	22.4	244.8	6.1
210.4	24.7	256.0	72.5	301.6	20.9	247.2	5.8
212.8	30.4	258.4	70.0	304.0	19.5	249.6	5.5
215.2	36.4	260.8	67.0	306.4	18.0	252.0	5.1
217.6	42.5	263.2	63.5	308.8	16.6	254.4	4.9
220.0	49.0	265.6	60.0	311.2	15.0	256.8	4.7
222.4	55.0	268.0	56.5	313.6	14.5	259.2	4.5
224.8	61.0	270.4	53.0	316.0	13.5	261.6	4.2
227.2	66.7	272.8	49.5	318.4	12.5		

CORRIDA 38.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	14.0	12.0	26.0
4.0	4.0	20.0	40.5	32.0
8.0	16.0	26.0	28.5	38.0
12.0	53.0			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
132.0	244.0
134.0	248.0
136.0	252.0
138.0	256.0
140.0	260.0
142.0	264.0
144.0	268.0
146.0	272.0
148.0	276.0
150.0	280.0
152.0	284.0
154.0	288.0
156.0	292.0
158.0	296.0

TIEMPO(S)  
 0.0  
 4.0  
 8.0  
 12.0  
 16.0  
 ENAL DE SALIDA

ALTURA(M)  
 112.0  
 84.0  
 56.0  
 28.0  
 25.5

TIEMPO(S)  
 40.0  
 44.0  
 48.0  
 52.0  
 56.0

ALTURA(M)  
 11.0  
 13.3  
 15.0  
 17.0  
 19.5

TIEMPO(S)  
 60.0  
 64.0  
 68.0  
 72.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 136.0 0.0  
 140.0 0.2  
 144.0 1.0  
 148.0 2.3  
 152.0 4.3  
 156.0 7.0  
 160.0 10.0  
 164.0 14.5  
 168.0 20.0  
 172.0 25.0  
 176.0 30.5  
 180.0 36.5  
 184.0 41.5  
 188.0 47.0  
 192.0 50.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 196.0 53.5  
 200.0 55.0  
 204.0 57.0  
 208.0 57.5  
 212.0 57.3  
 216.0 55.3  
 220.0 54.2  
 224.0 52.0  
 228.0 49.5  
 232.0 47.2  
 236.0 44.0  
 240.0 40.5  
 244.0 38.0  
 248.0 35.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 252.0 32.0  
 256.0 27.5  
 260.0 27.0  
 264.0 25.0  
 268.0 23.5  
 272.0 20.5  
 276.0 19.0  
 280.0 17.5  
 284.0 15.0  
 288.0 14.5  
 292.0 13.5  
 296.0 12.5  
 300.0 11.2  
 304.0 10.3

TIEMPO(S)  
 208.0  
 312.0  
 316.0  
 320.0  
 324.0  
 328.0  
 332.0  
 336.0  
 340.0  
 344.0  
 348.0  
 352.0  
 356.0  
 360.0

CORRIDA 39.01  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 0.0 0.0  
 4.0 2.5  
 8.0 23.0  
 12.0 60.0  
 16.0 98.0  
 20.0 95.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 24.0 62.0  
 28.0 65.0  
 32.0 49.5  
 36.0 37.0  
 40.0 27.5

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 44.0 20.5  
 48.0 19.0  
 52.0 12.0  
 56.0 9.5  
 60.0 7.5

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 64.0 6.0  
 68.0 5.0  
 72.0 4.2  
 76.0 3.0  
 80.0 3.2

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 160.0 0.0  
 164.0 0.3  
 168.0 0.8  
 172.0 1.5  
 176.0 2.7  
 180.0 4.5  
 184.0 7.0  
 188.0 9.0  
 192.0 12.0  
 196.0 17.1  
 200.0 21.2  
 204.0 26.3  
 208.0 31.0  
 212.0 35.0  
 216.0 39.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 220.0 42.7  
 224.0 46.0  
 228.0 48.5  
 232.0 50.0  
 236.0 51.0  
 240.0 51.0  
 244.0 50.8  
 248.0 50.0  
 252.0 48.6  
 256.0 47.0  
 260.0 45.0  
 264.0 42.5  
 268.0 40.5  
 272.0 38.5  
 276.0 36.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 280.0 33.5  
 284.0 31.4  
 288.0 29.0  
 292.0 27.0  
 296.0 25.0  
 300.0 22.0  
 304.0 21.0  
 308.0 19.2  
 312.0 17.5  
 316.0 15.2  
 320.0 15.0  
 324.0 14.0  
 328.0 13.0  
 332.0 12.2  
 336.0 11.3

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 340.0 10.7  
 344.0 10.0  
 348.0 9.5  
 352.0 9.0  
 356.0 8.5  
 360.0 7.7  
 364.0 7.2  
 368.0 6.6  
 372.0 6.2  
 376.0 5.7  
 380.0 5.3  
 384.0 4.9  
 388.0 4.7  
 392.0 4.2

CORRIDA 39.02  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 0.0 0.0  
 4.0 11.0  
 8.0 42.0  
 12.0 70.5  
 16.0 90.0

TIEMPO(S)  
 20.0  
 24.0  
 28.0  
 32.0  
 36.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 40.0 19.2  
 44.0 13.5  
 48.0 10.5  
 52.0 9.2  
 56.0 5.5

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 60.0 5.2  
 64.0 4.2  
 68.0 3.5  
 72.0 3.0

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 156.0 0.0  
 160.0 0.3  
 164.0 1.0  
 168.0 1.7  
 172.0 3.0  
 176.0 4.7  
 180.0 7.0  
 184.0 9.0  
 188.0 12.0  
 192.0 17.0  
 196.0 21.0  
 200.0 26.0  
 204.0 31.0  
 208.0 35.0  
 212.0 39.0

TIEMPO(S)  
 216.0  
 220.0  
 224.0  
 228.0  
 232.0  
 236.0  
 240.0  
 244.0  
 248.0  
 252.0  
 256.0  
 260.0  
 264.0  
 268.0  
 272.0

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 280.0 33.5  
 284.0 31.4  
 288.0 29.0  
 292.0 27.0  
 296.0 25.0  
 300.0 22.0  
 304.0 21.0  
 308.0 19.2  
 312.0 17.5  
 316.0 15.2  
 320.0 15.0  
 324.0 14.0  
 328.0 13.0  
 332.0 12.2  
 336.0 11.3

TIEMPO(S) ALTURA(M)  
 340.0 10.7  
 344.0 10.0  
 348.0 9.5  
 352.0 9.0  
 356.0 8.5  
 360.0 7.7  
 364.0 7.2  
 368.0 6.6  
 372.0 6.2  
 376.0 5.7  
 380.0 5.3  
 384.0 4.9  
 388.0 4.7  
 392.0 4.2

CORRIJA 39.33  
 FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	24.0	122.5	43.0	22.0	72.0	5.8
4.0	6.5	23.0	96.0	52.0	17.0	76.0	5.1
8.0	35.0	32.0	72.0	56.0	13.0	80.0	4.5
12.0	107.0	36.0	53.0	60.0	10.5	84.0	4.6
16.0	143.5	40.0	29.5	64.0	3.6	88.0	3.4
20.0	144.0	44.0	29.5	68.0	7.0		

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
156.0	0.0	223.0	71.0	300.0	33.5	372.0	
160.0	0.2	232.0	71.6	304.0	31.0	376.0	
164.0	1.0	236.0	72.0	308.0	28.5	380.0	
168.0	2.2	240.0	71.9	312.0	26.5	384.0	
172.0	4.1	244.0	71.0	316.0	24.5	388.0	
176.0	6.6	248.0	69.7	320.0	22.4	392.0	
180.0	10.5	252.0	69.0	324.0	21.2	396.0	
184.0	14.8	256.0	66.0	328.0	20.0	400.0	
188.0	20.0	260.0	63.5	332.0	18.5	404.0	
192.0	25.5	264.0	61.0	336.0	17.2	408.0	
196.0	32.0	268.0	59.5	340.0	16.0	412.0	
200.0	39.5	272.0	55.0	344.0	15.0	416.0	
204.0	46.0	276.0	52.0	348.0	13.9	420.0	
208.0	52.5	280.0	48.5	352.0	12.9	424.0	
212.0	58.0	284.0	45.2	356.0	12.0	428.0	
216.0	62.5	288.0	42.0	360.0	11.2	432.0	
220.0	66.5	292.0	39.0	364.0	10.5	436.0	
224.0	69.0	296.0	36.5	368.0	9.9		

Resultados experimentales obtenidos para relleno de geometría esférica y viscosidad de líquido: 5 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido (l/min)</u>
40,01	0,225
40,02	0,225
40,03	0,225
40,04	0,225
42,01	0,180
41,01	0,161
41,02	0,161
41,03	0,161
43,01	0,139
43,02	0,134
44,01	0,814
44,02	0,814
45,01	0,066
45,02	0,066
45,03	0,066

CORRIDA 40.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	15.0	173.0	32.0
4.0	5.0	20.0	123.0	36.0
8.0	98.0	24.0	77.0	40.0
12.0	190.0	28.0	44.0	44.0

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
92.0	0.0	124.0	44.3	164.0	200.0	25.3
96.0	0.4	137.0	62.0	169.0	204.0	19.0
100.0	1.1	136.0	90.0	172.0	205.0	13.2
104.0	2.6	140.0	55.5	176.0	212.0	9.6
108.0	4.5	144.0	107.5	180.0	216.0	7.5
112.0	7.5	141.0	115.5	184.0	220.0	5.5
116.0	12.5	152.0	117.5	188.0	224.0	4.2
120.0	20.0	156.0	116.0	192.0	228.0	3.4
124.0	30.5	160.0	111.0	196.0		

CORRIDA 40.02  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	16.0	171.0	32.0	25.0	48.0	4.4
4.0	3.0	20.0	125.0	36.0	15.5	52.0	3.2
8.0	67.0	24.0	79.0	40.0	9.0	56.0	2.1
12.0	170.0	28.0	45.0	44.0	6.0		

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
100.0	0.0	140.0	65.0	176.0	79.0	212.0	16.0
104.0	0.4	144.0	59.0	180.0	69.0	216.0	14.0
108.0	1.6	148.0	108.0	184.0	59.0	220.0	12.0
112.0	4.1	152.0	113.0	188.0	50.0	224.0	10.0
116.0	9.0	156.0	114.0	192.0	43.0	228.0	8.4
120.0	15.5	160.0	112.0	196.0	36.5	232.0	7.0
124.0	25.5	164.0	106.5	200.0	31.0	236.0	5.5
128.0	38.0	168.0	58.5	204.0	25.3	240.0	4.2
132.0	52.0	172.0	69.2	208.0	21.0	244.0	3.1
136.0	65.0						

CORRIDA 40.03  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	27.0	135.0	36.0	15.0	52.0	3.4
4.0	4.0	24.0	81.0	40.0	9.5	56.0	2.3
8.0	70.0	23.0	46.0	44.0	6.4	60.0	2.2
12.0	170.0	32.0	26.0	48.0	4.9	64.0	2.0
16.0	195.0						

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
92.0	0.0	137.0	68.0	169.0	98.0	204.0	17.0
96.0	0.3	136.0	64.0	172.0	78.0	208.0	13.5
100.0	0.7	140.0	57.2	176.0	68.0	212.0	11.2
104.0	1.2	144.0	106.5	180.0	58.5	216.0	9.0
108.0	3.5	148.0	111.5	184.0	47.0	220.0	7.0
112.0	7.0	152.0	112.7	188.0	33.5	224.0	5.9
116.0	12.2	156.0	111.0	192.0	32.0	228.0	4.5
120.0	23.0	160.0	105.0	196.0	25.5	232.0	3.5
124.0	35.0	164.0	97.0	200.0	20.5	236.0	2.3
128.0	51.0						

CORRIDA 40.24  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	16.0	177.0	32.0
4.0	20.0	131.0	36.0
8.0	24.0	82.0	40.0
12.0	24.0	47.0	44.0

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
96.0	0.0	140.0	66.0	180.0	65.4	220.0	9.4
100.0	0.5	144.0	67.0	184.0	56.5	224.0	6.2
104.0	2.0	148.0	105.0	188.0	47.5	228.0	7.0
108.0	3.5	152.0	109.2	192.0	41.0	232.0	6.1
112.0	5.5	156.0	109.2	196.0	34.0	236.0	5.4
116.0	11.0	160.0	106.2	200.0	23.5	240.0	4.6
120.0	19.0	164.0	100.5	204.0	23.0	244.0	4.2
124.0	30.0	168.0	93.2	208.0	19.5	248.0	3.6
128.0	42.0	172.0	84.0	212.0	14.5	252.0	3.4
132.0	57.0	176.0	75.0	216.0	11.5	256.0	3.0

CORRIDA 41.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	20.0	144.0	36.0	23.5	52.0
4.0	2.0	24.0	107.5	40.0	19.0	56.0
8.0	37.0	28.0	72.5	44.0	11.4	60.0
12.0	112.0	32.0	46.0	48.0	7.4	64.0
16.0	153.5					

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
128.0	0.0	172.0	66.7	212.0	78.0	252.0	19.4
132.0	0.4	176.0	76.5	216.0	70.7	256.0	16.3
136.0	2.0	180.0	88.0	220.0	63.4	260.0	13.8
140.0	4.4	184.0	94.5	224.0	56.5	264.0	11.5
144.0	8.0	188.0	98.0	228.0	50.0	268.0	9.5
148.0	12.5	192.0	99.0	232.0	43.5	272.0	7.7
152.0	18.0	196.0	97.9	236.0	37.5	276.0	6.4
156.0	26.0	200.0	95.0	240.0	32.0	280.0	5.1
160.0	34.0	204.0	90.0	244.0	26.7	284.0	4.4
164.0	44.2	208.0	84.0	248.0	22.6	288.0	3.8
168.0	55.4						

CORRIDA 41.02  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	20.0	145.0	36.0	25.0	52.0	5.4
4.0	5.0	24.0	103.0	40.0	16.2	56.0	4.0
8.0	51.0	28.0	67.0	44.0	10.7	60.0	3.2
12.0	138.0	32.0	41.5	48.0	7.4	64.0	2.5
16.0	145.0						

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
128.0	0.0	76.5	216.0	64.5
132.0	0.5	85.0	220.0	59.0
136.0	2.0	90.6	224.0	53.5
140.0	4.3	93.7	228.0	47.0
144.0	9.2	95.0	232.0	42.0
148.0	15.4	96.0	236.0	36.4
152.0	23.0	91.0	240.0	31.0
156.0	32.0	86.5	244.0	25.5
160.0	42.0	81.0	248.0	22.2
164.0	54.5	76.0	252.0	19.0
168.0	68.0	70.0	256.0	15.2

CORRIDA 41.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(M)
0.0	0.0	156.5
4.0	1.2	136.0
8.0	25.0	53.0
12.0	78.0	56.0
16.0	130.0	

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
128.0	0.0	173.0	60.0	216.0
132.0	0.3	175.0	70.0	220.0
135.0	1.0	180.0	77.5	224.0
140.0	2.9	184.0	84.5	228.0
144.0	5.5	189.0	89.5	232.0
149.0	10.4	192.0	92.3	236.0
152.0	16.2	196.0	93.0	240.0
156.0	24.0	200.0	91.2	244.0
160.0	32.0	204.0	87.0	248.0
144.0	41.0	204.0	81.5	252.0
158.0	50.5	212.0	75.0	256.0

CORRIDA 42.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	16.0	53.0	32.0	25.5	48.0
4.0	1.6	20.0	59.5	36.0	13.5	52.0
8.0	12.0	24.0	45.5	40.0	12.5	56.0
12.0	38.0	29.0	36.5	44.0	9.5	

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
120.0	0.0	169.0	36.0	212.0	42.0	256.0
124.0	0.4	172.0	42.0	216.0	37.5	260.0
129.0	0.7	176.0	47.0	220.0	34.0	264.0
132.0	1.0	180.0	51.0	224.0	30.0	268.0
136.0	1.4	184.0	53.5	228.0	26.7	272.0
140.0	3.0	189.0	55.5	232.0	24.0	276.0
144.0	5.5	192.0	55.3	236.0	21.2	280.0
148.0	8.5	196.0	54.6	240.0	17.8	284.0
152.0	13.0	200.0	52.4	244.0	15.7	288.0
156.0	17.5	204.0	49.5	248.0	13.5	292.0
160.0	23.5	209.0	46.0	252.0	12.0	296.0
164.0	30.0					

CORRIDA 43.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	24.0	125.0	44.0	30.0	64.0
4.0	4.5	29.0	111.0	48.0	21.5	68.0
8.0	16.5	32.0	93.5	52.0	15.5	72.0
12.0	61.0	36.0	60.0	56.0	11.5	76.0
16.0	116.0	40.0	42.5	60.0	8.8	80.0
20.0	142.0					

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
144.0	0.0	200.0	44.0	252.0	40.0
147.0	0.2	204.0	49.0	256.0	36.7
152.0	0.7	208.0	52.0	260.0	33.5
156.0	1.4	212.0	54.5	264.0	30.1
160.0	2.5	216.0	56.0	268.0	27.5
164.0	4.0	220.0	56.0	272.0	24.7
168.0	5.7	224.0	54.5	276.0	22.0
172.0	8.5	228.0	52.0	280.0	19.5
176.0	12.2	232.0	50.5	284.0	17.4
180.0	17.0	236.0	50.5	288.0	15.5
184.0	21.2	240.0	51.0	292.0	14.0
188.0	27.0	244.0	47.5	296.0	12.5
192.0	34.0	248.0	44.0	300.0	11.0
196.0	42.0				

CORRIDA 43.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	20.0	146.5	40.0
4.0	5.0	24.0	132.0	44.0
8.0	22.0	28.0	108.0	48.0
12.0	74.0	32.0	50.0	52.0
16.0	128.0	36.0	53.0	56.0

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
148.0	0.0	200.0	45.0	252.0	42.0	304.0
152.0	0.2	204.0	50.5	256.0	38.0	308.0
156.0	0.7	208.0	54.5	260.0	34.5	312.0
160.0	2.0	212.0	57.8	264.0	31.6	316.0
164.0	3.2	216.0	60.5	268.0	29.5	320.0
168.0	5.1	220.0	61.5	272.0	28.4	324.0
172.0	9.0	224.0	61.7	276.0	22.3	328.0
176.0	12.0	228.0	60.0	280.0	20.5	332.0
180.0	16.1	232.0	59.0	284.0	19.2	336.0
184.0	22.0	236.0	55.5	288.0	16.0	340.0
188.0	27.0	240.0	52.0	292.0	14.7	344.0
192.0	33.2	244.0	49.5	296.0	13.0	348.0
196.0	39.2	248.0	45.5	300.0	11.7	

CORRIDA 44.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	24.0	81.0	48.0	34.0	72.0
4.0	1.6	28.0	84.5	52.0	26.0	76.0
8.0	5.0	32.0	77.5	56.0	20.0	80.0
12.0	17.0	36.0	66.0	60.0	15.7	84.0
16.0	39.0	40.0	54.0	64.0	12.0	88.0
20.0	64.0	44.0	43.0	68.0	9.5	

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
204.0	0.0	276.0	46.5	348.0	34.5	420.0	11.5
208.0	0.3	280.0	50.0	352.0	34.6	424.0	10.5
212.0	0.5	284.0	51.0	356.0	33.0	428.0	10.2
216.0	1.1	288.0	53.0	360.0	31.2	432.0	9.5
220.0	2.1	292.0	54.0	364.0	29.5	436.0	8.5
224.0	3.5	296.0	54.5	368.0	27.0	440.0	8.5
228.0	5.0	300.0	54.0	372.0	25.0	444.0	8.0
232.0	7.5	304.0	54.7	376.0	23.5	448.0	7.0
236.0	9.8	308.0	54.0	380.0	22.0	452.0	6.5
240.0	12.5	312.0	53.1	384.0	20.5	456.0	6.4
244.0	15.5	316.0	52.0	388.0	19.0	460.0	6.0
248.0	19.5	320.0	51.5	392.0	17.8	464.0	5.7
252.0	23.0	324.0	48.0	396.0	16.0	468.0	5.2
256.0	27.5	328.0	46.6	400.0	15.5	472.0	4.5
260.0	32.0	332.0	44.5	404.0	14.7	476.0	4.0
264.0	35.5	336.0	43.0	408.0	14.0	480.0	4.0
268.0	40.0	340.0	41.0	412.0	13.0	484.0	3.5
272.0	43.5	344.0	39.0	416.0	12.5		

CORRIDA 45.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	56.0	72.0	25.0	104.0
8.0	8.0	74.0	60.0	17.2	112.0
16.0	40.0	42.0	48.0	12.5	120.0
24.0	86.0	35.0	36.0	7.7	128.0
32.0	107.0				

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)
128.0
136.0
144.0
152.0
160.0
168.0
176.0
184.0
192.0
200.0
208.0
216.0
224.0

CORRIDA 45.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	106.5	72.0
8.0	5.5	85.5	80.0
16.0	24.0	67.0	86.0
24.0	65.0	47.0	96.0
32.0	101.0		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
132.0	0.0	244.0	77.5	356.0	34.5	468.0	8.0
140.0	0.3	252.0	81.1	364.0	31.0	476.0	8.0
148.0	1.0	260.0	82.9	372.0	27.5	484.0	7.5
156.0	2.6	268.0	82.7	380.0	24.5	492.0	6.7
164.0	4.9	276.0	80.5	388.0	22.0	500.0	6.2
172.0	8.5	284.0	77.3	396.0	19.0	508.0	5.7
180.0	14.0	292.0	73.2	404.0	16.0	516.0	5.4
188.0	21.0	300.0	68.2	412.0	15.0	524.0	5.1
196.0	28.5	308.0	63.5	420.0	14.3	532.0	4.8
204.0	36.5	316.0	57.5	428.0	13.6	540.0	4.6
212.0	45.5	324.0	52.5	436.0	12.7	548.0	4.4
220.0	55.0	332.0	47.5	444.0	11.9	556.0	4.0
228.0	64.5	340.0	42.7	452.0	10.5	564.0	3.8
236.0	71.5	348.0	38.3	460.0	9.6		

CORRIDA 45.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	40.0	108.0	80.0	20.0
8.0	5.0	48.0	55.0	88.0	17.0
16.0	22.0	56.0	72.0	96.0	14.0
24.0	62.0	64.0	52.0	104.0	10.4
32.0	96.0	72.0	37.0	112.0	8.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
132.0	0.0	244.0	75.0	348.0	40.4	452.0	9.9
140.0	0.4	252.0	78.7	356.0	36.5	460.0	8.8
148.0	1.0	260.0	80.6	364.0	32.5	468.0	8.1
156.0	2.4	268.0	81.0	372.0	29.0	476.0	7.6
164.0	4.5	276.0	80.0	380.0	26.5	484.0	6.8
172.0	7.7	284.0	77.5	388.0	23.7	492.0	6.4
180.0	13.0	292.0	73.9	396.0	21.0	500.0	6.0
188.0	19.0	300.0	69.0	404.0	18.6	508.0	5.5
196.0	26.7	308.0	64.5	412.0	17.0	516.0	5.0
204.0	35.5	316.0	58.5	420.0	15.3	524.0	4.6
212.0	44.7	324.0	54.3	428.0	14.5	532.0	4.4
220.0	53.7	332.0	49.7	436.0	12.0	540.0	4.2
228.0	62.0	340.0	44.7	444.0	10.6	548.0	4.0
236.0	69.4						

Resultados experimentales obtenidos para relleno de geometría cilíndrica y viscosidad de líquido: 1 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido (l/min)</u>
11.01	1,750
11.02	1,750
11.03	1,750
12.01	1,410
12.02	1,410
12.03	1,410
13.01	1,000
13.02	1,000
13.03	1,000
14.01	0,810
14.02	0,810
14.03	0,810
15.01	0,475
15.02	0,475
15.03	0,475
16.01	0,300
16.02	0,300
16.03	0,300

(continuación)

17.01	0,790
17.02	0,790
17.03	0,790
18.02	1,750
18.02	1,750
19.01	2,100
19.02	2,100
19.03	2,100
20.01	2,530
20.02	2,530
20.03	2,530

CORRIDA 11.01  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	163.0	5.2	50.0
0.4	2.5	151.0	5.6	39.0
0.8	15.5	130.0	6.0	29.5
1.2	43.0	105.0	6.4	22.0
1.6	88.0	84.0	6.8	17.0
2.0	127.0	65.0	7.2	13.5
2.4	155.0			

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
102.0	0.0	110.0	72.5	118.0	35.5	126.0	6.5
102.4	0.2	110.4	78.5	118.4	33.0	126.4	6.0
102.8	0.3	110.8	82.5	118.8	27.5	126.8	5.5
103.2	0.6	111.2	86.0	119.2	26.5	127.2	5.3
103.6	1.0	111.6	87.5	119.6	24.0	127.6	5.0
104.0	1.8	112.0	89.5	120.0	21.5	128.0	4.8
104.4	2.5	112.4	89.5	120.4	19.5	128.4	4.5
104.8	4.5	112.8	87.5	120.8	18.0	128.8	4.1
105.2	6.5	113.2	85.5	121.2	16.2	129.2	4.0
105.6	8.5	113.6	83.0	121.6	14.5	129.6	3.9
106.0	11.5	114.0	79.5	122.0	13.2	130.0	3.7
106.4	16.0	114.4	75.5	122.4	12.0	130.4	3.5
106.8	20.5	114.8	71.0	122.8	11.0	130.8	3.3
107.2	27.0	115.2	66.5	123.2	10.2	131.2	3.2
107.6	33.5	115.6	62.0	123.6	9.5	131.6	3.2
108.0	40.5	116.0	57.5	124.0	8.8	132.0	3.1
108.4	47.0	116.4	53.0	124.4	8.3	132.4	3.1
108.8	53.5	116.8	48.5	124.8	7.6	132.8	3.0
109.2	60.0	117.2	44.5	125.2	7.3	133.2	3.0
109.6	67.0	117.6	40.0	125.6	7.0		

CORRIDA 11.02  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.8	164.5	5.2	54.0	7.5	
0.4	1.2	3.2	163.0	5.6	41.0	8.0	
0.8	8.5	3.6	143.5	6.0	31.0	8.4	
1.2	32.5	4.0	120.0	6.4	23.5	8.8	
1.6	70.0	4.4	93.0	6.8	19.0	9.2	
2.0	114.0	4.8	72.0	7.2	13.5	9.5	
2.4	147.5						

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
106.0	0.0	112.4	56.0	118.4	70.5	124.4	16.0
106.4	0.3	112.8	62.5	118.8	65.5	124.8	14.2
106.8	0.7	113.2	69.0	119.2	60.5	125.2	12.5
107.2	1.0	113.6	74.5	119.6	56.0	125.6	11.2
107.6	1.7	114.0	79.7	120.0	51.0	126.0	10.0
108.0	3.0	114.4	84.0	120.4	46.5	126.4	9.0
108.4	4.5	114.8	87.0	120.8	42.5	126.8	8.0
108.8	6.5	115.2	89.0	121.2	38.5	127.2	7.5
109.2	9.5	115.6	89.5	121.6	34.5	127.6	
109.6	12.4	116.0	89.5	122.0	31.0	128.0	
110.0	17.5	116.4	86.0	122.4	27.5	128.4	
110.4	22.0	116.8	86.0	122.8	24.5	128.8	
110.8	26.5	117.2	83.0	123.2	22.0	129.2	
111.2	35.0	117.6	78.5	123.6	19.5	129.6	
111.6	42.0	118.0	75.0	124.0	18.0	130.0	
112.0	49.5						

CORRIDA 11.02  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)	ALTURA (MM)
0.0	0.0	169.0
0.4	0.2	172.0
0.8	2.5	141.0
1.2	14.0	115.0
1.6	46.0	90.1
2.0	93.0	71.1
2.4	125.0	53.5
2.8	136.0	

ENAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)	TIEMPO (S)	ALTURA (MM)	TIEMPO (S)	TIEMPO (S)
109.0	0.0	114.0	65.0	121.2	127.0
108.4	0.4	115.2	71.5	121.6	128.0
109.9	0.6	115.6	77.5	122.0	129.4
109.2	1.2	116.0	82.5	122.4	129.9
109.6	1.9	116.4	86.5	122.8	129.2
110.0	3.0	116.8	89.2	123.2	129.6
110.4	4.6	117.2	91.0	123.6	130.0
110.8	7.0	117.6	91.2	124.0	130.4
111.2	9.7	118.0	91.0	124.4	130.8
111.6	12.5	118.4	89.2	124.8	131.2
112.0	17.5	118.8	87.0	125.2	131.6
112.4	23.0	119.2	84.0	125.6	132.0
112.8	29.0	119.6	80.5	126.0	132.4
113.2	36.0	120.0	76.0	126.4	132.8
113.6	42.5	120.4	71.5	126.8	133.2
114.0	50.0	120.8	66.5	127.2	133.6
114.4	57.5				

CORRIDA 12.01  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
0.0	0.0	3.2	156.0	6.4	49.0	9.6	9.2
0.4	1.5	3.6	159.5	6.8	39.0	10.0	7.8
0.8	7.0	4.0	150.0	7.2	31.0	10.4	6.5
1.2	22.5	4.4	124.0	7.6	25.0	10.8	5.5
1.6	51.0	4.8	113.0	8.0	20.0	11.2	4.8
2.0	83.0	5.2	94.0	8.4	16.2	11.6	4.2
2.4	116.0	5.6	76.0	8.8	13.3	12.0	3.8
2.8	141.0	6.0	61.0	9.2	11.0		

ENAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
124.0	0.0	132.0	73.0	140.0	70.0	148.0	13.6
124.4	0.2	132.4	80.0	140.4	65.5	148.4	12.5
124.8	0.5	132.8	85.5	140.8	61.0	148.8	11.5
125.2	1.0	133.2	90.0	141.2	56.5	149.2	10.2
125.6	1.7	133.6	94.5	141.6	52.5	149.6	10.0
126.0	2.3	134.0	98.5	142.0	48.5	150.0	9.5
126.4	3.8	134.4	101.0	142.4	44.5	150.4	8.5
126.8	5.5	134.8	103.0	142.8	41.0	150.8	7.7
127.2	7.5	135.2	104.0	143.2	38.0	151.2	7.2
127.6	10.5	135.6	104.0	143.6	34.5	151.6	6.8
128.0	13.8	136.0	103.4	144.0	31.5	152.0	6.2
128.4	17.5	136.4	102.5	144.4	29.0	152.4	5.8
128.8	22.0	136.8	100.5	144.8	26.5	152.8	5.5
129.2	27.0	137.2	98.5	145.2	24.5	153.2	5.0
129.6	32.5	137.6	95.0	145.6	22.5	153.6	4.8
130.0	39.0	138.0	91.0	146.0	20.3	154.0	4.4
130.4	45.5	138.4	87.5	146.4	18.2	154.4	4.1
130.8	52.5	138.8	83.0	146.8	17.5	154.8	4.0
131.2	59.5	139.2	79.0	147.2	16.0	155.2	3.8
131.6	67.0	139.6	74.5	147.6	15.0		

CORRIDA 12.12  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	160.0	10.0
0.4	147.0	10.4
0.8	127.0	10.8
1.2	107.0	11.2
1.6	97.0	11.6
2.0	70.5	12.0
2.4	55.5	12.4
2.8	44.0	12.8
3.2		

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
124.0	0.0	132.0	71.0	139.4	147.2	17.2
124.4	0.3	122.4	77.5	140.0	147.6	16.0
124.8	0.5	132.8	83.0	140.4	148.0	14.4
125.2	1.0	133.2	88.5	140.8	148.4	13.2
125.6	1.6	133.6	93.0	141.2	148.8	12.2
126.0	2.5	134.0	96.5	141.6	149.2	11.4
126.4	3.6	134.4	99.5	142.0	149.6	10.4
126.8	5.5	134.8	101.5	142.4	150.0	9.7
127.2	7.6	135.2	102.0	142.8	150.4	9.0
127.6	10.5	135.6	102.2	143.2	150.8	8.2
128.0	13.5	136.0	101.6	143.6	151.2	7.6
128.4	17.5	136.4	100.8	144.0	151.6	7.1
128.8	21.5	136.8	98.5	144.4	152.0	6.5
129.2	26.5	137.2	95.5	144.8	152.4	6.0
129.6	32.0	137.6	92.1	145.2	152.8	5.6
130.0	37.5	138.0	89.0	145.6	153.2	5.3
130.4	44.5	138.4	85.5	146.0	153.6	5.0
130.8	51.0	138.8	81.0	146.4	154.0	4.5
131.2	57.5	139.2	77.5	146.8	154.4	4.2
131.6	64.0					

CORRIDA 12.33  
FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	3.2	153.5	6.4	46.0	9.6
0.4	2.0	3.6	153.0	6.8	37.0	10.0
0.8	10.5	4.0	141.5	7.2	30.5	10.4
1.2	31.0	4.4	124.0	7.6	25.0	10.8
1.6	58.0	4.8	105.0	8.0	20.2	11.2
2.0	92.0	5.2	88.0	8.4	15.3	11.6
2.4	120.0	5.6	71.0	8.8	11.5	12.0
2.8	143.0	6.0	58.0	9.2	11.0	

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
122.0	0.0	130.4	70.0	138.4	68.0	146.4
122.4	0.2	120.8	75.5	138.8	64.2	146.8
122.8	0.5	131.2	81.0	139.2	59.5	147.2
123.2	0.8	131.6	86.0	139.6	56.0	147.6
123.6	1.2	132.0	90.2	140.0	52.0	148.0
124.0	1.9	132.4	94.0	140.4	48.5	148.4
124.4	2.8	132.8	97.0	140.8	44.5	148.8
124.8	4.2	133.2	99.0	141.2	41.5	149.2
125.2	6.0	133.6	100.0	141.6	39.5	149.6
125.6	8.2	134.0	100.5	142.0	38.5	150.0
126.0	10.2	134.4	100.2	142.4	32.5	150.4
126.4	14.0	134.8	99.2	142.8	30.5	150.8
126.8	18.2	135.2	97.5	143.2	28.0	151.2
127.2	22.0	135.6	95.0	143.6	26.0	151.6
127.6	27.4	136.0	92.0	144.0	23.6	152.0
128.0	32.5	136.4	88.5	144.4	22.0	152.4
128.4	38.0	136.8	85.0	144.8	20.0	152.8
128.8	45.0	137.2	81.0	145.2	19.0	153.2
129.2	51.0	137.6	77.0	145.6	17.8	153.6
129.6	57.0	138.0	72.5	146.0	15.2	154.0
130.0	62.0					

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.4	155.5	8.4	47.0
0.4	0.2	4.8	160.2	8.8	39.5
0.8	1.5	5.2	154.0	9.2	33.0
1.2	5.6	5.6	142.0	9.6	24.0
1.6	15.8	6.0	126.0	10.0	23.5
2.0	34.0	6.4	111.0	10.4	20.0
2.4	50.0	6.8	95.0	10.8	17.0
2.8	87.5	7.2	81.0	11.2	15.0
3.2	112.0	7.6	68.0	11.6	12.0
3.6	137.0	8.0	57.0	12.0	11.0
4.0	151.0				

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
146.0	0.0	156.0	55.5	166.0	75.5
146.4	0.1	156.4	60.4	166.4	72.5
146.8	0.3	156.8	65.5	166.8	69.0
147.2	0.5	157.2	69.7	167.2	66.0
147.6	0.8	157.6	74.5	167.6	63.0
148.0	1.0	158.0	79.0	168.0	60.0
148.4	1.3	158.4	82.9	168.4	57.0
148.8	1.6	158.8	86.5	168.8	54.5
149.2	2.0	159.2	89.5	169.2	51.5
149.6	3.5	159.6	91.5	169.6	48.7
150.0	4.5	160.0	93.5	170.0	46.2
150.4	5.8	160.4	95.0	170.4	43.5
150.8	7.5	160.8	96.0	170.8	41.0
151.2	9.3	161.2	96.5	171.2	39.0
151.6	11.5	161.6	96.5	171.6	36.0
152.0	14.3	162.0	96.5	172.0	34.5
152.4	17.3	162.4	95.5	172.4	32.5
152.8	20.5	162.8	94.5	172.8	30.5
153.2	23.6	163.2	93.0	173.2	29.0
153.6	29.0	163.6	91.0	173.6	27.0
154.0	32.0	164.0	89.0	174.0	25.5
154.4	31.5	164.4	86.5	174.4	23.0
154.8	41.0	164.8	84.0	174.8	22.2
155.2	45.5	165.2	80.5	175.2	21.0
155.6	50.5	165.6	78.5	175.6	19.5

CORRIDA 13.02

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.4	165.5	8.4	43.0
0.4	0.4	4.8	163.0	8.8	31.5
0.8	2.0	5.2	152.0	9.2	30.5
1.2	8.5	5.6	127.0	9.6	25.5
1.6	23.0	6.0	120.5	10.0	22.0
2.0	45.5	6.4	103.0	10.4	19.0
2.4	71.5	6.8	82.5	10.8	16.0
2.8	100.0	7.2	73.5	11.2	14.0
3.2	126.5	7.6	62.0	11.6	12.0
3.6	148.5	8.0	51.5	12.0	10.7
4.0	160.0				

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
150.0	0.0	160.0	72.5	170.0	74.0
150.4	0.4	160.4	78.0	170.4	70.5
150.8	0.6	160.8	82.0	170.8	67.0
151.2	0.8	171.2	86.0	171.2	64.0
151.6	1.3	171.6	89.5	171.6	60.5
152.0	1.6	172.0	93.0	172.0	57.5
152.4	2.5	172.4	96.0	172.4	54.0
152.8	3.6	172.8	99.0	172.8	51.3
153.2	5.0	173.2	100.0	173.2	48.5
153.6	6.2	173.6	101.0	173.6	45.5
154.0	8.0	174.0	102.0	174.0	43.0
154.4	10.0	174.4	102.5	174.4	40.5
154.8	12.5	174.8	102.0	174.8	38.0
155.2	15.5	175.2	102.5	175.2	35.0
155.6	19.0	175.6	101.5	175.6	32.0
156.0	23.0	176.0	101.0	176.0	29.0
156.4	27.0	176.4	99.5	176.4	26.0
156.8	30.5	176.8	97.0	176.8	23.0
157.2	34.5	177.2	95.0	177.2	20.5
157.6	39.0	177.6	92.0	177.6	18.0
158.0	44.0	178.0	89.0	178.0	15.5
158.4	49.0	178.4	86.5	178.4	13.0
158.8	54.5	178.8	84.0	178.8	11.0
159.2	61.5	179.2	80.5	179.2	9.0
159.6	67.5	179.6	77.5	179.6	7.5

CORRIDA 13.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.0	158.5	7.6	51.0	11.2	13.5
0.4	0.5	4.4	161.5	8.0	49.0	11.6	11.5
0.8	1.0	4.8	157.0	8.4	41.0	12.0	10.5
1.2	10.5	5.2	145.0	8.8	35.0	12.4	9.5
1.6	25.0	5.6	130.0	9.2	29.0	12.8	8.5
2.0	49.5	6.0	113.0	9.6	25.0	13.2	7.5
2.4	75.0	6.4	98.0	10.0	20.0	13.6	6.5
2.8	104.0	6.8	93.0	10.4	19.0	14.0	5.7
3.2	125.0	7.2	70.0	10.8	15.6	14.4	5.0
3.6	149.5						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
149.0	0.0	159.0	68.5	167.0	74.5	173.0	18.0
148.4	0.2	157.4	73.5	169.4	71.5	175.4	17.0
148.8	0.5	159.0	78.0	168.8	68.0	173.8	16.0
149.2	0.8	159.2	82.5	169.2	65.0	179.2	15.0
149.6	1.0	159.6	87.0	169.6	61.8	175.6	14.0
150.0	1.5	160.0	91.0	170.0	58.4	180.0	13.5
150.4	2.1	160.4	94.0	170.4	55.5	180.4	12.0
150.8	3.0	160.8	96.5	170.8	52.5	180.8	12.0
151.2	4.0	161.2	98.6	171.2	49.5	181.2	11.2
151.6	5.5	161.6	100.4	171.6	47.0	181.6	10.6
152.0	7.1	162.0	101.4	172.0	44.5	182.0	10.2
152.4	9.2	162.4	102.0	172.4	42.0	182.4	9.5
152.8	12.0	162.8	102.4	172.8	39.5	182.8	9.0
153.2	14.5	163.2	102.4	173.2	37.4	183.2	8.5
153.6	17.8	163.6	101.5	173.6	35.0	183.6	8.0
154.0	21.2	164.0	100.5	174.0	33.3	184.0	7.5
154.4	25.5	164.4	99.5	174.4	31.0	184.4	7.2
154.8	29.0	164.8	97.5	174.8	29.2	184.8	7.0
155.2	33.5	165.2	95.5	175.2	27.5	185.2	6.8
155.6	38.0	165.6	93.0	175.6	26.0	185.6	6.3
156.0	42.0	166.0	90.5	176.0	24.5	186.0	6.0
156.4	48.0	166.4	87.5	176.4	23.0	186.4	5.8
156.8	53.0	166.8	84.5	176.8	21.5	186.8	5.5
157.2	58.0	167.2	81.0	177.2	20.4	187.2	5.2
157.6	64.0	167.6	78.0	177.6	19.0		

CORRIDA 14.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.8	161.0	9.0	51.0	13.2	12.0
0.6	0.2	5.4	159.5	9.6	39.5	13.8	10.0
1.2	4.0	6.0	143.0	10.2	31.5	14.4	8.5
1.8	16.0	6.6	122.5	10.8	25.5	15.0	7.2
2.4	46.0	7.2	100.0	11.4	20.5	15.6	6.5
3.0	83.0	7.8	81.0	12.0	18.5	16.2	5.8
3.6	121.0	8.4	64.0	12.6	14.0	16.8	5.0
4.2	147.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
110.0	0.0	122.6	69.0	135.2	55.0	147.8	12.0
110.6	0.2	123.2	74.5	135.8	52.0	148.4	11.2
111.2	0.4	123.8	79.5	136.4	49.5	149.0	10.5
111.8	0.8	124.4	82.5	137.0	45.0	149.6	9.6
112.4	1.4	125.0	85.5	137.6	42.0	150.2	9.0
113.0	2.0	125.6	88.0	138.2	39.0	150.8	8.5
113.6	3.3	126.2	89.5	138.8	36.5	151.4	8.0
114.2	5.2	126.8	90.5	139.4	34.0	152.0	7.6
114.8	7.0	127.4	90.8	140.0	31.5	152.6	7.4
115.4	9.0	128.0	90.5	140.6	29.5	153.2	6.8
116.0	12.0	128.6	89.0	141.2	27.2	153.8	6.5
116.6	15.5	129.2	87.5	141.8	25.0	154.4	6.1
117.2	19.5	129.8	95.5	142.4	23.0	155.0	5.8
117.8	24.5	130.4	82.5	143.0	21.0	155.6	5.8
118.4	29.5	131.0	70.5	143.6	19.0	156.2	5.5
119.0	35.0	131.6	75.5	144.2	17.5	156.8	5.2
119.6	40.5	132.2	70.2	144.8	16.0	157.4	5.0
120.2	47.0	132.8	69.0	145.4	14.5	158.0	4.8
120.8	52.5	133.4	66.0	146.0	13.0	158.6	4.5
121.4	59.5	134.0	62.5	146.6	11.8	159.2	4.1
122.0	67.7	134.6	59.5	147.2	12.1		

CORRIDA 14.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	4.8	159.5	9.6	14.4
0.6	0.2	5.4	160.0	10.2	15.0
1.2	4.5	6.0	147.0	10.8	15.6
1.8	15.5	6.6	127.0	11.4	16.2
2.4	49.0	7.2	105.0	12.0	16.8
3.0	83.0	7.8	84.0	12.6	17.4
3.6	117.0	8.4	66.0	13.2	18.0
4.2	146.5	9.0	51.5	13.8	

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
110.0	0.0	122.6	73.5	134.6	55.5	146.6	12.8
110.6	0.2	123.2	78.0	135.2	52.0	147.2	11.8
111.2	0.6	123.8	81.5	135.8	49.5	147.8	11.0
111.7	1.1	124.4	85.0	136.4	45.2	148.4	10.2
112.4	1.8	125.0	87.4	137.0	42.7	149.0	9.5
113.0	2.9	125.6	89.0	137.6	39.0	149.6	8.8
113.6	4.0	126.2	90.0	138.2	36.0	150.2	8.2
114.2	6.0	126.8	90.5	138.8	34.0	150.8	7.9
114.8	8.3	127.4	90.5	139.4	31.0	151.4	7.5
115.4	11.0	128.0	90.2	140.0	29.0	152.0	6.5
116.0	14.2	128.6	87.5	140.6	25.5	152.6	6.5
116.6	18.0	129.2	85.6	141.2	24.6	153.2	6.1
117.2	22.0	129.8	83.0	141.8	22.4	153.8	5.8
117.8	27.0	130.4	79.8	142.4	21.0	154.4	5.5
118.4	32.7	131.0	76.7	143.0	19.5	155.0	5.2
119.0	38.5	131.6	73.8	143.6	18.0	155.6	5.0
119.6	44.0	132.2	70.0	144.2	16.8	156.2	4.8
120.2	50.5	132.8	66.5	144.8	15.5	156.8	4.5
120.8	57.0	133.4	62.5	145.4	14.5	157.4	4.1
121.4	63.0	134.0	59.0	146.0	13.5	158.0	3.5
122.0	68.5						

CORRIDA 14.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.8	158.8	9.6	14.4	7.7
0.6	0.4	5.4	148.8	10.2	15.0	6.5
1.2	7.0	6.0	120.0	10.8	15.6	5.5
1.8	27.0	6.6	106.0	11.4	16.2	5.3
2.4	56.0	7.2	86.0	12.0	16.8	4.8
3.0	105.0	7.8	69.0	12.6	17.4	4.0
3.6	134.0	8.4	54.5	13.2	18.0	3.8
4.2	154.0	9.0	43.0	13.8		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
108.0	0.0	120.6	70.5	132.6	55.5	144.6	12.8
109.6	0.3	121.2	76.0	133.2	52.0	145.2	11.8
109.2	0.6	121.8	80.0	133.8	49.5	145.8	11.0
109.9	1.1	122.4	83.5	134.4	45.4	146.4	10.2
110.4	1.8	123.0	86.5	135.0	42.0	147.0	9.5
111.0	2.5	123.6	89.0	135.6	39.0	147.6	8.8
111.6	3.8	124.2	85.2	136.2	36.5	148.2	8.2
112.2	5.5	124.8	80.0	136.8	34.0	148.8	7.7
112.8	7.5	125.4	80.5	137.4	31.5	149.4	7.2
113.4	10.0	126.0	80.0	138.0	29.0	150.0	6.5
114.0	12.5	126.6	87.5	138.6	27.0	150.6	6.5
114.6	17.0	127.2	85.5	139.2	25.2	151.2	6.0
115.2	21.0	127.8	83.0	139.8	23.5	151.8	5.8
115.8	26.0	128.4	80.0	140.4	21.5	152.4	5.3
116.4	31.5	129.0	77.0	141.0	20.0	153.0	5.0
117.0	36.5	129.6	73.5	141.6	18.4	153.6	4.8
117.6	42.0	130.2	69.5	142.2	17.0	154.2	4.5
118.2	48.0	130.8	66.0	142.8	15.5	154.8	4.2
118.8	54.0	131.4	62.5	143.4	14.0	155.4	4.0
119.4	60.0	132.0	59.5	144.0	13.0	156.0	3.8
120.0	66.5						

CORRIDA 15.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	51.0	12.0	17.4
0.7	1.2	66.0	12.7	18.4
1.6	6.5	76.5	13.6	19.2
2.4	19.5	65.5	14.4	20.0
3.2	39.0	55.0	15.2	20.6
4.0	59.5	44.5	16.0	21.5
4.8	78.5	36.0	16.8	22.4
5.6	88.5			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
110.0	0.0	126.8	55.0	142.3	47.5	153.3
110.3	0.3	127.6	58.7	143.6	46.5	158.6
111.6	0.6	129.4	62.3	144.4	43.0	160.4
112.4	1.0	129.2	65.0	145.2	41.5	161.2
113.2	1.7	130.0	67.5	146.0	39.0	162.0
114.0	2.3	130.0	69.5	146.8	36.5	162.8
114.8	3.6	131.6	70.8	147.6	35.5	163.6
115.6	4.5	132.4	71.5	148.4	32.4	164.4
116.4	6.5	133.7	71.5	149.2	37.0	165.2
117.2	8.5	134.0	71.5	150.0	29.0	166.0
118.0	11.0	134.9	70.8	150.3	26.5	166.8
118.7	13.5	135.6	69.5	151.6	24.6	167.6
119.6	17.0	136.4	68.0	152.4	23.0	168.4
120.4	20.5	137.2	66.5	153.2	21.6	169.2
121.2	24.5	137.0	64.0	154.0	20.5	170.0
122.0	28.5	138.8	62.0	154.8	19.0	170.8
122.8	32.9	139.6	59.5	155.6	17.5	171.6
123.6	37.5	140.4	57.0	156.4	16.3	172.4
124.4	42.5	141.2	54.5	157.2	15.4	173.2
125.2	46.5	142.0	52.0	158.0	14.0	174.0
126.0	51.5					

CORRIDA 15.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	6.4	102.5	12.0	33.0	17.6
0.8	1.0	7.2	56.0	12.8	27.0	13.4
1.6	7.0	9.0	66.0	13.6	21.5	19.2
2.4	21.0	8.3	73.5	14.4	18.0	20.0
3.2	46.0	9.6	60.0	15.2	15.5	20.8
4.0	69.0	10.4	50.5	16.0	12.0	21.6
4.8	90.0	11.2	40.5	16.8	10.2	22.4
5.6	100.5					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
112.0	0.0	129.8	67.4	145.6	162.4	11.8
112.8	0.5	129.6	71.0	146.4	163.2	11.0
113.6	1.1	129.4	74.0	147.2	164.0	10.5
114.4	1.6	131.2	76.5	148.0	164.8	9.5
115.2	2.5	132.0	78.5	148.8	165.6	9.0
116.0	3.5	132.8	79.5	149.6	166.4	8.5
116.8	5.0	133.6	80.5	150.4	167.2	8.0
117.6	7.0	134.4	80.5	151.2	168.0	7.5
118.4	9.5	135.2	80.5	152.0	168.8	7.0
119.2	12.5	136.0	79.4	152.8	169.6	6.6
120.0	15.6	136.8	78.0	153.6	170.4	6.2
120.8	19.5	137.6	76.5	154.4	171.2	5.8
121.6	24.5	138.4	74.5	155.2	172.0	5.5
122.4	29.6	139.2	72.3	156.0	172.8	5.2
123.2	34.0	140.0	70.0	156.8	173.6	4.9
124.0	38.5	140.8	67.0	157.6	174.4	4.6
124.8	44.5	141.6	64.4	158.4	175.2	4.3
125.6	46.7	142.4	61.5	159.2	176.0	4.0
126.4	54.0	143.2	59.5	160.0	176.8	3.7
127.2	59.0	144.0	57.5	160.8	177.6	3.4
128.0	62.5	144.8	52.0	161.6		

CORRIDA 15.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	6.4	125.0	12.0
0.8	0.4	7.2	127.5	13.6
1.6	3.0	9.0	113.0	14.4
2.4	14.0	6.9	97.5	15.2
3.2	35.0	9.6	83.0	16.0
4.0	64.5	10.4	69.0	16.8
4.8	93.0	11.2	56.0	17.6
5.6	115.5	12.0	45.0	18.4

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
110.0	0.0	127.6	77.0	145.2	54.0	162.8	13.2
110.9	0.2	129.4	82.0	146.0	56.5	163.6	12.5
111.5	0.8	129.2	86.0	146.8	52.0	164.4	11.7
112.4	1.1	130.0	90.0	147.6	49.0	165.2	11.2
113.2	1.8	130.8	92.5	148.4	45.5	166.0	10.5
114.0	2.7	131.6	94.5	149.2	42.7	166.8	9.8
114.8	3.7	132.4	96.0	150.0	40.0	167.6	9.2
115.5	5.5	133.2	96.9	150.8	37.4	168.4	8.5
116.4	7.7	134.0	96.9	151.6	35.0	169.2	8.0
117.2	10.5	134.8	96.2	152.4	32.5	170.0	7.5
118.0	13.5	135.6	95.2	153.2	30.5	170.8	7.2
118.8	17.2	136.4	93.4	154.0	28.5	171.6	6.8
119.5	21.5	137.2	91.0	154.8	25.5	172.4	6.5
120.4	26.0	138.0	89.0	155.6	23.0	173.2	6.1
121.2	31.3	138.8	86.0	156.4	20.0	174.0	5.7
122.0	37.0	139.6	83.0	157.2	21.0	174.8	5.3
122.8	42.5	140.4	79.5	158.0	20.0	175.6	5.0
123.6	48.5	141.2	75.5	158.8	19.9	176.4	4.7
124.4	54.0	142.0	72.5	159.6	17.5	177.2	4.5
125.2	60.5	142.8	68.9	160.4	16.1	178.0	4.3
126.0	66.5	143.6	65.2	161.2	15.2	178.8	4.1
126.8	72.0	144.4	61.7	162.0	14.0		

CORRIDA 16.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	135.5	18.0	27.0	26.4	7.0
1.2	1.0	10.9	114.0	19.2	21.5	27.6	6.1
2.4	11.0	12.0	92.0	20.4	17.0	28.8	5.5
3.6	40.0	13.2	72.0	21.6	14.0	30.0	4.8
4.8	91.0	14.4	56.0	22.8	11.5	31.2	4.3
6.0	131.0	15.6	44.0	24.0	9.6	32.4	3.9
7.2	153.0	16.8	34.0	25.2	8.3	33.6	3.5
8.4	152.0						

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
89.0	0.0	114.4	75.0	139.6	49.5	164.8	11.8
89.2	0.1	115.6	78.5	140.8	45.3	166.0	11.0
90.4	0.4	116.8	82.0	142.0	44.0	167.2	10.5
91.6	0.9	118.0	84.5	143.2	41.0	168.4	9.5
92.8	1.2	119.2	86.0	144.4	38.0	169.6	9.0
94.0	2.0	120.4	87.0	145.6	36.0	170.8	8.5
95.2	3.1	121.6	87.0	146.8	33.5	172.0	8.0
96.4	5.0	122.8	87.0	148.0	31.0	173.2	7.5
97.6	6.6	124.0	86.4	149.2	29.0	174.4	7.1
98.8	8.4	125.2	85.0	150.4	27.0	175.6	6.8
100.0	12.5	126.4	83.0	151.6	25.2	176.8	6.5
101.2	17.0	127.6	81.0	152.8	23.5	178.0	6.2
102.4	21.0	128.8	78.0	154.0	22.0	179.2	6.0
103.6	26.5	130.0	75.5	155.2	20.5	180.4	5.7
104.8	31.5	131.2	72.5	156.4	19.0	181.6	5.4
106.0	37.0	132.4	69.5	157.6	17.5	182.8	5.1
107.2	42.5	133.6	65.5	158.8	16.5	184.0	4.9
108.4	48.0	134.8	62.5	160.0	15.5	185.2	4.7
109.6	54.5	136.0	58.5	161.2	14.5	186.4	4.5
110.8	60.0	137.2	56.0	162.4	13.5	187.6	4.3
112.0	65.0	138.4	53.0	163.6	12.5	188.8	4.1
113.2	70.5						

CORRIDA 16.02  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	134.0	19.0	29.0	29.4	1.7
1.2	1.6	10.8	113.0	19.2	29.0	27.6	5.6
2.4	13.0	12.0	50.0	20.4	18.0	28.8	6.0
3.6	44.0	13.2	72.0	21.6	16.5	30.0	5.4
4.8	90.0	14.4	55.0	22.8	12.4	31.2	4.8
6.0	131.0	15.6	44.0	24.0	10.2	32.4	4.2
7.2	151.0	16.8	34.0	25.2	9.0	33.6	3.7
8.4	151.0						

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
90.0	0.0	116.4	77.3	142.8	44.5	169.2	10.6
91.2	0.2	117.6	80.5	144.0	41.8	170.4	10.2
92.4	0.6	118.8	83.2	145.2	39.0	171.6	9.5
93.6	1.0	120.0	85.0	146.4	36.5	172.8	8.9
94.8	1.4	121.2	86.5	147.6	34.0	174.0	8.5
96.0	2.6	122.4	87.0	148.8	32.0	175.2	8.0
97.2	4.2	123.6	87.0	150.0	30.0	176.4	7.5
98.4	6.3	124.8	86.5	151.2	27.5	177.6	7.1
99.6	8.5	126.0	85.6	152.4	26.0	178.8	6.8
100.8	11.7	127.2	84.0	153.6	24.0	180.0	6.5
102.0	15.0	128.4	82.0	154.8	22.5	181.2	6.2
103.2	19.5	129.6	79.0	156.0	21.2	182.4	6.0
104.4	24.0	130.8	76.8	157.2	19.5	183.6	5.7
105.6	29.0	132.0	74.0	158.4	18.5	184.8	5.4
106.8	34.5	133.2	70.7	159.6	17.5	186.0	5.1
108.0	40.5	134.4	67.2	160.8	16.4	187.2	4.9
109.2	46.0	135.6	64.3	162.0	15.5	188.4	4.8
110.4	52.5	136.8	60.5	163.2	14.5	189.6	4.6
111.6	58.5	138.0	57.5	164.4	13.8	190.8	4.4
112.8	64.0	139.2	54.0	165.6	12.0	192.0	4.2
114.0	68.5	140.4	51.0	166.8	12.3	193.2	4.0
115.2	74.0	141.6	47.5	168.0	11.4		

CORRIDA 16.03  
 ENAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	145.0	18.0	30.5	26.4	8.0
1.2	0.8	10.8	127.5	19.2	24.0	27.6	7.5
2.4	7.0	12.0	103.5	20.4	19.5	28.8	6.2
3.6	28.0	13.2	82.0	21.6	14.0	30.0	5.5
4.8	72.0	14.4	64.0	22.8	13.4	31.2	5.0
6.0	113.0	15.6	50.0	24.0	11.0	32.4	4.5
7.2	144.0	16.8	39.0	25.2	9.3	33.6	4.0
8.4	154.0						

ENAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
90.0	0.0	116.4	74.5	141.6	50.0	166.8	11.2
91.2	0.2	117.6	78.5	142.8	47.0	168.0	11.0
92.4	0.4	118.8	81.5	144.0	44.2	169.2	10.3
93.6	0.8	120.0	84.0	145.2	41.5	170.4	9.7
94.8	1.5	121.2	86.0	146.4	39.0	171.6	9.2
96.0	2.0	122.4	87.0	147.6	36.5	172.8	8.5
97.2	3.2	123.6	87.5	148.8	34.0	174.0	8.0
98.4	5.0	124.8	87.5	150.0	32.0	175.2	7.6
99.6	7.0	126.0	87.0	151.2	30.0	176.4	7.2
100.8	9.6	127.2	85.5	152.4	27.5	177.6	6.8
102.0	12.0	128.4	84.0	153.6	26.0	178.8	6.4
103.2	17.0	129.6	81.5	154.8	24.0	180.0	6.0
104.4	21.0	130.8	79.0	156.0	22.5	181.2	5.7
105.6	26.0	132.0	76.5	157.2	21.0	182.4	5.5
106.8	32.0	133.2	73.5	158.4	19.8	183.6	5.3
108.0	37.0	134.4	70.0	159.6	18.5	184.8	5.0
109.2	43.0	135.6	67.0	160.8	17.0	186.0	4.8
110.4	49.0	136.8	63.5	162.0	15.1	187.2	4.5
111.6	55.0	138.0	60.0	163.2	13.2	188.4	4.3
112.8	60.5	139.2	56.5	164.4	11.5	189.6	4.1
114.0	65.5	140.4	53.5	165.6	10.5	190.8	3.9
115.2	70.0						

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	153.0	9.6	9.0
0.6	1.5	167.0	10.2	7.5
1.2	0.5	161.0	10.8	6.5
1.8	35.0	135.0	11.4	6.0
2.4	76.0	111.0	12.0	5.0
3.0	127.0	69.5	12.6	4.8
3.6	164.0	71.5	13.2	4.0
4.2	197.5	56.0	13.8	

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
104.0	0.0	117.9	64.0	131.0	61.2	144.2	12.0
104.6	0.1	113.4	50.0	131.6	57.0	144.8	12.0
105.2	0.2	113.0	54.0	132.2	53.5	145.4	11.2
105.8	0.5	119.6	58.5	132.8	50.0	146.0	10.5
106.4	1.0	120.2	101.5	133.4	47.0	146.6	9.8
107.0	1.5	120.8	104.0	134.0	44.0	147.2	9.2
107.6	2.3	121.4	105.5	134.6	41.2	147.8	8.6
108.2	3.5	122.0	106.0	135.2	38.6	148.4	8.2
108.8	5.5	122.6	106.0	135.8	36.0	149.0	7.5
109.4	7.5	123.2	105.9	136.4	33.0	149.6	7.0
110.0	10.5	123.8	104.9	137.0	30.7	150.2	6.7
110.6	13.5	124.4	102.3	137.6	28.5	150.8	6.5
111.2	17.5	125.0	99.8	138.2	26.5	151.4	6.2
111.8	22.0	125.6	97.0	138.8	24.7	152.0	5.8
112.4	27.0	126.2	93.0	139.4	23.0	152.6	5.4
113.0	32.0	126.8	89.5	140.0	21.3	153.2	5.1
113.6	38.0	127.4	86.0	140.6	19.8	153.8	4.9
114.2	44.5	128.0	81.5	141.2	18.3	154.4	4.6
114.8	51.0	128.6	77.5	141.8	17.2	155.0	4.4
115.4	57.5	129.2	73.0	142.4	16.0	155.6	4.2
116.0	65.0	129.8	69.0	143.0	15.0	156.2	4.1
116.6	71.5	130.4	65.2	143.6	13.8	156.8	3.5
117.2	78.0						

CORRIDA 17.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.8	152.0	9.6	42.0	14.4	9.0
0.6	2.0	5.4	169.0	10.2	34.0	15.0	7.5
1.2	13.0	6.0	147.0	10.8	27.5	15.6	6.5
1.8	39.0	6.6	124.0	11.4	22.5	16.2	5.5
2.4	81.0	7.2	101.0	12.0	18.0	16.8	5.1
3.0	126.0	7.8	63.0	12.6	15.0	17.4	4.5
3.6	163.0	8.4	66.0	13.2	12.5	18.0	4.0
4.2	191.0	9.0	54.0	13.8	10.5		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
106.0	0.0	119.9	64.0	133.0	53.0	146.2	12.0
106.6	0.2	120.4	68.5	133.6	54.5	146.8	11.4
107.2	0.5	121.0	53.0	134.2	50.7	147.4	10.5
107.8	1.0	121.6	56.0	134.8	47.5	148.0	10.0
108.4	1.3	122.2	59.0	135.4	44.5	148.6	9.4
109.0	2.0	122.8	100.5	136.0	41.3	149.2	9.0
109.6	3.0	123.4	101.0	136.6	38.0	149.8	8.5
110.2	4.5	124.0	101.3	137.2	35.3	150.4	8.0
110.8	6.2	124.6	101.0	137.8	33.2	151.0	7.5
111.4	8.5	125.2	100.0	138.4	31.0	151.6	7.0
112.0	11.5	125.8	98.5	139.0	29.0	152.2	6.6
112.6	15.0	126.4	96.2	139.6	27.0	152.8	6.2
113.2	19.0	127.0	93.0	140.2	25.0	153.4	5.8
113.8	24.0	127.6	90.5	140.8	23.0	154.0	5.7
114.4	29.0	128.2	87.0	141.4	21.5	154.6	5.4
115.0	35.0	128.8	83.5	142.0	20.0	155.2	5.1
115.6	41.0	129.4	80.5	142.6	18.0	155.8	4.9
116.2	47.5	130.0	76.0	143.2	17.5	156.4	4.7
116.8	54.0	130.6	72.5	143.8	16.2	157.0	4.5
117.4	60.5	131.2	69.0	144.4	15.0	157.6	4.3
118.0	67.5	131.8	65.0	145.0	13.8	158.2	4.1
118.6	73.5	132.4	61.0	145.6	13.0	158.8	3.9
119.2	78.0						

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
0.0	0.0	4.2	66.0	8.4	132.0	12.6	198.0
0.6	0.3	4.9	64.0	9.0	135.0	13.5	195.0
1.2	0.5	5.4	62.0	9.6	138.0	14.4	192.0
1.8	0.5	6.0	60.0	10.2	141.0	15.3	189.0
2.4	26.0	6.6	72.0	10.8	144.0	16.2	186.0
3.0	47.0	7.2	60.0	11.4	147.0	17.1	183.0
3.6	71.0	7.8	48.0	12.0	150.0	18.0	180.0

FINAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
112.0	0.0	123.4	25.5	134.2	71.0	145.0	13.2
112.6	0.3	124.0	43.0	134.8	88.5	145.6	12.6
113.2	0.5	124.6	45.5	135.4	106.0	146.2	11.2
113.8	1.0	125.2	48.0	136.0	123.5	146.8	10.5
114.4	1.5	125.8	50.5	136.6	141.0	147.4	9.7
115.0	2.2	126.4	52.0	137.2	158.5	148.0	9.2
115.6	2.5	127.0	53.0	137.8	176.0	148.6	8.5
116.2	4.7	127.6	54.0	138.4	193.5	149.2	8.0
116.8	6.5	128.2	55.0	139.0	211.0	149.8	7.5
117.4	8.5	128.8	55.0	139.6	228.5	150.4	7.0
118.0	10.5	129.4	54.5	140.2	246.0	151.0	6.4
118.6	13.0	130.0	54.0	140.8	263.5	151.6	6.0
119.2	16.0	130.6	53.0	141.4	281.0	152.2	5.6
119.8	19.0	131.2	51.5	142.0	298.5	152.8	5.2
120.4	22.5	131.8	50.0	142.6	316.0	153.4	4.8
121.0	26.0	132.4	49.5	143.2	333.5	154.0	4.6
121.6	29.5	133.0	47.0	143.8	351.0	154.6	4.3
122.2	33.0	133.6	45.0	144.4	368.5	155.2	4.0
122.8	36.5						

CORRIDA 19.02

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
0.0	0.0	2.4	124.0	4.8	79.0	7.2	7.2
0.4	0.2	2.8	147.0	5.2	62.0	7.6	7.6
0.8	3.5	3.2	153.5	5.6	46.0	8.0	8.0
1.2	19.0	3.5	144.0	6.0	35.5	8.4	8.4
1.6	50.0	4.0	124.0	6.4	25.0	8.8	8.8
2.0	89.0	4.4	102.0	6.8	20.0		

FINAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)						
112.0	0.0	113.0	46.0	124.0	57.5	130.0	16.0
112.4	0.6	119.4	51.0	124.0	54.5	130.4	14.5
112.8	1.2	119.8	55.5	124.8	51.0	130.8	12.0
113.2	2.2	119.2	60.0	125.2	48.0	131.2	11.8
113.6	3.4	119.6	63.5	125.6	45.0	131.6	10.5
114.0	5.5	120.0	66.5	126.0	41.5	132.0	9.0
114.4	8.0	120.4	68.0	126.4	39.0	132.4	8.2
114.8	10.5	120.8	65.5	126.8	35.5	132.8	7.3
115.2	14.0	121.2	70.0	127.2	32.0	133.2	6.7
115.6	17.5	121.6	69.8	127.6	29.0	133.6	6.2
116.0	22.0	122.0	69.0	128.0	26.0	134.0	5.5
116.4	26.0	122.4	67.5	128.4	24.0	134.4	4.8
116.8	31.0	122.8	66.0	128.8	22.0	134.8	4.3
117.2	36.0	123.2	63.5	129.2	19.5	135.2	3.8
117.6	41.0	123.6	61.0	129.6	17.5		

CORRIDA 18.03

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (MM)	TIEMPO (S)	ALTURA (MM)	TIEMPO (S)	ALTURA (MM)
0.0	0.0	2.4	107.0	4.8	4.8
0.4	0.3	2.8	125.0	5.2	5.2
0.8	4.0	3.2	131.5	5.6	5.6
1.2	17.0	3.6	125.0	6.0	6.0
1.6	42.0	4.0	109.0	6.4	6.4
2.0	77.0	4.4	59.0	6.8	6.8

FINAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	TIEMPO (S)
106.0	125.5
106.4	126.0
106.8	126.4
107.2	126.8
107.6	127.2
108.0	127.6
108.4	128.0
108.8	128.4
109.2	128.8
109.6	129.2
110.0	129.6
110.4	130.0
110.8	130.4
111.2	130.8
111.6	131.2
112.0	131.6
112.4	132.0

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.4	149.0	4.8	110.5
0.4	1.0	2.8	148.0	5.2	105.5
0.8	3.0	3.2	151.0	5.6	100.5
1.2	36.0	3.6	131.0	6.0	95.5
1.6	71.0	4.0	105.0	6.4	90.5
2.0	116.0	4.4	79.0	6.8	85.5

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
94.0	0.0	99.2	34.0	104.4	53.5	109.6	14.0
94.4	0.1	99.6	41.0	104.8	59.5	110.0	12.5
94.8	0.5	100.0	47.0	105.2	51.0	110.4	11.4
95.2	1.0	100.4	53.5	105.6	47.0	110.8	10.0
95.6	1.5	100.8	59.0	106.0	42.5	111.2	8.8
96.0	2.5	101.2	63.0	106.4	39.5	111.6	8.0
96.4	4.0	101.6	65.0	106.8	35.0	112.0	7.0
96.8	6.0	102.0	67.0	107.2	31.0	112.4	6.1
97.2	9.0	102.4	67.3	107.6	29.0	112.8	5.4
97.6	12.5	102.8	67.0	108.0	23.5	113.2	4.7
98.0	17.5	103.2	65.5	103.4	20.0	113.6	4.0
98.4	23.0	103.6	63.8	108.8	17.5	114.0	3.5
98.8	29.0	104.0	62.0	109.2	15.6		

CORRIDA 19.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.8	146.0	5.6	39.0	8.4	9.5
0.4	0.6	3.2	146.0	6.0	30.0	8.8	8.6
0.8	9.0	3.6	131.0	6.4	22.5	9.2	6.2
1.2	25.0	4.0	110.0	6.8	13.5	9.6	5.5
1.6	64.0	4.4	89.0	7.2	15.0	10.0	4.5
2.0	102.0	4.8	69.0	7.6	13.0	10.4	3.0
2.4	132.0	5.2	52.0	8.0	11.3		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
104.0	0.0	109.2	23.0	114.4	55.0	119.6	18.5
104.4	0.1	109.6	27.5	114.8	52.5	120.0	16.0
104.8	0.6	110.0	42.0	115.2	50.0	120.4	14.0
105.2	1.5	110.4	46.5	115.6	47.0	120.8	12.0
105.6	2.5	110.8	50.0	116.0	44.0	121.2	10.5
106.0	4.0	111.2	53.5	116.4	40.5	121.6	9.5
106.4	6.5	111.6	55.6	116.8	37.5	122.0	8.1
106.8	8.5	112.0	57.7	117.2	34.5	122.4	7.0
107.2	12.0	112.4	59.3	117.6	31.2	122.8	6.0
107.6	15.5	112.8	59.5	118.0	29.5	123.2	5.4
108.0	20.0	113.2	59.5	118.4	25.5	123.6	4.6
108.4	24.0	113.6	58.8	118.8	23.0	124.0	4.0
108.8	28.5	114.0	57.7	119.2	20.5		

CORRIDA 19.03  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.4	145.0	4.8	64.0
0.4	1.6	2.8	155.0	5.2	49.0
0.8	12.0	3.2	145.0	5.6	35.0
1.2	40.0	3.6	130.0	6.0	25.0
1.6	77.0	4.0	106.0	6.4	19.0
2.0	116.0	4.4	83.0	6.8	13.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
100.0	0.0	105.6	111.2	57.0	116.5
100.4	0.2	106.0	111.6	56.0	117.2
100.8	0.8	106.4	112.0	50.5	117.9
101.2	1.3	106.8	112.4	44.0	118.0
101.6	2.0	107.2	112.8	44.0	118.6
102.0	3.0	107.6	113.0	41.0	118.7
102.4	4.5	108.0	113.6	37.5	119.2
102.8	6.0	108.4	114.0	34.0	119.7
103.2	10.0	108.8	114.4	30.0	120.0
103.6	17.0	109.2	114.8	27.0	120.4
104.0	26.0	109.6	115.2	25.5	120.8
104.4	36.5	110.0	115.6	22.0	121.2
104.8	48.0	110.4	116.0	20.5	121.5
105.2	60.0	110.8	116.4	19.0	

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.4	179.0	4.4	70.5	6.4	20.0
0.4	1.6	2.8	176.0	4.8	54.0	6.8	16.0
0.8	14.0	3.2	159.0	5.2	31.0	7.2	12.0
1.2	61.0	3.6	129.0	5.6	11.0	7.6	9.5
1.6	136.0	4.0	64.0	6.0	0.0	8.0	6.5
2.0	169.5						

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
94.0	0.0	90.0	34.5	95.6	73.4	101.2	16.0
94.4	0.2	90.4	41.5	96.0	60.5	101.6	14.0
94.8	0.5	90.8	48.5	96.4	66.0	102.0	12.5
95.2	0.7	91.2	56.0	96.8	61.5	102.4	10.6
95.6	1.0	91.6	62.0	97.2	54.5	102.8	9.2
96.0	1.5	92.0	68.0	97.6	52.0	103.2	8.2
96.4	2.0	92.4	72.5	98.0	47.0	103.6	7.2
96.8	2.5	92.8	76.5	98.4	42.0	104.0	6.5
97.2	3.0	93.2	78.5	98.8	37.0	104.4	6.0
97.6	3.5	93.6	80.0	99.2	33.0	104.8	5.5
98.0	4.0	94.0	80.0	99.6	29.0	105.2	5.0
98.4	4.5	94.4	79.5	100.0	24.5	105.6	4.4
98.8	5.0	94.8	78.0	100.4	21.0	106.0	4.0
99.2	5.5	95.2	76.0	100.8	18.0	106.4	3.7

CORRIDA 20.02

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	2.0	107.0	4.0	99.0	6.0	18.0
0.4	0.5	2.4	125.0	4.4	74.0	6.4	11.5
0.8	5.0	2.8	146.0	4.8	52.5	6.8	8.0
1.2	25.0	3.2	143.0	5.2	33.0	7.2	4.5
1.6	67.0	3.6	124.0	5.6	26.5		

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
86.0	0.0	91.2	21.0	96.4	60.0	101.6	19.5
86.4	0.2	91.6	25.5	96.8	53.0	102.0	17.2
86.8	0.5	92.0	30.2	97.2	55.5	102.4	15.5
87.2	0.9	92.4	35.0	97.6	52.5	102.8	13.5
87.6	1.3	92.8	35.5	98.0	43.5	103.2	11.5
88.0	2.0	93.2	43.5	98.4	45.0	103.6	9.5
88.4	2.8	93.6	48.0	98.8	41.3	104.0	8.0
88.8	4.0	94.0	52.5	99.2	38.0	104.4	7.0
89.2	6.0	94.4	55.5	99.6	34.5	104.8	6.0
89.6	7.8	94.8	58.0	100.0	31.0	105.2	4.5
90.0	10.0	95.2	60.0	100.4	28.0	105.6	3.5
90.4	13.5	95.6	61.0	100.8	25.0	106.0	2.5
90.8	17.5	96.0	61.0	101.2	22.0		

CORRIDA 20.03

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	4.4	64.5	8.4	39.0	12.4	10.5
0.4	1.2	4.8	63.0	8.8	34.5	12.8	9.0
0.8	4.0	5.2	60.0	9.2	30.5	13.2	8.0
1.2	10.0	5.6	76.0	9.6	27.5	13.6	6.8
1.6	21.0	6.0	71.0	10.0	24.0	14.0	6.0
2.0	34.0	6.4	65.0	10.4	21.2	14.4	5.2
2.4	48.0	6.8	60.0	10.8	18.5	14.8	4.5
2.8	61.0	7.2	54.5	11.2	16.4	15.2	3.7
3.2	72.0	7.6	49.0	11.6	14.2	15.6	3.2
3.6	79.0	8.0	44.0	12.0	12.2	16.0	2.7
4.0	93.0						

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)
36.0
36.4
36.8
37.2
37.6
38.0
38.4
38.8
39.2
39.6
40.0
40.4
40.8
41.2

Resultados experimentales obtenidos para relleno de geometría cilíndrica y viscosidad de líquido: 2,7 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido (l/min)</u>
1.01	0,540
1.02	0,540
2.01	0,390
2.02	0,390
3.01	0,280
3.02	0,280
4.02	0,200
5.01	0,144
5.02	0,144
6.01	0,095
6.02	0,095

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.0	106.0	15.0	
1.4	1.0	9.4	100.0	17.6	
3.2	16.0	11.2	63.0	19.2	
4.8	52.0	12.8	64.0	20.8	
6.4	90.0	14.4	47.0	22.4	

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
132.0	0.0	151.2	27.5	160.8	31.2
133.6	0.5	152.8	30.8	170.4	29.6
135.2	1.2	154.4	33.5	172.0	27.5
136.8	2.1	156.0	35.5	173.6	25.2
138.4	2.5	157.6	37.0	175.2	23.5
140.0	5.5	159.2	37.5	176.8	21.4
141.6	7.7	160.2	37.5	178.4	19.4
143.2	10.5	162.4	37.5	180.0	17.5
144.8	13.0	164.0	36.7	181.6	15.5
146.4	16.5	165.6	35.5	183.2	14.0
148.0	20.2	167.2	33.6	184.8	12.5
149.6	24.0				

CORRIDA 1.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.0	54.0	16.0	26.0	24.0	
1.6	7.0	9.6	61.5	17.6	19.0	25.6	
3.2	33.0	11.2	64.0	19.2	14.0	27.2	
4.8	69.0	12.8	48.5	20.8	10.2	25.8	
6.4	91.0	14.4	35.5	22.4	7.8		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
128.0	0.0	147.2	27.0	164.8	33.5	182.4	11.5
129.6	0.3	148.8	29.5	166.4	31.5	184.0	10.0
131.2	1.0	150.4	33.2	168.0	29.5	185.6	8.5
132.8	1.9	152.0	35.0	169.6	26.5	187.2	7.25
134.4	2.8	153.6	36.7	171.2	24.0	188.8	7.1
136.0	4.5	155.2	37.7	172.8	21.3	190.4	6.5
137.6	6.5	156.8	38.0	174.4	17.5	192.0	6.0
139.2	9.5	158.4	38.0	176.0	17.5	193.6	5.25
140.8	12.5	160.0	37.5	177.6	15.6	195.2	5.0
142.4	16.0	161.6	36.5	179.2	14.0	196.8	4.5
144.0	19.5	163.2	35.0	180.8	12.7	198.4	4.2
145.6	13.5						

CORRIDA 2.01  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	9.6	52.0	19.2	39.0	23.2	8.0
1.6	2.5	11.2	89.0	20.8	24.0	30.4	6.8
3.2	17.0	12.8	73.0	22.4	17.0	32.0	5.8
4.8	47.0	14.4	60.0	24.0	15.0	33.6	4.8
6.4	75.0	16.0	48.5	25.6	12.0	35.2	4.0
8.0	90.0	17.6	39.0	27.2	7.8		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
152.0	176.0	33.0
153.6	177.6	31.5
155.2	179.2	29.5
156.8	180.8	27.0
158.4	182.4	24.5
160.0	184.0	25.0
161.6	185.6	23.2
163.2	187.2	21.5
164.8	188.8	20.0
166.4	190.4	18.3
168.0	192.0	17.0
169.6	193.6	15.5
171.2	195.2	14.0
172.8	196.8	12.5
174.4	198.4	12.0

EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	19.2
1.6	0.2	20.8
3.2	0.5	22.4
4.8	1.1	24.0
6.4	1.8	25.6
8.0	2.6	27.2

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
156.0	0.0	180.0	26.0	204.0	31.5	228.0
157.5	0.2	181.6	28.5	205.6	29.1	229.5
159.0	0.5	183.2	31.0	207.2	23.0	231.0
160.5	1.1	184.8	33.0	208.8	26.5	232.5
162.0	1.8	186.4	35.0	210.4	29.9	234.0
164.0	2.6	189.0	36.3	212.0	21.2	236.0
165.5	4.0	190.6	37.0	213.6	21.1	237.5
167.2	5.2	191.2	37.6	215.2	20.0	239.2
168.9	7.0	192.8	38.0	216.8	19.7	240.9
170.4	9.0	194.4	37.3	218.4	17.2	242.5
172.0	11.5	196.0	37.4	220.0	16.0	244.0
173.6	14.5	197.6	36.5	221.6	14.5	245.6
175.2	17.0	199.2	35.6	223.2	13.5	247.2
176.9	20.0	200.8	34.5	224.8	12.5	248.8
178.4	23.0	202.4	33.2	226.4	11.5	

CORRIDA 3.01

EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	14.4	58.5	26.4	24.5
2.4	1.1	15.8	63.0	28.8	21.5
4.9	18.0	19.2	66.0	31.2	15.0
7.2	56.0	21.6	50.2	33.6	12.2
9.6	93.0	24.0	38.0	36.0	9.9
12.0	105.0				

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
128.0	0.0	159.2	17.5	190.4	32.0	221.6
130.4	0.4	161.6	30.5	192.8	29.4	224.0
132.8	0.8	164.0	33.5	195.2	28.0	226.4
135.2	1.3	166.4	36.0	197.6	25.0	228.8
137.6	2.5	168.8	37.5	200.0	23.9	231.2
140.0	3.8	171.2	38.5	202.4	22.0	233.6
142.4	5.5	173.6	39.3	204.8	20.0	236.0
144.8	7.6	176.0	39.5	207.2	19.0	238.4
147.2	10.1	178.4	39.2	209.6	16.4	240.8
149.6	13.1	180.8	38.3	212.0	15.0	243.2
152.0	16.8	183.2	37.4	214.4	13.4	245.6
154.4	20.2	185.6	36.0	216.8	12.4	248.0
156.8	24.0	188.0	34.0	219.2	11.0	

CORRIDA 3.02

EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	14.4	26.4	24.0
2.4	1.2	16.8	28.8	21.0
4.8	16.0	19.2	31.2	15.3
7.2	52.0	21.6	33.6	12.8
9.6	85.0	24.0	36.0	10.4
12.0	100.5			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
124.0	26.5	196.0
126.4	29.3	198.4
128.8	31.5	200.8
131.2	33.5	203.2
133.6	35.0	205.6
136.0	36.0	208.0
138.4	36.5	210.4
140.8	36.7	212.8
143.2	36.9	215.2
145.6	35.9	217.6
148.0	35.0	220.0
150.4	33.3	222.4
152.8	30.7	224.8
155.2	28.0	227.2
157.6	27.5	229.6

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	105.0	36.0
4.0	74.0	40.0
8.0	49.5	44.0
12.0	33.0	48.0
16.0		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
92.0	0.0	136.0	34.0	180.0	30.5
96.0	0.2	140.0	38.3	184.0	23.0
100.0	0.8	144.0	42.0	188.0	25.4
104.0	1.0	148.0	44.0	192.0	23.0
108.0	3.5	152.0	44.5	196.0	20.7
112.0	6.0	156.0	44.5	200.0	19.7
116.0	5.5	160.0	43.0	204.0	15.0
120.0	14.0	164.0	41.2	208.0	14.3
124.0	18.0	168.0	39.0	212.0	13.0
128.0	24.0	172.0	36.4	216.0	11.4
132.0	29.0	176.0	33.2	220.0	10.0

CORRIDA 5.01  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	20.0	76.0	40.0	23.0
4.0	1.3	24.0	65.0	44.0	17.5
8.0	18.0	28.0	52.0	48.0	10.3
12.0	52.0	32.0	40.0	52.0	10.4
16.0	74.0	36.0	30.5	56.0	3.5

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
112.0	0.0	168.0	27.5	224.0	27.0	280.0	7.4
116.0	0.1	172.0	21.0	228.0	24.8	284.0	7.0
120.0	0.3	176.0	34.3	232.0	23.0	288.0	6.5
124.0	0.6	180.0	26.7	236.0	21.2	292.0	5.8
128.0	1.1	184.0	33.5	240.0	19.2	296.0	5.4
132.0	1.9	188.0	39.5	244.0	17.3	300.0	5.0
136.0	3.0	192.0	29.8	248.0	15.0	304.0	4.6
140.0	4.7	196.0	39.4	252.0	13.9	308.0	4.2
144.0	6.5	200.0	38.5	256.0	12.4	312.0	3.9
148.0	8.7	204.0	37.0	260.0	11.3	316.0	3.6
152.0	11.5	208.0	35.2	264.0	10.4	320.0	3.2
156.0	14.9	212.0	33.5	268.0	9.5	324.0	3.1
160.0	19.0	216.0	31.2	272.0	8.9	328.0	3.0
164.0	23.0	220.0	29.0	276.0	8.0		

CORRIDA 5.02  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	24.0	63.0	48.0	17.4	72.0	5.0
4.0	10.0	28.0	64.0	52.0	13.5	76.0	4.0
8.0	48.0	32.0	49.0	56.0	10.7	80.0	3.5
12.0	93.0	36.0	37.5	60.0	9.5	84.0	3.0
16.0	113.5	40.0	29.0	64.0	7.0	88.0	2.5
20.0	102.5	44.0	22.5	68.0	5.9		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
116.0	0.0	176.0	232.0	34.0
120.0	0.3	180.0	236.0	31.5
124.0	0.8	184.0	240.0	29.0
128.0	1.2	188.0	244.0	26.5
132.0	2.5	192.0	248.0	24.0
136.0	4.0	196.0	252.0	22.0
140.0	6.7	200.0	256.0	20.0
144.0	5.0	204.0	260.0	18.0
148.0	12.0	208.0	264.0	17.0
152.0	17.5	212.0	268.0	16.0
156.0	21.0	216.0	272.0	15.0
160.0	24.0	220.0	276.0	14.0
164.0	31.5		280.0	13.0
168.0	36.0		284.0	11.0
172.0	40.0			

CORRIJA 6.01  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	32.0	76.0	64.0	15.5		4.7
8.0	10.5	40.0	55.0	72.0	11.7		3.7
16.0	53.0	48.0	37.5	80.0	0.4		3.0
24.0	84.0	56.0	24.0	88.0	6.0		

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
72.0	0.0	152.0	42.5	224.0	21.0	296.0	5.6
80.0	0.4	160.0	45.6	232.0	27.5	304.0	8.0
88.0	1.4	168.0	47.5	240.0	24.1	312.0	7.1
96.0	3.5	176.0	47.9	248.0	21.2	320.0	6.2
104.0	7.0	184.0	46.8	256.0	18.5	328.0	5.5
112.0	12.0	192.0	44.0	264.0	16.0	336.0	5.0
120.0	18.5	200.0	41.0	272.0	14.0	344.0	4.5
128.0	25.5	208.0	38.0	280.0	12.5	352.0	4.0
136.0	32.5	216.0	34.5	288.0	11.0	360.0	3.4
144.0	38.5						

CORRIJA 6.02  
EVAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	32.0	73.5	64.0	17.0	96.0	5.0
8.0	8.5	40.0	54.0	72.0	12.0	104.0	4.0
16.0	47.0	48.0	36.0	80.0	9.0	112.0	3.0
24.0	76.0	56.0	24.0	88.0	6.5		

EVAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
72.0	0.0	144.0	24.0	216.0	33.5	288.0	11.2
80.0	0.3	152.0	38.0	224.0	30.5	296.0	10.0
88.0	1.2	160.0	41.4	232.0	27.0	304.0	8.4
96.0	3.0	168.0	43.0	240.0	24.3	312.0	7.2
104.0	6.2	176.0	43.5	248.0	21.3	320.0	6.4
112.0	10.5	184.0	43.0	256.0	19.0	328.0	5.4
120.0	16.2	192.0	41.5	264.0	16.8	336.0	4.6
128.0	22.5	200.0	39.0	272.0	14.5	344.0	4.0
136.0	28.4	208.0	36.5	280.0	12.7		

Resultados experimentales obtenidos para relleno de geometría cilíndrica y viscosidad de líquido: 5 cp

<u>Experiencia</u>	<u>Caudal de líquido (l/min)</u>
1.01	0,225
1.02	0,225
1.03	0,225
2.02	0,161
2.03	0,161
3.01	0,112
3.02	0,112
3.03	0,112
4.02	0,081

CORRIDA 1.01  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)	ALTURA (M)	TIEMPO (S)
0.0	0.0	64.0	25.5
2.4	1.0	69.0	21.2
4.9	2.0	72.5	17.5
7.2	27.0	43.0	36.0
9.6	47.5	35.0	38.4
12.0	60.5	28.0	40.8

EMAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)						
132.0	0.0	222.9	41.1	263.0	40.3	304.4	14.0
134.4	1.0	223.2	44.1	266.0	49.2	306.8	13.0
136.8	1.2	227.6	46.5	268.4	75.1	309.2	12.1
139.2	2.0	230.0	48.7	270.8	36.1	311.6	11.2
141.6	3.1	232.4	50.2	273.2	34.2	314.0	10.3
144.0	5.0	234.8	52.0	275.6	37.0	316.4	9.6
146.4	7.0	237.2	53.0	278.0	30.0	318.8	8.7
148.8	9.1	239.6	53.7	280.4	20.2	321.2	8.1
201.2	11.5	242.0	54.0	282.8	25.5	323.6	7.5
203.6	14.5	244.4	53.3	285.2	25.0	326.0	6.8
206.0	17.2	246.8	53.2	287.6	23.5	328.4	6.1
208.4	20.7	249.2	52.1	290.0	21.0	330.8	5.7
210.8	24.0	251.6	50.3	292.4	20.3	333.2	5.2
213.2	27.5	254.0	49.5	294.8	17.0	335.6	4.8
215.6	31.0	256.4	48.0	297.2	17.6	338.0	4.5
218.0	34.1	258.8	46.0	299.6	15.5	340.4	4.0
220.4	38.0	261.2	44.0	302.0	15.2		

CORRIDA 1.03  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)	TIEMPO (S)	ALTURA (M)	ALTURA (M)	TIEMPO (S)	ALTURA (M)
0.0	0.0	20.0	59.0	30.0	52.0	7.5
4.0	0.8	24.0	61.5	21.0	56.0	5.8
8.0	7.5	28.0	61.0	15.5	60.0	4.5
12.0	48.0	32.0	44.0	10.5	64.0	3.8
16.0	92.5					

EMAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)						
108.0	0.0	156.0	68.0	204.0	53.5	252.0	13.5
112.0	0.3	160.0	76.0	208.0	52.6	256.0	12.0
116.0	1.5	164.0	82.0	212.0	47.4	260.0	10.4
120.0	2.9	169.0	85.5	216.0	42.0	264.0	9.0
124.0	6.3	172.0	88.0	220.0	37.4	268.0	7.5
128.0	10.7	176.0	89.5	224.0	33.2	272.0	6.8
132.0	15.4	180.0	87.0	228.0	29.4	276.0	6.0
136.0	23.0	184.0	84.3	232.0	25.5	280.0	5.1
140.0	30.5	189.0	80.0	236.0	22.2	284.0	4.5
144.0	29.3	192.0	75.0	240.0	19.6	288.0	4.0
148.0	46.0	196.0	69.9	244.0	17.5	292.0	3.5
152.0	58.5	200.0	64.6	248.0	15.5		

CORRIDA 1.04  
 EMAL DE ENTRADA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)						
0.0	0.0	15.0	103.3	32.0	37.0	49.0	
4.0	1.0	20.0	95.0	36.0	25.0	52.0	
8.0	20.0	24.0	74.5	40.0	17.0	55.0	
12.0	72.0	29.0	54.0	44.0	11.7		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO (S)	ALTURA (M)	TIEMPO (S)
108.0	0.0	156.0
112.0	1.0	160.0
116.0	3.1	164.0
120.0	6.4	168.0
124.0	11.0	172.0
128.0	16.0	176.0
132.0	22.0	180.0
136.0	29.0	184.0
140.0	37.0	189.0
144.0	46.0	192.0
148.0	57.0	196.0
152.0	70.0	200.0

CORRIDA 2.02  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)
0.0	20.0	65.0	40.0
4.0	24.0	62.0	44.0
8.0	27.0	53.0	48.0
12.0	32.0	42.5	52.0
16.0	35.0	32.5	56.0

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
132.0	0.0	196.0	89.0	256.0	51.0	316.0	10.0
136.0	0.4	200.0	94.5	260.0	55.0	320.0	9.7
140.0	1.2	204.0	99.0	264.0	59.0	324.0	8.8
144.0	2.3	208.0	101.3	268.0	37.5	328.0	7.8
148.0	4.5	212.0	102.0	272.0	33.5	332.0	7.2
152.0	7.9	216.0	100.8	276.0	30.0	336.0	6.8
156.0	11.5	220.0	97.5	280.0	26.5	340.0	6.2
160.0	16.0	224.0	93.5	284.0	23.5	344.0	5.6
164.0	22.0	228.0	89.5	288.0	21.5	348.0	5.5
168.0	30.0	232.0	84.0	292.0	19.2	352.0	5.2
172.0	37.0	236.0	78.5	296.0	17.3	356.0	4.6
176.0	46.0	240.0	72.5	300.0	15.4	360.0	4.2
180.0	55.0	244.0	66.5	304.0	14.1	364.0	4.2
184.0	64.0	248.0	61.5	308.0	12.8	368.0	4.0
188.0	73.0	252.0	55.9	312.0	11.4	372.0	3.6
192.0	81.4						

CORRIDA 2.03  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	28.0	127.5	56.0	19.5	84.0	5.0
4.0	3.0	32.0	101.0	60.0	15.3	88.0	5.2
8.0	31.0	36.0	79.0	64.0	12.0	92.0	4.5
12.0	95.0	40.0	59.0	68.0	10.0	96.0	4.0
16.0	146.0	44.0	44.0	72.0	9.5	100.0	4.2
20.0	164.0	48.0	34.0	76.0	7.1	104.0	3.5
24.0	153.0	52.0	26.0	80.0	6.2		

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
124.0	0.0	188.0	76.5	244.0	50.5	300.0	14.5
128.0	0.3	192.0	82.5	252.0	56.0	312.0	12.5
132.0	0.9	196.0	88.5	256.0	52.0	316.0	11.4
136.0	1.9	200.0	92.5	260.0	47.9	320.0	10.4
140.0	3.0	204.0	95.0	264.0	43.7	324.0	9.5
144.0	5.1	208.0	96.0	268.0	39.9	328.0	8.6
148.0	8.0	212.0	96.1	272.0	35.9	332.0	8.0
152.0	12.1	216.0	94.5	276.0	32.0	336.0	7.5
156.0	17.0	220.0	91.5	280.0	29.0	340.0	6.8
160.0	23.5	224.0	88.5	284.0	26.4	344.0	6.0
164.0	30.0	228.0	84.0	288.0	23.6	348.0	5.4
168.0	38.0	232.0	79.5	292.0	21.4	352.0	4.8
172.0	46.0	236.0	75.0	296.0	19.0	356.0	4.2
176.0	53.6	240.0	70.0	300.0	17.0	360.0	3.8
180.0	61.5	244.0	65.4	304.0	15.5	364.0	3.5
184.0	70.0						

CORRIDA 3.01  
EMAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(MM)	ALTURA(MM)	TIEMPO(S)	ALTURA(MM)
0.0	0.0	145.0	104.0	6.5
8.0	6.0	99.0	112.0	5.0
16.0	60.0	64.0	120.0	4.0
24.0	163.0	41.0	128.0	3.0
32.0	131.0			

EMAL DE SALIDA

TIEMPO(S)

84.0

88.0

92.0

96.0

100.0

104.0

108.0

112.0

116.0

120.0

124.0

128.0

132.0

136.0

140.0

144.0

148.0

152.0

156.0

160.0

164.0

168.0

172.0

176.0

180.0

184.0

188.0

192.0

196.0

200.0

TIEMPO(S)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	43.0	114.0
4.0	56.0	73.0
16.0	64.0	45.0
24.0	72.0	29.0
32.0	80.0	19.2
40.0		

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
80.0	0.0	160.0	82.0	240.0	54.0
83.0	0.9	167.0	82.0	248.0	51.0
96.0	2.5	175.0	97.0	256.0	43.5
104.0	5.5	184.0	98.8	264.0	37.5
112.0	11.0	192.0	97.5	272.0	32.5
120.0	18.5	200.0	94.0	280.0	28.5
128.0	29.5	207.0	88.5	288.0	23.3
136.0	42.5	215.0	81.0	296.0	18.5
144.0	56.5	224.0	73.5	304.0	15.5
152.0	70.5	232.0	66.0	312.0	12.0

CORRIDA 3.03

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)
0.0	0.0	32.0	161.0	64.0	34.0	96.0
3.0	7.0	40.0	121.0	72.0	22.0	104.0
16.0	103.0	48.0	82.0	80.0	14.5	112.0
24.0	180.0	56.0	53.0	88.0	9.3	

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
80.0	0.0	160.0	79.0	240.0	57.0	320.0	12.5
88.0	1.0	168.0	87.5	248.0	50.0	328.0	11.0
96.0	2.6	175.0	82.5	256.0	43.0	336.0	9.5
104.0	6.1	184.0	94.9	264.0	37.3	344.0	8.0
112.0	11.8	192.0	94.0	272.0	32.2	352.0	7.0
120.0	20.0	200.0	91.0	280.0	27.5	360.0	5.9
128.0	30.5	208.0	85.9	288.0	23.5	368.0	5.1
136.0	43.0	215.0	79.0	296.0	20.4	376.0	4.7
144.0	56.0	224.0	71.5	304.0	17.4	384.0	4.0
152.0	69.0	232.0	64.0	312.0	14.3		

CORRIDA 4.02

FINAL DE ENTRADA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
0.0	0.0	43.0	166.0	89.0	25.0	128.0	7.6
8.0	2.2	56.0	84.0	96.0	19.3	136.0	6.2
16.0	19.0	64.0	62.0	104.0	14.4	144.0	5.1
24.0	70.0	72.0	46.0	112.0	11.3	152.0	4.2
32.0	111.0	80.0	34.0	120.0	9.3	160.0	3.6
40.0	122.0						

FINAL DE SALIDA

TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)	TIEMPO(S)	ALTURA(M)
112.0	0.0	216.0	65.0	320.0	33.0	424.0	8.9
120.0	1.0	224.0	68.0	328.0	35.0	432.0	8.0
128.0	2.2	232.0	69.8	336.0	31.5	440.0	7.2
136.0	5.0	240.0	70.4	344.0	29.5	448.0	6.6
144.0	8.4	248.0	70.0	352.0	25.5	456.0	5.9
152.0	12.4	256.0	69.0	360.0	23.0	464.0	5.3
160.0	20.0	264.0	65.0	368.0	21.0	472.0	4.9
168.0	27.5	272.0	62.0	376.0	17.5	480.0	4.5
176.0	35.0	280.0	58.5	384.0	15.4	488.0	4.0
184.0	42.0	288.0	54.0	392.0	13.7	496.0	3.8
192.0	50.0	296.0	51.0	400.0	12.0	504.0	3.5
200.0	56.0	304.0	47.0	408.0	10.0	512.0	3.0
208.0	61.0	312.0	43.0	416.0	10.0		

NOMENCLATURA

$A$	: sección transversal del reactor
$a$	: área del relleno/volumen del lecho
$C(t)$	: concentración del trazador como función del tiempo
$C(\theta)$	: concentración del trazador como función del tiempo adimensional
$C^*$	: concentración adimensionalizada
$C(i)$	: función concentración discretizada
$C_o$	: concentración característica del trazador, función de la señal de entrada al sistema
$C_d$	: concentración del trazador en la fase dinámica
$C_s$	: concentración del trazador en la fase estática
$C_i(t)$	: concentración de entrada como función del tiempo
$C_e(t)$	: concentración de salida como función del tiempo
$C'_i, C'_e$	: respuestas de las sondas de análisis, función de la concentración del trazador en la entrada y salida res- pectivamente
$d_t$	: diámetro del lecho relleno
$d_p$	: diámetro de partícula del relleno
$D_{11}$	: coeficiente de difusividad molecular
$E(t)$	: función de distribución de edades
$E_z$	: coeficiente de dispersión axial
$Fr$	número de Froude

$F(t)$	: función de DTR acumulativa
$F_v$	: caudal volumétrico del fluido
$G(t)$	: función de transferencia experimental
$G_M(t)$	: función de transferencia teórica de un modelo
$g$	: aceleración de la gravedad
$G_a$	: número de Galileo
$h_T$	: retención total de fluido
$h_d$	: retención dinámica del fluido
$h_s$	: retención estática del fluido
$K$	: coeficiente de partición
$k$	: coeficiente de intercambio de materia entre la fase dinámica y estática
$L$	: longitud del tramo de pruebas del reactor
$M$	: masa del trazador inyectada
$m_{tYk}$	: momento de orden $k$ de $Y(t)$ en el dominio del tiempo
$Pe$	: número de Peclet
$Q$	: masa del trazador inyectada
$Re$	: número de Reynolds definido en base a la velocidad superficial del fluido
$Re'$	: número de Reynolds definido en base a la velocidad intersticial del fluido
$t$	: tiempo
$t_0$	: tiempo inicial
$t_{ra}$	: tiempo medio de residencia

$U$	: velocidad intersticial del fluido
$U_0$	: velocidad superficial del fluido
$X(s)$	: transformada de Laplace de la función de entrada del trazador
$X(t)$	: función de entrada del trazador en el dominio del tiempo
$X(\theta)$	: función de entrada del trazador adimensionalizada
$Y(t)$	: función de salida del trazador en el dominio del tiempo
$Y(\theta)$	: función de salida del trazador adimensionalizada
$Y(s)$	: transformada de Laplace de la función de salida del trazador
$z$	: coordenada axial del sistema

Símbolos griegos

$\epsilon$	: porosidad
$\rho$	: densidad
$\theta$	: tiempo adimensional ( $t/t_m$ )
$\sigma^2$	: varianza
$\sigma_{tYk}^2$	: momento de segundo orden
$\sigma_{tYk}^3$	: momento de tercer orden
$\xi$	: tensión superficial
$\mu$	: viscosidad
$\alpha$	: conductividad térmica

## Subíndices

L : fase líquida

G : fase gaseosa

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbott, M.D., Moore, G.R. y Ralph, J.L., 7<sup>th</sup> ABG conference, Paper S-5, 1967.
- Anderssen y White, Chem. Eng. Sci., vol 25, p. 1015, 1970.
- Aris, R., Proc. Roy. Soc. (London), vol. A235, p. 67, 1956.
- Arvía, A.J., Bazán, J.C. y Carrozza, J.S., Electrochimica Acta vol. 11, pp. 881-889, 1966.
- Bennett y Goodridge, F., Trans. Inst. Chem. Eng., vol. 48, p. 232, 1970.
- Bishoff, K.B. y Levenspiel, O., Chem. Eng. Sci., vol. 17, p. 245, 1962.
- Box, G. y Hill, W., Tech. Rep., Univ. Wisconsin, n° 142, 1968.
- Buffham, B.A., Chem. Eng. J., vol. 2, p. 71, 1971.
- Buffham, B.A. y Rathor, M.N., Tr. Inst. Chem. Engrs., vol. 56, p. 266, 1978.
- Carlslaw, H.S. y Jaeger, J.C., Oxford University Press, London, p. 311, 1947.

- Charpentier, J.C., Prost, C. y Le Goff, P., Chem. Eng. Sci., vol. 24, p. 1777, 1969.
- Charpentier, J.C., Prost, C. y Le Goff, P., Chim. Ind. Génie Chim. vol. 100, p. 653, 1968.
- Charpentier, J.C. y Favier, M., AIChE J., vol. 21, N° 6, p. 1213,
- Chou, T.S., Worly, F.L. y Luss, D., I&EC Process Design Dev., vol. 16, p. 424, 1977.
- Clements, W.C. Jr., Chem. Eng. Sci., vol. 24, p. 957, 1969.
- Colombo, A.J., Baldi, G. y Sicardi, S., Chem. Eng. Sci., vol. 31, p. 1101, 1976.
- Cooper, C., Christl, R. y Perry, L., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. vol. 37, p. 979, 1941.
- Crine, M., Asua, J.M., Marchot, P. y L'Homme, G.A., Rev. Latinoam. Ing. Quim. y Quim. Apl., vol. 13, p. 1-20, 1983.
- Co, Pham y Bibaud, R., Can. J. Chem. Eng., vol. 19, p. 727, 1971.
- Davidson, J., Trans. Inst. Chem. Eng., vol. 37, p. 131, 1959.
- Deans, H.A., Soc. Petrol. Eng. J., vol. 3, p. 49, 1963.

Deans, H.A. y Lapidus, L., AIChE J., vol. 6, N° 4, p. 656, 1960.

Dunn, W., Mermeulen, T., Wilke y Wrod, T., Univ. of California  
Radiation Lab. Report 10394, 1962.

Edwards, M.F. y Richardson, J.F., Chem. Eng. Sci., vol. 23, p. 109,  
1968.

Elgin, J. y Weiss, F., Ind. Eng. Chem., vol. 31, p. 435, 1939.

Fahim, M.A. y Makao, N., Chem. Eng. J., vol. 25, p. 1-8, 1982.

Friebe, J., Dissertation, T.H., Darmstadt, 1966.

Friedlander, A.G. y Lemcoff, N.O., Rev. Latinoam. Ing. Quim. y  
Quim. Apl., vol. 11, p. 153, 1981.

Furnas, C.C., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., vol. 24, p. 142, 1930.

Furnas, G.C. y Bellinger, F., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., vol.  
34, p. 251, 1938.

Gianetto, A., Baldi, G. y Specchia, V., AIChE J., vol. 24, p. 1087,  
1978.

Gunn, D.J., Chem. Eng. Sci., vol. 15, p. 56, 1970.

Harned, H., Nuttall, R., JChS, vol. 69, p. 736, 1947.

///

Harned, H., Shropshire, J., JACHS, vol. 80, p. 5652, 1958.

Harned, H., Shropshire, J., JACHS, vol. 82, p. 799, 1960.

Herskowitz, M., y Smith, J.M., AIChE J., vol. 29, N° 1, p. 1-18,  
1983.

Hochman, J.M. y Effron, E., I&EC Fund., vol. 8, N° 1, p. 63, 1969.

Hofmann, H., Chem. Ing. Tech., vol. 47, N° 20, p. 823, 1975.

Hoogendorn, C.J. y Lips, J., Can. J. Chem. Eng., vol. 43, p. 125,  
1965.

Hopkins, M.J., Sheppard, A.J. y Eisenklam, P., Chem. Eng. Sci.,  
vol. 24, p. 1131, 1969.

Hsiang, T., y Haynes, H., Chem. Eng. Sci., vol. 32, p. 678, 1977.

Jesser, B. y Elgin, J., Trans. Am. Ind. Chem. Engrs., vol. 39, p. 277, 1943.

Kan, K.M. y Greenfield, P.F., AIChE J., vol. 29, N° 1, p. 123, 1983.

Kitrell, J., Mezaki, R. y Watson, C., Ind. and Eng. Chem., vol. 57,  
p. 18, 1965.

Klinkenberg, A., Ind. Chem. Eng., vol. 40, N° 10, p. 1992, 1946.

Kucera, E., Journal of Chromatography, vol. 19, p. 237, 1965.

///

Kobayashi, S. y Wakao, N., Kagaku Kogaku Ronbunshu, vol. 5, p. 256,  
1979.

Larkins, R.P., AIChE J., vol. 7, p. 231, 1961.

Lerou, J.J., Glasser, D. y Luss, D., I&EC Fund., vol.  
19, p. 66, 1980.

Lemcoff, N.O., The Chem. Eng. J., vol. 13, p. 71, 1977.

Levenspiel, O. y Turner, J.C., Chem. Eng. Sci., vol. 25, p. 1605,  
1970.

Levenspiel, O. y Smith, W.K., Chem. Eng. Sci., vol. 6, p. 227, 1957.

Matsuura, A., Akehata, T. y Shirai, T., J. Chem. Eng. Japan, vol.  
9, N° 4, p. 294, 1976.

de María, F. y White, R.R., AIChE J., vol. 6, p. 473, 1960.

Mezaki, P., Johnson, R. y Standal, N., I&EC Fund., vol.  
7, p. 181, 1968.

Michell, R.W. y Furzer, I.A., Chem. Eng. J., vol. 4, p. 53, 1972.

Michell, R.W. y Furzer, E.A., Trans. Inst. Chem. Eng., vol. 50,  
p. 334, 1972.

///

- Mills, P.L. y Dudukovic, M.D., I&EC Fund., vol. 18,  
p. 139, 1979.
- Mills, P.L. y Dudukovic, M.D., AIChE J., vol. 27, p. 893, 1981.
- Morton, F., King, P.J. y Atkinson, B., Trans. Inst. Chem. Eng.,  
vol. 42, p. 149, 1964,
- Mohunta, D. y Laddha, G., Chem. Eng. Sci., vol. 20, p. 1069, 1965.
- Onda, K., Sda, E. y Murase, Y., AIChE J., vol. 5, p. 235, 1959.
- Ostergaard, K. y Michelsen, N.L., Chem. Eng. J., vol. 2, p. 37,  
1970.
- Otake, T. y Okada, K., Kagaku Kogaku, vol. 17, p. 176, 1953.
- Raghuraman, J. y Varma, Y.B., Chem. Eng. Sci., vol. 28, p. 585,  
1973.
- Rao, V.G. y Varma, Y.B., AIChE J., vol. 22, N° 3, p. 612, 1976.
- Ross, L.D., Chem. Eng. Progr., vol. 61, N° 10, p. 77, 1965.
- Rothfeld, L.B. y Ralph, J.L., AIChE J., vol. 9, N° 6, p. 852, 1963.
- Ruszkay, R.D., Eng. Sci. Dissertation, Dep. Chem. Eng., Columbia  
University New York, 1962.

Sater, V.E. y Levenspiel, O., I&EC Fund., vol. 5, p. 86, 1966.

Satterfield, C., AIChE J., vol. 21, N° 2, p. 209, 1975.

Schwartz, C.E. y Smith, J.M., Ind. Eng. Chem., vol. 45, p. 1209,  
1953.

Schwartz, C.E., Dudukovic, N. y Weger, E., AIChE J., vol. 22, N° 5,  
p. 953, 1976.

Schwartz, J.G., Dudukovic, N. y Weger, E., AIChE J., vol. 22, N° 5,  
p. 895, 1976.

Schwartz, J.G., Dudukovic, N. y Weger, E., IV ISCRE, Heidelberg,  
6-8 Abril, 1976.

Schwartz, J.G. y Roberts, G.W., I&EC Process Design  
Develop., vol. 12, p. 262, 1973.

Scott, D.S., Lee, W. y Papa, J., Chem. Eng. Sci., vol. 29, p. 2155,  
1974.

Sato, Y., Hirase, T., Takahashi, F. y Toda, M., J. Chem. Eng.  
(Japan), vol. 6, N° 2, p. 147, 1973.

Sarma, P. y Haynes, H., Chem. Reaction Eng., vol. II, p. 205, 1974.

Shah, Y., Stiegel, G. y Sharma, M., AIChE J., vol. 24, N° 3, p. 309,

1978.

Shah, Y., "Gas-Liquid-Solid Reactor Design", Mc Graw-Hill Inc., 1979.

Shulman, K., Ulbrich, C., Proulx, A. y Zimmermann, J., AIChE J.,  
vol. 1, p. 253, 1955.

Shumann, T.E.W., J. Franklin Inst., vol. 208, p. 405, 1929.

Schiesser, W.E. y Lapidus, L., AIChE J., vol. 7, p. 163, 1961.

Sicardi, S., Baldi, G. y Specchia, V., Chem. Eng. Sci., vol. 35,  
p. 1775, 1980.

Specchia, V. y Baldi, G., Chem. Eng. Sci., vol. 32, p. 515, 1977.

Stephens, T.G., Thesis, University of Birmingham, England, 1966.

Tosun, G., I&EC Fund., vol. 21, p. 184, 1982.

Tosun, G., I&EC Process Des. Dev., vol. 23, p. 29, 1984.

Turek, F., Lange, R. y Busch, A., Chem. Eng. Sci., vol. 36, p. 569,  
1981.

Turner, J.C., Chem. Eng. Sci., vol. 26, p. 549, 1971.

Urban, J. y Gomezplata, A., Can. J. Chem. Eng., vol. 47, p. 353,

///

1969.

Van Swaij, W.P., Charpentier, J.C. y Villermaux, J., Chem. Eng. Sci., vol. 24, p. 1083, 1969.

Walter, J.E., J. Chem. Phys., vol. 13, p. 332, 1945.

Wen, C.Y. y Fan, L.T., "Models for Flow Systems and Chemical Reactors", Marcel Dekker, Inc. New York, 1975.