

Tesis de Posgrado

Transferencia de calor en lechos rellenos con mallas

Suarez Fernandez, Constantino

1977

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. 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. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Suarez Fernandez, Constantino. (1977). Transferencia de calor en lechos rellenos con mallas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1540_SuarezFernandez.pdf

Cita tipo Chicago:

Suarez Fernandez, Constantino. "Transferencia de calor en lechos rellenos con mallas". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1977.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1540_SuarezFernandez.pdf

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

TRANSFERENCIA DE CALOR EN
LECHOS RELLENOS CON MALLAS

Tesis presentada por
CONSTANTINO SUAREZ FERNANDEZ
para optar al título de
DOCTOR EN QUIMICA
(orientación Química Industrial)

Director de Tesis: Ing. José M. Bados

- 1977 -

1540
2
6

AGRADECIMIENTO

A la Dra. Ursula Böhm de Bordenave por su desempeño como Con
sejera de Estudios.

Al Ing. Pascual E. Viollaz por la colaboración prestada en
los trabajos de computación.

INDICE

	página
1. Introducción.	1
2. Objeto del trabajo.	5
3.1. Descripción del equipo.	6
3.2. Método experimental.	9
3.3. Puesta a punto del equipo.	10
3.4. Condiciones operativas en la columna.	10
3.5. Perfil de temperatura a la salida del lecho.	11
3.6. Medición del perfil de velocidades a la salida del lecho.	12
3.7. Determinación de las propiedades físicas.	12
3.8. Altura del lecho.	12
3.9. Características de las mallas.	13
4. Sistema de intercambio sólido-fluido.	15
4.1. balance de Energía.	16
4.2. Solución del sistema de ecuaciones.	18
5. Resultados experimentales.	23
5.1. Determinación del coeficiente de transferencia de calor.	25
5.2. Comparación de los valores de $G(Z,\theta)$ de la ecuación (14) con los de Schumann.	26
5.3. Comparación de los valores experimentales con los predi- chos por el modelo.	27
5.4. Dependencia del coeficiente de transferencia de calor con el caudal.	34

	página
6. Correlación de datos.	36
6.1. Modelo I.	36
6.2. Modelo II.	44
6.3. Modelo III.	45
6.4. Discusión de los resultados.	50
7. Comparación de datos.	54
8. Conclusiones.	59
9.1. Apéndice I.	60
9.2. Apéndice II.	62
9.3. Apéndice III.	66
10. Nomenclatura.	68
11. Bibliografía.	71

1. INTRODUCCION.

El estudio de los sistemas formados por nucleos de mallas metálicas presenta una considerable importancia tanto desde el punto de vista de transferencia de masa como de calor. En el primer caso, son conocidos los trabajos de Satterfield y Cortez (¹), que estudiaron la oxidación catalítica de tolueno en exceso de aire usando de una a tres mallas de platino como catalizador; el trabajo de Gay y Maughan (²), que determinaron la velocidad de transferencia de una delgada capa de mercurio depositada sobre una malla a los fines de conocer el comportamiento de ésta.

El estudio de transferencia de masa por métodos electroquímicos ha sido también usado en lechos de mallas. Vogtländer y Bakker (³) han aplicado esta técnica a un conjunto de mallas de platino a través de las cuales circula un líquido. Aplicando también el método electroquímico se encuentra el trabajo de Cano y Böhm (⁴), que estudiaron la transferencia de masa para una, tres, seis y nueve mallas; los datos experimentales fueron correlacionados en base al modelo que ellos plantearon.

Finalmente, citaremos el trabajo de Nowak (⁵), que estudia la oxidación catalítica de amoníaco sobre mallas de platino; los datos se comparan con la correlación para cilindro infinito, observándose que las velocidades de transferencia en el caso de mallas son algo mayores que para cilindro infinito.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, el

estudio de este tipo de lecho tiene una aplicación importante en el diseño de ciertos intercambiadores compactos. La necesidad de disponer de equipos livianos, de poco volumen, con un valor alto de la relación de área de transferencia a volumen de equipo y valores altos del coeficiente de transferencia de calor, ha inducido la búsqueda de nuevas geometrías capaces de satisfacer tales requisitos, llevando a los llamados "intercambiadores compactos", definidos como aquellos para los cuales la relación área-volumen es mayor que $600\text{m}^2/\text{m}^3$.

Dado que a los fines de diseño es necesario tener información sobre coeficientes de transferencia de calor en tales sistemas, se han hecho investigaciones empleando métodos tanto en estado estacionario como en régimen variable.

En estado estacionario, el coeficiente de transferencia de calor se determina midiendo la cantidad de calor transferido entre las partículas que forman el lecho (varillas, esferas, etc.) y un fluido, y la diferencia de temperatura entre dicha partícula, considerando distribución de temperatura uniforme dentro de la misma, y el fluido.

En régimen variable se mide la temperatura del fluido en función del tiempo; comparando las curvas que resultan de su representación gráfica con las obtenidas teóricamente por Schumann (⁶), se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor. Estas curvas fueron obtenidas por Schumann por integración de la ecuación diferencial que describe la transferencia de calor en un lecho de

sólidos supuesto adiabático.

Una solución más general al problema de transferencia de calor sólido-fluido es presentado por Amundson (⁷), el cual supone que el lecho está formado por esferas uniformes dentro de las cuales existen gradientes de temperatura; en este trabajo también se contempla el caso en que existe generación de calor dentro del lecho.

Los principales trabajos experimentales realizados para obtener correlaciones tanto de transferencia de calor como de pérdidas por fricción en diversas geometrías, fueron realizados por Kays (⁸), (⁹) y por Coppage y London (¹⁰). Por ejemplo, en la referencia (⁸), el autor determina el coeficiente de transferencia de calor en régimen variable para un banco de tubos de pequeño diámetro, con aire fluyendo en dirección normal a los mismos.

Han sido propuestos también otros métodos para evaluar el coeficiente de transferencia. Entre los trabajos correspondientes se encuentra el de Lindauer (¹¹), aplicable tanto a lechos rellenos como a fluidizados. Denominado método de "variaciones cíclicas de temperatura", consiste en introducir una variación cíclica en el tiempo en la corriente gaseosa. Como resultado de la transferencia de calor en el lecho, esta onda modifica su amplitud y frecuencia. El coeficiente de transferencia de calor se calcula a partir de la relación entre las amplitudes y las frecuencias de la onda original y la modificada, de las propiedades térmicas del gas y de las parti

culas, de la geometría del sistema y de la velocidad de enfriamiento.

En nuestro caso, dada la dificultad de medir la temperatura de las mallas por causa de su geometría y el pequeño diámetro de los alambres, se plantea como una necesidad efectuar las mediciones en régimen variable.

En términos generales, el método consiste en modificar bruscamente la temperatura del aire a la entrada, a un valor más alto que el inicial, por ejemplo, y registrar su variación con el tiempo a la salida del lecho. El coeficiente de transferencia para el sistema aire-mallas se determinará comparando estos valores con la solución de las ecuaciones diferenciales que fueron propuestas por Schumann.

2. OBJETO DEL TRABAJO.

La finalidad de este trabajo es encontrar una correlación para los datos experimentales obtenidos en el sistema aire-mallas.

Los dimensionales que se usarán en las correlaciones serán obtenidas de los modelos aplicados a transferencia de calor en lechos y a los cuales se hará referencia más adelante.

El método experimental empleado consiste en medir la temperatura del aire a la salida del lecho en función del tiempo y se comparan estos valores con los predichos en base a un modelo teórico. De esta comparación y tal como veremos en la sección 4, mediante un método de ajuste adecuado se puede determinar el coeficiente de transferencia de calor para el lecho. La ventaja de este método radica en que no es necesario medir la temperatura de las mallas, y las propiedades físicas del aire se pueden suponer aproximadamente constantes.

El lecho, en nuestro caso, consiste en varias mallas metálicas apoyadas unas sobre otras.

Finalmente se comparan los resultados obtenidos con los de la bibliografía para transferencia de calor y masa, y se discuten los resultados.

3. PARTE EXPERIMENTAL.

3.1. Descripción del equipo.

El equipo, tal como se muestra en la fig. (1), consta de un ventilador centrífugo, un medidor de caudal tipo flotámetro, una caja de resistencias calefactoras, la columna de prueba y el sistema de medición y registro de temperatura.

El ventilador empleado es del tipo centrífugo de 2 CV, con un caudal de descarga de $6 \text{ m}^3/\text{min}$ para una presión de salida de 300 mm

Un filtro de aire de malla metálica muy fina, ubicado en la línea de conducción evita el transporte de polvo dentro del equipo.

La válvula esclusa usada en combinación con el by-pass, permite una buena regulación del caudal.

La medición de caudales se hizo con un flotámetro, siendo la curva de calibración la provista por el fabricante. Los caudales de aire se variaron en un rango de 40 a 1090 l/min. Debido a la oscilación de la pluma, principalmente a bajos caudales, la medición se estima con un error promedio del 2%. Los caños, de 1", y las válvulas usadas, son de P.V.C.

El aire pasa por la caja de resistencias, donde se calienta hasta alcanzar temperaturas entre 65° y 75°C . La caja contiene un total de 12 resistencias, capaces de disipar una potencia de 2,725 KW.

- A Soplador
- B Flotámetro
- C-D Válvulas exclusivas
- F Caja calefactora
- G Tablero eléctrico
- I Caño aislado
- H Válvula de tres vías
- J Salida de aire
- K Zona de estabilización de flujo
- L Lecho de mallas
- N Cámara de aire
- 1-4 Termocuplas
- 5 Termómetro

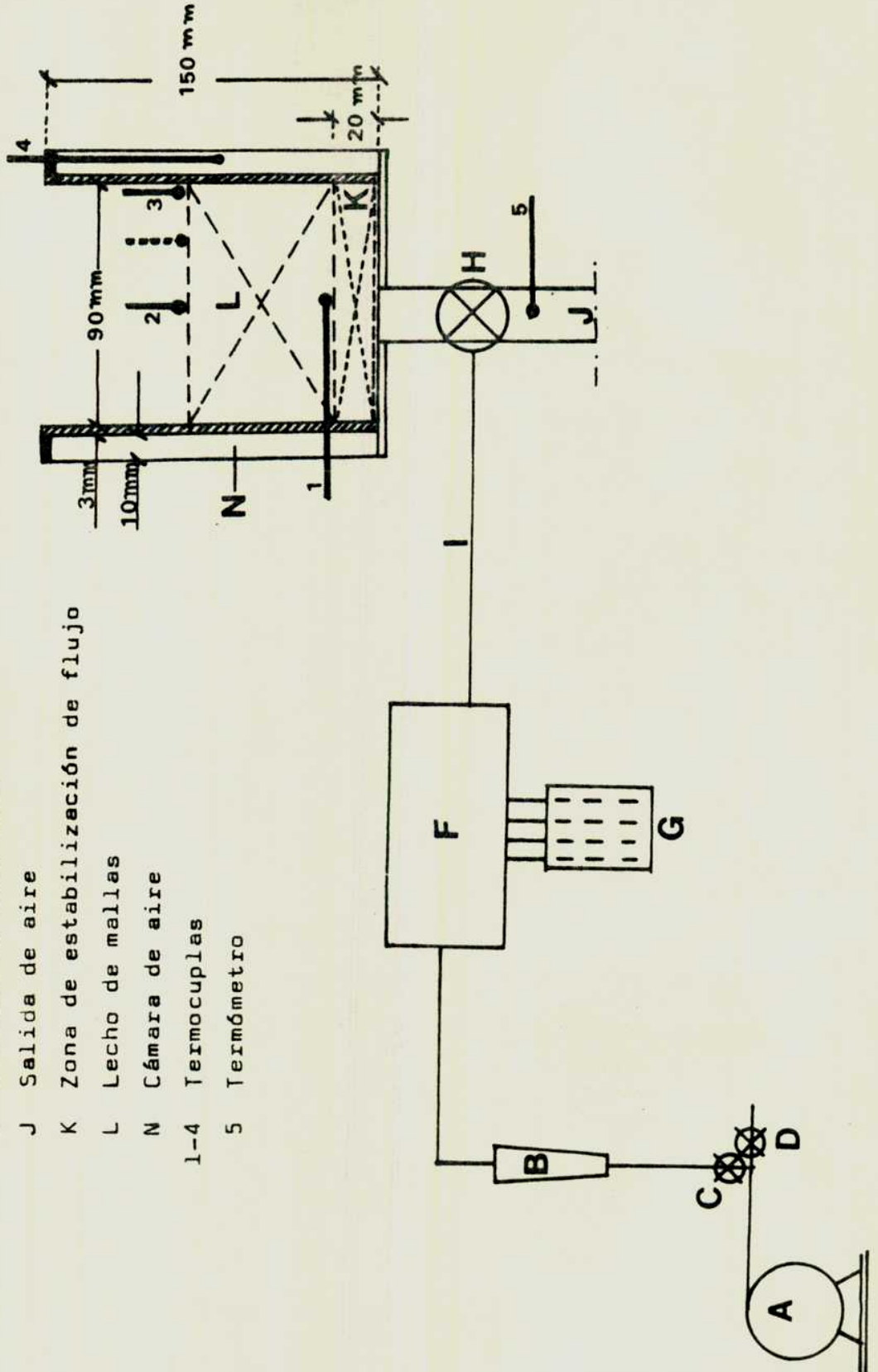


FIGURA 1 : Esquema del equipo.

Las resistencias, cada una con distinta potencia, son conectadas desde el tablero, regulándose de esta manera la potencia total entregada.

La columna está formada por un caño soporte de 15 cm de altura. Separada de éste, dejando una luz de un centímetro y apoyada sobre la misma base, está el cilindro hueco, de fibra poliamídica (Grilón), de 3 mm de espesor y 90 mm de diámetro interno, dentro del cual se ubican los distintos rellenos que se usaron en las experiencias.

Un aro de un centímetro de ancho sella el extremo superior de la abertura entre ambos cilindros, creando de esta manera una cámara de aire hermética entre los dos.

Las mallas que forman el lecho son apiladas al azar.

Las temperaturas del aire, a la entrada y a la salida del lecho, se miden con termocuplas de Cobre-Constantan, cuyo diámetro es de 0,19 mm; un capilar de acero inoxidable permite mantener las termocuplas en una posición fija, enfrentando al flujo de aire inmediatamente a la salida del lecho, tal como puede verse en la figura (¹), al mismo tiempo que las protege de posibles deterioros mecánicos. Dichas termocuplas fueron calibradas y los valores verificados con los de la bibliografía, siendo coincidentes con éstos para el rango de temperaturas empleado.

Tres termocuplas, una a la entrada y dos a la salida

del lecho, permiten seguir la evolución de la temperatura del aire correspondientes. Una cuarta termocupla de la temperatura de la capa de aire entre los dos cilindros y sirve para controlar las condiciones de adiabaticidad supuestas, tal como veremos más adelante.

El registro de temperaturas se hizo con dos registradores potenciométricos marca SERVOSCRIBE de las siguientes características:

Rango de medición: máximo valor de la escala 5 mV y una aproximación de ± 20 microV.

Velocidad de papel : 120 mm/min

Constante de tiempo : 0.2 segundos a toda escala.

La calibración de la escala se constató mediante un voltímetro digital. Una válvula de tres vías ubicada en la base de la columna permite alimentar el aire caliente a la misma, una vez alcanzado el estado estacionario para el resto del equipo; ésto se verifica mediante un termómetro colocado en una salida de dicha válvula.

3.2. Método experimental

El sistema aire-malla se opera en condiciones de régimen no estacionario. Se inyecta al mismo un escalón posi-

vo de temperatura y se registra la temperatura del aire a la salida del lecho.

3.3. Puesta a punto del equipo.

El primer paso consiste en llevar la caja calefactora y la línea de conducción de aire a estado estacionario, para un dado caudal de trabajo. Durante esta operación el aire no tiene acceso a la columna, siendo desviado al exterior por la válvula de tres vías, hasta que alcanza la temperatura deseada, y se está entonces en condiciones de desviarlo hacia dicha columna.

Para ello se opera la válvula en forma manual, generándose de esta manera el escalón de entrada; éste se registra mediante la termocupla ubicada en la base del lecho.

3.4. Condiciones operativas en la columna.

Previo al pasaje de aire caliente por el lecho, la columna se lleva a una temperatura inicial uniforme, haciendo circular aire a la temperatura ambiente por la misma. Esta condición se verifica mediante la termocupla ubicada a la salida del lecho.

Satisfecha esta condición, el paso siguiente es inyectar el escalón de temperatura y registrar la misma a la salida del lecho; para esto se usaron dos termocuplas, una ubicada en el centro y otra en un punto intermedio entre éste y

la pared.

La suposición de adiabaticidad para el lecho se verificó mediante la termocupla ubicada en la capa de aire entre los dos cilindros. Durante el tiempo que dura cada corrida, que varía entre 2 y 5 minutos, la temperatura de la capa de aire se incrementa entre 2°C y 3°C. Se calcularon para estas condiciones límites el calor cedido a las mallas y a la capa de aire, estimándose que este último representa en promedio un 5% del primero.

3.5. Perfil de temperatura a la salida del lecho.

Se registró el perfil de temperatura a la salida del lecho en tres puntos:

centro (1) Intermedio (2) cercano a la pared (3)

Un ejemplo de dichas medidas se da a continuación

Mallas N° 3 $T_e = 72^\circ\text{C}$ $T_o = 21.5^\circ\text{C}$

Caudal (l/min) de aire	tiempo (seg)	(1)	(2)	(3)
45	15	24.7	24.7	23.9
	75	39.6	39.4	38.8
	180	65.4	65.2	65.7
520	10	27.3	26.9	27.1
	60	45.5	45.5	45.0
	150	65.4	65.3	64.8

Los resultados tabulados se obtuvieron manteniendo la capa de aire de la camisa a una temperatura intermedia entre la ambiente y la del escalón. De esta manera no solo se disminuye la fuerza impulsora entre el lecho y la capa de aire, sino que disminuye el calor cedido como consecuencia de posibles contactos de las mallas con la pared.

Resultados análogos se obtuvieron con otras mallas y en distintas condiciones operativas. Dado que las diferencias de temperaturas en la dirección radial no son significativas, los valores registrados en las distintas posiciones de las termocuplas fueron usados indistintamente.

3.6. Medición del perfil de velocidades a la salida del lecho.

Mediante un velómetro se midieron las velocidades del aire en distintos puntos a la salida del lecho, verificándose así que la suposición de perfil plano resulta satisfactoria dentro de un 3%. Esta verificación es necesaria, pues forma parte de las suposiciones del modelo de Schumann.

3.7. Determinación de las propiedades físicas.

La densidad, calor específico y viscosidad del aire junto con la densidad y el calor específico de las mallas, se calcularon a la temperatura media entre la inicial y final del lecho.

3.8. Altura del lecho.

La altura del lecho se determinó de dos formas. Una, mi

diendo la altura de las mallas, apiladas directamente en el lecho, en distintos puntos del mismo; los valores obtenidos se promedian y este valor se toma como altura del lecho.

La otra es midiendo el espesor de las mallas y multiplicándolo por el número de éstas. Como este valor no difiere del obtenido midiendo directamente las alturas, se prefirió calcularlas a partir del dato de espesor de mallas, pues además estos últimos son necesarios para el cálculo de las porosidades.

3.9. Características de las mallas.

Para las mallas de bronce usadas en este trabajo se obtuvo de tablas (17) el valor del calor específico, en tanto que la densidad del material se determinó experimentalmente.

El cálculo de porosidad de las mallas se hizo en base al trabajo de Blass (¹²), ver apéndice (I), Además se calculó experimentalmente, midiendo el volumen de la malla, el peso y la densidad del material. Dado que ambos valores son similares, como se ve a continuación, se puede usar uno u otro indistintamente.

<u>Denominación de mallas</u>	<u>Porosidad</u>	
	<u>Blass</u>	<u>Experimental</u>
1	0.81	0.80
2	0.78	0.78
3	0.85	0.84

A continuación se resumen las características geométri-

cas de las mallas empleadas.

Tabla N° 1

Denominación de mallas	(cm)	d (cm)	a (cm ⁻¹)	ε
1	0.300	0.15	5.06	0.81
2	0.453	0.20	4.40	0.78
3	0.174	0.08	7.50	0.85
4	0.189	0.09	7.00	0.83

Es necesario aclarar que el área específica se calculó a partir del trabajo de Glass, ya citado.

4. Sistema de intercambio sólido-fluido.

Se usa aquí, en el caso particular del sistema aire-mallas metálicas, el método empleado a menudo en la práctica para el calentamiento o enfriamiento de fluidos cuando atraviesan un lecho relleno.

La formulación del mecanismo de transferencia de calor en lechos porosos fijos fue presentado por Schumann (⁶). Dado un lecho relleno con una distribución inicial de temperatura uniforme, se hace circular a través de él un fluido a una temperatura también uniforme pero mayor.

El problema consiste en encontrar la distribución de temperatura en el lecho y el fluido en cada instante, usando las siguientes suposiciones:

- a) Las partículas que forman el lecho son pequeñas o tienen una difusividad térmica suficientemente alta como para que pueda considerarse que no hay gradientes de temperatura en su interior.
- b) Comparada con la transferencia de calor desde el fluido al sólido, la transferencia por conducción en el fluido es pequeña y puede despreciarse.
- c) La velocidad de transferencia sólido-fluido en cada sección es proporcional a la diferencia de temperatura entre el fluido y el sólido.
- d) Las variaciones de volumen de sólido y fluido con la temperatura son despreciables.

- e) Las propiedades físicas son independientes de la temperatura.
- f) El lecho es adiabático y por lo tanto la transferencia de calor ocurre solamente entre el relleno y el fluido. Esta suposición es importante porque elimina el radio como variable independiente.
- g) La velocidad de circulación es constante en toda la sección y a lo largo del lecho.
- h) La conducción de calor en el sólido en dirección axial es despreciable.

El grado de validez de estas suposiciones se puede determinar solo experimentalmente. No son analizadas por Schumann, cuyo objetivo es solamente presentar el tratamiento matemático del problema.

En trabajos posteriores, Furnas (¹⁶) utiliza dicha solución para determinar los coeficientes de transferencia de calor en medios porosos, comparándola con los datos experimentales por él obtenidos.

La solución analítica de Schumann está presentada en forma de una sumatoria de funciones de Bessel, lo que hace dificultoso su uso desde el punto de vista computacional.

4.1. Balance de energía.

En base a las suposiciones antes enumeradas se puede plantear un balance de energía entre las fases fluida y sólida, resultando las ecuaciones:

$$E \rho_f c_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = - E \rho_f c_{p_f} V_f \frac{\partial T_f}{\partial z} - h_a (T_f - T_s) \quad (1)$$

$$(1 - E) \rho_s c_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_a (T_f - T_s) \quad (2)$$

La ecuación (1) describe la variación de temperatura de la fase fluida según la coordenada axial y el tiempo.

La ecuación (2) da la variación de temperatura de la fase sólida en función del tiempo. Ambas ecuaciones quedan acopladas por el término de transferencia de calor de la fase fluida a la sólida: $h_a(T_f - T_s)$.

Definimos la variable de tiempo modificada t' como:

$$t' = t - z/V_f \quad (2')$$

que da el tiempo medido a partir del momento en que el frente de fluido alcanza un punto dado del lecho definido por su coordenada z . Sustituyendo en las ecuaciones (1) y (2) y operando resulta:

$$\frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{h_a}{E V_f c_{p_f} \rho_f} (T_f - T_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t'} = \frac{h_a}{(1 - E) \rho_s c_{p_s}} (T_f - T_s) \quad (4)$$

Las condiciones de contorno en este caso son:

$$\begin{aligned} t' = 0 \quad y \quad z = 0 & \quad T_f = T_s = T_o \\ z = 0 \quad y \quad t' = 0 & \quad T_f = T_e = \text{constante} \end{aligned}$$

Introduciendo los siguientes adimensionales:

$$\begin{aligned} G &= \frac{T_f - T_o}{T_e - T_o} & S &= \frac{T_s - T_o}{T_e - T_o} \\ Z &= \frac{z h_a}{E V_f c_p \rho_f} & \theta &= \frac{t' h_a}{(1 - E) \rho_s c_p} \end{aligned}$$

en la ecuaciones (3) y (4) se obtienen:

$$-\frac{\partial G}{\partial Z} = (G - S) \quad (5) \quad \frac{\partial S}{\partial \theta} = (G - S) \quad (6)$$

con las condiciones de contorno adimensionales:

$$S(Z, \theta) = 0 \quad ; \quad G(0, \theta) = 1 \quad (7)$$

Queda entonces por resolver el conjunto de las dos ecuaciones (5) y (6) en derivadas parciales acopladas con sus condiciones de contorno.

4.2. Solución del sistema de ecuaciones.

El método de integración de las ecuaciones (5) y (6) mediante transformadas de Laplace aparece como más conveniente, comparado con el método clásico de Schumann, pues permite obtener una solución que resulta de mayor facilidad operativa desde el punto de vista computacional.

Aplicando la definición de transformada a la ecuación (6) resulta

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right) e^{-p\theta} d\theta = \int_0^{\infty} \bar{G} e^{-p\theta} d\theta - \int_0^{\infty} S e^{-p\theta} d\theta$$

Integrando por partes el miembro de la izquierda y aplicando la condición de contorno para S se tiene:

$$\bar{S} = \bar{G} \left(\frac{1}{p+1} \right) \quad (8)$$

donde \bar{S} y \bar{G} son las variables transformadas.

Si ahora aplicamos la definición de transformada a la ecuación (5) y operamos

$$- \frac{d\bar{G}}{dZ} = \bar{G} - \bar{S} \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (8) en la (9) e integrando,

$$\bar{G} = C e^{-\frac{P}{P+1} Z}$$

Aplicando la condición de contorno en la ecuación anterior determinamos el valor de la constante de integración C.

La ecuación que describe la variación de temperatura para el fluido en el campo transformado resulta:

$$\bar{G} = \frac{1}{p} e^{-\frac{P}{p+1} Z} \quad (10)$$

Operando con el exponente de la ecuación (10) y reemplazando la ecuación (8) en esta, se obtiene

$$\bar{s} = \frac{e^{-Z}}{p} \frac{e^{-p+1}}{p+1} \quad (11)$$

El paso siguiente es calcular la función antitransformada de la ecuación (11).

Haciendo uso del teorema de convolución y de desplazamiento se obtiene la ecuación

$$S(Z, \theta) = e^{-Z} \int_0^{\theta} e^{-\theta} I_0(2\sqrt{Z\theta}) d\theta \quad (12)$$

que nos da la variación de temperatura de la fase sólida en función de Z y θ . $I_0(2(Z\theta)^{\frac{1}{2}})$ es la función de Bessel modificada de primera especie y orden cero.

Restando las ecuaciones (5) y (6) e integrando la expresión que resulta obtenemos para G:

$$G = 1 - e^{-\theta} \int_0^Z e^{-Z} I_0(2\sqrt{Z\theta}) dZ \quad (13)$$

Si reemplazamos $I_0(2(Z\theta)^{\frac{1}{2}})$ por la serie que la define e integramos se obtiene

$$G = 1 - e^{-\theta-Z} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\theta^i}{i!} \sum_{j=0}^i \frac{Z^j}{j!} \quad (14)$$

la cual, si desarrollamos algunos términos, toma la forma:

$$G(Z,0) = 1 - e^{-Z} - \theta \left(1 + \theta(1+Z) + \frac{\theta^2}{2!} \left(1 + Z + \frac{Z^2}{2!} \right) \dots \dots \right) \quad (15)$$

La expresión dada por la ecuación (15) presenta una forma más accesible para su uso que la presentada por Schumann, el cual obtiene una expresión para G como una serie infinita de funciones de Bessel, la cual la hace difícil para usos computacionales.

En un trabajo más reciente de Kohlmayr (¹³), éste prueba la convergencia de la ecuación para G, obtenida por Schumann, la cual es formalmente análoga a la obtenida mediante el método de transformada de Laplace.

En este trabajo se observa que para el caso de Z = 5.0 la serie calculada con 6 términos difiere en un 0.1% con respecto a los valores obtenidos incluyendo mayor número de términos.

En la figura (2) se representan en forma gráfica los valores de G(Z,θ) calculados mediante la ecuación (15), fijando el número de términos de la serie de la forma que se indica en la sección.5.1. En la misma figura se grafican los valores consignados por Schumann, dejándose para la sección citada las conclusiones de esta comparación.

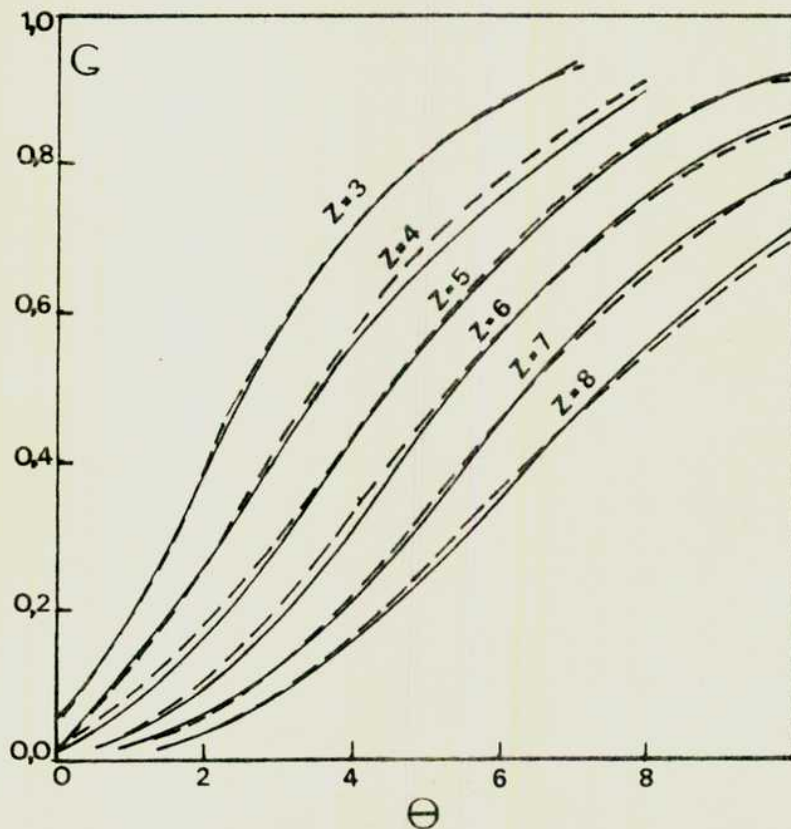
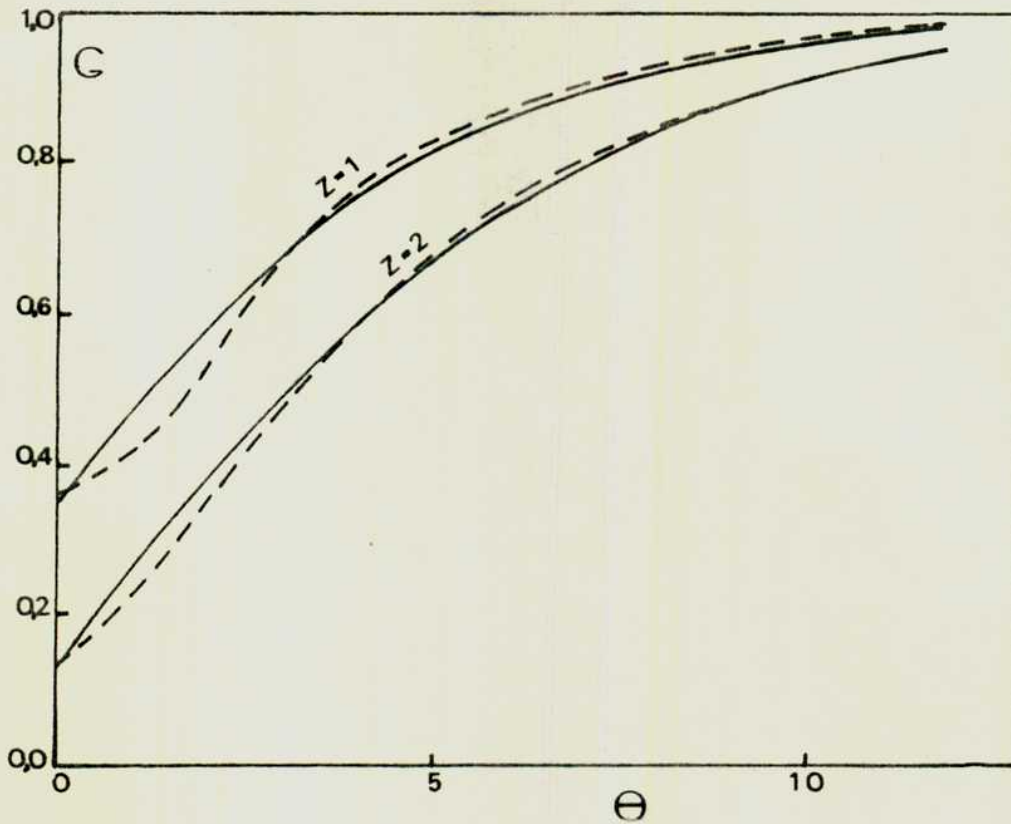


FIGURA 2 : Valores de G calculados a partir de la Ecuación 14. En trazos se representan los obtenidos por Schumann.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los datos experimentales se obtienen en forma de gráficos. En éstos se registran simultáneamente, mediante dos registradores, la temperatura del aire a la entrada del lecho y la correspondiente a la salida en función del tiempo.

En la figura (3) puede verse un gráfico característico de la función de entrada, generada de la manera anteriormente descrita, y su discrepancia con respecto a una función escalón teórica. La constante de tiempo de un segundo es un valor característico de las funciones así generadas.

La discrepancia que se observa puede deberse a las siguientes causas:

- a) al mecanismo de generación en sí, pues si bien éste no es instantáneo, es muy rápido, ya que el giro de la válvula es de solo 90°; por lo tanto podemos suponer que es poco importante.
- b) debido al cuerpo de la válvula conectado con la base de la columna. Hay razones para pensar que dicha válvula no halla alcanzado la temperatura estacionaria del resto del equipo, y por lo tanto pueda introducir una perturbación adicional difícil de cuantificar.
- c) la constante de tiempo del registrador, que resulta ser un 20% del valor de la constante para la función generada.

En la misma figura se muestra la respuesta a dicho escalón registrada a la salida del lecho; en la misma se especifican las

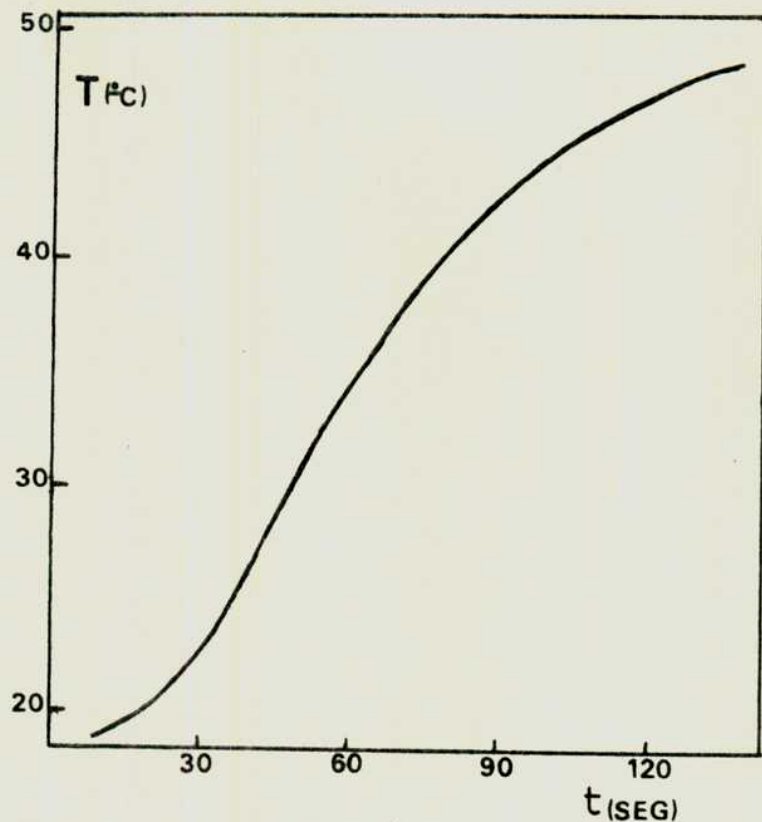
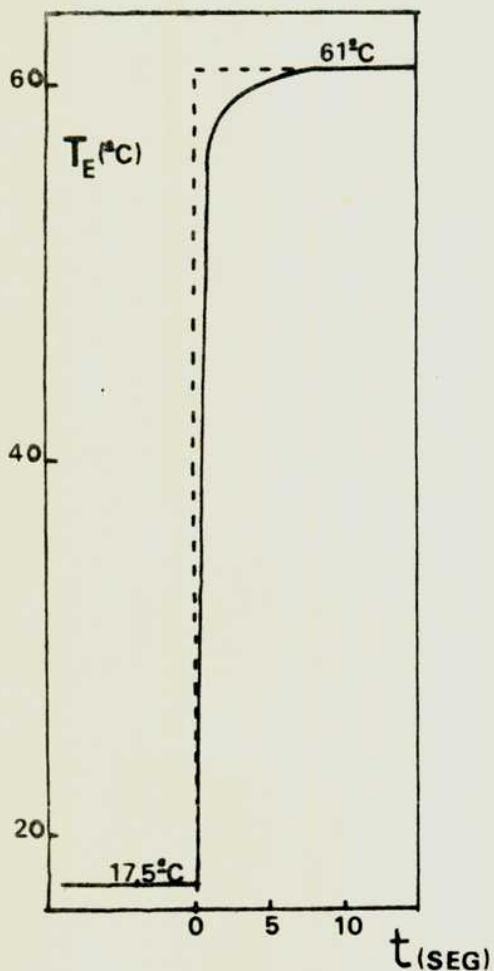


FIGURA 3: Representación gráfica de un salto de temperatura registrado a la entrada del lecho y su discrepancia con la función escalón. A la derecha, la respuesta a dicho escalón para el juego de mallas N^o1 y un caudal de aire de 370 l/min.

condiciones operativas y las características del lecho. De gráficos como éste se leen los valores de la temperatura de salida para intervalos de tiempo de 5 a 10 segundos, los cuales serán usados para el método de ajuste, que se describe en la sección siguiente.

El tiempo cero se toma en todos los casos a partir del momento en que se abre la válvula de tres vías. Los valores de tiempos leídos en abscisas son corregidos de acuerdo a la ecuación (2') de la sección 4.1.

5.1. Determinación del coeficiente de transferencia de calor.

El método usado para la determinación del coeficiente de transferencia de calor para el sistema aire-mallas consiste en el ajuste de los datos de temperatura y tiempo obtenidos experimentalmente con los predichos por la ecuación (14) obtenida mediante transformadas de Laplace, la cual nos vincula la temperatura adimensional del aire G con el tiempo θ adimensional para un dado valor de Z . Por lo tanto, una de las maneras posibles para evaluar el parámetro Z y de ahí obtener el coeficiente de transferencia podría ser el utilizado por Furnas, el cual compara las curvas experimentales con las obtenidas por Schumann, obteniéndose de esta comparación el valor del parámetro.

Dado que este método nos parece poco preciso, se procedió, para este caso, a hacer un ajuste de los datos experimentales mediante la ecuación (14) por un método de regresión.

Como dicha ecuación es una serie de infinitos términos, resulta necesario adoptar un criterio que la haga operable computacionalmente.

El método de ajuste empleado, para una ecuación como la (14), es por regresión no lineal. Para ello se hizo uso de un programa de biblioteca que figura en el Centro de Cálculo de la Facultad de Ingeniería con el nombre SISOØ1. Los valores de G de la ecuación (14) se calculan mediante un subprograma, el cual se describe en el Apéndice (II).

En este subprograma puede verse que el número de términos de la serie queda definido cuando se comparan el valor que resulta de la suma de n -números de términos con el término siguiente; cuando la diferencia entre estos dos valores es menor que 1% se da por terminado el cálculo de la función G .

La elección de esta aproximación es satisfactoria, como veremos a continuación, al comparar estos valores con los de Schumann.

5.2. Comparación de los valores de $G(Z,\theta)$ de la ecuación (14) con los de Schumann.

Los valores de $G(Z,\theta)$ que se muestran en la figura (2), calculados mediante la ecuación (14), se compararon con los de Schumann; de dicha comparación resulta que el criterio adoptado en la sección 5.1. es satisfactorio para valores de Z mayores que 2. Por otra parte, también resultaron coinciden

tes los valores de G calculados por integración numérica de las ecuaciones (5) y (6), cuyo método se muestra en detalle en el apéndice (III). Para Z menores que 2 los valores de G dados por Schuman resultan ser algo mayores.

Esta discrepancia aparece durante el primer período de cada curva. La solución obtenida por Schumann presenta durante dicho período un punto de inflexión, ver figura (2), en tanto que los valores de G obtenidos a partir de la ecuación (14), crecen en forma monótona para todo valor de Z .

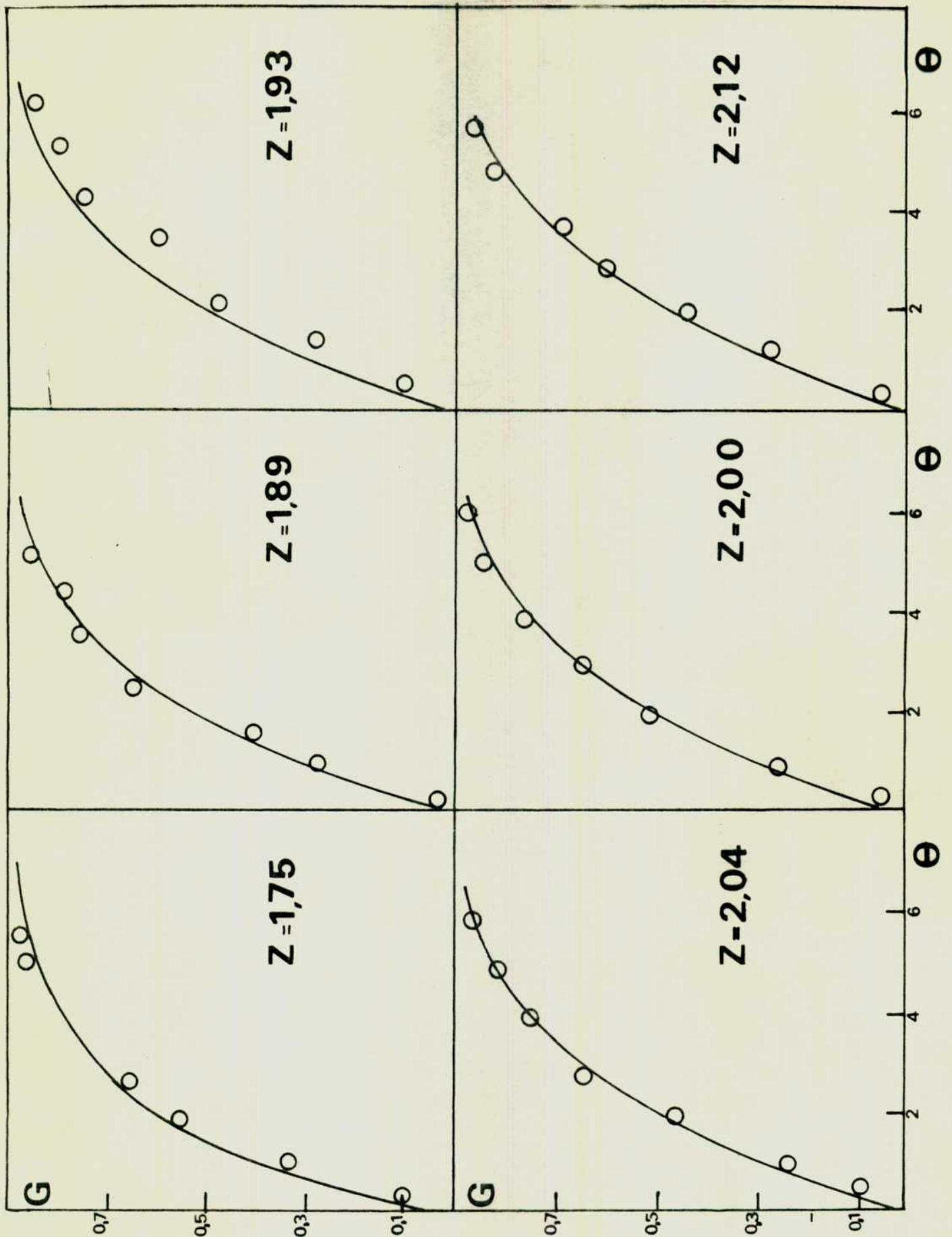
Si bien no se ha encontrado una explicación a los valores de G encontrados por Schumann para valores de Z menores que 2, el hecho de que los valores experimentales obtenidos no permitan observar dicho punto de inflexión, nos lleva a pensar que éste no esté de acuerdo con la realidad.

5.3. Comparación de los valores experimentales con los predichos por el modelo.

A continuación se discuten los resultados del ajuste de los datos experimentales mediante la ecuación (14) obtenida. En las figuras (4), (5), (6), (7), (8) y (9), se muestran dichos resultados, para varias condiciones operativas.

Las mayores desviaciones entre ambos valores de G se observan en el primer período de cada experiencia. Estas discrepancias podrían deberse a:

i) la inercia del sistema de medición



FIGURAS 4 a 9 : Resultados del ajuste de los datos experimentales mediante la ecuación 14, para un juego de mallas denominadas con 1. Los datos experimentales están representados por círculos.

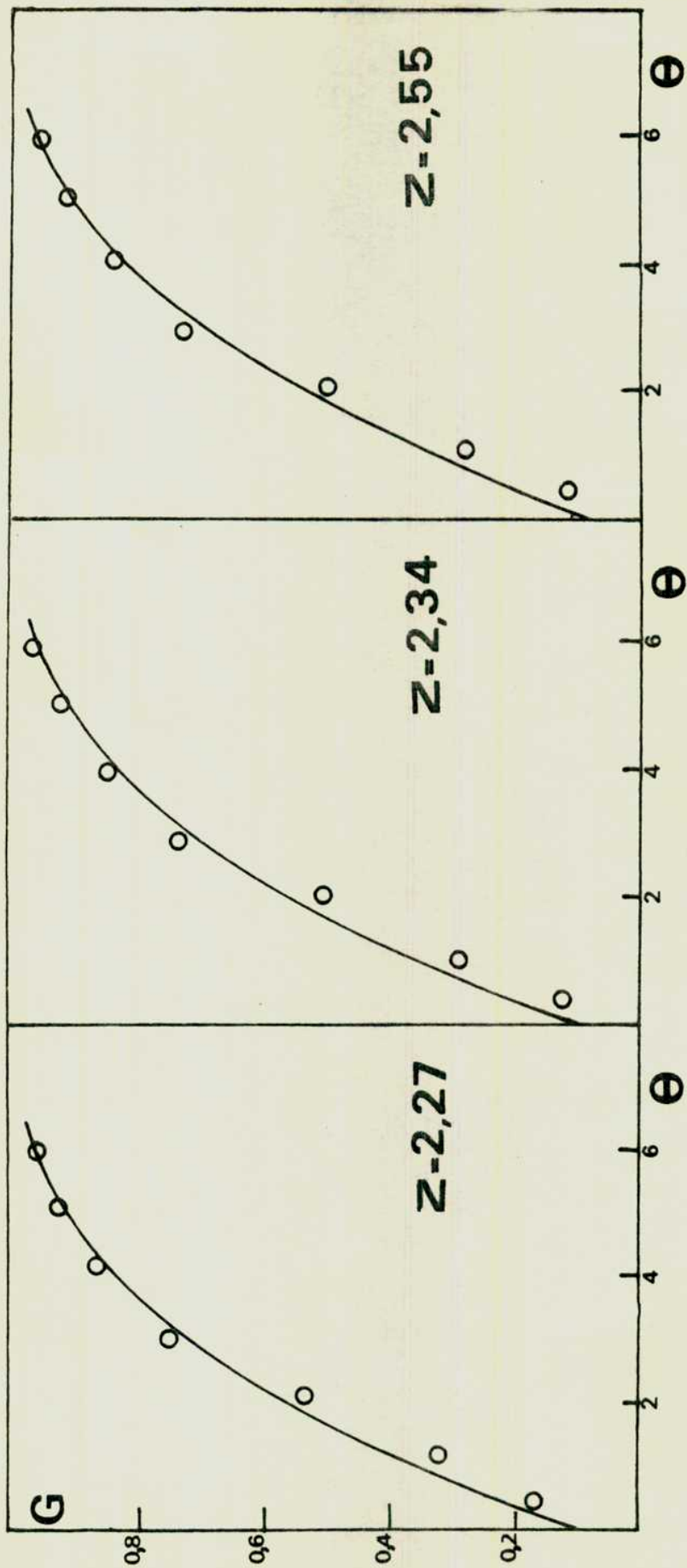


FIGURA 5

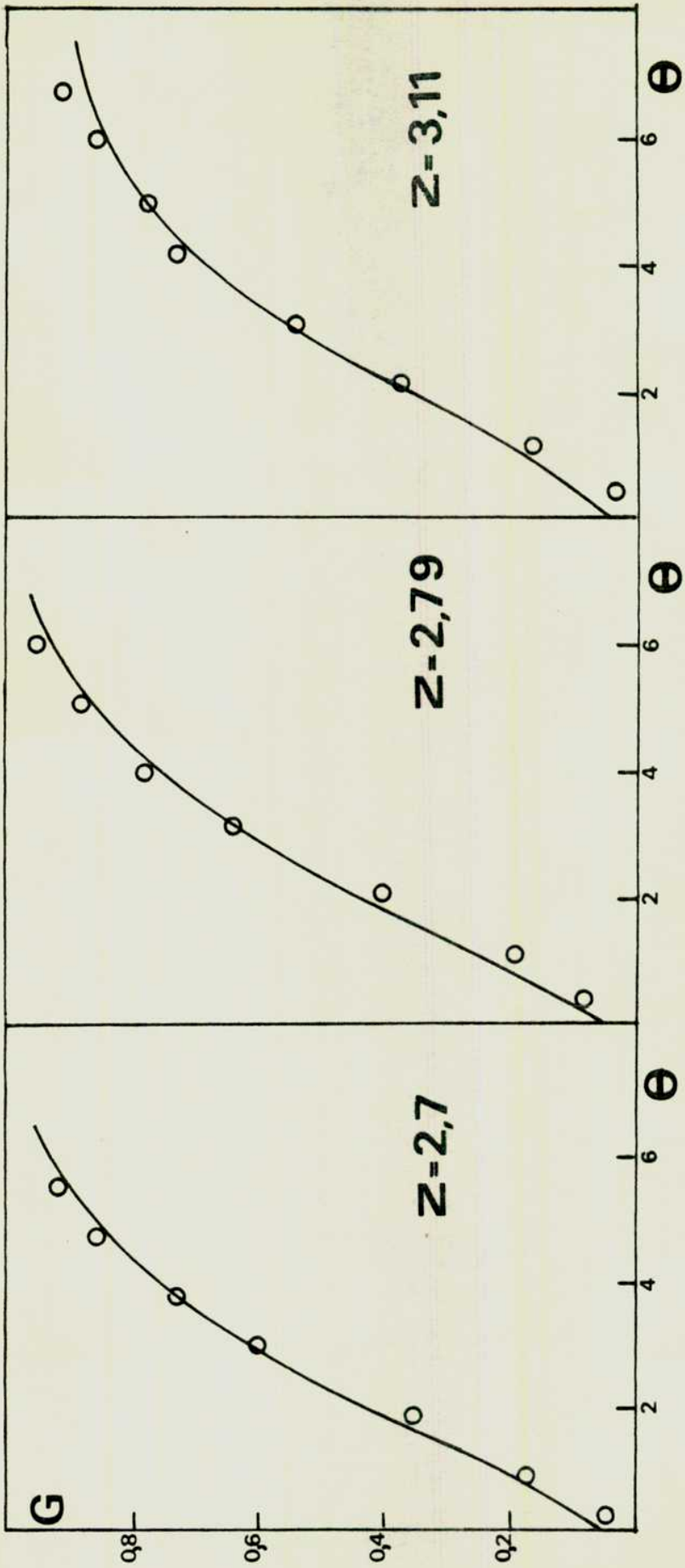


FIGURA 6

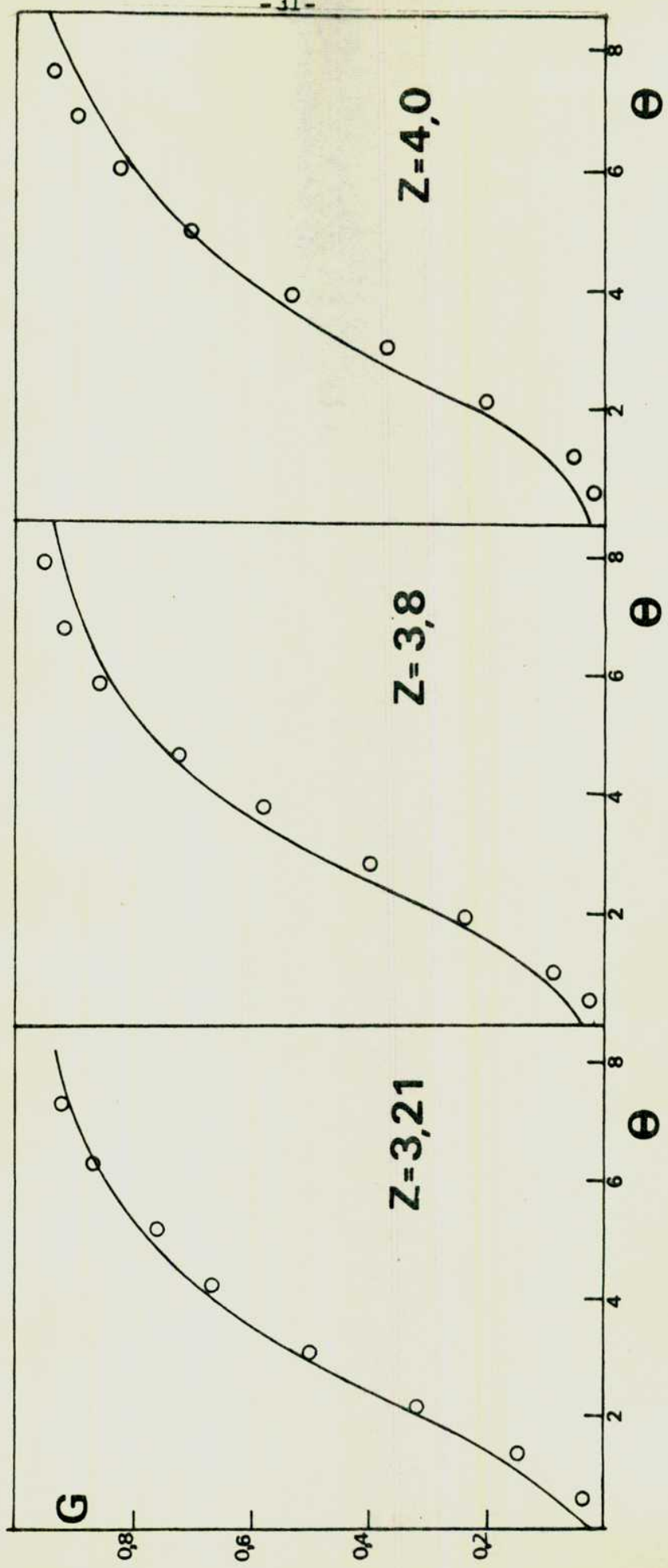
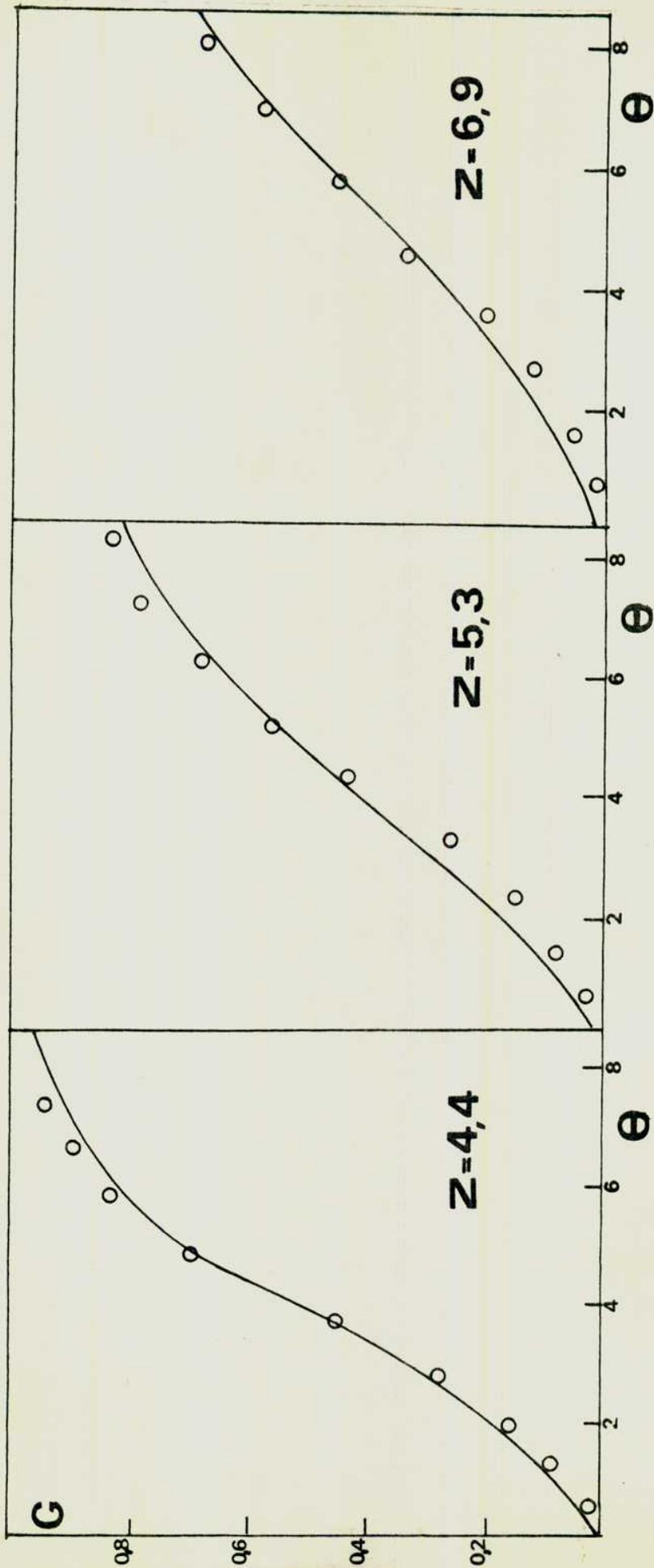


FIGURA 7



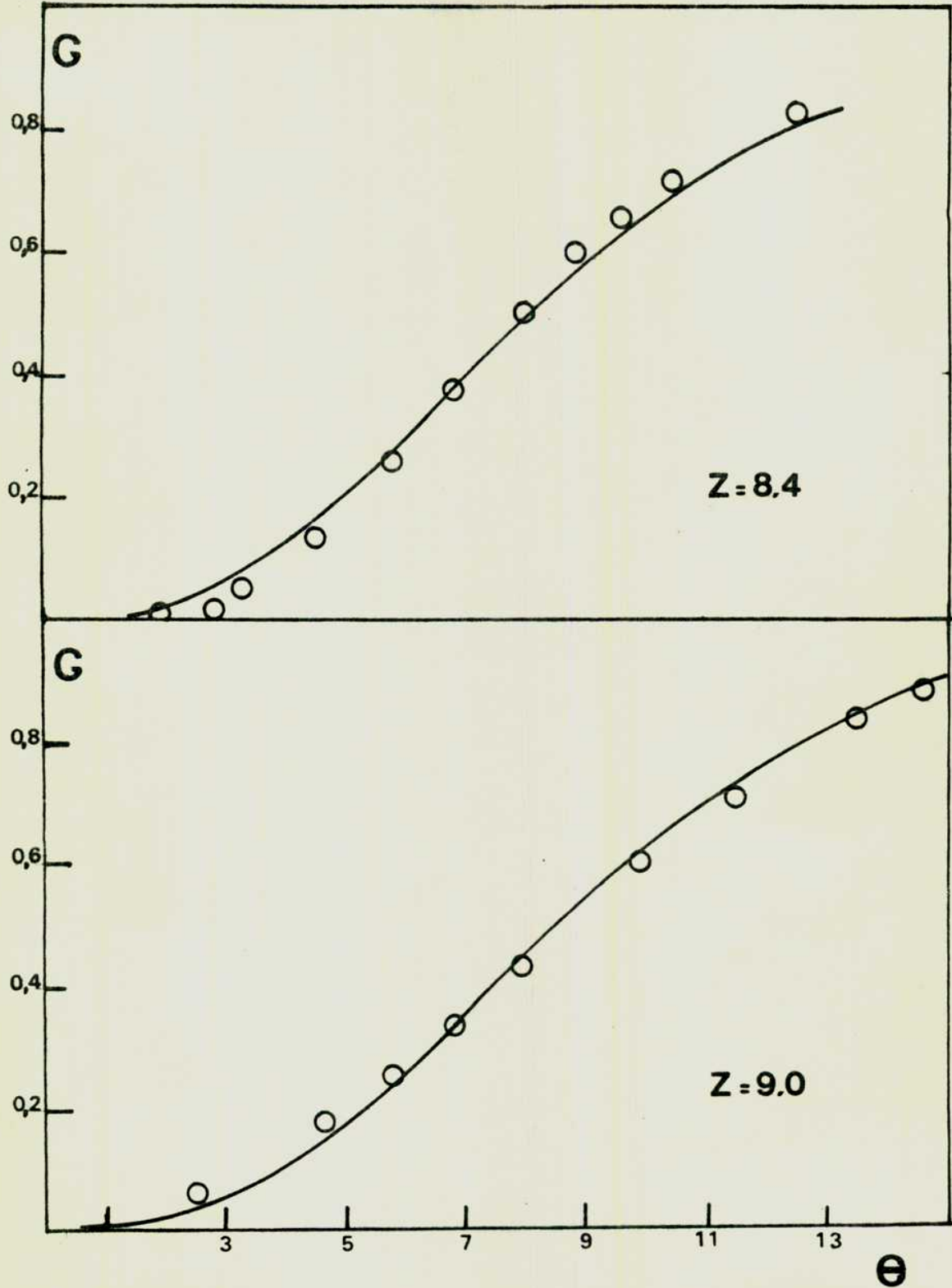


FIGURA 9

ii) por efecto de una posible transferencia de calor a la columna y a la capa de aire

iii) cierta inexactitud en el método de regresión

El coeficiente de transferencia de calor se calculó en cada caso a partir del valor de Z que predice el método de regresión empleado y de los parámetros que aparecen en su definición.

5.4. Dependencia del coeficiente de transferencia de calor con el caudal.

En la figura (10) se muestran los valores experimentales del coeficiente de transferencia de calor obtenidos en la forma anteriormente descrita, en función del caudal de aire. En la misma se indica el número de mallas que forman el lecho; en todos los casos se operó con 15 mallas.

Para el caso de las mallas que se indican con 1 y 3 se han hecho ensayos con lechos formados por 10 mallas; estos ensayos no arrojaron diferencias significativas con los valores de h obtenidos con 15 mallas. Por otra parte, de datos obtenidos de Mc Adams (¹⁴), basados en el trabajo de Kays y Lo (¹⁵), se desprende que los valores de h medio para un banco de tubos no alineados, comienza a ser aproximadamente constante cuando el número de filas es mayor que 8, lo que confirma nuestra observación.

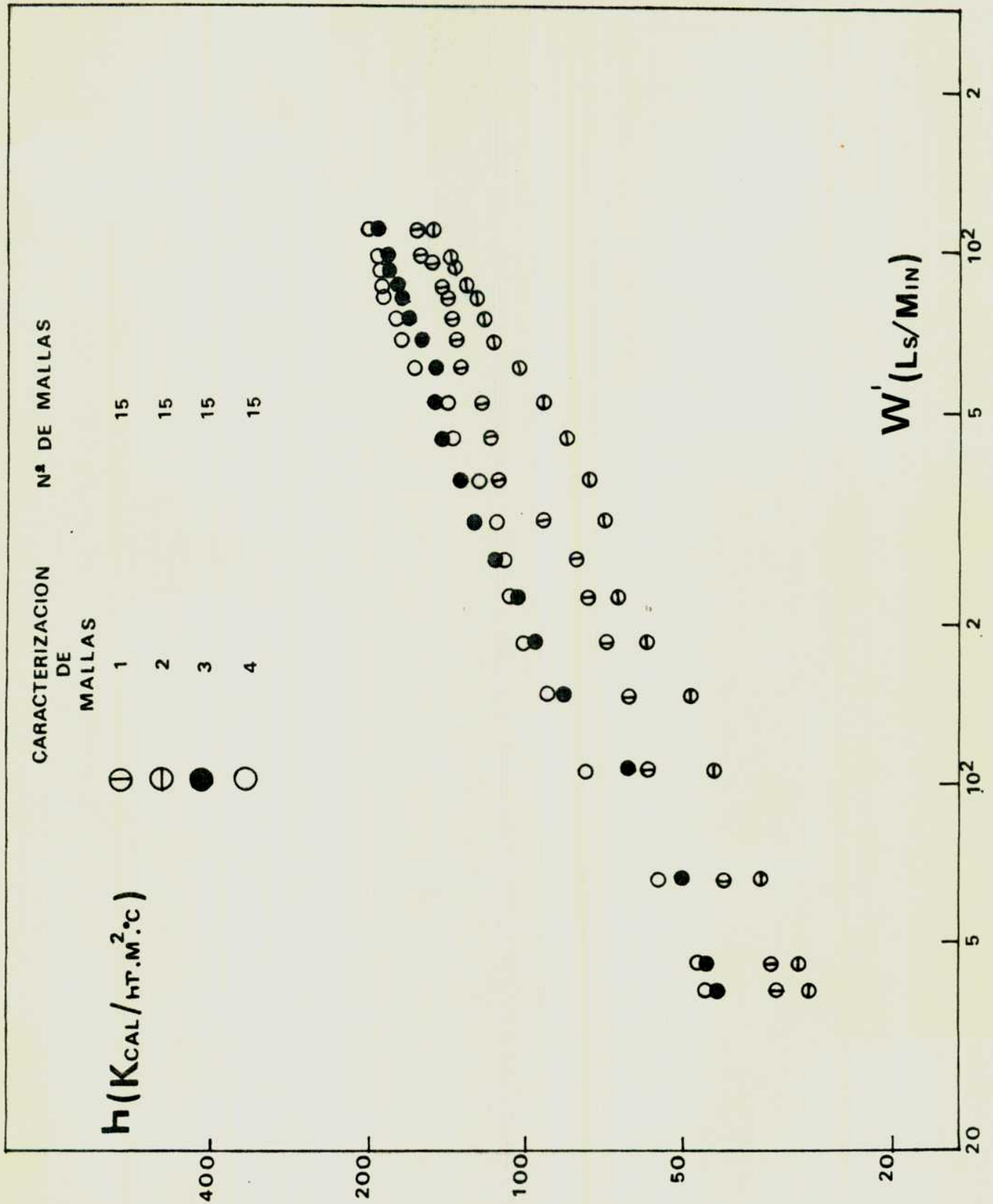


FIGURA 10 : Dependencia del coeficiente de transferencia de calor con el caudal.

6. CORRELACION DE DATOS.

La correlación de los datos experimentales se hará mediante los modelos que llamaremos I, II y III.

6.1. Modelo I.

En este caso, haremos uso de la correlación propuesta por Kays y London (⁹), para transferencia de calor en intercambiadores compactos. Dichos autores suponen que el sistema aire-mallas se comporta como un lecho poroso, con el aire circulando entre los intersticios.

Los parámetros geométricos usados para este modelo son:

- i. la porosidad
- ii. el área específica
- iii. el radio hidráulico

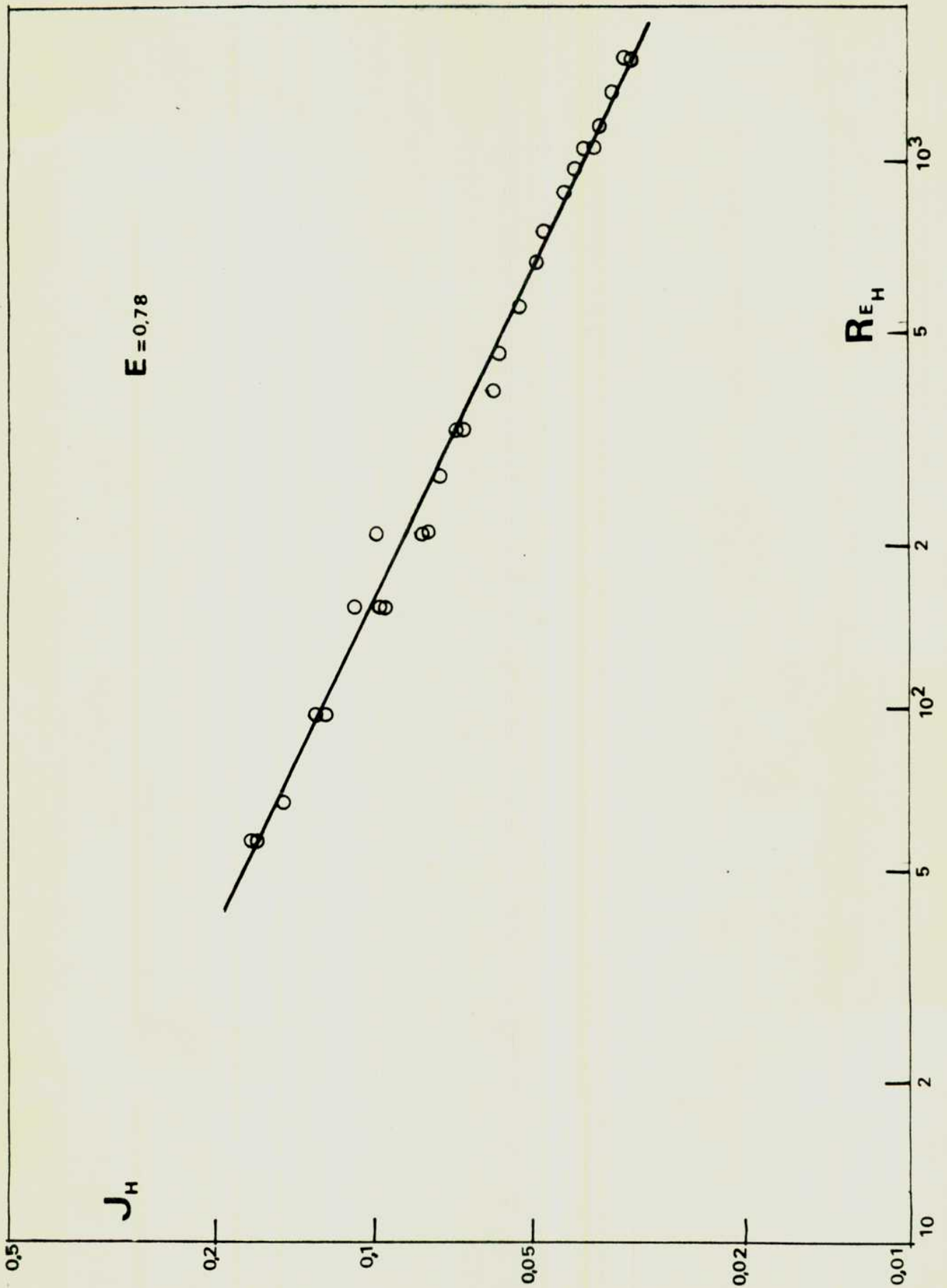
En este trabajo se optó por tomar como porosidad y área específica para el lecho la correspondiente a una malla ya que este valor se pudo determinar con mayor precisión.

La porosidad y el área específica son valores ya calculados en base al método propuesto por Blass. El radio hidráulico, siguiendo a Bird (¹⁸), puede expresarse en función de los dos parámetros anteriores a través de la relación:

$$r_h = E/a$$

La correlación ensayada para este modelo responde a la forma

$$J_h = C Re_h^{-0.8}$$



FIGURAS 11 a 14 : Representación de los datos experimentales mediante el modelo I, para las distintas mallas.

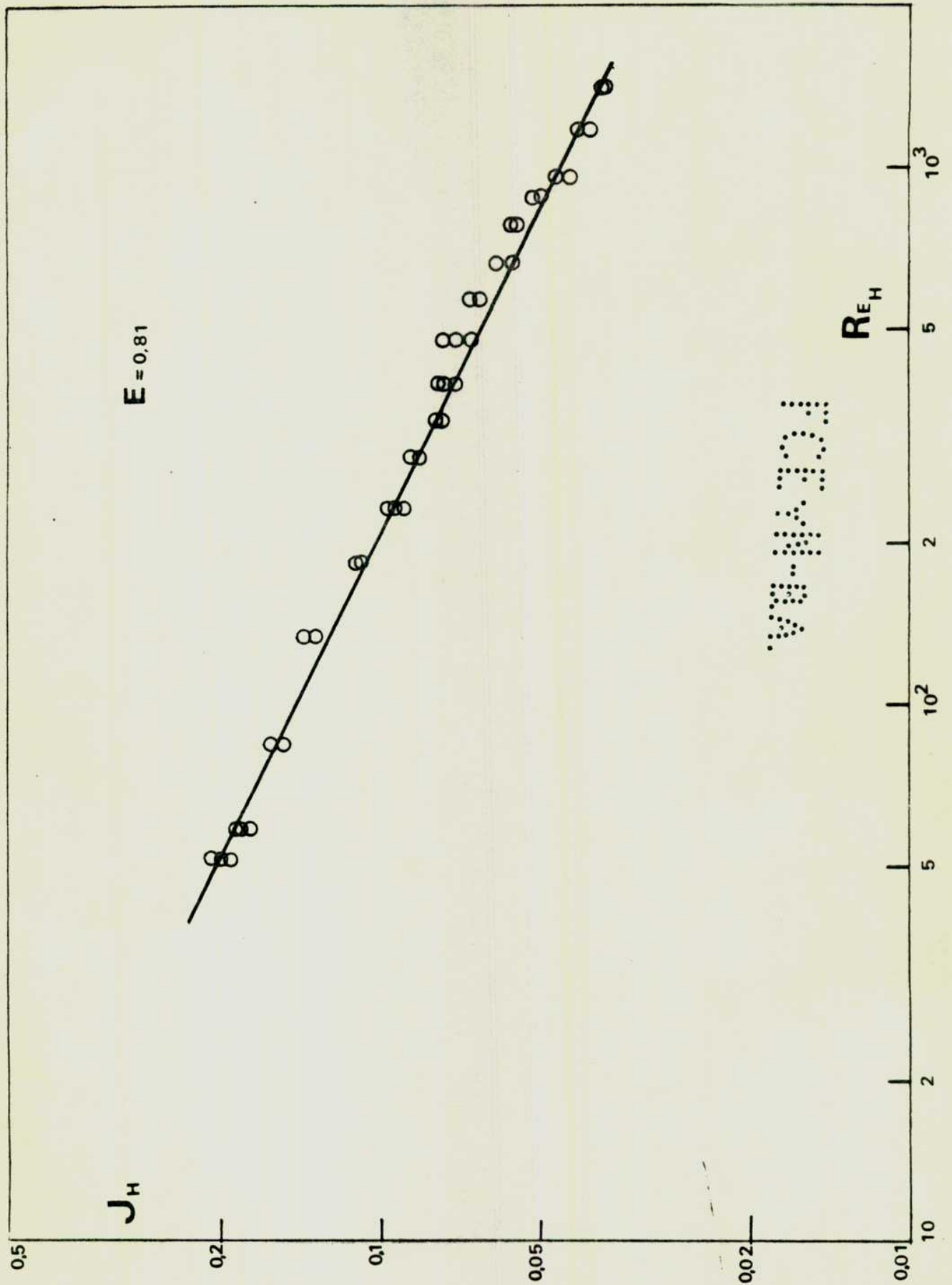


FIGURA 12

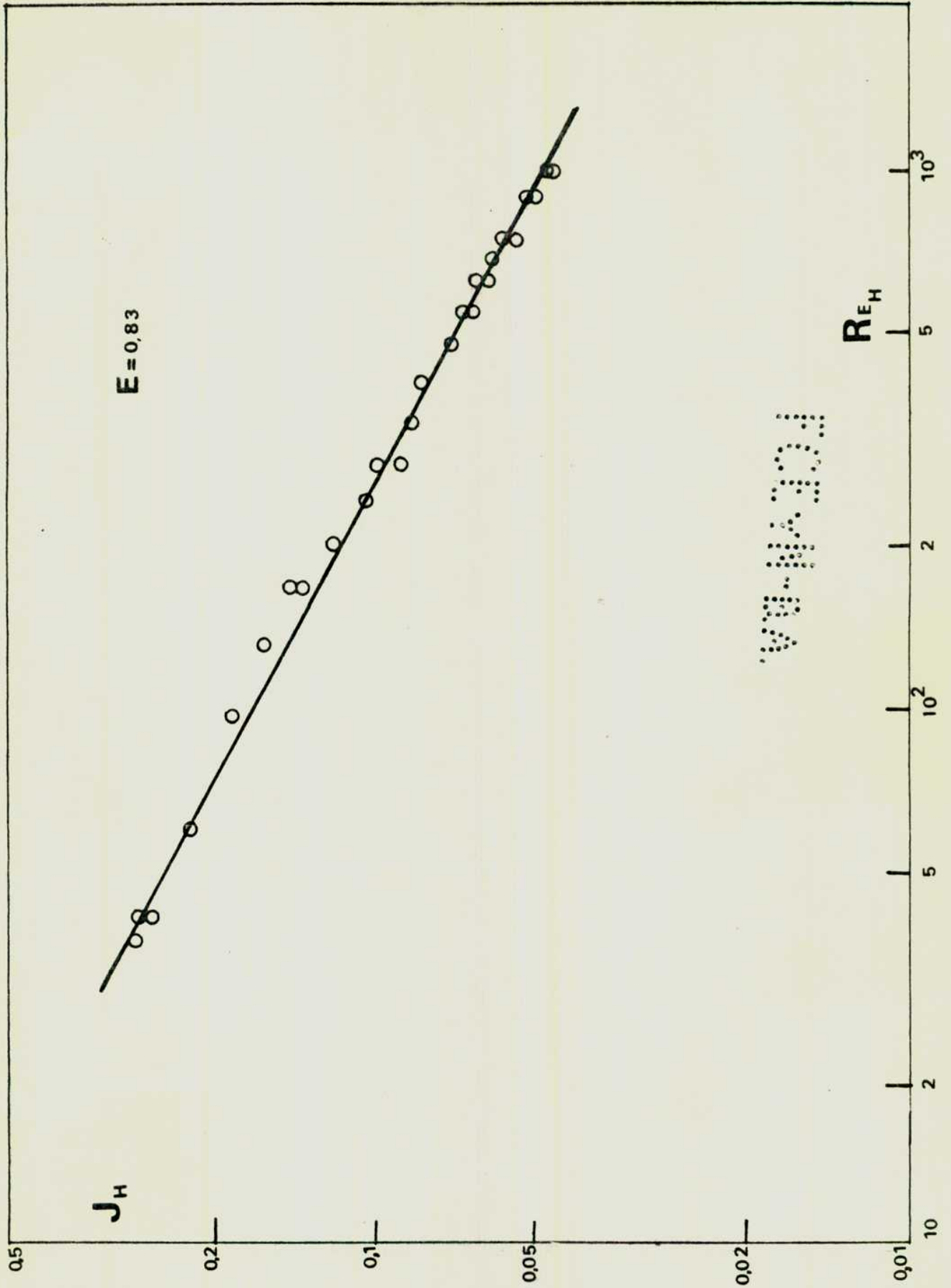


FIGURA 13

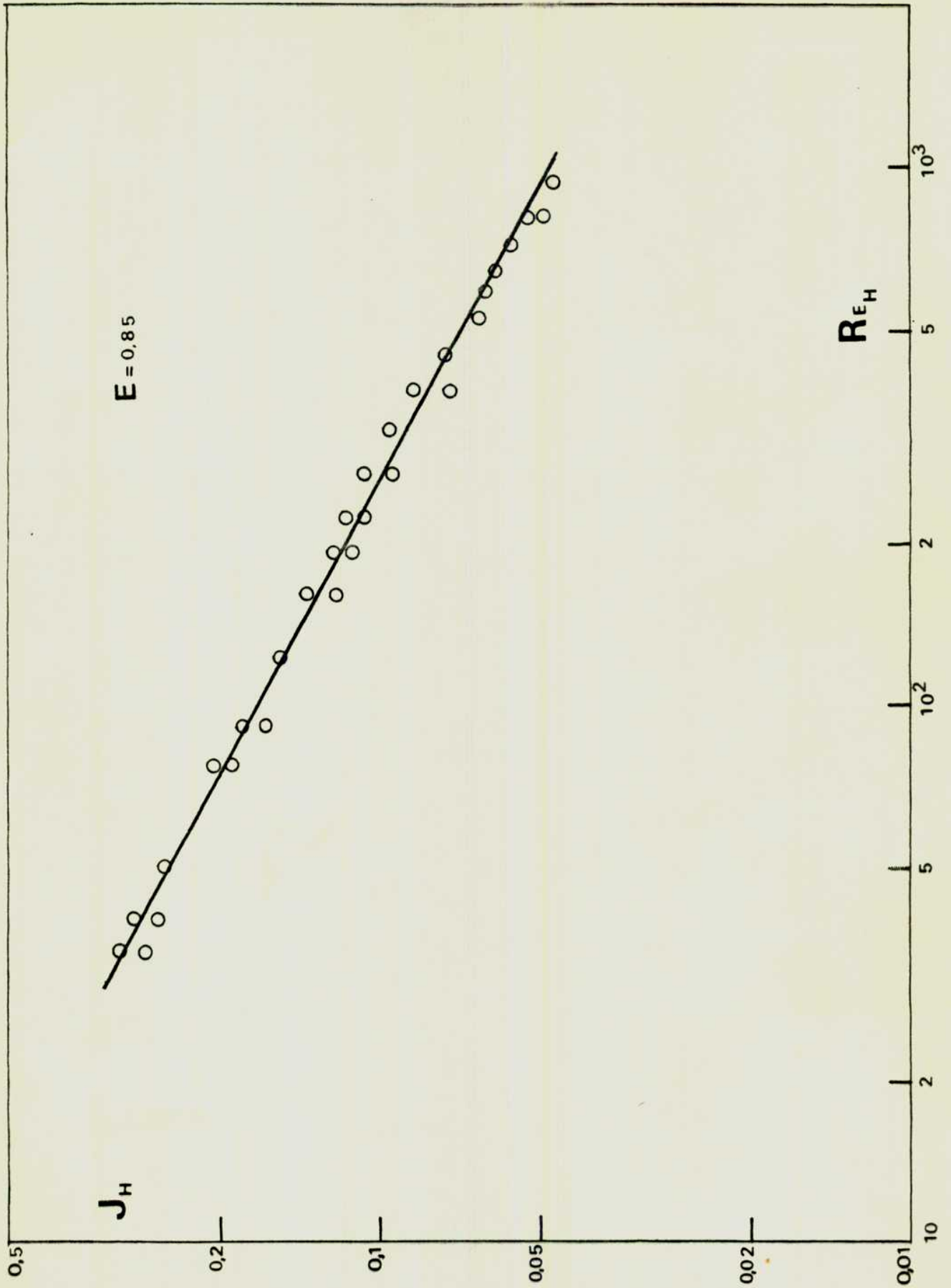


FIGURA 14

donde el número de Reynolds se define como

$$Re_h = 4r_h G' / \mu$$

siendo $G' = W_f / (E A_{fR})$, donde la porosidad E y el área frontal A_{fR} combinadas expresan un área libre de flujo; el factor J_h calculado como el producto de $St Pr^{2/3}$, resulta

$$J_h = (h/G' c_p) Pr^{2/3}$$

El valor del $Pr^{2/3}$ se incluye en la correlación aún cuando en nuestro caso, resulta ser muy aproximadamente constante para el rango de temperaturas de trabajo.

En las figuras (11), (12), (13) y (14) pueden verse gráficamente para las distintas porosidades, los resultados obtenidos mediante esta forma de correlación. De cada una de las rectas trazadas por cuadrados mínimos se obtuvo una correlación empírica. En la tabla N° 2 aparece la forma genérica de dicha correlación, los valores de la constante y del exponente del Reynolds para las distintas porosidades.

Tabla N° 2

<u>N° de Malla</u>	<u>$J_h = C Re_h^{-n}$</u>		<u>E</u>	<u>Desviación media</u> (1)
	<u>C</u>	<u>n</u>		
1	1.43	0.50	0.81	± 4.5%
2	1.09	0.48	0.78	± 3.9%
3	2.30	0.55	0.85	± 4.2%
4	1.98	0.53	0.83	± 4.7%

(1) Desviación media del factor J para un intervalo de confianza del 95%.

FIGURA 15 : Influencia de la porosidad en la correlación del modelo 1.

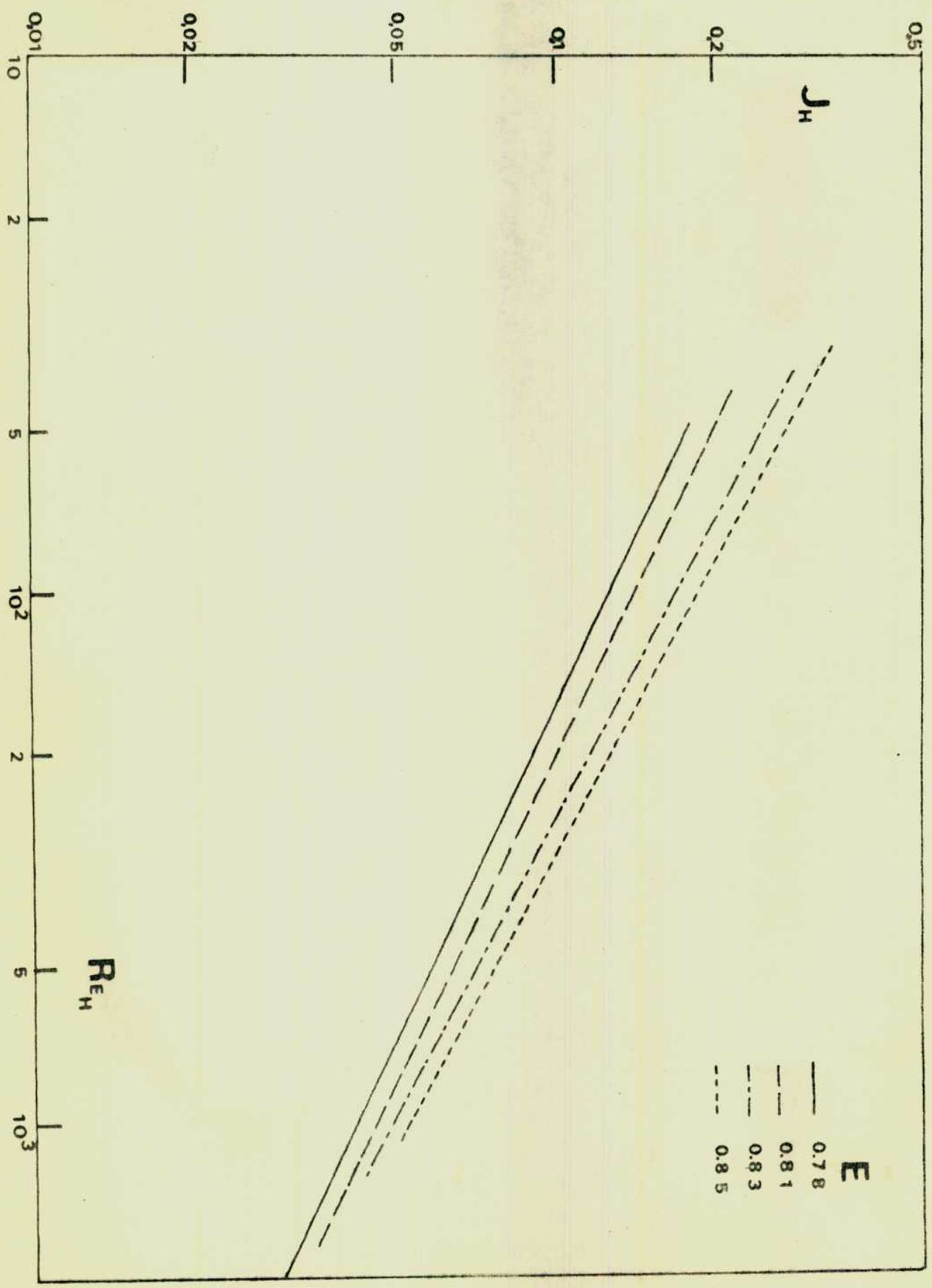
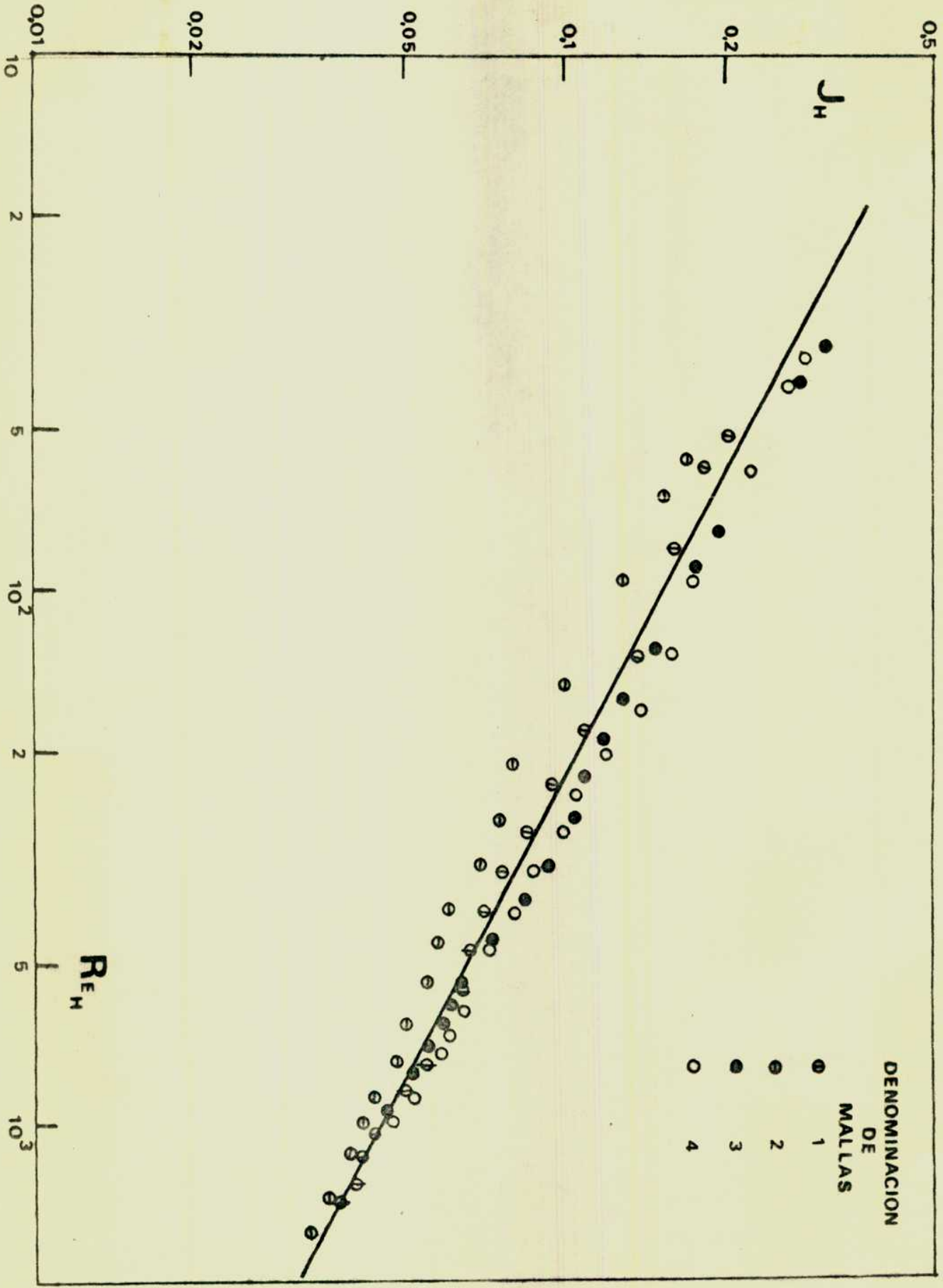


FIGURA 16 : Representación de los datos experimentales según modelo I.



na

metro del alambre. La correlación a ensayar responde a la for-

El parámetro geométrico para este sistema es el diá-

La dirección normal a los mismos.

de alambres colocados unos sobre otros, y el aire circula en

posición a un lecho de mallas considerándolo como un conjunto

no una red de cilindros infinitos. Extenderemos aquí dicho su-

autores proponen que una malla metálica puede interpretarse co

intentaremos aquí otra forma de correlación empírica. Dichos

Sobre la base del trabajo de Satterfield y Cortez (1),

6.2. Modelo II

datos mínimos pueden verse en la figura (16).

Los valores experimentales junto con la recta obtenida por cur

± 27%

$$J_h = 1.84 Re_h^{-0.53}$$

Desviación media

Modelo I

empírica mediante cuadrados mínimos; dicha correlación es:

Los valores experimentales obtenidos, se obtuvo una expresión

En un intento de establecer una correlación para todos

te ser un parámetro de esta forma de correlación.

cada caso. Podemos concluir de la misma que la porosidad resul-

vas a los fines de visualizar la influencia de la porosidad en

En la figura (15) se han representado estas cuatro cur

///

de una de las cuales contiene una partícula rodeada de fluido puede ser representado por un conjunto de celdas idénticas, \bar{c}_a de cilindros infinitos, a través del cual circula el fluido, culas, que pueden ser un lecho de esteras o un lecho relleno. El modelo de Happel supone que un sistema de parti-

suelven numéricamente.

desarrolladas por Leclair y Hamielec (20), cuyos autores re- haremos uso de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, rrollado por Happel (19) para un dado arreglo de partículas; En esta sección aplicaremos el modelo teórico desa-

6.3. Modelo III

±15%

$$\eta_h = 0.76 Re_p^{-0.52}$$

Desviación media

Modelo I

siguiente correlación:

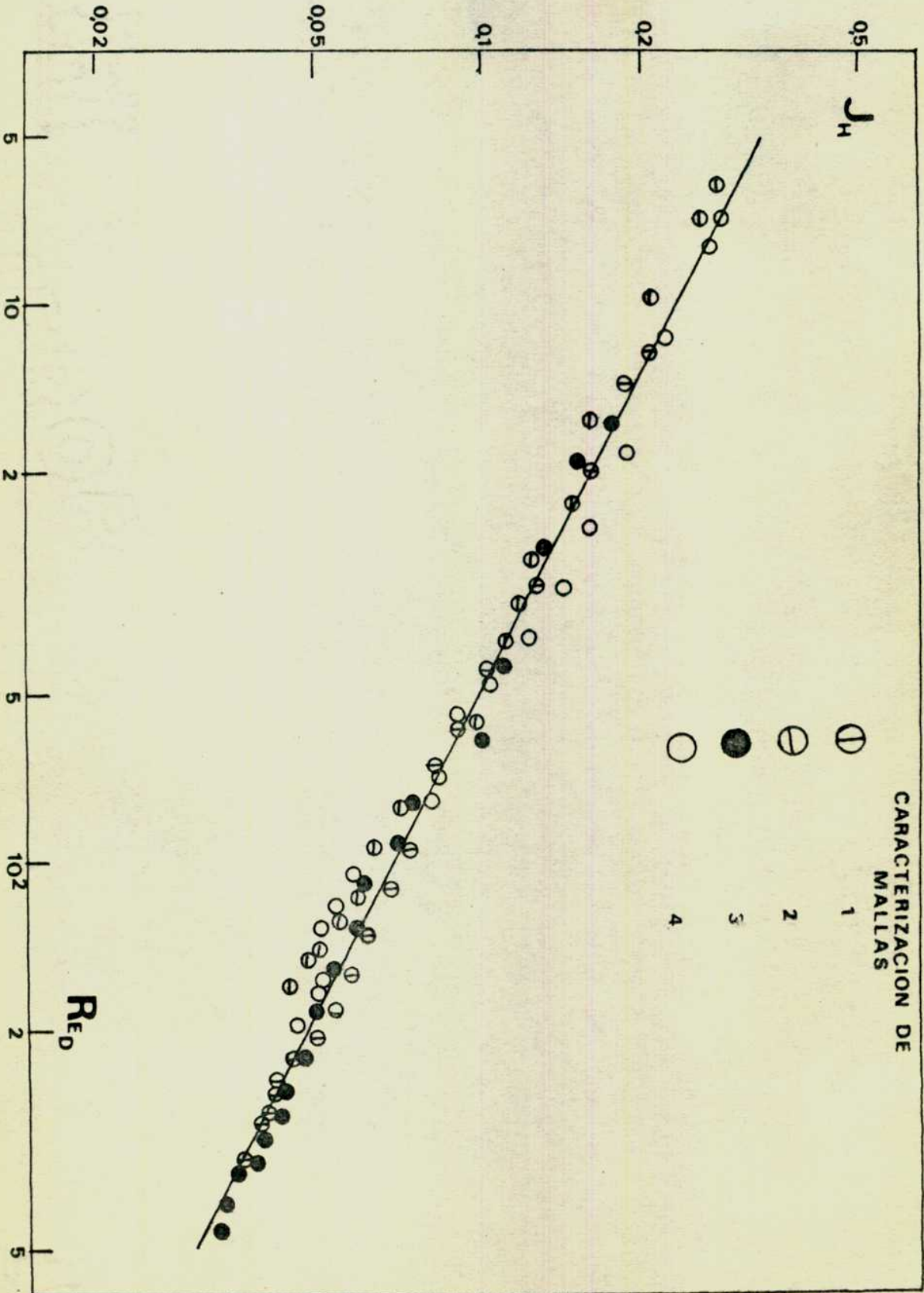
ajuste de los datos por cuadrados mínimos permitió obtener la te esta forma de correlación se muestra en la figura (17). El La representación de los datos experimentales median basado en el diámetro de alambre y la velocidad intersticial.

$$Re_p = dg/\mu$$

con Re_p definido como

$$\eta_h = C_1 Re_p^{-n_1}$$

FIGURA 17 : Representación de los datos experimentales según



de tal manera que la porosidad de la celda sea igual a la porosidad del lecho.

Las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven en el espacio delimitado por la superficie del objeto y la superficie de la celda, y el sistema en su totalidad está representado por una sucesión de estas celdas.

Las condiciones de contorno suponen que no hay fricción en la superficie externa de la celda ni deslizamiento sobre la superficie de la partícula. Dentro de la celda el fluido es Newtoniano e incompresible.

Las ecuaciones obtenidas para este sistema fueron resueltas numéricamente, como se dijo, para un intervalo de Reynolds comprendido entre 0.1 y 500; el perfil de velocidad obtenido se usa para calcular las velocidades de transferencia de masa y calor.

Para obtener dichas velocidades de transferencia, LeClair y Hamielec (20) hacen uso de la suposición de Leitch (21), el cual supone que la caída de concentración o de temperatura se produce en una delgada capa adyacente a la superficie de la partícula, de espesor menor que las dimensiones de la misma. Esta suposición es estrictamente válida para altos números de Peclet, si bien para mayores de 50, LeClair y Hamielec consideran que el modelo de la celda de valores que difieren en un 20% de los experimentales.

///

///

De las correlaciones experimentales presentadas se deduce

±17%	$J^h \epsilon^{0.83} = 1.05 Re^p - 0.58$	III
±15%	$J^h = 0.76 Re^p - 0.52$	II
±27%	$J^h = 1.84 Re^h - 0.53$	I

Modelo Correlación teórica Correlación experimental Desviación

Tabla N° 3

sumen de las correlaciones obtenidas.

En la tabla que se incluye a continuación se da un

resumen de los datos de la tabla de Leitch y Hamielec.

En dicha figura se representa al mismo tiempo la correlación

$$J^h \epsilon^{0.83} = 0.57(Re^p) - 0.51 \quad \pm 17\%$$

Modelo III - Correlación empírica Desviación media

obtenida por cuadrados mínimos que responde a la forma

este modelo se muestran en la figura (18), junto con la curva

Los valores experimentales correlacionados mediante

la velocidad superficial.

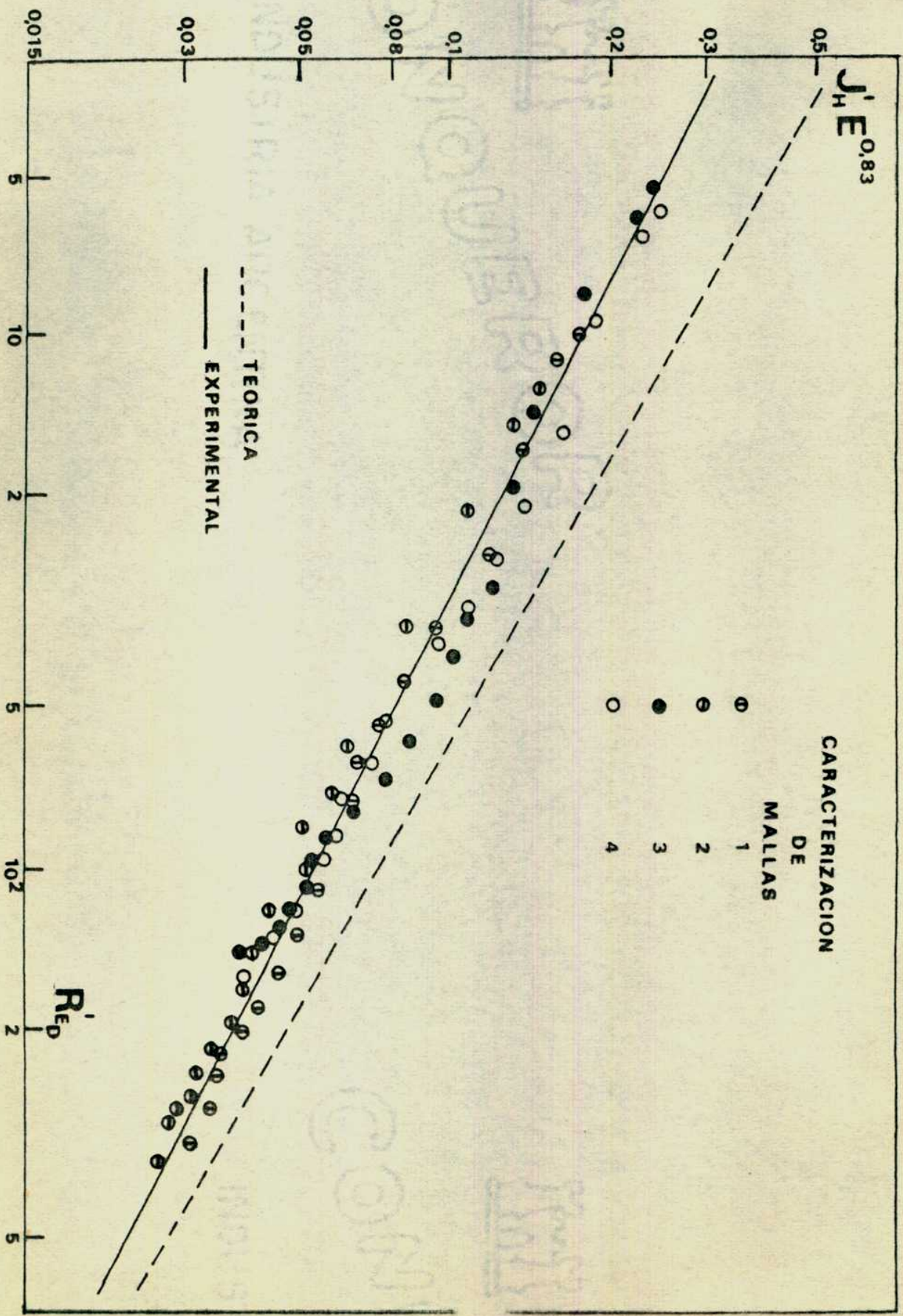
con el Reynolds definido en función del diámetro de alambre y

$$J^h \epsilon^{0.83} = 1.05(Re^p) - 0.58$$

forma

La correlación obtenida por estos últimos responde a

FIGURA 18 : Representación de los datos experimentales según modelo III



///

En cuanto al modelo de las celdas, desarrollado por de para este modelo con respecto a la del modelo I. la de lecho poroso, como surge de la menor desviación encontrada en cilindros infinitos (modelo II) pareciera ser más adecuada que Para mallas con alta porosidad, la suposición de \bar{c}_1 de entre 0.76 y 0.82. Copeage y Longon (¹⁰), para el rango de porosidades comprendidos satisfactorios. Resultados análogos fueron encontrados por con los de porosidad, para distintas mallas, no arrojó resultado de encontrar una correlación sencilla entre nuestros datos observar las curvas de la figura (15). Por otra parte, el intento h depende de la porosidad de las mallas, tal como resulta de la correlación, basada en el radio hidráulico que, el factor En el primer caso (modelo I), podemos concluir de \bar{c}_1 infinitos. aire-mallas como un lecho poroso o como una red de cilindros de los I y II se basan respectivamente en considerar el sistema Las correlaciones empíricas obtenidas mediante los \bar{m}_0

6.4. Discusión de los resultados.

factores. Las correlaciones experimentales II y III como las más satisfactorias. Por lo tanto, de aquí en más, consideraremos te el modelo I. presenten una desviación significativamente menor que medianamente que aquellas calculadas mediante los modelos II y III

///

Para la región limitada por la superficie de la celda y la superficie del objeto, se resuelven las ecuaciones de Nav-

siendo esta unidad representativa para todo el sistema.

Cilindro rodeado por el fluido representando una celda típica,

cilindros igualmente espaciados en la dirección radial, con el

te el sistema sólido-fluido se presenta como un arreglo de ci-

lindros, será necesario hacer algún análisis de las mismas. En eg

limitaciones, en particular cuando se aplica a un lecho de ma-

Por lo tanto, dado que el modelo III presenta ciertas

damentalmente a bajos Reynolds.

cia tiende a hacerse menor para Schmidt del orden de 500, fun-

Los experimentales para un $Re = 10$, en tanto que esta diferen-

Schmidt 0.76, que los valores teóricos son un 30% mayores que

experimentales de Rowe y Claxton (22), para lechos de esteras, con

por ejemplo, resulta de la comparación con los trabajos expe-

to con datos experimentales encontrados en bibliografía. Así,

cuando comparan los valores de λ calculados en base a su mode

Este hecho ya es observado por LeClair y Hamielec,

mo se deduce de la figura (18).

resultan ser en un 40% mayores que los experimentales, tal co

porosidad, predice valores del coeficiente de transferencia que

la del modelo II, y al mismo tiempo una funcionalidad con la

ción empírica que presenta una desviación media del orden de

LeClair y Hamielec, si bien nos permite obtener una correla-

///

El modelo y la obtención experimentalmente aparecen, tal como se puede verse en la figura (18), a bajos números de Reynolds. Es claro que las mayores discrepancias entre la curva predicha por los datos satisfactorios a altos números de Péclet. Es por esta razón que los valores de Reynolds intermedios, no mayores de 1.000, de resultados para este modelo es aplicable para la transferencia de calor.

contacto que tienden a reducir el área efectiva para la transferencia, sin tener en cuenta que en el lecho existen puntos de contacto para cada cálculo. En nuestro caso el área se calculó para cada punto de efecto a tener en cuenta es el cálculo del área del modelo.

valores obtenidos para el coeficiente de transferencia en este modelo y Hamielec, sería mayor, lo que explicaría los mayores valores de la velocidad del fluido en la celda simétrica, del modelo de transferencia con el eje mayor en la dirección radial. Por lo tanto, como resultado una celda no simétrica, más cercana a una forma radial al flujo es mayor que en la dirección axial. Esto daría lugar a las direcciones; la distancia entre alambres en la dirección axial. En nuestro caso, la porosidad no es uniforme en todas las direcciones para todo el lecho.

Para lo tanto, para este modelo, la porosidad es uniforme en las condiciones de contorno para la superficie externa de la celda. La presencia de otras partículas se considera en

to también explica el hecho de porque el modelo de la celda da mejores resultados cuando se aplica a transferencia de masa, con Schmidt altos.

7. Comparación de datos.

En la tabla N° 4 se resumen las características principales de las distintas publicaciones que suministraron los datos para su comparación con los de este trabajo.

Tabla N° 4

Autor	Orden de magnitud técnica	de Sc o Pr	Experimental	Referencia
-------	---------------------------	------------	--------------	------------

Tong y London	Transferencia de calor	0.7	0.82-0.76	(15)
---------------	------------------------	-----	-----------	------

Coppage y London	Transferencia de calor	0.7	0.82-0.72	(10)
------------------	------------------------	-----	-----------	------

Gay y Maughan	Evaporación de Hg en corriente de N ₂	1.0	0.76-0.82	(2)
---------------	--	-----	-----------	-----

Satterfield y Cortez	Oxidación de hexano y tolueno en corriente de aire	1.7	0.70-0.91	(11)
----------------------	--	-----	-----------	------

Cano y Bbhm	Electroquímica	1.500	0.81-0.87	(4)
-------------	----------------	-------	-----------	-----

Este trabajo	Transferencia de calor	0.70	0.78-0.85	
--------------	------------------------	------	-----------	--

Las figuras (20) y (21) muestran la comparación de los re

$$(J_H^i, J_D^i) E^{0,83}$$

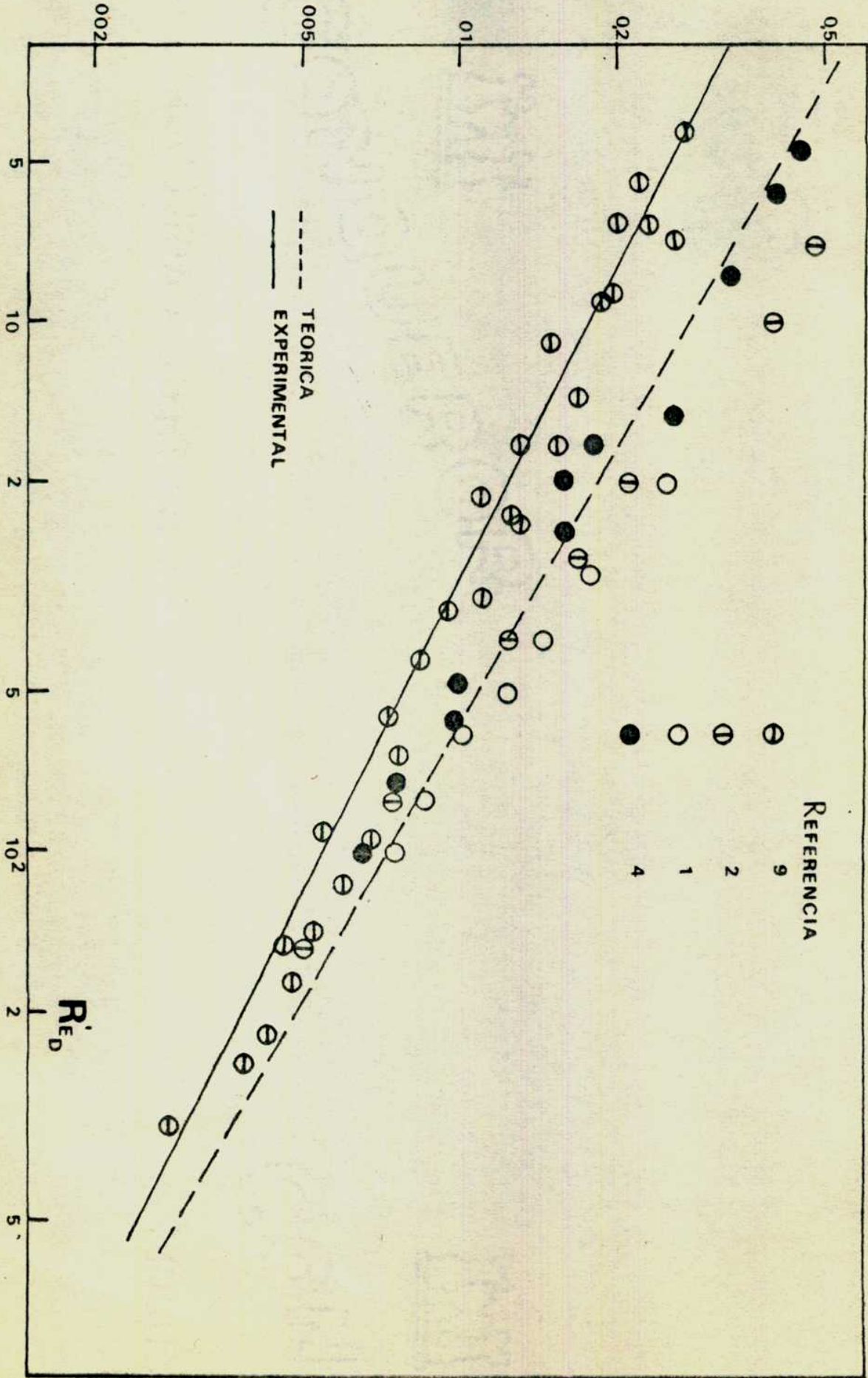
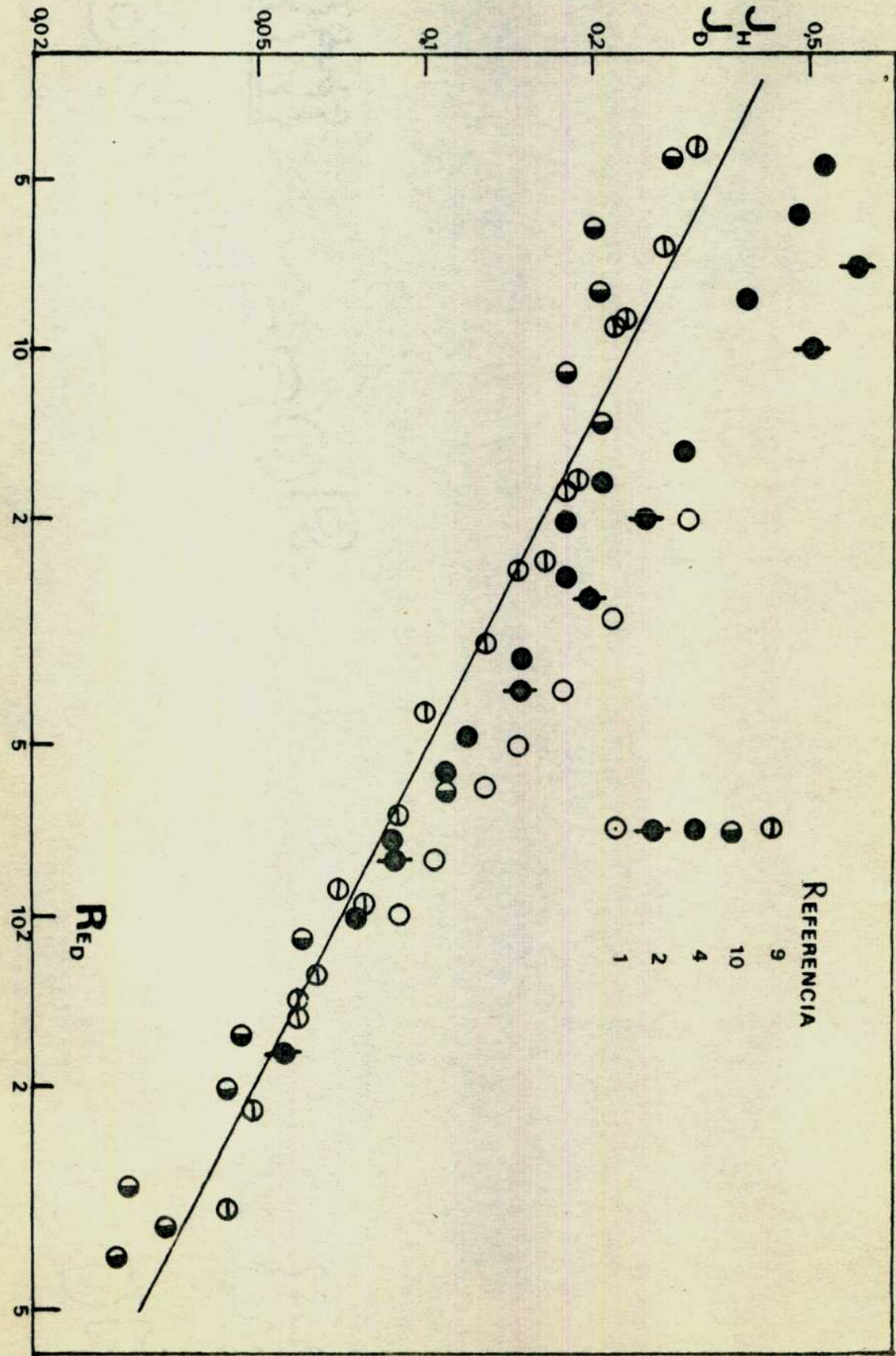


FIGURA 19 : Comparación con otros trabajos (modelo II).

FIGURA 20 : Comparación con otros trabajos (modelo III).



///

conductión longitudinal de calor en las mallas, que no se tuvo en
Un efecto que puede explicar esta discrepancia sería la
paración fuera de este rango.
sa en lechos de mallas a Re mayores de 100 hace imposible una com-
bajos números de Reynolds. La falta de datos en transferencia de ma-
de mallas son menores, aún son significativas, fundamentalmente a
rencias entre U^* de este trabajo y U^* de Cano y Böhm para un lecho
malla son mayores que para un lecho; por lo tanto si bien las dife-
De este trabajo también surge que los valores de U^* para una sola
den a un lecho formado por tres, seis y nueve mallas, sucesivamente.
ra una sola malla, excepto el trabajo de Cano y Böhm que correspon-
demostramos aclarar que los datos de U^* obtenidos de bibliografía son pa-
Como paso previo a la explicación de esta observación, de-
rencias mayores a bajos números de Reynolds.
y los obtenidos mediante las dos correlaciones, siendo dichas dife-
en mallas, podemos observar diferencias significativas entre estos
De la comparación con los datos de transferencia de masa
aquí.
que el método experimental de estos autores es diferente al usado
tivas con los de este trabajo, principalmente si se tiene en cuenta
obtenidos por London et al (9) no presentan diferencias significati-
Podemos observar que los datos para transferencia de calor
 U^* y U^* son correlacionados según los modelos II y III.

sultados obtenidos con los de la bibliografía, donde los valores de

transferencia.

de hace difícil cuantificar su influencia sobre el coeficiente de

axial de calor en el lecho de malles y de dispersión en la fase fluida.

La dificultad de no disponer de datos sobre la conducción

no es tan importante.

dispersión axial, concluyendo que la omisión de este efecto a Ray-

sselit en un 25% mayores cuando se tiene en cuenta el efecto de la

comprendidos entre 1 y 10 estos autores encuentran valores del Nu-

analizan dicho efecto en un lecho de esferas metálicas. Para Ray-

nolds, tal como se deduce del trabajo de Gunn y De Souza (23), que

do es un factor importante, principalmente a bajos números de Ray-

Por otra parte el efecto de la dispersión axial en el flujo

la curva de salida.

axial de calor en la fase sólida, y analizando su influencia sobre

yendo en estas un término adicional correspondiente a la conducción

se obtendría al resolver el sistema de ecuaciones (1) y (2), inclu-

de transferencia de calor del sistema. La información cuantitativa

purzora media en el lecho con lo cual se aumentaría el coeficiente

cuantitativo esta conducción axial tiende a disminuir la fuerza im-

cuenta en el modelo simplificado de Schumann. Desde un punto de vis-

8. CONCLUSIONES.

1. Mediante el uso del modelo de Schumann y su aplicación a nuestro sistema aire-mallas fue posible evaluar h en forma simple y bastante coincidente con lo obtenido por otros experimentadores en el caso.

2. Un cálculo más preciso de dicho coeficiente, llevaría a plantear un modelo más complicado que tuviera en cuenta la conducción longitudinal de calor entre mallas y la dispersión axial en el fluido, los cuales, tal como se desprende de la bibliografía, son importantes en los procesos de transferencia de calor en lechos rellenos.

3. En el caso de mallas con altas porosidades, la mejor manera de correlacionar el coeficiente de transferencia de calor, resulta de expresar el número de Reynolds en función del diámetro de alambre en vez del radio hidráulico.

4. De lo anterior se infiere que las características de transporte de las mallas y de cilindros infinitos son similares.

5. Los datos experimentales correlacionados mediante los modelos II y III presentan una dispersión sensiblemente menor con respecto al modelo I.

9.1. APENDICE I.

Ecuaciones usadas para el cálculo de porosidad y área específica de

malas.

Suponiendo un tejido de forma regular, de mallas cuadradas

y diámetro uniforme para todos los alambres, Blass (12) deduce la siguiente expresión para la porosidad de una malla

$$\epsilon = 1 - \frac{\pi}{L_s/d} \frac{z G^b (G^b + 1)}{2}$$

siendo

$$L_s/d = (G^b + G^b/2 - 4) 1/2 - 2 \arctg(z G^b - G^b(G^b + G^b/2 - 4) 1/2)$$

$$G^b = 1/(z \cdot d)$$

$$G^b/d = S^d$$

$$S^d - d = p$$

Los valores de d y p se midieron tomando 10 muestras cuadradas de cada lado, recortados en distintos lugares del tejido, evitándose la toma de muestras en los bordes por las desviaciones considerables en esta zona.

Para medir el diámetro de los alambres, estos se sacaron de dichas muestras y se calculó la media aritmética.

z^b , el número de mallas por unidad de longitud, se evaluó sobre 10 muestras de cada tejido, contando un cierto número de las

deducida también por Blas.

$$a = \frac{p}{4} (1 - E)$$

El área específica se calculó a partir de la expresión

lambres extremos.

lambres y dividiéndolas por la distancia entre los centros de los a-

9.2. APENDICE II

Subprograma para ajuste de datos experimentales mediante

la ecuación (14).

```
DIMENSION G(15), X(15), XX(50), S(50), SE(50), VT(50), T(30)
SUBROUTINE FCN (NPAR,G,F,X,IFLAG)
  READ (5,2) Z, A, CF,DS,DF,PORO
  READ (5,4) NP, VF
  READ (5,5) TU, TE
  READ (5,6) (S(I), I=1, NP)
  READ (5,7) (SE(I), I=1, NP)
  WRITE(6,15)(I,SE(I),S(I),I=1, NP)
15 FORMAT(20X, 'ABSCISA (SEG)',20X, 'V. EXPERIMENTAL',20X,(I3,2(F10.3)))
  DO 100 I = 1, NP
100 SE(I)=(SE(I) - TE)/(TU - TE)
  20 CONTINUE
  40 CONTINUE
  DO 200 I = 1, NP
200 XX(I)=(S(I) - Z/VF)*(X(1)*A)/(1 - PORO)*DS*CS
  ALFA = (Z*X(1)*A)/(PORO*VF*CF*DF)
  CALL VALT (XX,ALFA,VT,NP,T,K)
  F=0
  DO 400 I = 1, NP
400 F=F + (VT(I) - SE(I))/VT(I)**2
  RETURN
```

30 CONTINUE

WRITE (6,12) ALFA

12 FORMAT (E20.3)

WRITE (6,9) (I,XX(I),VT(I),SE(I), I=1,NP)

9 FORMAT (20X,'ABSCISA',20X,'V/TEORICO',20X,'V.EXPERI',13,3(F10.5))

2 FORMAT (7F10.0)

4 FORMAT (15,F10.0)

5 FORMAT (2F10.0)

6 FORMAT (16F5.0)

7 FORMAT (16F5.0)

WRITE (6,17) (T(I), I=1,K)

17 FORMAT (10X,'T=','/,5X,E20.3)

END

SUBROUTINE VALT (XX,ALFA,A,NP,T,K)

DIMENSION XX(NP), H(NP),T(30)

DO 600 J=1,NP

K=0

SUM=1

XF=1

FAC=1

DO 300 I=1,20

FAC = FAC * I

K = K + 1

```
-SUM = SUM + ALFA*XI/FAC
T(I) = XX(J)*XI/FAC*SUM
XF = XF + T(I)
IF (T(I)/XF .LT. 0.01) GO TO 50
300 CONTINUE
50 H(J) = 1 - EXP (-XX(J) - ALFA)*XF
500 CONTINUE
RETURN
END
```

Nomenclatura:

N : número de términos de la serie
Z : altura del lecho, cm
A : área específica, cm^{-1}
CF : calor específico del aire, cal/gr °C
CS : calor específico de las mallas, cal/gr °C
DS : densidad de las mallas, gr/cm^3
DF : densidad del aire, gr/cm^3
VF : velocidad del aire, cm/seg
TO : temperatura del aire, inicial, °C
TE : temperatura de entrada del aire, °C
S(I): tiempo, seg
SE(I): temperatura del aire a la salida del lecho, °C

XX(I): tiempo adimensional

NP : número de valores SE(I) leídos

9.3. APENDICE III

Listado del programa para la integración de las ecuaciones (5) y (6) en forma numérica.

```
DIMENSION A(500), V(200,2), U(200,2)
READ (1,2) L,N,DELX,DELT,(A(K),K=1,L),(V(I,1),I=1,N)
2  FORMAT (2I10,2F10.0/(40F2.0))

T = 0
J = 1
DO 10 K=1,L
U(1,J) = A(K)
DO 20 I=1,N
V(I,J+1) = (U(I,J)-V(I,J))*DELT + (V(I,J))
U(I+1,J) = (V(I,J) - V(I,J+1))*DELX/DELT + U(I,J)
20 V(I,J) = V(I,J+1)

B = T
T = T + DELT
10 WRITE (3,12) B,(U(I,J), I=1,N)
12 FORMAT (E20.7/(10E12.3))

STOP

END
```

Nomenclatura:

U : temperatura del aire (adimensional)

V : temperatura de las mallas (adimensional)

J : subíndice para la variable tiempo

I : subíndice para la variable espacio

L : número de intervalos (dimensión de la variable J)

A(K): temperatura del aire a la salida del lecho (adimensional)

10. NOMENCLATURA.

- a : área específica, cm^{-1}
- A_{fr} : área frontal de malla, cm^2
- c_p : calor específico, $\text{cal/gr } ^\circ\text{C}$
- d : diámetro de alambre, cm
- D : coeficiente de difusión, cm^2/seg
- ϵ : porosidad de malla, adimensional
- G : temperatura adimensional del fluido, $= (T_f - T_o)/(T_e - T_o)$
- G' : flujo másico, basado en área libre de flujo, $A_{fr} \epsilon$, $\text{gr}/\text{cm}^2 \text{seg}$
- h : coeficiente de transferencia de calor, $\text{cal}/\text{seg cm}^2 : ^\circ\text{C}$
- J_d : factor J para transferencia de materia basado en la velocidad intersticial, $= k_c / V_f' . Sc^{2/3}$, adimensional
- J_d' : factor J para transferencia de materia basado en la velocidad superficial, $= k_c / V_f . Sc^{2/3}$
- J_h' : factor J para transferencia de calor, basado en la velocidad superficial , $= \left(\frac{h}{V_f c_p \rho_f} \right) Pr^{2/3}$, adimensional
- J_h : factor J para transferencia de calor, basado en la velocidad insterticial, $= \left(\frac{h}{G' c_p} \right) Pr^{2/3}$, adimensional
- k_f : conductividad térmica, $\text{cal}/\text{seg cm } ^\circ\text{C}$
- k_c : coeficiente de transferencia de materia, cm/seg
- p : parámetro de transformación de Laplace
- Pe : número de Péclet, $= Re.Pr$, adimensional
- Pr : número de Prandtl, $= c_p \mu_f / k_f$

- r_h : radio hidráulico, cm
- Re_γ : número de Reynolds, basado en el radio hidráulico y la velocidad intersticial, $= 4r_h G' / \mu_f$, adimensional
- Re_D : número de Reynolds, basado en el diámetro del alambre y la velocidad intersticial, $= dG' / \mu_f$, adimensional
- Re'_D : número de Reynolds, basado en el diámetro de alambre y la velocidad superficial, $= dV_f / \mu_f$, adimensional
- S : temperatura adimensional de malla, $= (T_s - T_o) / (T_e - T_o)$
- Sc : número de Schmidt, $= \nu / D$, adimensional
- t : tiempo, seg
- t' : definido por la ecuación (2'), seg
- T : temperatura, °C
- V : velocidad superficial, cm/seg
- V' : velocidad intersticial, cm/seg
- w_f : caudal másico, gr/seg
- w'_f : caudal volumétrico, l/min
- z : altura del lecho, cm
- Z : definido en sección 4.1., adimensional

SUBINDICES

- e : entrada
- f : aire
- o : inicial
- s : mallas

-LETRAS GRIEGAS

δ : espesor de mallas, cm

μ : viscosidad dinámica, gr/cm seg

ν : viscosidad cinemática, cm²/seg

ρ : densidad, gr/cm³

θ : definido en sección 4.1., adimensional

11. BIBLIOGRAFIA.

- (1) Satterfield C.N. y Cortez E.H.: Ind. Eng. Chem. Fundam., 9, N°4, 613, (1970)
- (2) Gay B. y Maughan R. : Int. J. Heat Mass Transfer, 6, 277, (1963)
- (3) Vogtländer P.H. y Bakker C.A. : Chem. Eng. Sci., 18, 583, (1963)
- (4) Cano J. y Böhm U. : Tesis Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A. (1973)
- (5) Nowak, E. : Chem. Eng. Sci., 21, 19-27, (1966)
- (6) Schumann T.E. : J. Franklin Institute, 208, 405, (1929)
- (7) Amundson R.N. y Munro W.D. : Industrial and Engineering Chemistry, 42, N°8, 1481, (1950)
- (8) Kays, W.M., London A.L. y Lo R.K., Transactions of the ASME, 387 (abril), (1954)
- (9) Kays W.M. & London A.L. : "Compact Heat Exchangers", 2da. Edición, McGraw Hill, N.Y. (1964)
- (10) Coppage J.E. y London A.L. : Chem. Eng. Progr., 52, N°2, 57, (1956)
- (11) Lindauer C.G. : AIChE Journal, 13, N°6, 1181, (1967)
- (12) Blass W. : Chemie Ing. Techn., 36, N°7, 747, (1964)
- (13) Konimayer G.R. : AIChE Journal, 14, N°3, 499, (1968)
- (14) Mc Adams W.H. : "Heat Transmission", 3ra. Edición, McGraw Hill, N.Y. (1954)
- (15) Kays W.M., Tong L.S. y London A.L. : Transactions of the ASME, 1558 (octubre), (1957)

- (16) Furnas, C.C. : Tran. Am. Inst. Chem. Engrs., 24, 142, (1930)
- (17) Perry J.H. : "Chemical Engineers' Handbook", 4ta. Edición, Mc(raw Hill, Kogakusha, (1963)
- (18) Bird R.B., Stewart W.E. y Lightfoot E.N. : "Fenómenos de Transporte", Editorial Reverté, (1964)
- (19) Happel J. y Brenner W. : A.I. Ch.E.Jl, 4, 197, (1959)
- (20) Leclair B.P. y Hamielec A.E. : I.Chem.E. Symposium Series, N° 30, 197, (1968)
- (21) Levich V.G. : "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice Hall, N.Y. (1965)
- (22) Rowe P.N., Claxton K.T. y Lewis J.B. : Trans. Instn. Chem. Eng. 43, 321, (1965)
- (23) Gurn D.J. y De Souza J.F. : Chemical Engineering Science, 29, N°6, 1363, (1974).