



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

UNA NUEVA CORRELACION PARA PREDECIR LA  
VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION  
EN SISTEMAS LIQUIDO-SOLIDO

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el titulo de

INGENIERO QUIMICO

Presenta

MARICELA MONJARAS PASARON

ASESOR: DR. ROBERTO LEYVA RAMOS

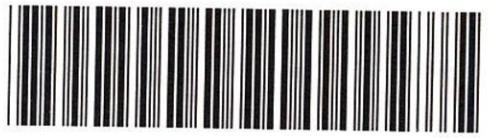
SAN LUIS POTOSI, S. L. P.

1994.



T  
TP15  
.F65  
M6  
c.1





1080076927



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**

**UNA NUEVA CORRELACION PARA PREDECIR LA  
VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION  
EN SISTEMAS LIQUIDO-SOLIDO**

**TESIS PROFESIONAL**

Que para obtener el título de

**INGENIERO QUIMICO**

Presenta

**MARICELA MONJARAS PASARON**

**ASESOR: DR. ROBERTO LEYVA RAMOS**



CON CARIÑO A:  
MIS PADRES ALFREDO Y SABINA  
MIS HERMANAS  
ANGELICA  
LUCIA  
ALEJANDRA  
TERESA

Agradezco al Dr. Roberto Leyva Ramos por la confianza que me brindó en la realización del presente trabajo.

## INDICE

	PAG.
<b>RESUMEN</b>	III
<b>1. INTRODUCCION</b>	1
<b>2. REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	
2.1 Introducción.	3
2.2 Hidrodinámica de un Lecho Fluidizado.	4
2.3 Correlaciones para Predecir la Velocidad Mínima de Fluidización.	5
<b>3. APARATOS Y SUBSTANCIAS</b>	
3.1 Equipo.	14
3.2 Materiales.	15
<b>4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	
4.1 Pretratamiento de la Arena Sílica.	17
4.2 Pretratamiento del Carbón Activado.	17
4.3 Pretratamiento de la Pirita.	18
4.4 Método para Determinar la Densidad de la Partícula.	18
4.5 Método para Obtener la Densidad Aparente de la Partícula.	19
4.6 Método para Determinar el Diámetro Equivalente de las Partículas.	20
4.7 Método para Empacar la Columna.	20
4.8 Método para Obtener Datos Experimentales de la Hidrodinámica de un Lecho Fijo y Fluidizado.	21
4.9 Método para Determinar la Curva de Calibración para los Rotámetros.	22
<b>5. PROCEDIMIENTO DE CALCULO, RESULTADOS Y REPRESENTACION GRAFICA</b>	
5.1 Densidad Aparente de las Partículas.	26
5.2 Densidad de las Partículas.	26
5.3 Diámetro Equivalente.	26
5.4 Datos Experimentales de la Hidrodinámica de Lechos Fijos y Fluidizados.	35

5.5	Calculo de la Velocidad Mínima de Fluidización.	38
5.6	Esfericidad de las Partículas.	53
<b>6.</b>	<b>DISCUSION DE RESULTADOS</b>	
6.1	Datos Experimentales de la Hidrodinámica del Lecho Fluidizado.	58
6.2	Densidad de las Partículas.	59
6.3	Densidad Aparente de las Partículas.	59
6.4	Caída de Presión en el Lecho.	60
6.5	Porosidad del Lecho.	60
6.6	Esfericidad de las Partículas.	61
6.7	Velocidad Mínima de Fluidización.	63
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	89
	<b>NOMENCLATURA</b>	91
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	93
<b>APENDICE A.</b>	Datos Experimentales de la Calibración de los Rotámetros.	96
<b>APENDICE B.</b>	Datos Experimentales para Calcular la Densidad Aparente y de Partícula.	98
<b>APENDICE C.</b>	Datos Experimentales de la Hidrodinámica de Lechos Fluidizados.	100
<b>APENDICE D.</b>	Resultados de los Datos Experimentales de la Hidrodinámica de Lechos Fluidizados.	102

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la velocidad mínima de fluidización de los sistemas líquido (agua)-sólido siguientes: carbón activado, pirita y arena sílica y se propuso una nueva correlación para predecir esta velocidad.

Los datos experimentales se obtuvieron de un lecho fluidizado experimental empacado con tres diferentes materiales: arena sílica, pirita y carbón activado. Se investigó el efecto del diámetro de la columna, diámetro de la partícula, altura inicial de empaque y la densidad de la partícula en la velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima de fluidización se determinó por los métodos de caída de presión contra velocidad superficial y velocidad superficial contra fracción hueca del lecho. Las gráficas de caída de presión vs. velocidad superficial y de velocidad superficial vs. fracción hueca exhibieron el comportamiento esperado para lechos fluidizados líquido-sólido.

Se corroboró que la velocidad mínima de fluidización depende significativamente del diámetro de partícula y de la densidad de la partícula, disminuye ligeramente aumentando el diámetro del lecho o columna y no es afectada por la altura inicial de empaque.

Los valores experimentales que se obtuvieron de la velocidad mínima de fluidización,  $U_{mf}$ , se compararon con los que predicen diversas correlaciones reportadas en la literatura y se encontró que estas correlaciones no predicen adecuadamente la  $U_{mf}$ , debido a que son correlaciones que se desarrollaron para partículas de forma esférica ó regular y las partículas usadas en este trabajo tienen forma irregular.

Se propusieron cuatro nuevas correlaciones para predecir  $U_{mf}$  similares a las reportadas en la literatura y se recomienda una ecuación similar a la sugerida por Ergun.

## 1. INTRODUCCION

La fluidización tal y como se conoce en la actualidad se ha desarrollado durante las tres últimas décadas. No está confinada a un campo específico dentro de la Ingeniería Química pero su conocimiento básico ha servido para desarrollar algunos procesos dentro del campo práctico.

La fluidización puede definirse como una operación en la cual una masa de partículas sólidas (lecho) se mantiene suspendida por medio de una corriente de gas o líquido fluyendo hacia arriba en una columna. A bajas velocidades las partículas permanecen estáticas pero al aumentar la velocidad del fluido se alcanza un punto donde las partículas sólidas tienden a expandirse aumentando con esto la porosidad del lecho e iniciándose de esta manera la fluidización. La velocidad a la cual tiene lugar el inicio de la fluidización es llamada velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima de fluidización,  $U_{mf}$ , se ha estudiado extensamente para sistemas fluidizados gas-sólido y existen diversas correlaciones para predecirla. La información acerca de la  $U_{mf}$  en sistemas líquido-sólido es muy escasa en la literatura y las pocas correlaciones reportadas se han desarrollado con partículas de diámetros pequeños y de forma esférica. Estas correlaciones no predicen adecuadamente la  $U_{mf}$  y por lo tanto existe la necesidad de ecuaciones que correlacionen en forma más exacta la velocidad mínima de fluidización en sistemas líquido-sólido, con partículas de forma tanto esférica como irregular (no esférica).

La velocidad mínima de fluidización es una variable muy importante en el diseño de un lecho fluidizado ya que éste se opera a velocidades superiores a la velocidad mínima de fluidización. En la actualidad los lechos fluidizados tienen aplicaciones importantes como los reactores catalíticos y adsorbedores de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales industriales y municipales.

El objetivo principal de este estudio es obtener datos de la velocidad mínima de fluidización en varios sistemas líquido-sólido, comparar los datos experimentales con los valores que predicen diversas correlaciones reportadas en la literatura y proponer una nueva correlación. Otros de los objetivos de este estudio son :

i) Realizar un análisis comparativo entre los dos métodos experimentales empleados para determinar la velocidad mínima de fluidización.

ii) Analizar el efecto de la relación diámetro de la columna a diámetro de la partícula en la velocidad mínima de fluidización.

iii) Estudiar el efecto de la densidad y factor de forma de la partícula en la velocidad mínima de fluidización.

iv) Determinar el efecto de la altura inicial del empaque en la velocidad mínima de fluidización.

Con el objeto de variar la densidad y forma del material de empaque se usaron partículas de carbón activado, pirita y arena sílica.

## **2. REVISION BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 INTRODUCCION**

La fluidización de un lecho de partículas ocurre cuando las partículas son suspendidas en una corriente de fluido que pasa a través del lecho, esto es, se encuentran en suspensión uniforme en estado estacionario. La transición de lecho fijo a lecho fluidizado ocurre a la velocidad mínima de fluidización por lo tanto la velocidad mínima de fluidización es el límite inferior de operación de un lecho fluidizado. Por lo anterior la velocidad mínima de fluidización es una variable importante en diseño y operación de los lechos fluidizados.

Las aplicaciones del lecho fluidizado líquido-sólido son principalmente en adsorción ya que se logra un mejor contacto fluido-sólido en lechos con partículas gruesas que en lechos gas-sólido con partículas muy finas. El primer uso significativo a gran escala de lechos fluidizados fue hecho por Fritz Winkler en 1922, para la gasificación de carbón pulverizado y en 1948 se hizo la primera aplicación de lechos fluidizados en catálisis de reacciones químicas (Levenspiel y Kunii , 1968). Los lechos fijos así como los fluidizados se usan en los procesos de intercambio iónico para el ablandamiento de agua, en este campo actualmente se estudian diversos compuestos orgánicos para usar como empaques en estos lechos. En la industria de los hidrocarburos el uso de lecho fluidizado es en el proceso de craking catalítico del petróleo, otras aplicaciones en esta área incluyen la producción de anhídrido ftálico por oxidación catalítica de naftaleno a orto-xileno, la producción de cloruro-alquil y el proceso para producir acrilonitrilo.

Las principales ventajas (Levenspiel y Kunii, 1968), que ofrece el lecho fluidizado son: 1) Rápido mezclado de sólidos en condiciones isotérmicas. 2) La circulación de sólidos entre lechos fluidizados hace posible transportar una amplia cantidad de calor. 3) La transferencia de masa entre el fluido y las partículas es alta en comparación con otros tipos de lechos.

Las principales desventajas (Levenspiel y Kunii, 1968) del lecho fluidizado son: a) El rápido mezclado de sólidos en el lecho disminuye el tiempo de residencia en el reactor. En tratamientos continuos de sólidos esto produce bajas conversiones y el producto no es uniforme. b) La erosión de tubos y columnas por abrasión de las partículas puede ser seria. c) En operaciones no catalíticas la alta temperatura y la aglomeración de las partículas finas requiere bajar la temperatura de operación, ocasionando que la reacción disminuya.

## 2.2 HIDRODINAMICA DE UN LECHO FLUIDIZADO

En un lecho fijo las partículas permanecen estáticas cuando un gas o líquido fluye ascendentemente a través del lecho y la caída de presión se incrementa gradualmente a medida que se aumenta la velocidad del fluido. Sin embargo se alcanza una cierta velocidad a la cual las partículas empiezan a suspenderse por el movimiento ascendente del fluido y si el lecho no tiene ninguna restricción en la parte superior, entonces el lecho se empieza a expandir. A partir de esta velocidad que se le llama velocidad mínima de fluidización, las partículas se encuentran completamente suspendidas y el lecho se conoce técnicamente como lecho fluidizado.

En este tipo de lechos la caída total de presión permanece constante con el aumento de la velocidad. Si se continua aumentando la velocidad del fluido a través del lecho finalmente se alcanza la velocidad de arrastre, a esta velocidad las partículas son transportadas o arrastradas fuera del lecho. La anterior indica que un lecho fluidizado opera en el intervalo de velocidades delimitado por la velocidad mínima de fluidización y la velocidad de arrastre.

La velocidad mínima de fluidización se puede determinar experimentalmente o bien predecir por medio de diversas correlaciones empíricas o ecuaciones teóricas que se han reportado en la literatura.

En la literatura de lechos fluidizados (Leyva Ramos y colaboradores, 1990) se han reportado dos métodos experimentales para medir  $U_{mf}$ . El primer método se basa en graficar (log-log) la caída de presión vs. la velocidad superficial. En la región de lecho fijo la presión aumenta linealmente con la velocidad superficial mientras que en la de fluidizado la presión se mantiene constante con la velocidad superficial. El punto donde ocurre este cambio de comportamiento corresponde a la  $U_{mf}$ .

El segundo método consiste en graficar en escala semilog la velocidad superficial vs. la fracción hueca o porosidad del lecho. En el lecho fijo la fracción hueca permanece constante con el incremento de la velocidad pero en el lecho fluidizado la fracción hueca aumenta linealmente con la velocidad. El punto de transición es  $U_{mf}$ . En las Figuras 2.1 y 2.2 se ilustran estos métodos.

### 2.3 CORRELACIONES PARA PREDECIR LA VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION EN SISTEMAS LIQUIDO-SOLIDO.

En la literatura de lechos fluidizados se han reportado mas de treinta ecuaciones o correlaciones (Grewal y Saxena, 1980) para predecir la velocidad mínima de fluidización. La gran mayoría de estas ecuaciones han sido desarrolladas para sistemas gas-sólido y por esta razón para partículas muy pequeñas. La mayor parte de estas ecuaciones son semiempíricas y solamente aplicables a sistemas sólido-gas. Muy pocas de estas ecuaciones (Narsimham, 1965; Wen y Yu, 1966; Bourgeois y Greiner, 1968; Riba y colaboradores, 1978) son aplicables a sistemas líquido-sólido y cuando se usan se obtienen porcentos de desviación del orden del 100% (Leyva Ramos y colaboradores, 1990). Por otro lado datos de velocidad mínima de fluidización para sistemas líquido-sólido son muy escasos.

La ecuación de Wen y Yu (1966) es la correlación más recomendada (Barnea y Mizrahi, 1973) para el cálculo de la velocidad mínima de fluidización. La ecuación de Wen y Yu es bastante sencilla, se puede aplicar a sistemas líquido-sólido y gas-sólido y se usa en un amplio intervalo de  $N_{Re}$ .

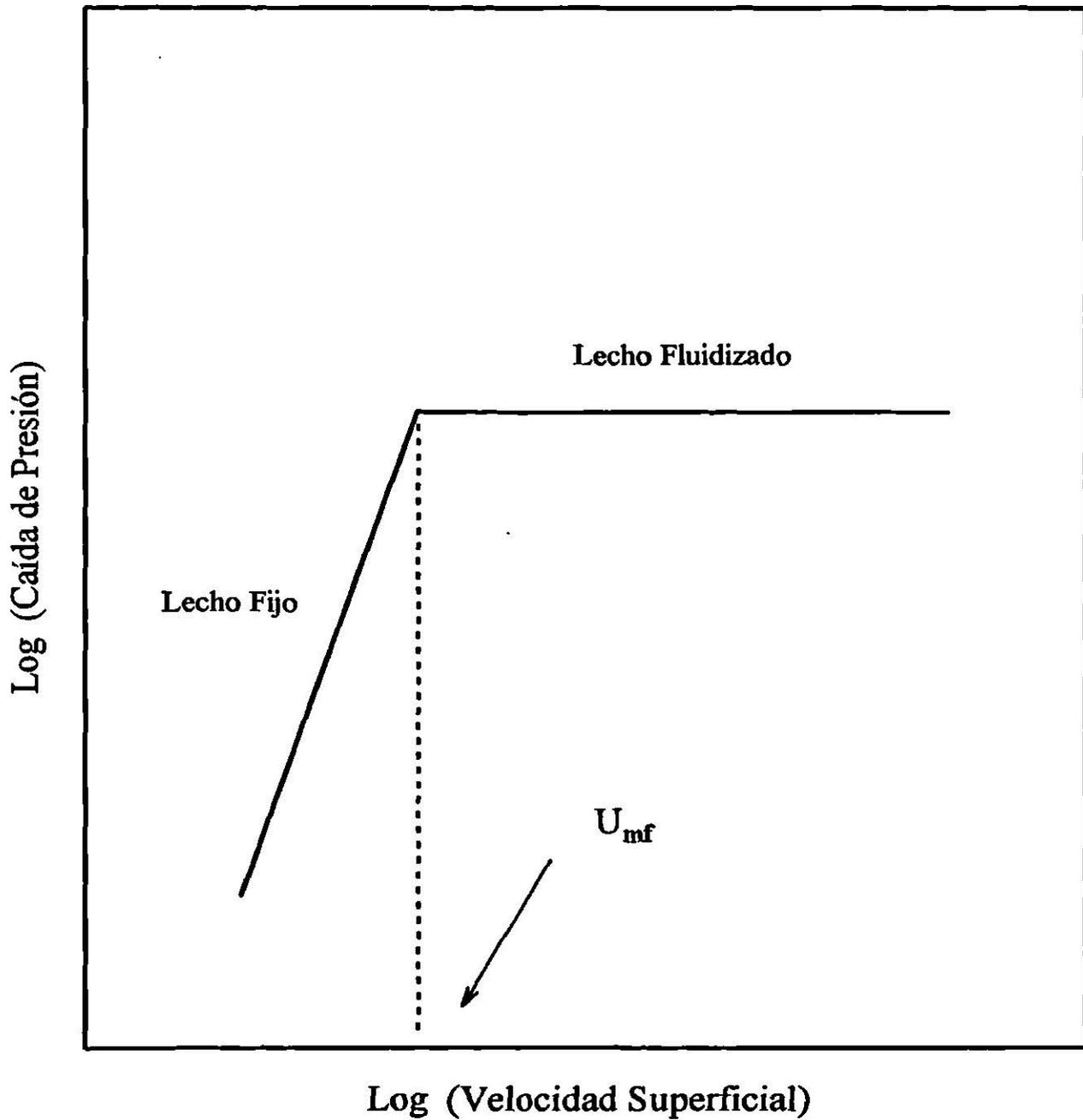
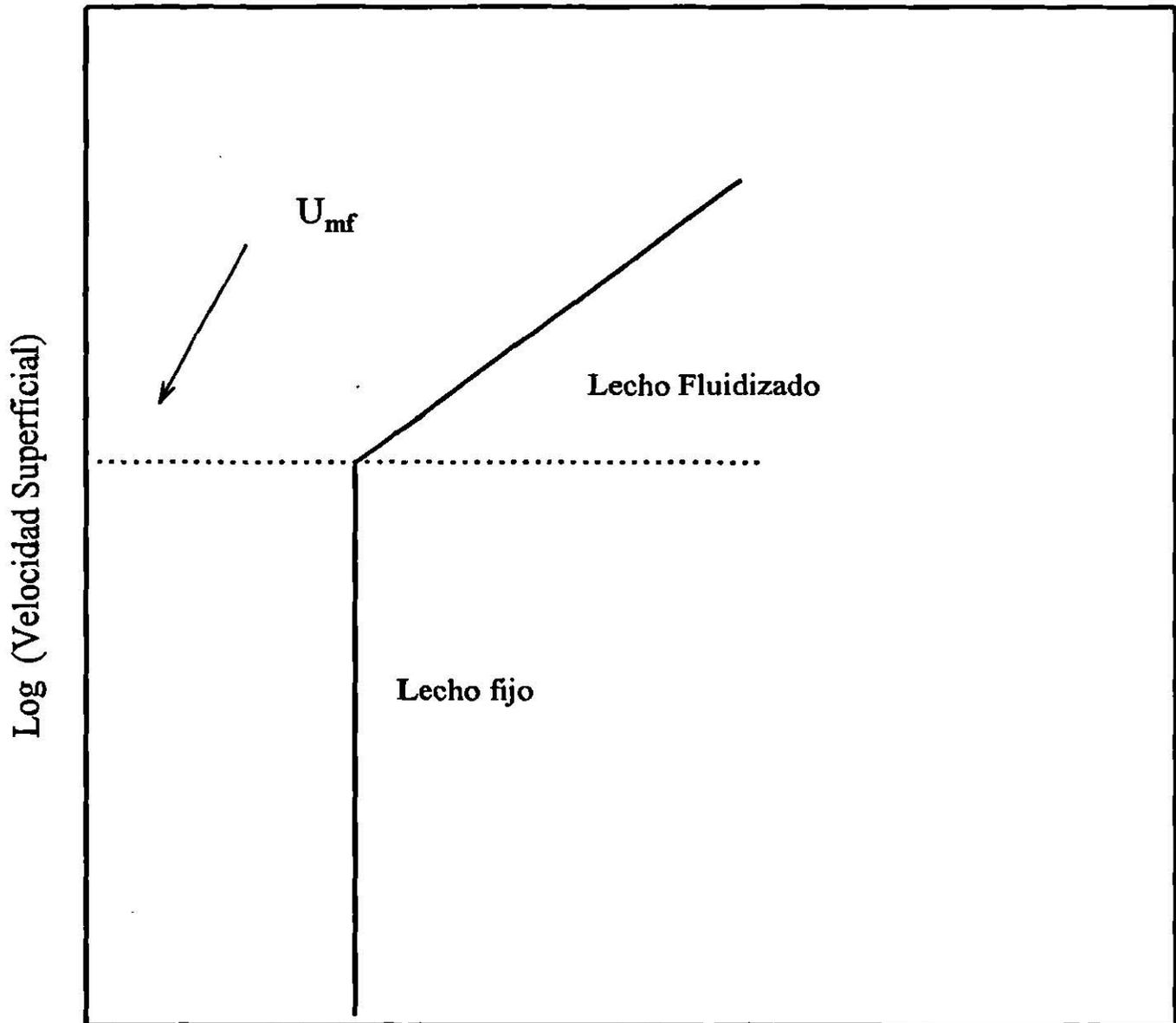


Figura 2.1 Método de la Caída de Presión



Fracción Hueca

Figura 2.2 Método de la Fracción Hueca

Esta ecuación, como otras (Bourgeois y Greiner, 1968), está basada en que al inicio de la fluidización la caída de presión total es igual a la fuerza necesaria para mantener al sólido suspendido o sea el peso efectivo del sólido. Además, se considera que al inicio de la fluidización el lecho todavía se comporta como fijo y la ecuación de Ergun (Levenspiel y Kunii, 1962) para el cálculo de caída de presión se puede aplicar. La caída de presión en el lecho al inicio de la fluidización es :

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (2.1)$$

y la caída de presión estimada por la ecuación de Ergun es :

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = \frac{150(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f U_{mf}^2}{\phi_s d_p} \quad (2.2)$$

Wen y Yu igualaron estas ecuaciones y obtuvieron la ecuación:

$$\frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} (N_{Re})_{mf} + \frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} (N_{Re})_{mf}^2 - N_{Ga} = 0 \quad (2.3)$$

Donde :

$$(N_{Re})_{mf} = \frac{\rho_f d_p U_{mf}}{\mu} = \text{Número de Reynolds a la velocidad mínima de fluidización}$$

$$N_{Ga} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} = \text{Número de Galileo}$$

$U_{mf}$  = Velocidad mínima de fluidización , m/s

$d_p$  = Diámetro de la partícula , m

$\rho_f$  = Densidad del fluido , Kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  = Viscosidad del fluido , Kg/m seg

$\rho_s$  = Densidad del sólido , Kg/m<sup>3</sup>

$\phi_s$  = Esfericidad de la partícula

$\epsilon_{mf}$  = Fracción hueca a la velocidad mínima de fluidización

$g$  = Aceleración de la gravedad , m/seg<sup>2</sup>

Posteriormente Wen y Yu usando datos experimentales para diferentes sistemas, obtuvieron los valores siguientes :

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (2.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.4) y (2.5), en la ecuación (2.3) y despejando el  $(N_{Re})_{mf}$ , Wen y Yu obtuvieron la siguiente correlación :

$$(N_{Re})_{mf} = \sqrt{(33.7)^2 + 0.0408 N_{Ga}} - 33.7 \quad (2.6)$$

Esta ecuación es semiempírica porque se basa en conceptos teóricos y las ecuaciones (2.4) y (2.5) que son ecuaciones empíricas que solamente ajustan los datos experimentales adecuadamente.

La ecuación de Wen y Yu no requiere del factor de esfericidad, ni de la fracción hueca y por esta razón su uso es sencillo. El intervalo de aplicación recomendado por los autores es de  $(N_{Re})_{mf}$  de 0.001 a 4000.

Riba y colaboradores (1978) reportaron que la velocidad mínima de fluidización es una propiedad intrínseca del sistema fluidizado y agruparon en cuatro categorías los parámetros más importantes : i) Características del fluido tales como temperatura, composición, densidad y viscosidad. ii) Características del sólido. Estas son propiedades tales como esfericidad, diámetro, densidad y masa total. iii) Características del lecho que incluyen el diámetro de la columna. iv) Condiciones dinámicas del fluido; por ejemplo, la velocidad . Estos autores propusieron la siguiente correlación :

$$(N_{Re})_{mf} = 1.54 \times 10^{-2} G^{0.66} Mv^{0.70} \quad 10 < (N_{Re})_{mf} < 1000 \quad (2.7)$$

donde :

$$Mv = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}$$

$$G = \frac{d^3 \rho_l^2 g}{\mu^2}$$

En este punto es importante aclarar que estos autores denominaron incorrectamente al número adimensional  $G$  como el número de Galileo. Los autores reportaron que esta ecuación ajustó bastante bien sus datos experimentales y que el porcentaje de desviación aumenta a medida que el  $(N_{Re})_{mf}$  disminuye, y recomendaron que esta correlación se use en el intervalo  $10 < (N_{Re})_{mf} < 1000$ .

Bourgeois y Greiner (1968) sugirieron una ecuación para evaluar la velocidad mínima de fluidización de partículas esféricas de tamaños uniformes a partir de la ecuación de caída de presión de Ergun (1952). Los principales parámetros que afectan a la velocidad mínima de fluidización se agruparon en un número adimensional designado como "Número de Fluidización"; sin embargo, este número es equivalente al número de Galileo,  $N_{Ga}$ . La ecuación propuesta por Bourgeois y Greiner (1968) es :

$$Re_{mf} = 42.86(1 - \epsilon_{mf}) \left[ \left( 1 + 3.11 \times 10^{-4} N_{Ga} \frac{\epsilon_{mf}^3}{(1 - \epsilon_{mf})^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Esta correlación se obtuvo también a partir de la ecuación de caída de presión de Ergun. Bourgeois y Greiner realizaron una revisión bibliográfica sobre el valor de  $\epsilon_{mf}$  para varios sistemas y recomendaron que se use un valor de  $\epsilon_{mf} = 0.406$ . Sustituyendo este valor en la ecuación (2.8) se obtiene :

$$Re_{mf} = 25.46 \left[ \sqrt{1 + 5.90 \times 10^{-5} N_{Ga}} - 1 \right] \quad (2.9)$$

Estas correlaciones se pueden usar para predecir la velocidad mínima de fluidización cuando se conoce  $\epsilon_{mf}$  y el  $N_{Ga}$  esta dentro de intervalo  $10^2 < N_{Ga} < 10^8$ . La extensión de estas ecuaciones a partículas no esféricas debe de realizarse con mucha precaución, ya que estas correlaciones se obtuvieron usando solamente datos experimentales de partículas esféricas.

La velocidad mínima de fluidización fue evaluada experimentalmente para sistemas líquido-sólido por Rao y Prakash (1982) y encontraron que la velocidad es independiente de la altura inicial del lecho. La ecuación propuesta es la siguiente :

$$G_{mf} = 3.63 \times 10^{-4} \left[ \frac{d_p^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \right]^{0.915} \quad (2.10)$$

Donde :

$G_{mf}$  = Velocidad masica a la velocidad mínima de fluidización , Kg/m<sup>2</sup> s

Es importante recalcar que esta ecuación es solamente aplicable a lechos empacados-fluidizados líquido-sólido que tienen un material de empaque estático y otro fluidizado. El sólido se encuentra fluidizado entre los espacios huecos que deja el material estático.

Una expresion generalizada para predecir la velocidad mínima de fluidización para sistemas líquido-sólido fue formulada por Narsimham (1965), esta ecuación también se basa en la caída de presión total de la ecuación de Ergun :

$$G_{mf} = \frac{42.9(1 - \epsilon_{mf})\mu}{\phi_s d_p} \left[ \left( 1 + \frac{0.0056 \epsilon_{mf}^3 \phi_s^3}{(1 - \epsilon_{mf})^2} N_{Ret} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.11)$$

donde :

$$N_{Ret} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{18\mu^2}$$

Para usar esta ecuación se necesitan los valores de la fracción hueca a la velocidad mínima de fluidización,  $\epsilon_{mf}$ , y del factor de esfericidad,  $\phi_s$ .

Para partículas irregulares es necesario relacionar  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  en los términos siguientes:

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s} \text{ y } \frac{\epsilon_{mf} \phi_s^3}{(1 - \epsilon_{mf})^2}$$

Narsimham correlacionó datos experimentales y obtuvo ecuaciones para estos dos términos en función de  $d_p$ . Sustituyendo estos en la ecuación (2.11), Narsimham obtuvo la ecuación siguiente:

$$G_{mf} = \frac{42.9\mu}{d_p} (0.231 \log d_p + 1.417) \left[ \left( 1 + 2.12 \times 10^{-5} d_p^{-0.55} N_{Ret} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.12)$$

La validez de la ecuación (2.12) esta restringida a un intervalo de diámetros de partículas de 0.00254 cm a 0.0508 cm. Experimentalmente se ha observado que para partículas irregulares mayores a 0.0508 cm que  $\epsilon_{mf}$  tiende a ser independiente del diámetro de la partícula y alcanza un valor constante. Narsimham basandose en esta consideración sugirió una relación lineal entre  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  y sustituyendo esta relación en la ecuación (2.12) propuso la ecuación siguiente :

$$G_{mf} = \frac{42.9\mu}{d_p} f_o(\phi_s) \left[ \left( 1 + 0.0056 f_l(\phi_s) N_{Ret} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.13)$$

donde :

$$f_o(\phi_s) = \frac{0.232 + 0.42\phi_s}{\phi_s} \quad (2.14)$$

$$f_l(\phi_s) = \frac{(0.768 - 0.42\phi_s)^3}{(0.232 + 0.42\phi_s)^2} \phi_s^3 \quad (2.15)$$

Varias correlaciones para calcular  $U_{mf}$  en sistemas gas-sólido se han hecho extensivas a sistemas líquido-sólido, tal es el caso de las correlaciones de Johnson (1950), Leva (1959), Davies y Richardson (1966) y Pillai y Raja Rao (1971). Johnson propuso la siguiente ecuación:

$$G_{mf} = \frac{d_p^2 \phi_s^2 g \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \left( \frac{\epsilon_{mf}^5}{1 + 0.5 (1 - \epsilon_{mf})} \right) \quad (2.16)$$

Esta ecuación se puede utilizar para  $N_{Re} < 2$ . La correlación de Leva (1950) es la siguiente:

$$G_{mf} = 0.0093 \frac{d_p^{1.82} (\rho_f (\rho_s - \rho_f))^{0.94}}{\mu^{0.88}} \quad (2.17)$$

Los autores recomiendan esta correlación para  $N_{Re} < 10$ . La correlación de Davies y Richardson (1966) se desarrolló con partículas de catalizadores :

$$G_{mf} = 0.00078 \frac{d_p^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \quad (2.18)$$

Finalmente la correlación de Pillai y Raja Rao (1971) que se recomienda para  $N_{Re} < 20$  es la siguiente:

$$G_{mf} = 0.000701 \frac{d_p^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \quad (2.19)$$

Estas son todas las ecuaciones reportadas en la literatura para el calculo de la velocidad mínima de fluidización en sistemas líquido-sólido.

### **3. APARATOS Y SUBSTANCIAS**

#### **3.1 EQUIPO**

Los datos experimentales se obtuvieron en un lecho fluidizado experimental que esta integrado por el siguiente equipo: tanque de alimentación, instrumentos de medición y control de variables, y columna o lecho.

1) Tanque de alimentación. El líquido que se alimenta a la columna se almacena en un tanque de  $1\text{m}^3$  de capacidad, construido de fibra de vidrio y tiene una descarga en la parte inferior que se conecta con la bomba que alimenta el fluido a la columna.

2) Instrumentos de medición y control de variables.

a) Bomba de alimentación. El fluido se alimenta a la columna por medio de una bomba de engranes marca ISMATEC, modelo 07617-70, que cuenta con cabezales de descarga de velocidad variable. Se seleccionó una bomba de engranes ya que proporciona un flujo de descarga constante.

b) Rotámetros. El gasto volumétrico de la alimentación se mide por medio de 4 rotámetros que cubren los siguientes intervalos de operación: 0.005 a 0.03, 0.01 a 0.2, 0.1 a 2.0 y 1.5 a 4.0 L/min.

c) Termómetro. La temperatura del agua a la entrada de la columna se mide con un termómetro.

d) Manómetro. Las caídas de presión que se tienen en un lecho son muy bajas y por esta razón se utilizan manómetros inclinados. Los manómetros inclinados son de marca DWYER, modelo 400, que tienen un rango de operación de 0.1 a 10 in de  $\text{H}_2\text{O}$  y como fluido manométrico utilizan aceite rojo de la misma marca. Los manómetros se conectan a las tomas de presión de la columna por medio de mangueras de plástico.

3) Columna. Se construyeron dos columnas de vidrio con diámetros de 2.54 cm y 5.0cm.

La columna consta de tres secciones, la primera es un distribuidor que proporciona flujo uniforme a la entrada de la columna, esto se logra empacando una sección de la columna con perlas de vidrio. La altura empacada en el distribuidor es de 30.0 cm para la columna de diámetro de 2.54 cm y de 40.0 cm para la columna de 5.0 cm.

La segunda sección se compone de dos tubos de 50.0 cm de longitud con tomas de presión colocadas a todo lo largo y espaciadas 5 cm entre sí en una de las secciones y en la otra las tomas de presión están espaciadas 4.5 cm entre sí; esta sección es propiamente la columna. La columna se empaca con arena sílica, carbón activado o pirita según sea el material empleado en el experimento. Entre la sección de distribución y la columna se instaló una malla de acero inoxidable para sostener el material que se carga a la columna y evitar de esta manera que pase a la sección de distribución.

La tercera sección es el vertedero, que tiene la finalidad de proporcionar un flujo uniforme del fluido que efluye de la columna. Esta compuesto de dos tubos de vidrio concéntricos de 20.0 cm de diámetro con dos salidas laterales y una inferior.

Las diferentes secciones se ensamblan entre sí por medio de uniones esféricas para la columna de diámetro de 2.54 cm y cónicas para la de 5.00 cm de diámetro y se sujetan por medio de pinzas de acero inoxidable.

El sistema de lecho fluidizado se arma con una o dos secciones de columna según los requerimientos del experimento. Ver Figura 3.1.

### 3.2 MATERIALES.

Los experimentos de fluidización se llevaron a cabo con tres diferentes materiales: arena sílica, carbón activado y pirita. La arena sílica que se utilizó contiene un 15% de arcillas como impurezas, esta fue proporcionada por el laboratorio de metalurgia extractiva del Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. El carbón activado que se utilizó es de grado C producido por Carbones Mexicanos S.A. La pirita que se utilizó tiene aproximadamente un 30% de impurezas y fue donada por Industrial Minera México S.A de C.V.

- 1.- TANQUE DE ALIMENTACION
- 2.- BOMBA DE ENGRANES
- 3.- ROTAMETRO
- 4.- TERMOMETRO
- 5.- MANOMETRO INCLINADO
- 6.- DISTRIBUIDOR
- 7.- LECHO FLUIDIZADO
- 8.- VERTEDERO
- 9.- VALVULA
- 10.- DRENAJE
- 11.- EMBOLO

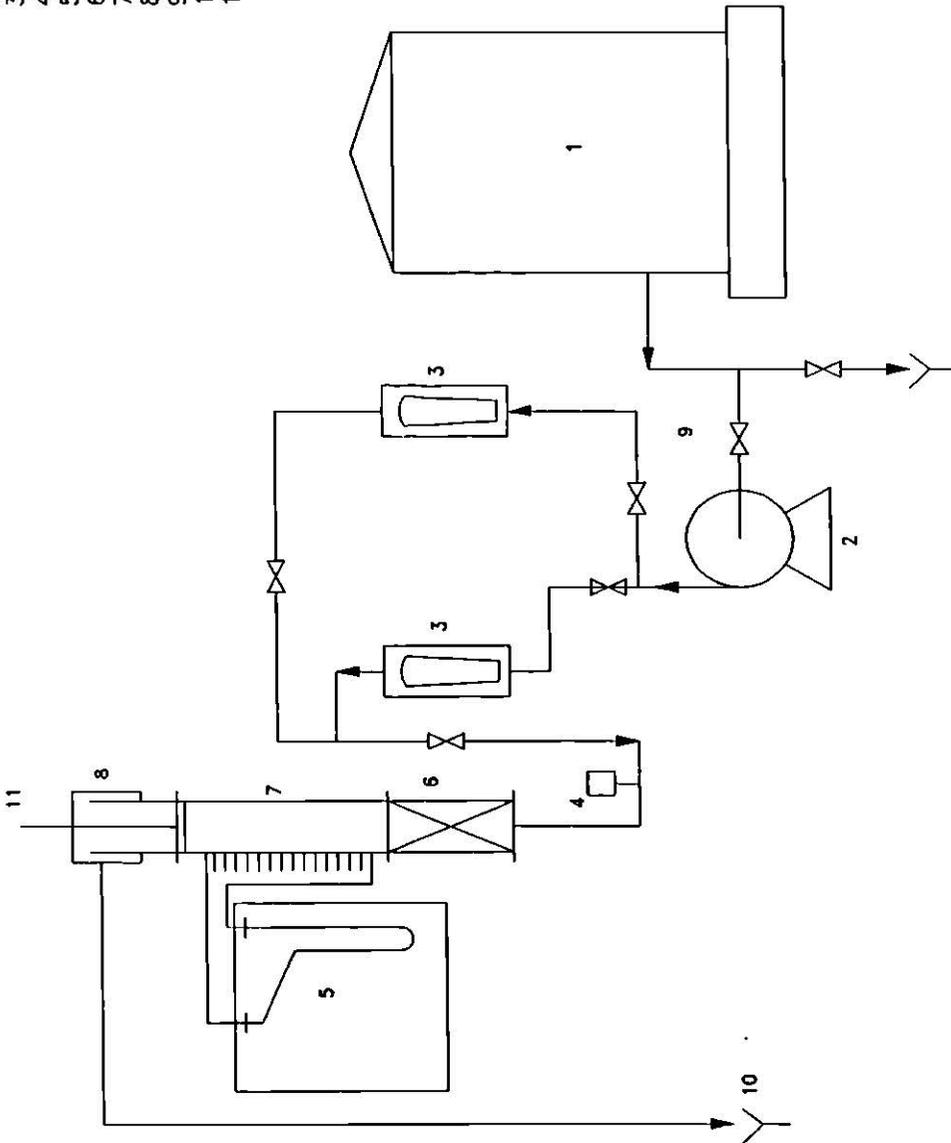


FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE UN LECHO FLUIDIZADO

## **4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### **4.1 PRETRATAMIENTO DE LA ARENA SILICA**

La arena tal como se recibió del laboratorio de metalurgia extractiva, contenía lamas (polvos, arcillas, carbonatos) éstas se eliminaron por el procedimiento siguiente:

a) Se tamiza usando mallas estandar USA números: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 que corresponden a los diámetros promedio de partículas siguientes : 0.200, 0.084, 0.059, 0.041, 0.029 y 0.025 cm, respectivamente.

b) Se pesa 1 kg de arena sílica tamizada y se lleva a un atricionador marca DENVER, se le agregan 20 mL de ácido sulfúrico concentrado y agua necesaria para llenar el atricionador y se lava por espacio de 15 min.

c) Enseguida se coloca en un vaso de precipitado para decantar las arcillas presentes y luego se lava repetidas veces con agua destilada.

d) Se coloca en una charola de acero inoxidable y se seca en una estufa a 85 °C por espacio de 20 min.

e) Finalmente se almacena en recipientes de plástico sellados.

### **4.2 PRETRATAMIENTO DEL CARBON ACTIVADO.**

El carbón tal como se recibe del fabricante contiene polvo y el tamaño de partícula es muy variable. Por lo anterior se pretrató de acuerdo al procedimiento siguiente :

a) El carbón activado se tamiza usando mallas estandar USA números: 10, 20, 30 y 50 y mallas Tyler números: 8, 10 y 14 que corresponden a los diámetros promedio de partículas siguientes: 0.200, 0.084, 0.059, 0.029, 0.236, 0.165 y 0.117 cm, respectivamente.

b) Se lava repetidamente con agua destilada para remover el polvo, hasta que el agua de lavado no contenga polvo suspendido.

c) Enseguida el carbón se coloca en una charola de acero inoxidable y se seca en una estufa a 110 °C por espacio de 24 hrs.

d) El carbón se guarda en frascos perfectamente sellados y secos.

#### 4.3 PRETRATAMIENTO DE LA PIRITA

La pirita se recibió tamizada en un intervalo de diámetros de partículas de 0.236 a 0.0248 cm y conteniendo lamas (polvos) por lo que fue necesario que se pretratara de acuerdo al procedimiento siguiente :

a) Se tamiza utilizando mallas estandar USA números: 10, 20, 30, 40 y 50 que corresponden a los diámetros promedios de partículas siguientes: 0.200, 0.084, 0.059, 0.041 y 0.029 cm, respectivamente.

b) Se pesa 0.5 kg de pirita, se coloca en un vaso de precipitados y se agregan 15 mL de ácido clorhídrico concentrado y agua en una relación 1:1.

c) Enseguida el vaso de precipitados se coloca en una estufa a la temperatura de 40 °C por espacio de 24 hrs, esto es con el objeto de eliminar el fierro presente en la pirita.

d) Se decanta el fierro e impurezas y se lava con agua destilada repetidas veces hasta que el agua de lavado sea transparente.

e) Finalmente se coloca en una charola de acero inoxidable y se seca en la estufa a la temperatura de 80 °C por espacio de 20 min y se guarda en recipientes de plástico sellados.

#### 4.4 METODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE LA PARTICULA

La densidad de la partícula se determinó por el método de desplazamiento de agua usando un picnómetro. El procedimiento es el siguiente :

a) Se pesa una determinada cantidad del material de un tamaño de malla específico.

b) Se pesa un picnómetro aforado con agua destilada.

c) Se vacia parte del agua del picnómetro, se agrega el material y se afora nuevamente. El picnómetro con el material se deja dos días en reposo para permitir que el agua penetre dentro de los poros del material.

d) El picnómetro se afora nuevamente y se pesa.

e) Se mide y registra la temperatura ambiente.

f) La densidad de la partícula se calcula por la ecuación siguiente :

$$\rho_p = \frac{m_m}{V_d} \quad (4.1)$$

y el volumen desplazado se obtiene por la ecuación :

$$V_d = \frac{m_m + m_p - m_{pm}}{\rho_w} \quad (4.2)$$

donde :

$m_m$  = Masa del material agregado al picnómetro , g

$m_p$  = Masa del picnómetro aforado con agua , g

$m_{pm}$  = Masa del picnómetro con el material y aforado con agua , g

$\rho_w$  = Densidad del agua , g/cm<sup>3</sup>

$V_d$  = Volumen de agua desplazada por el material , cm<sup>3</sup>

#### 4.5 METODO PARA OBTENER LA DENSIDAD APARENTE DE LA PARTICULA

a) Se pesa una determinada cantidad de material de un tamaño de malla específico.

b) Se pesa un picnómetro aforado con agua destilada.

c) Se vacía parte del agua del picnómetro, se agrega el material y se afora nuevamente, se pesa inmediatamente para evitar que el agua penetre dentro de los poros del material.

d) Se mide y registra la temperatura.

e) La densidad aparente de la partícula ,  $\rho_a$  , se determina usando las ecuaciones (4.1) y (4.2)

#### 4.6 METODO PARA DETERMINAR EL DIAMETRO EQUIVALENTE DE LAS PARTICULAS.

El diámetro equivalente de una partícula es el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen ocupado por la partícula de forma irregular. Este diámetro se determinó experimentalmente por el método siguiente :

a) Se pesa cierta cantidad de masa del material y se calcula el volumen total de las partículas usando la densidad aparente de las partículas :

$$V_T = \frac{m_m}{\rho_a} \quad (4.3)$$

b) Se cuenta el número de partículas del material y se obtiene el volumen promedio de cada partícula :

$$V_p = \frac{V_T}{\text{No. de partículas}} \quad (4.4)$$

c) El diámetro equivalente de la partícula ,  $d_e$ , se calcula por medio de la ecuación :

$$d_e = 2 \left[ \frac{3 V_p}{4 \pi} \right]^{1/3} \quad (4.5)$$

#### 4.7 METODO PARA EMPACAR LA COLUMNA

La columna se empaca siguiendo el procedimiento que se describe enseguida :

a) Se pesa una determinada cantidad del material con que se empaca la columna.

b) Cuando se usa carbón activado, este se contacta con agua durante 24 horas para que el agua penetre dentro de los poros, ya que es un material poroso; para la arena sílica y la pirita esto no es necesario porque no son partículas porosas.

c) Se arma la columna sin el vertedero, se llena con agua y en seguida se adiciona el material.

d) Se ensambla el vertedero a la columna.

e) Se enciende la bomba de engranes y se suspenden completamente las partículas del material.

f) Se disminuye lentamente el gasto hasta que se sedimenten nuevamente todas las partículas.

g) Se apaga la bomba, se desmonta el vertedero, se agrega más material y se repiten los pasos d) a f) hasta que el material empacado tenga una cierta altura.

#### 4.8 METODO PARA OBTENER DATOS EXPERIMENTALES DE LA HIDRODINAMICA DE UN LECHO FIJO Y FLUIDIZADO.

Para obtener los datos hidrodinámicos se siguieron los pasos que se describen a continuación.

a) La columna se ensambla y se empaca como se describió anteriormente.

b) Se mide y registra la altura inicial del lecho empacado,  $h_0$ , por medio de una escala que esta colocada a un lado de la columna.

c) El agua se alimenta a la columna encendiendo la bomba de engranes, se fija el gasto volumétrico a un cierto valor que se mide por medio de un rotámetro. Una vez que se alcanza el estado estacionario, se mide la altura del lecho con la escala y la caída de presión.

d) La caída de presión por unidad de longitud se mide por medio de un manómetro inclinado. El procedimiento es el siguiente : i) Se abren las válvulas del manómetro durante 2 minutos para que se estabilize el sistema y se cerciora que no haya fugas de agua en el sistema. ii) Se toma la lectura del manómetro directamente en in de  $H_2O$  y se registra la lectura así como la distancia entre las tomas de presión. iii) Se cierran las válvulas del manómetro .

e) Se registra la temperatura del agua fluyendo a través del lecho.

f) Una vez que se efectuaron todas la mediciones necesarias, el gasto volumétrico se incrementa ligeramente y nuevamente se repiten los pasos c), d) y e).

g) La corrida se termina cuando todo el material esta formando un lecho fluidizado.

h) En caso de que la columna opere como un lecho fijo, el émbolo se coloca sobre el material de empaque para evitar que este sea suspendido al alcanzar la velocidad mínima de fluidización.

#### 4.9 METODO PARA DETERMINAR LA CURVA DE CALIBRACION PARA LOS ROTAMETROS.

Los gastos volumétricos suministrados a la columna se midieron por medio de 4 rotámetros. Los intervalos de medición de estos son : 0.005 a 0.03, 0.01 a 0.2, 0.1 a 2.0 y 1.5 a 4.0 L/min.

Los dos primeros rotámetros tienen una escala en L/min por lo que se puede leer directamente el gasto volumétrico, pero se calibraron para calcular el error experimental en las lecturas. Los datos experimentales se muestran en las Tablas A.1 y A.2 (Ver apéndice A). Como se nota en estas tablas, en el intervalo de 0.01 a 0.03 L/min del primer rotámetro se tienen porcentos de desviación menor del 12.5% y promedio de 5.29 %. En el segundo intervalo de 0.04 a 0.2 L/min del segundo rotámetro se obtuvieron porcentos de desviación del 6% y promedio 4.3 %. Por esta razon estos rotámetros se usaron en estos intervalos de gasto volumétrico.

Los dos últimos rotámetros tienen una escala de 10 a 100 y no se puede leer directamente el gasto volumétrico, por lo que se prepararon sus curvas de calibración. El procedimiento de calibración consiste en pesar la cantidad de agua que fluye a través del rotámetro durante un cierto periodo de tiempo. El gasto volumétrico se calcula por medio de la cantidad de agua, la densidad del agua y el periodo de tiempo. Los datos experimentales se muestran en las Tablas A.3 y A.4 (Ver apéndice A).

Los datos obtenidos con el rotámetro de 0.1 a 2.0 L/min se correlacionaron por una ecuación de segundo orden. La ecuación resultante es :

$$G \text{ (L/min)} = -3.065 \times 10^{-2} + 1.727 \times 10^{-2} (\text{lectura}) + 3.976 \times 10^{-5} (\text{lectura})^2 \quad (4.6)$$

Los datos experimentales y la ecuación 4.6 se muestran en la Figura 4.1. En caso del rotámetro de 1.5 a 4.0 L/min, los datos se correlacionaron por la ecuación lineal siguiente :

$$G \text{ (L/min)} = 3.420(\text{lectura}) + 0.7015 \quad (4.7)$$

Los datos experimentales y la ecuación (4.7) se exhiben en la Figura 4.2.

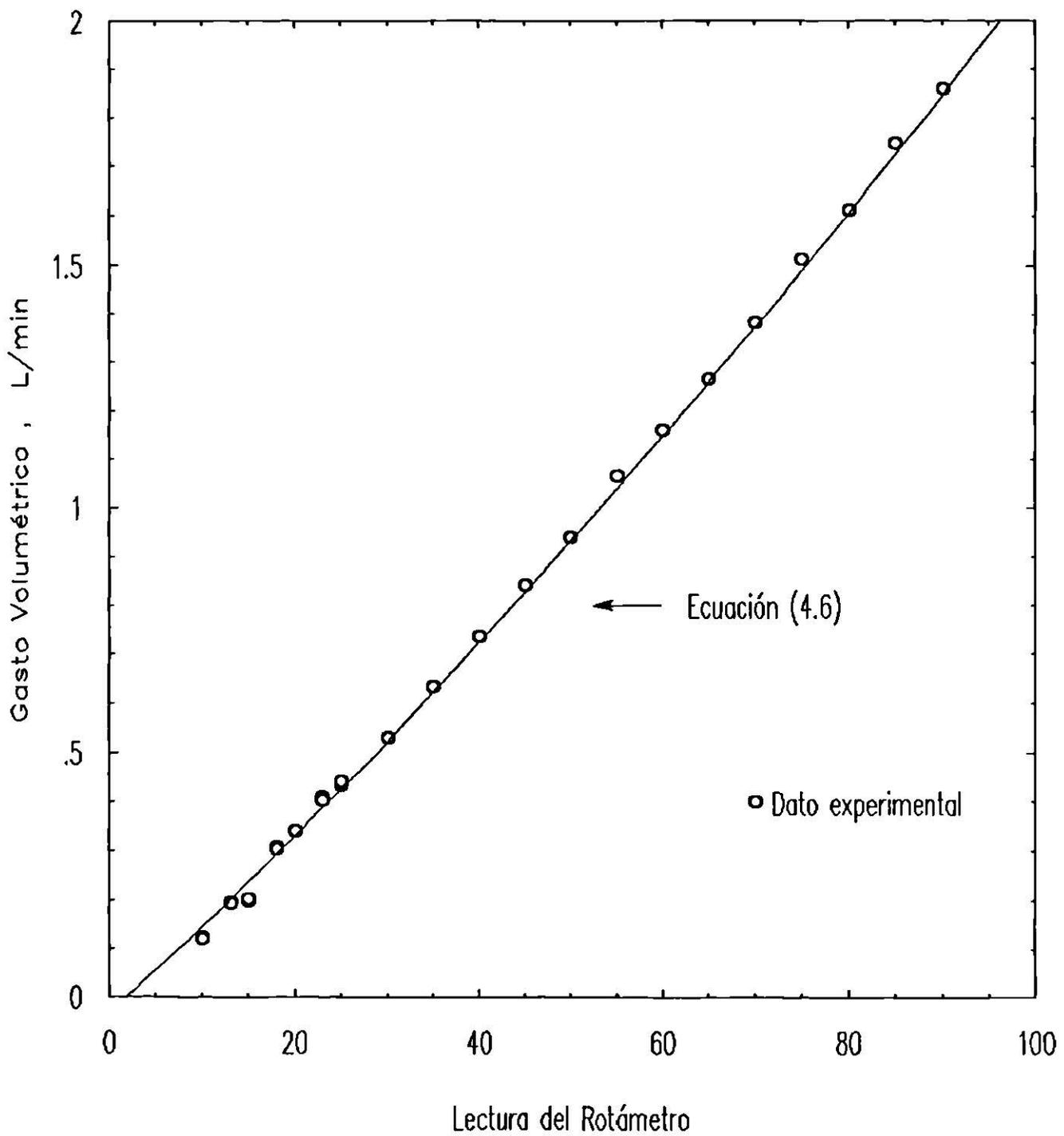
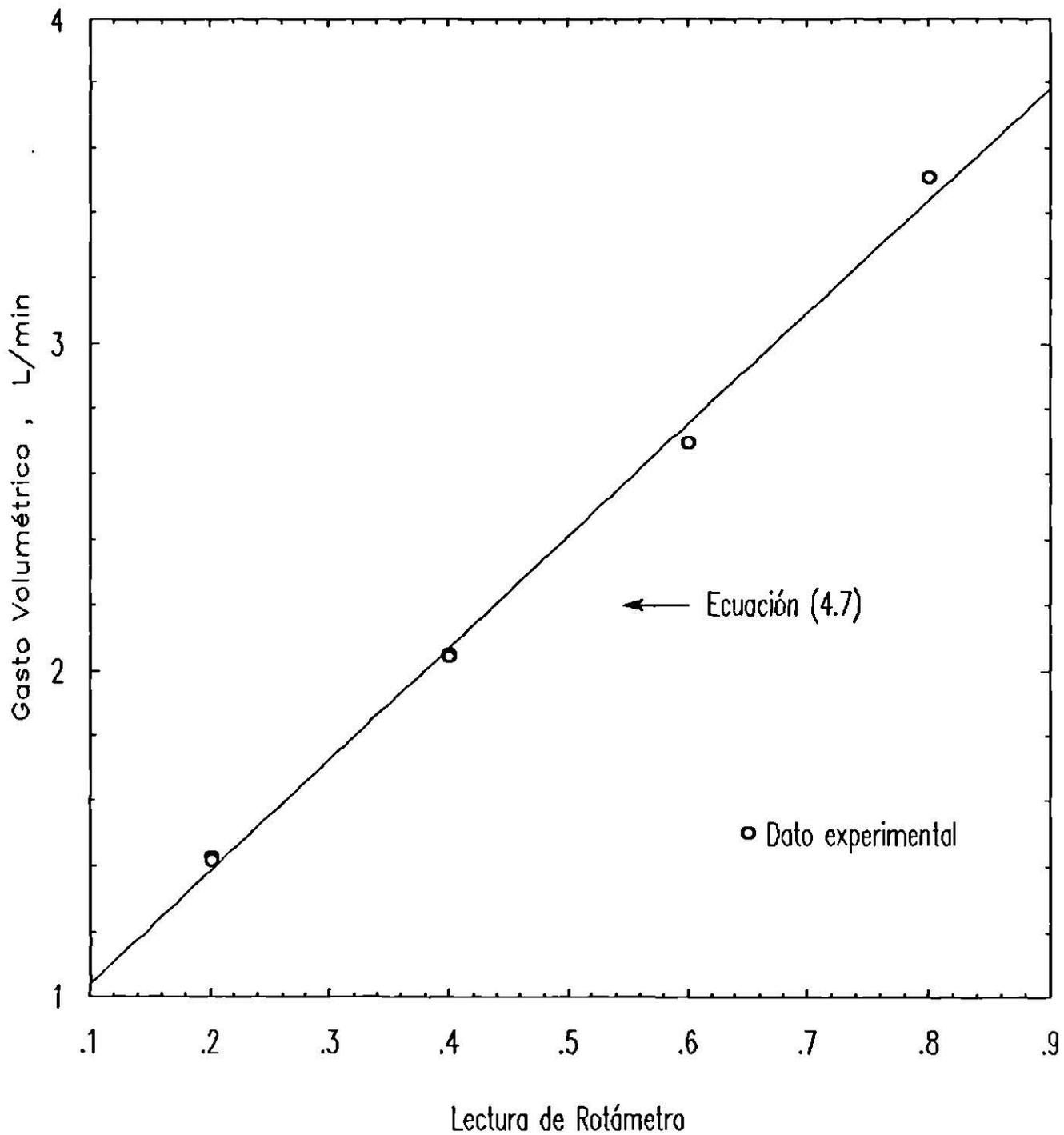


Figura 4.1 Curva de Calibración del Rotámetro de 0.1 a 2.0 L/min, Temperatura 23<sup>0</sup>C.



**Figura 4.2** Curva de Calibración del Rotámetro de 1.5 a 4.0 L/min,  
 Temperatura 23<sup>0</sup>C.

## **5. PROCEDIMIENTO DE CALCULO, RESULTADOS Y REPRESENTACION GRAFICA.**

### **5.1 DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS.**

La densidad aparente de las partículas se calculó por medio de las ecuaciones 4.1 y 4.2 y usando los datos experimentales que se encuentran en las Tablas B.1, B.2 y B.3. (Ver Apéndice B). Los resultados finales se reportan en las Tablas 5.1 a 5.3. La densidad promedio de cada tamaño de partícula se determinó por medio de una distribución gráfica. El método de distribución gráfica consiste en hacer una representación de la distribución de frecuencias de los datos clasificados según determinados intervalos de densidad, de ésta gráfica se selecciona el intervalo que presente mayor frecuencia de datos y de este intervalo se calcula el valor de densidad promedio. En la Figura 5.1 se ilustra este procedimiento para los datos de arena sílica de diámetro de partícula de 0.0358 cm.

### **5.2 DENSIDAD DE LAS PARTICULAS.**

La densidad de las partículas de arena sílica, pirita y carbón activado también se calculó con las ecuaciones 4.1 y 4.2 a partir de los datos experimentales de las Tablas B.4, B.5 y B.6. (Ver Apéndice B). Por medio del método de distribución gráfica descrito anteriormente, se obtiene la densidad promedio para cada tamaño de partícula. Los resultados se reportan en las Tablas 5.1 a 5.3.

### **5.3 DIAMETRO EQUIVALENTE**

El diámetro equivalente se determinó para cada tamaño de partícula de arena sílica, pirita y carbón activado con las ecuaciones 4.3 a 4.5. Los datos experimentales y los resultados se encuentran en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.1 Resultados de la Densidad Aparente y la Densidad de la Partícula de la Arena Sílica.**

Diámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
0.1419	2.5903	2.5927	2.5821	2.5672
	2.6056		2.6296	
	2.5965		2.5601	
	2.6110		2.5905	
	2.5797		2.5362	
	2.5752			
	2.5075			
	2.5862			
	2.5937			
	2.5903			
0.0717	2.5467	2.5643	2.6949	2.6417
	2.5631		2.6450	
	2.5711		2.5911	
	2.4197		2.6166	
	2.5623		2.6103	
	2.5934			
	2.5783			
	2.5885			
	2.5676			
	2.5824			
0.0506	2.5765	2.5759	2.6637	2.6242
	2.5897		2.6343	
	2.5666		2.6022	
	2.5751		2.6218	
	2.5775		2.6387	
	2.5889			
	2.5845			
	2.5747			
	2.5552			
	2.5510			

**Tabla 5.1 (Continuación)**

Diámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
0.0358	2.4346	2.5753	2.6994	2.6666
	2.5757		2.6669	
	2.5554		2.8553	
	2.5723		2.6335	
	2.5725		2.5189	
	2.5798			
	2.5943			
	2.5838			
	2.5765			
	2.5679			
0.0273	2.5631	2.5576	2.6497	2.6002
	2.5476		2.6182	
	2.5577		2.6548	
	2.5587		2.5799	
	2.5186		2.6027	
	2.5555			
	2.5665			
	2.5694			
	2.5576			
	2.5588			

**Tabla 5.2 Resultados de la Densidad Aparente y la Densidad de la Partícula de la Pirita.**

Diámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
0.1419	3.4355	3.5872	3.4957	3.4950
	3.5840		3.4387	
	3.6333		3.4211	
	3.5719		3.4955	
	3.5882		3.4948	
	3.6377		3.4942	
	3.5966			
	3.6432			
	3.6275			
	3.5954			
0.0717	3.5264	3.5353	3.5554	3.5654
	3.5978		3.5961	
	3.5320		3.3753	
	3.5387		3.5469	
	3.5779		3.4329	
	3.5077		3.5634	
	3.5354			
	3.5285			
	3.5411			
	3.5354			
0.0506	3.5364	3.5719	3.4252	3.4502
	3.5708		3.4581	
	3.5844		3.3881	
	3.5730		3.4673	
	3.5489		3.5163	
	3.5436			
	3.5779			
	3.5479			
	3.5853			
	3.5660			

**Tabla 5.2 (Continuación)**

Díámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
00358	3.5364	3.5418	3.5698	3.5706
	3.5394		3.5356	
	3.5527		3.5934	
	3.5620		3.5714	
	3.5645		3.5706	
	3.5474			
	3.5239			
	3.5435			

**Tabla 5.3 Resultados de la Densidad Aparente y la Densidad de la Partícula de Carbón Activado.**

Diámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
0.2001	0.7551	0.6992	1.4765	1.5105
	0.6887		1.5078	
	0.6560		1.5008	
	0.7075		1.5449	
	0.6910		1.5229	
	0.6954			
	0.7138			
0.1419	0.7417	0.7480	1.5979	1.5990
	0.7420		1.5996	
	0.7545		1.6151	
	0.7429		1.5995	
	0.7479		1.5137	
	0.7406			
0.1000	0.6919	0.7098	1.6209	1.6251
	0.7033		1.6196	
	0.6912		1.6349	
	0.7043		1.6946	
	0.7080		1.6459	
	0.7110			
	0.7244			
	0.7140			
	0.7187			
0.0717	0.8075	0.8048	1.6031	1.5969
	0.7405		1.5909	
	0.8254		1.5645	
	0.8296		1.5955	
	0.8075		1.5982	
	0.7996			

**Tabla 5.3 (Continuación)**

Diámetro de Partícula (cm)	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_a$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
0.0440	0.8810	0.8938	1.5156	1.5143
	0.8892		1.5106	
	0.8918		1.4527	
	0.8911		1.5167	
	0.8984		1.4897	
	0.8939			

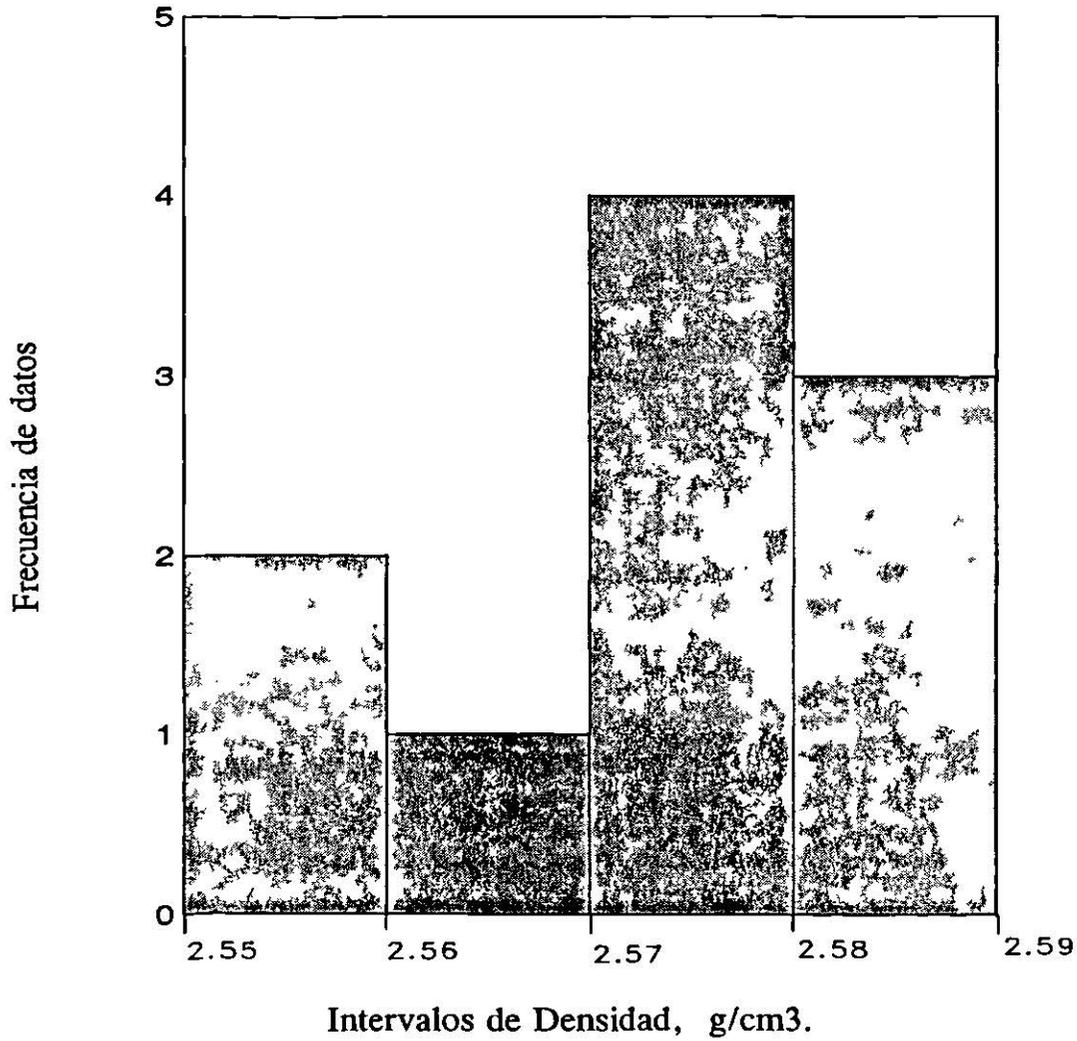


Figura 5.1 Gráfica de distribución de Frecuencia de la Densidad Aparente de la Partícula, Arena Sílica,  $d_p = 0.0506$  cm.

**Tabla 5.4 Valores Experimentales para Determinar el Diámetro Equivalente de las Partículas.**

Material	$d_p$ (cm)	Masa (g)	No. de Partículas	$V_T$ (cm <sup>3</sup> )	$V_P$ (cm <sup>3</sup> )	$d_e$ (cm)
Arena Sílica	0.1419	0.2350	89	$9.064 \times 10^{-2}$	$1.018 \times 10^{-3}$	0.1248
	0.0717	0.0394	61	$1.554 \times 10^{-2}$	$2.520 \times 10^{-4}$	0.0784
	0.0506	0.0168	70	$6.522 \times 10^{-3}$	$9.320 \times 10^{-5}$	0.0564
	0.0358	0.0183	153	$7.106 \times 10^{-3}$	$4.653 \times 10^{-5}$	0.0446
	0.0273	0.0111	187	$4.340 \times 10^{-3}$	$2.300 \times 10^{-5}$	0.0354
Carbón Activado	0.2007	0.2007	83	$2.870 \times 10^{-1}$	$3.458 \times 10^{-3}$	0.1876
	0.1419	0.1000	201	$1.337 \times 10^{-1}$	$6.650 \times 10^{-4}$	0.1083
	0.1000	0.1000	208	$1.409 \times 10^{-1}$	$6.773 \times 10^{-4}$	0.1089
	0.0717	0.0500	338	$6.213 \times 10^{-2}$	$1.838 \times 10^{-4}$	0.0705
	0.0440	0.0251	448	$2.808 \times 10^{-2}$	$6.268 \times 10^{-5}$	0.0493
Pirita	0.1419	0.5001	50	$1.394 \times 10^{-1}$	$2.788 \times 10^{-3}$	0.1746
	0.0717	0.1000	125	$2.828 \times 10^{-2}$	$2.262 \times 10^{-4}$	0.0756
	0.0506	0.0505	145	$1.414 \times 10^{-2}$	$9.769 \times 10^{-5}$	0.0571
	0.0358	0.0308	296	$8.696 \times 10^{-3}$	$2.937 \times 10^{-5}$	0.0382

#### 5.4 DATOS EXPERIMENTALES DE LA HIDRODINAMICA DE LECHOS FIJO Y FLUIDIZADO.

Todos los datos experimentales que se obtuvieron sobre la hidrodinámica de los lechos fijos y fluidizados se encuentran en las Tablas C.1 a C.55 (Ver Apéndice C). A continuación se describen las ecuaciones que se usaron en la manipulación de los datos experimentales para el calculo de la fracción hueca, la caída de presión total y la velocidad superficial.

Las fracciones huecas del lecho fijo y fluidizado se calcularon mediante las ecuaciones :

$$\varepsilon_o A_t h_o = A_t h_o - m / \rho_a \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_f A_t h_f = A_t h_f - m / \rho_a \quad (5.2)$$

donde :

$A_t$  = Area transversal de la columna , cm

$h_o$  = Altura inicial del lecho fijo , cm

$h_f$  = Altura del lecho fluidizado , cm

$m$  = Masa total del material , g

$\rho_a$  = Densidad aparente de la partícula , g/cm<sup>3</sup>

$\varepsilon_o$  = Porosidad del lecho fijo

$\varepsilon_f$  = Porosidad del lecho fluidizado

El primer término del lado derecho de las ecuaciones anteriores representa el volumen total ocupado por el lecho y el segundo término corresponde al volumen ocupado solamente por las partículas.

La caída de presión total en un lecho fijo o fluidizado se obtiene por la ecuación:

$$\Delta P = \frac{(\Delta P)_{\text{exp}} h}{L} \quad (5.3)$$

donde :

$h$  = Altura total que ocupa el material en el lecho , cm

$L$  = Distancia entre las tomas de presión , cm

$(\Delta P)_{\text{exp}}$  = Caída de presión indicada por el manómetro, Pulgadas

H<sub>2</sub>O

La velocidad superficial es la relación entre el gasto volumétrico y el área transversal de la columna :

$$U = \frac{\text{Gasto Volumétrico}}{\text{Area}} \quad (5.4)$$

A continuación se ejemplifican los cálculos con los datos experimentales de la arena sílica . Los datos que se usaron son del experimento 1-C y están en la Tabla C.10.

Lecho Fijo :

Utilizando los datos experimentales correspondientes al renglon 11 :

Diámetro de la columna = 2.54 cm.

Masa de la arena sílica = 144.3569 g

Gasto Volumétrico = 0.040 L/min

$\Delta P = 2.5$  in H<sub>2</sub>O

$h_o = 20.00$  cm

$\rho_a = 2.5759$  g/cm<sup>3</sup>

Enseguida se muestran los calculos de  $\epsilon_o$  ,  $\Delta P$  , y  $U$  usando las ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3), respectivamente.

Fracción hueca :

$$\epsilon_o = \frac{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4) (20.0 \text{ cm}) - (144.3569 \text{ g} / 2.5759 \text{ g} / \text{cm}^3)}{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4) (20.0 \text{ cm})} = 0.4470$$

Caída de presión total :

$$\Delta P = \frac{(2.5 \text{ in H}_2\text{O}) (20.0 \text{ cm})}{10.0 \text{ cm}} = 5.0 \text{ Pulgadas H}_2\text{O} = 1244.200 \text{ Pa}$$

Velocidad superficial :

$$U = \frac{(0.040 \text{ L / min})(1000 \text{ cm}^3)}{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4)(1 \text{ L})} = 7.894 \text{ cm / min}$$

Lecho Fluidizado :

Utilizando los datos experimentales correspondientes al renglon 20 :

Diámetro de la columna = 2.54 cm.

Masa de la arena sílica = 144.3569 g

Gasto Volumétrico = 0.195 L/min

$\Delta P = 2.7 \text{ in H}_2\text{O}$

$h_f = 25.6 \text{ cm}$

$\rho_a = 2.5759 \text{ g/cm}^3$

Fracción hueca :

$$\varepsilon_f = \frac{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4)(25.6 \text{ cm}) - (144.3569 \text{ g} / 2.5759 \text{ g / cm}^3)}{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4)(25.6 \text{ cm})} = 0.5679$$

Caída de presión total :

$$\Delta P = \frac{(2.7 \text{ in H}_2\text{O})(25.6 \text{ cm})}{10 \text{ cm}} = 6.912 \text{ in H}_2\text{O} = 1719.982 \text{ Pa}$$

Velocidad superficial :

$$U = \frac{(0.195 \text{ L / min})(1000 \text{ cm}^3)}{(2.54 \text{ cm})^2 (\pi / 4)(1 \text{ L})} = 38.483 \text{ cm / min}$$

Estos resultados se encuentran en los renglones 11 y 20 de la Tabla D.7 (Ver Apéndice D).

## 5.5 CALCULO DE LA VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION.

La Velocidad Mínima de Fluidización,  $U_{mf}$ , se evaluó por los dos métodos siguientes :

a) Método de la Caída de Presión. El procedimiento de cálculo consiste en graficar en escala log-log la caída de presión total contra la velocidad superficial del fluido. En un lecho fijo la caída de presión se incrementa con el aumento de la velocidad superficial del fluido, mientras que en un lecho fluidizado la caída de presión se mantiene constante. El punto de transición entre lecho fijo y lecho fluidizado es la Velocidad Mínima de Fluidización,  $U_{mf}$ .

Graficando  $\log \Delta P$  vs  $\log U$ , se observan las regiones de lecho fijo y lecho fluidizado y además se nota que los datos en cada región tienen un comportamiento lineal. Los datos experimentales de cada región se correlacionaron por una ecuación lineal y la intersección de estas dos líneas rectas corresponde a la Velocidad Mínima de Fluidización,  $U_{mf}$ . En las Figuras 5.2 a 5.7 se ilustra este método usando los datos experimentales de los experimentos: 1-C, 1-D, 1-AP, 4-BP, 1-BC y 1-EC que se encuentran en las Tablas C.10, C.15, C.21, C.28, C.40 y C.50, respectivamente.

b) Método de la Fracción Hueca. Este procedimiento se basa en que graficando  $\log U$  contra  $\log \epsilon$  se forman dos regiones.

En la región de lecho fijo la fracción hueca permanece constante y en la de lecho fluidizado la fracción hueca se incrementa linealmente con la velocidad del fluido. Los datos experimentales de cada región exhibieron un comportamiento lineal y se correlacionaron por una ecuación lineal, la intersección entre estas dos ecuaciones es la Velocidad Mínima de Fluidización,  $U_{mf}$ .

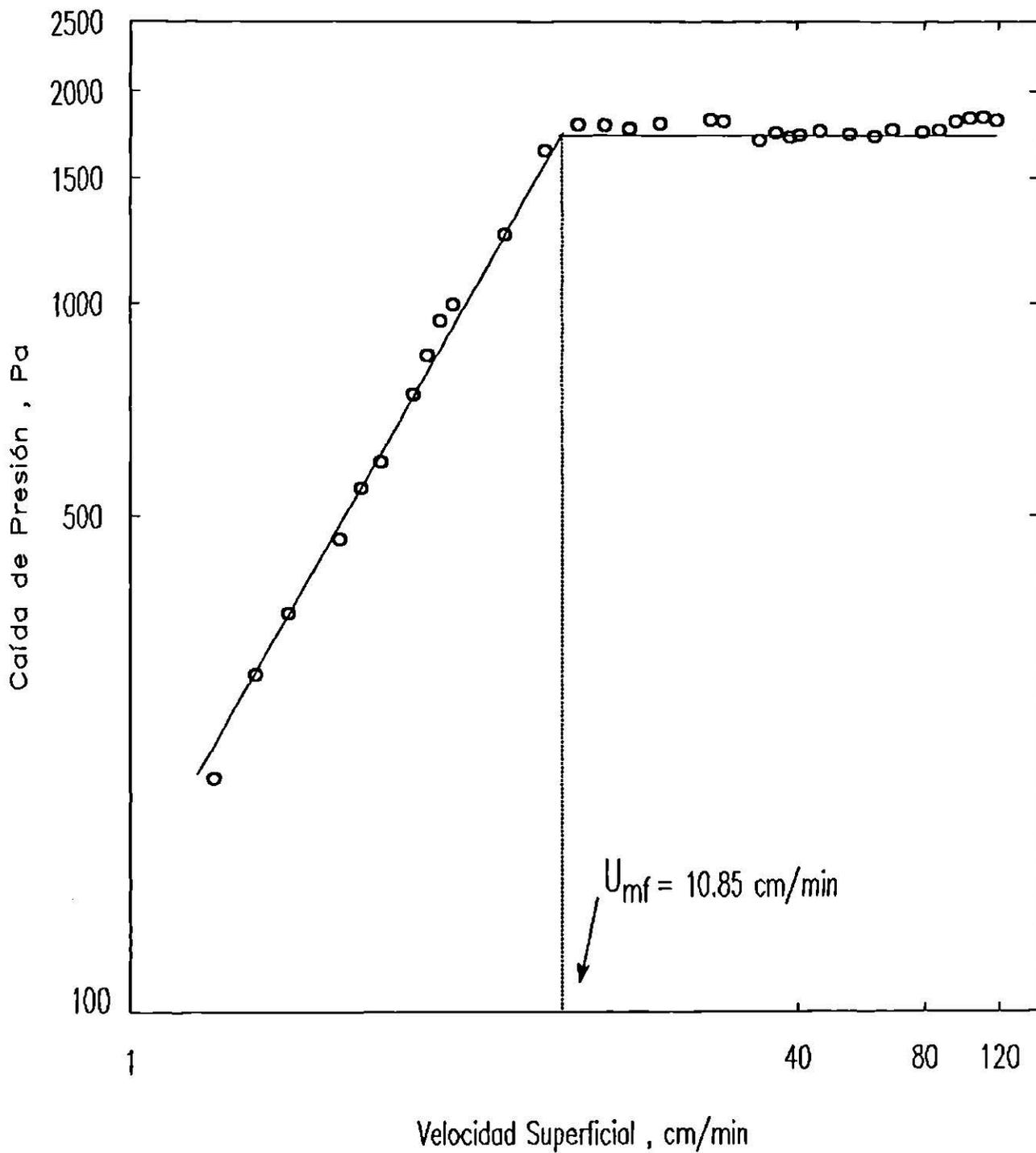


Figura 5.2 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Arena Sílica, Experimento 1-C,  $h_o=20.0$  cm,  $d_p=0.0506$  cm,  $d_T=2.54$  cm.

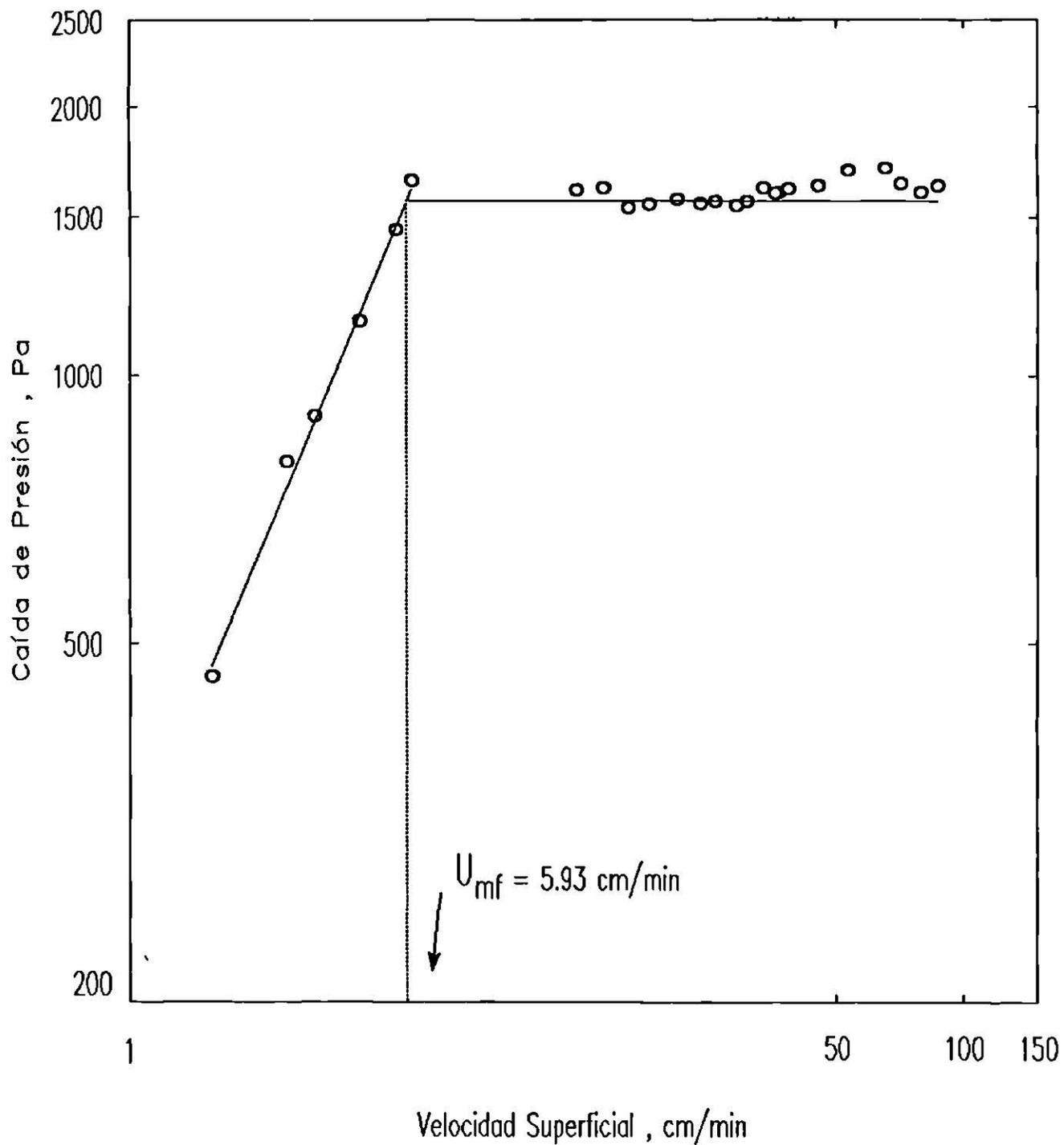


Figura 5.3 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Arena Sílica, Experimento 1-D,  $h_0=20.0 \text{ cm}$ ,  $d_p=0.0273 \text{ cm}$ ,  $d_T=2.54 \text{ cm}$ .

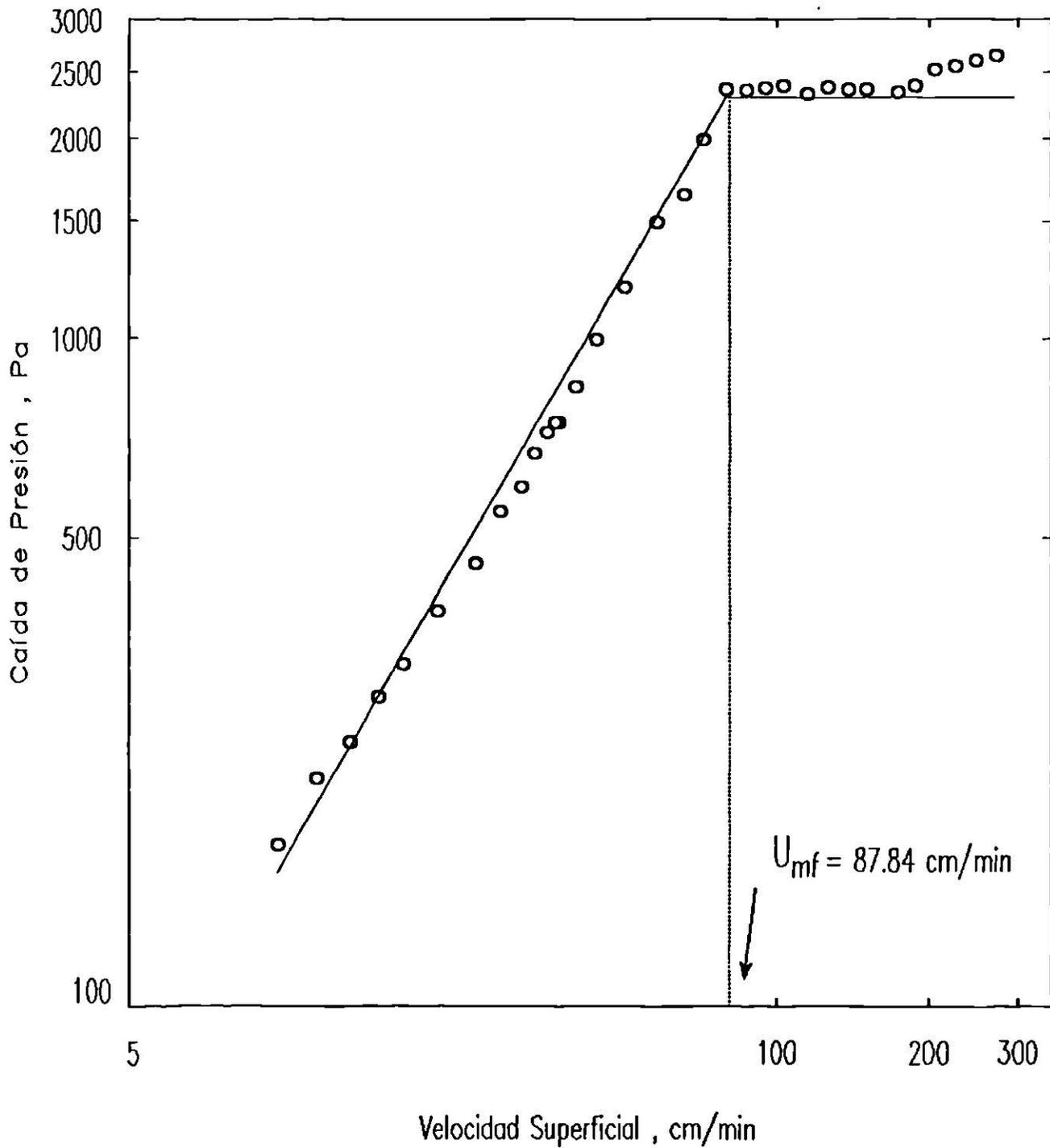


Figura 5.4 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Pirita, Experimento 1-AP,  $h_o=20.0$  cm,  $d_p=0.1419$  cm,  $d_T=2.54$  cm.

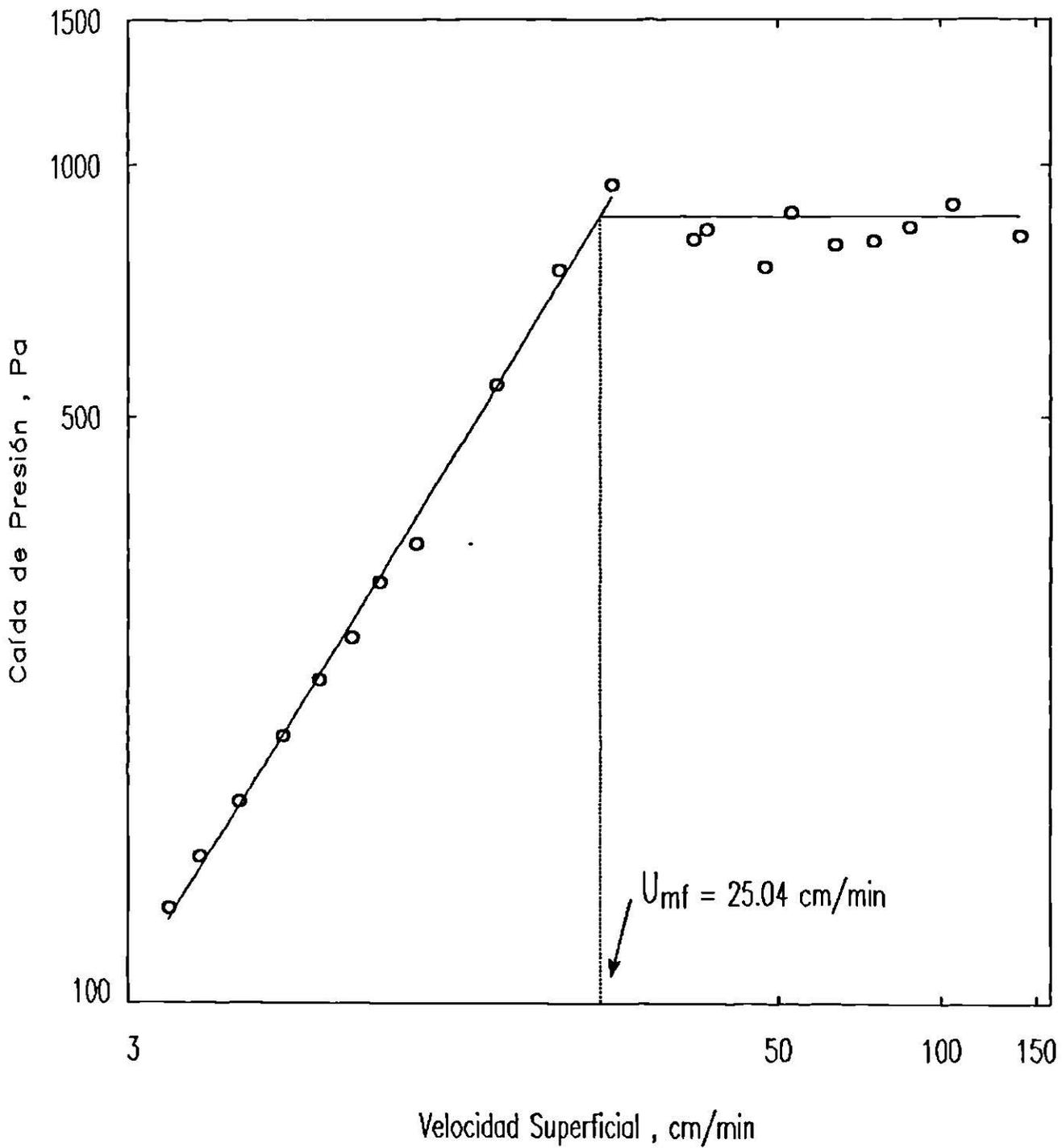


Figura 5.5 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Pirita, Experimento 4-BP,  $h_o = 10.0 \text{ cm}$ ,  $d_p = 0.0717 \text{ cm}$ ,  $d_T = 5.00 \text{ cm}$ .

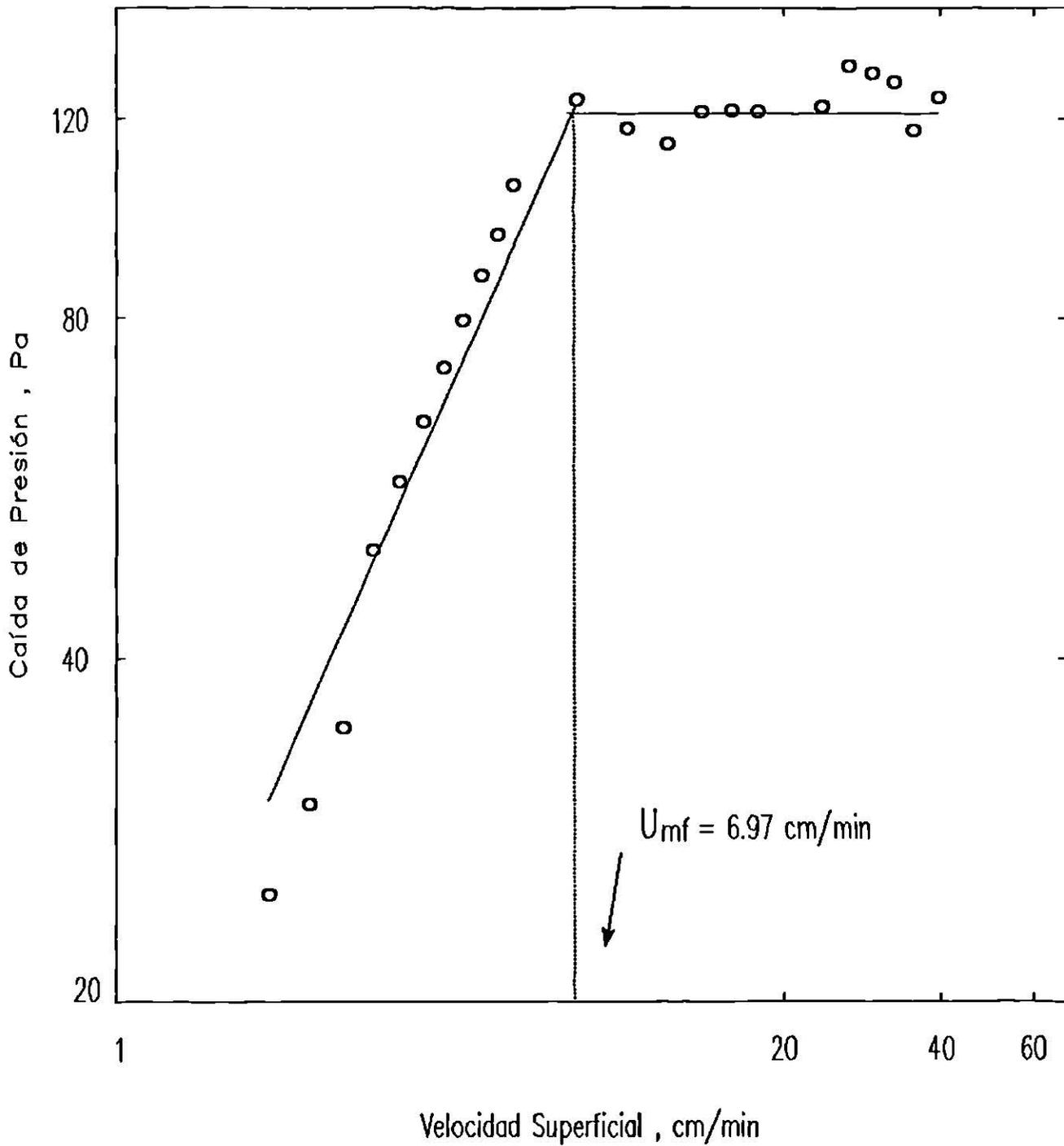


Figura 5.6 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Carbón Activado, Experimento 1-BC,  $h_o = 20.0 \text{ cm}$ ,  $d_p = 0.1419 \text{ cm}$ ,  $d_T = 2.54 \text{ cm}$ .

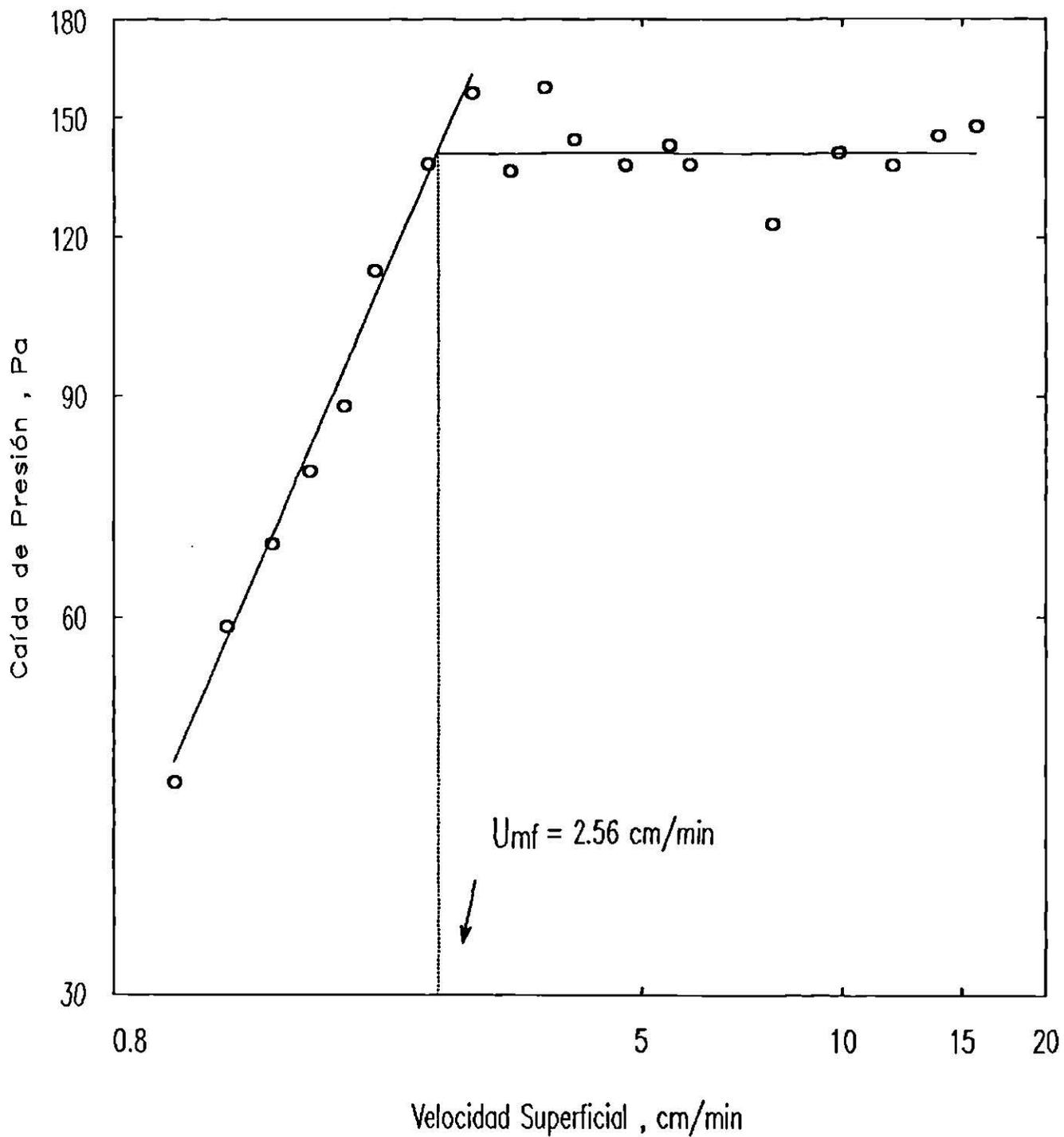


Figura 5.7 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Caída de Presión. Material Carbón Activado, Experimento 1-EC,  $h_o = 19.7 \text{ cm}$ ,  $d_p = 0.0440 \text{ cm}$ ,  $d_T = 2.54 \text{ cm}$ .

En las Figuras 5.8 a 5.13 se muestra este método usando los datos experimentales de los experimentos : 1-C, 1-D, 1-AP, 4BP, 1-BC y 1-EC que se encuentran en las Tablas C.10, C.15, C.21, C.28, C.40 y C.50, respectivamente.

Todos los valores experimentales de  $U_{mf}$  obtenidos por ambos métodos se encuentran en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5 Valores Experimentales de la Velocidad Mínima de Fluidización.**

No. de Exp.	Tipo de Material	$d_T$ (cm)	$d_p$ (cm)	$h_0$ (cm)	Método	
					$\Delta P$ vs U $U_{mf}$ (cm/min)	U vs $\epsilon$ $U_{mf}$ (cm/min)
1-A	Arena	2.54	0.1419	20.00	29.37	36.42
2-A	Sílica			40.00	49.60	42.76
4-A		5.00		20.00	36.03	42.13
1-B		2.54	0.0717	20.00	29.34	24.94
2-B				40.00	17.58	22.10
4-B		5.00		20.00	19.50	21.71
1-C		2.54	0.0506	20.00	10.84	12.47
2-C				39.40	9.59	11.91
4-C		5.00		20.00	11.72	11.70
5-C				40.00	10.21	11.77
1-D		2.54	0.0358	20.00	5.93	5.82
2-D				40.00	7.89	7.91
1-E			0.0273	20.00	3.03	4.28
2-E				40.00	4.07	4.61
	Pirita					
1-AP		2.54	0.1419	20.00	87.84	81.57
2-AP				40.00	76.47	77.66
4-AP		5.00		18.00	61.91	69.11
1-BP		2.54	0.0717	20.00	36.71	35.75
2-BP				37.00	32.25	37.67
4-BP		5.00		10.00	25.04	33.53
1-CP		2.54	0.0506	20.00	22.12	25.83
2-CP				40.00	18.06	24.47
4-CP		5.00		10.00	14.04	16.85
1-DP		2.54	0.0358	20.00	9.87	13.71

**Tabla 5.5 (Continuación).**

No. de Exp.	Tipo de Material	$d_T$ (cm)	$d_p$ (cm)	$h_o$ (cm)	Método	
					$\Delta P$ vs U $U_{mf}$ (cm/min)	U vs $\epsilon$ $U_{mf}$ (cm/min)
2-DP	Pirita	2.54		40.00	7.32	12.61
	Carbón					
1-AC	Activado	2.54	0.2000	20.00	19.76	20.81
2-AC				40.00	14.17	17.01
1-BC			0.1419	20.00	6.97	8.65
2-BC				40.00	9.63	10.31
4-BC		5.00		20.00	7.63	7.69
1-CC		2.54	0.1000	20.00	5.57	7.24
2-CC				40.00	5.62	6.59
4-CC		5.00		20.00	6.51	6.29
1-DC		2.54	0.0717	20.60	4.07	4.48
2-DC				40.00	4.32	4.78
4-DC		5.00		20.00	3.45	4.26
5-DC				40.00	3.76	4.45
1-EC		2.54	0.0440	19.70	2.56	3.27
2-EC				37.70	2.14	2.64

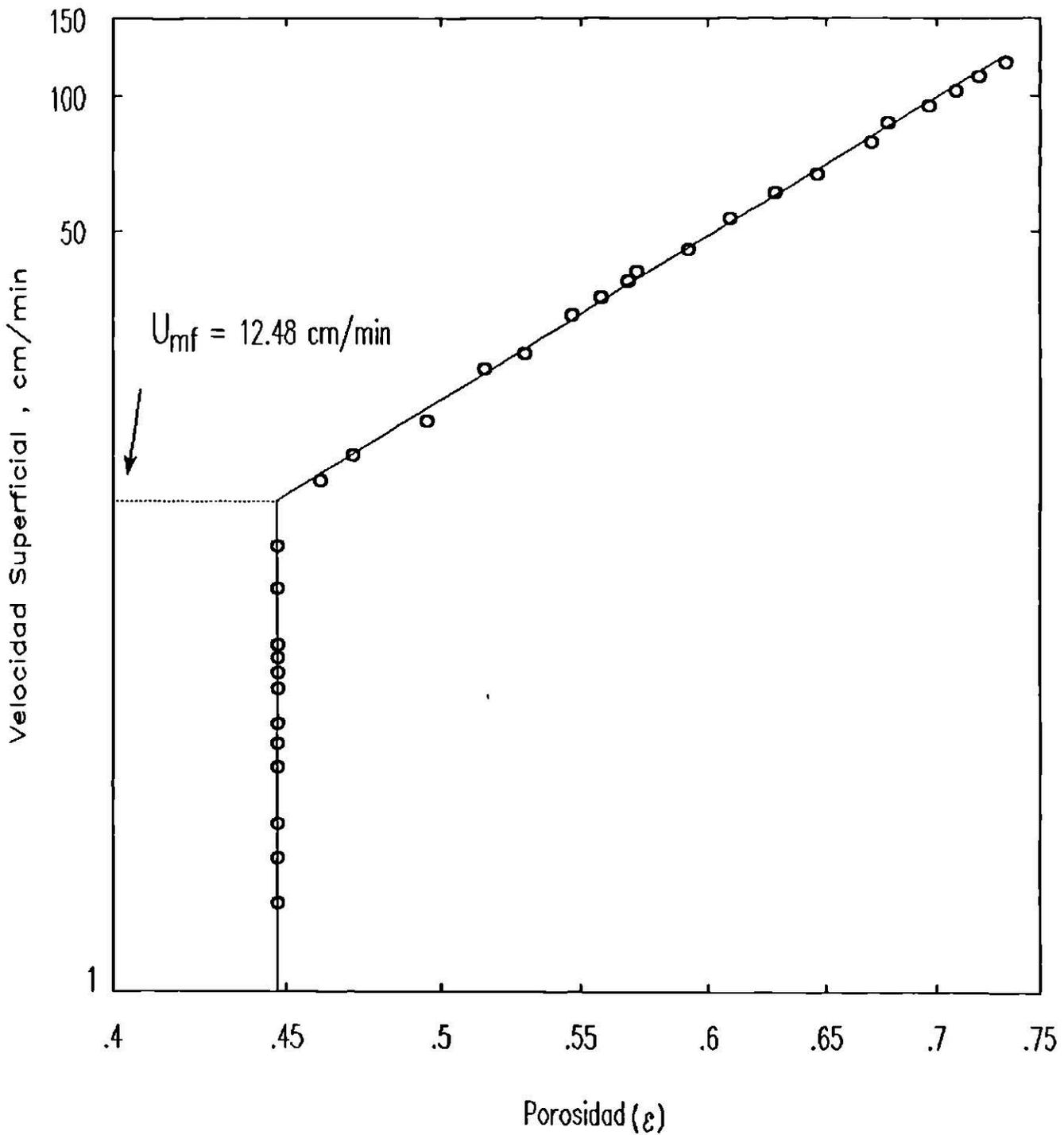


Figura 5.8 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Arena Sílica, Experimento 1-C,  $h_o=20.0 \text{ cm}$ ,  $d_p=0.0506 \text{ cm}$ ,  $d_T=2.54 \text{ cm}$ .

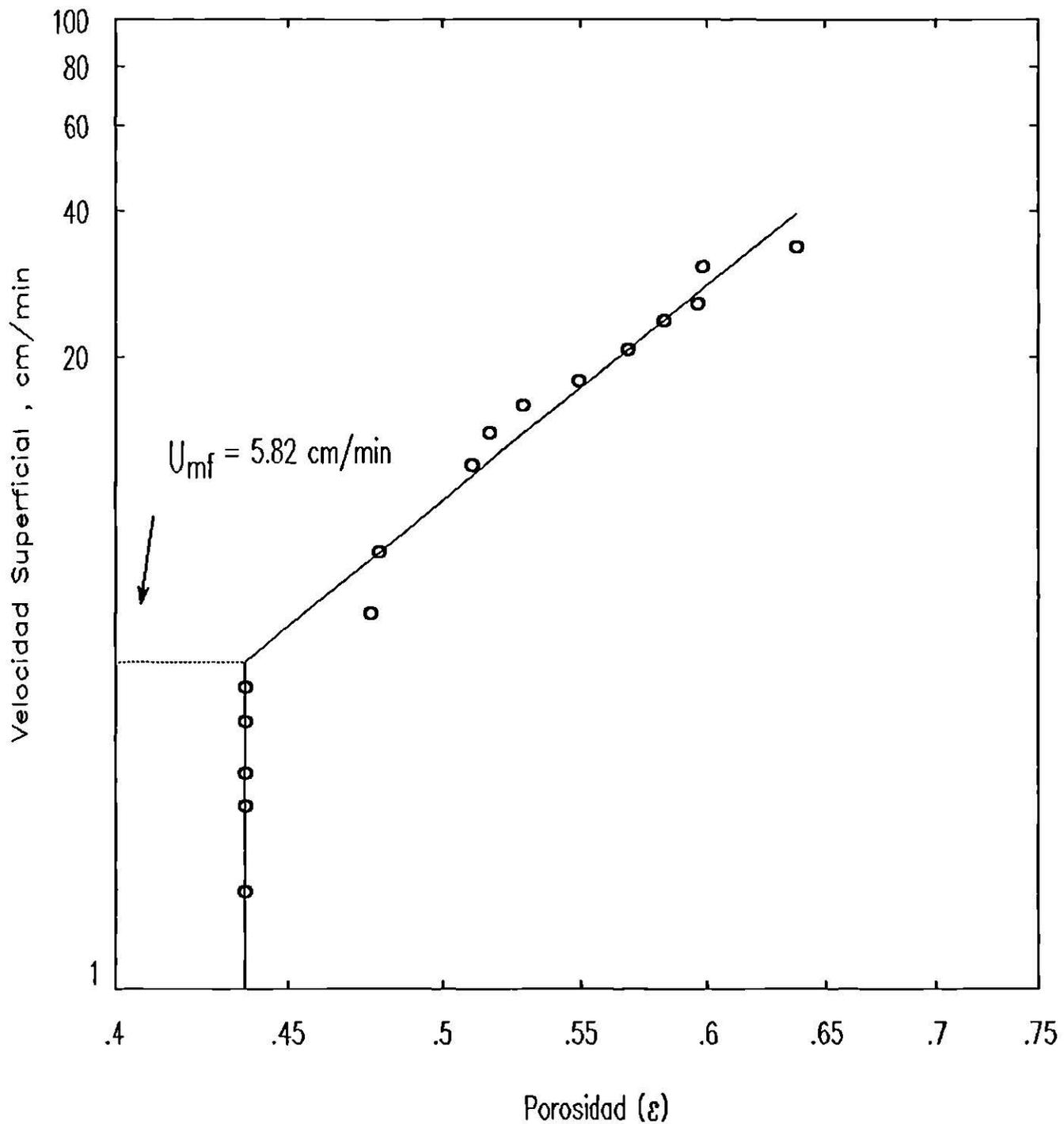


Figura 5.9 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Arena Sílica, Experimento 1-D,  $h_o=20.0$  cm,  $d_p=0.0273$  cm,  $d_T=2.54$  cm.

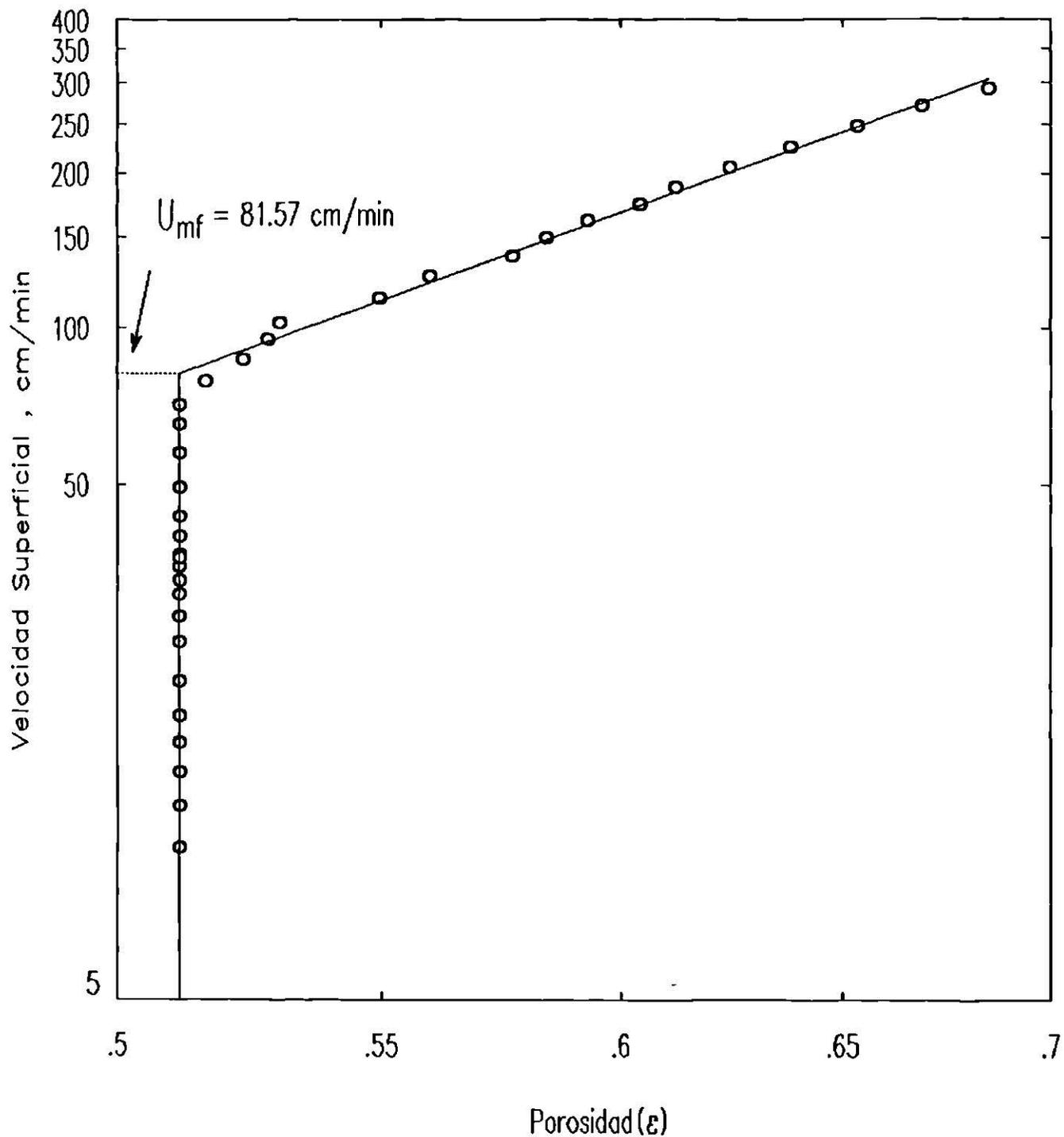


Figura 5.10 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Pirita, Experimento 1-AP,  $h_o=20.0 \text{ cm}$ ,  $d_p=0.1419 \text{ cm}$ ,  $d_T=2.54 \text{ cm}$ .

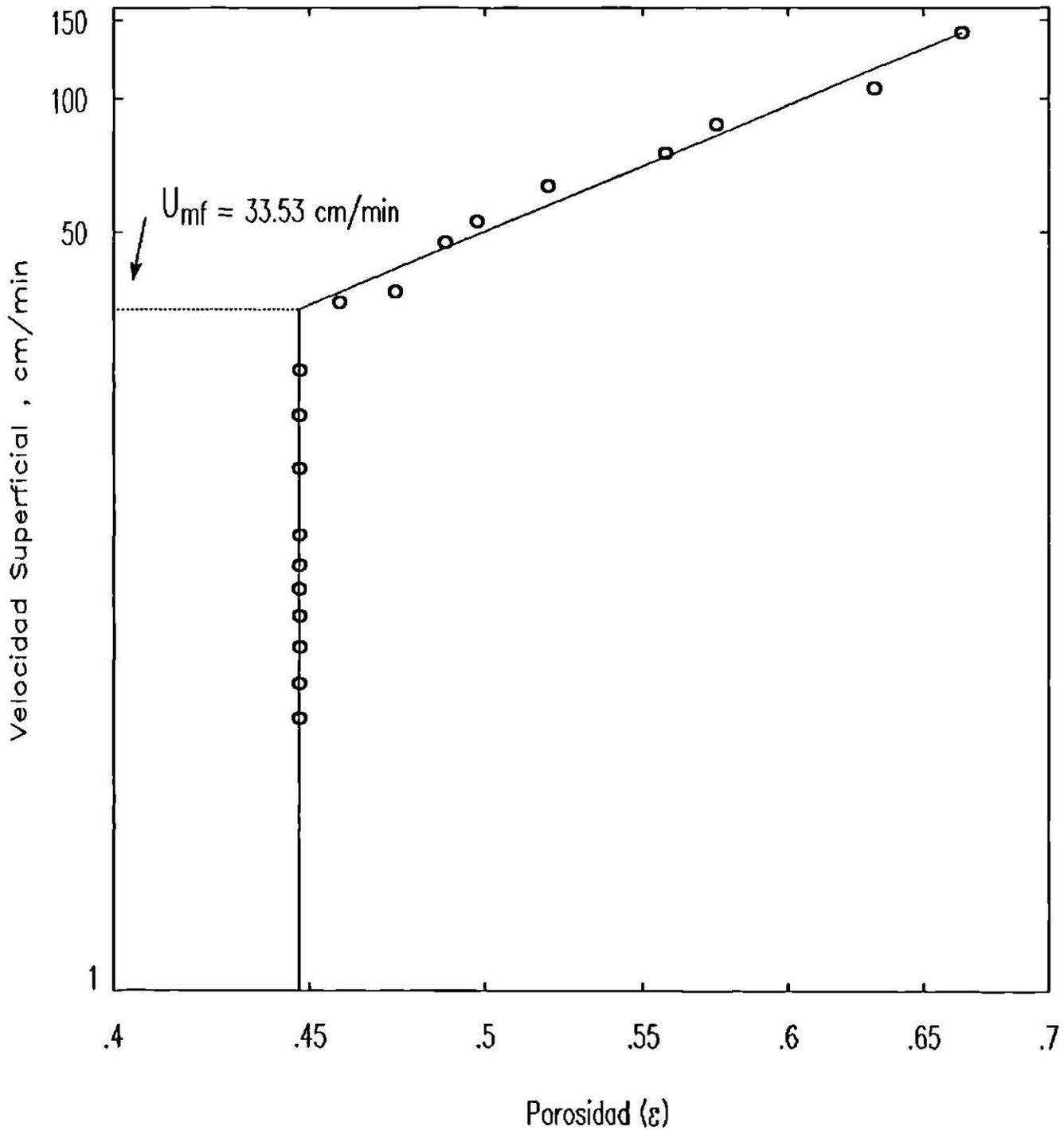


Figura 5.11 Cálculo de la Velocidad Mfima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Pirita, Experimento 4-BP,  $h_o = 10.0$  cm,  $d_p = 0.0717$  cm,  $d_T = 5.00$  cm.

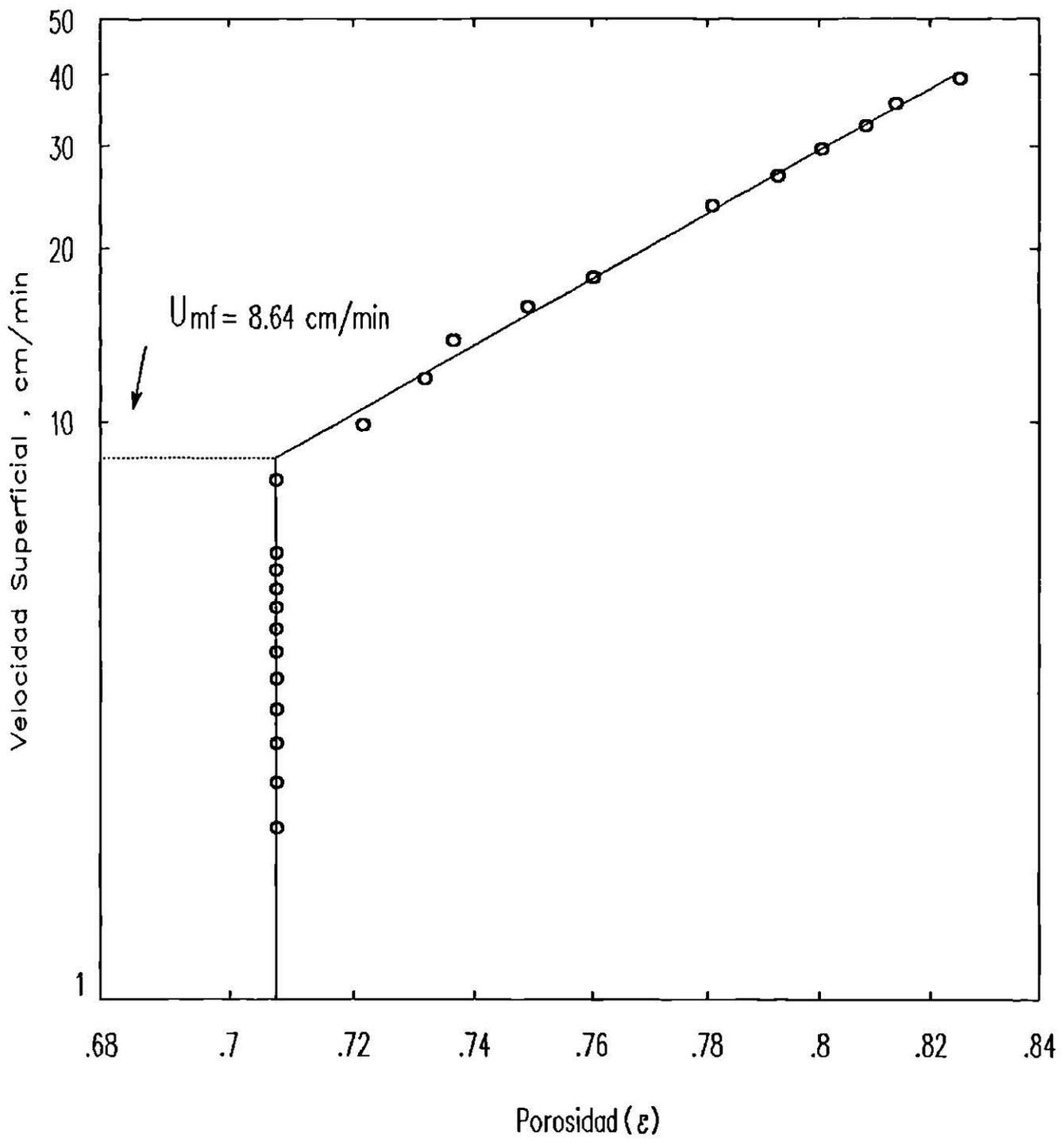


Figura 5.12 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Carbón Activado, Experimento 1-BC,  $h_o=20.0$  cm,  $d_p=0.1419$  cm,  $d_T=2.54$  cm.

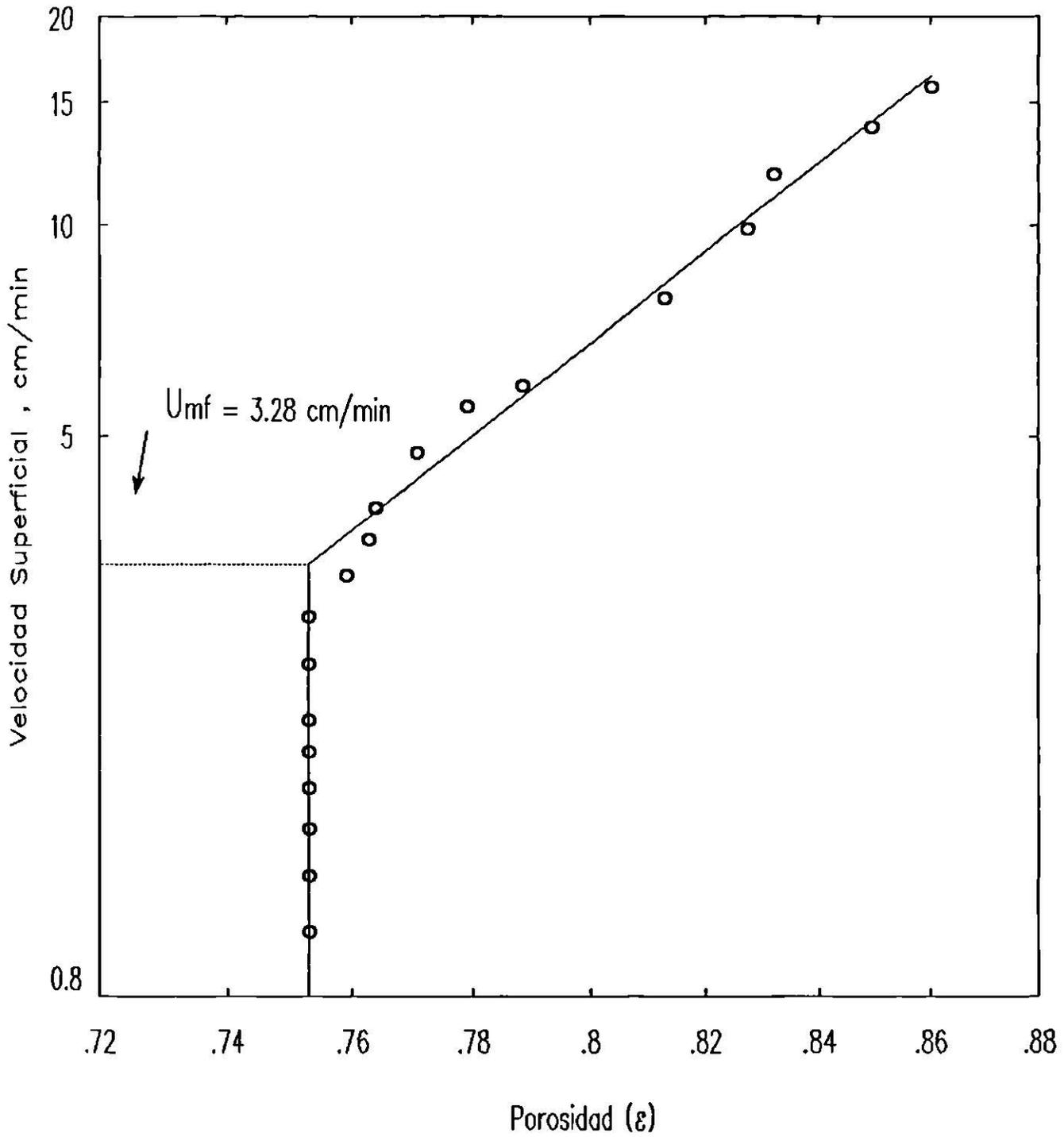


Figura 5.13 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización. Método de la Fracción Hueca. Material Carbón Activado, Experimento 1-EC,  $h_o=19.7 \text{ cm}$ ,  $d_p=0.0440 \text{ cm}$ ,  $d_T=2.54 \text{ cm}$ .

## 5.6 ESFERICIDAD DE LAS PARTICULAS

La esfericidad de las partículas de arena sílica, pirita y carbón activado fue calculada usando la ecuación propuesta por Casal, Lucas y Arnaldos (1985), derivada de la ecuación de Blake-Kozeny :

$$\frac{\Delta P}{L} = K \frac{U\mu(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3 d^2 \phi^2}$$

Para partículas irregulares los autores sugirieron que se use  $K = 180$ .

El procedimiento consiste en medir la caída de presión a diferentes velocidades del fluido en un lecho fijo. Si se grafica  $\Delta P/L$  contra  $K(U\mu / d^2)[(1 - \epsilon)^2 / \epsilon^3]$  y se obtiene una línea recta entonces a partir de la pendiente de esta línea recta,  $m$ , se calcula el factor de esfericidad :

$$m = \frac{1}{\phi}$$

Esta ecuación tiene validez para valores  $N_{Re} < 10$ .

En las Figuras 5.14 a 5.16 se ilustra este método usando los datos experimentales de los experimentos 3-C, 3-DP y 3-BC que se encuentran en las Tablas C.12, C.35 y C.41, respectivamente.

Los valores experimentales de  $\phi$  para todos los materiales empleados en este estudio a diferentes diámetros de partícula, se reportan en la Tabla 5.6.

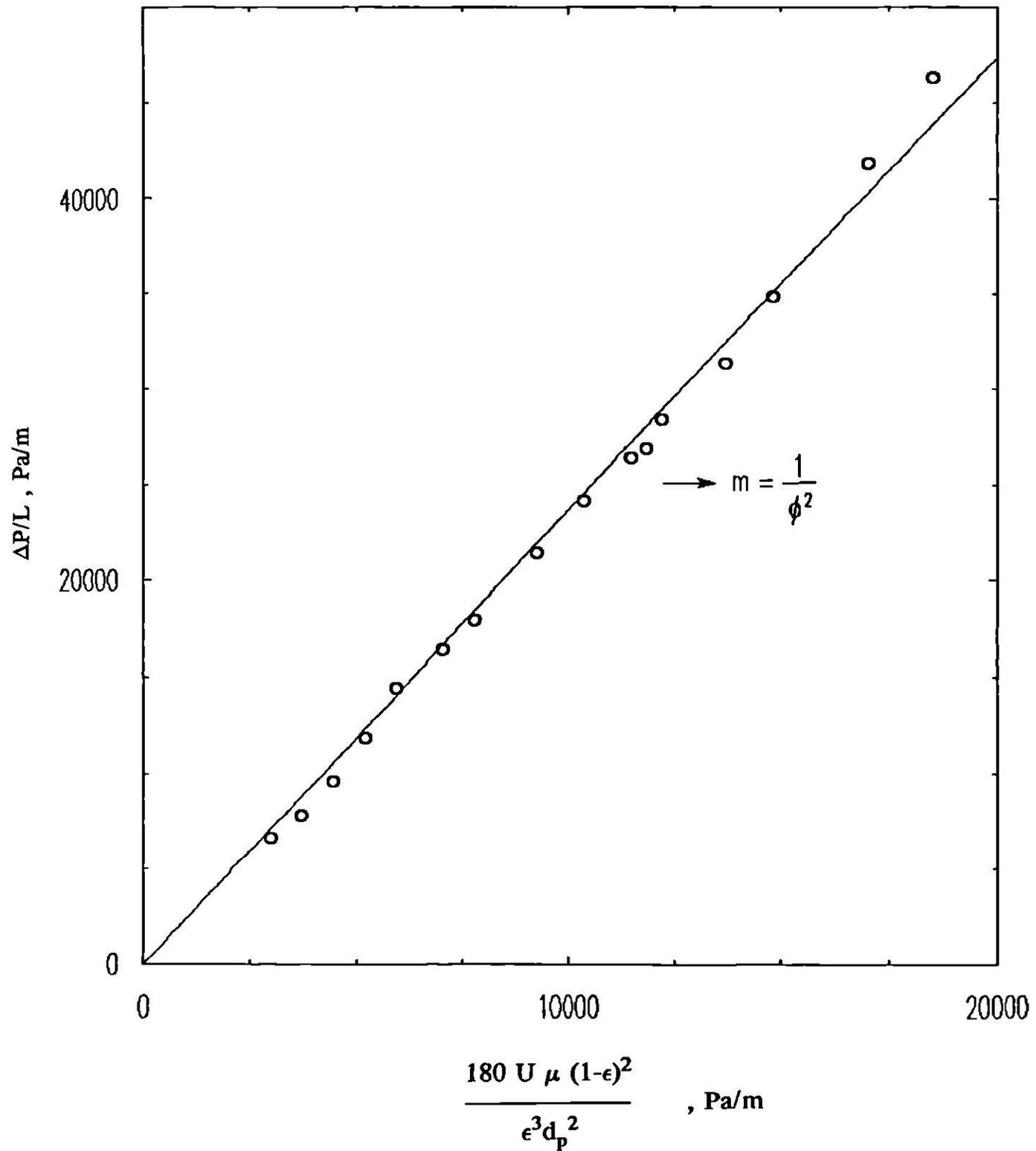


Figura 5.14 Esfericidad de las Partículas. Material Arena Sílica.  
 Experimento 3-C,  $d_p=0.0506 \text{ cm}$ ,  $h_o=40.0 \text{ cm}$ ,  
 $d_T=2.54 \text{ cm}$ , ( $N_{Re} > 10$ ).

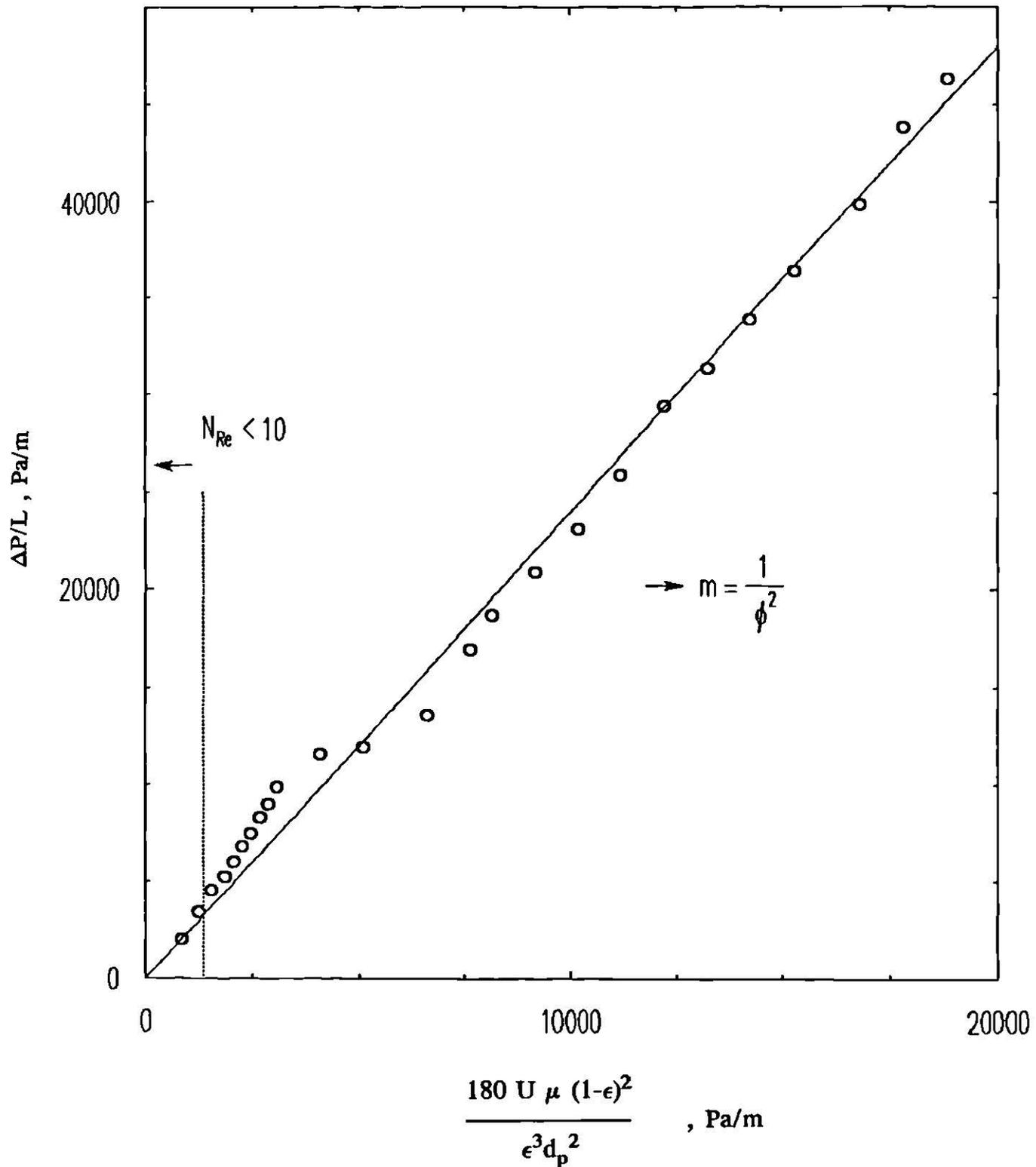


Figura 5.15 Esfericidad de las Partículas. Material Pirita,  
 Experimento 3-DP,  $d_p = 0.0358 \text{ cm}$ ,  $h_o = 40.0 \text{ cm}$ ,  
 $d_T = 2.54 \text{ cm}$ .

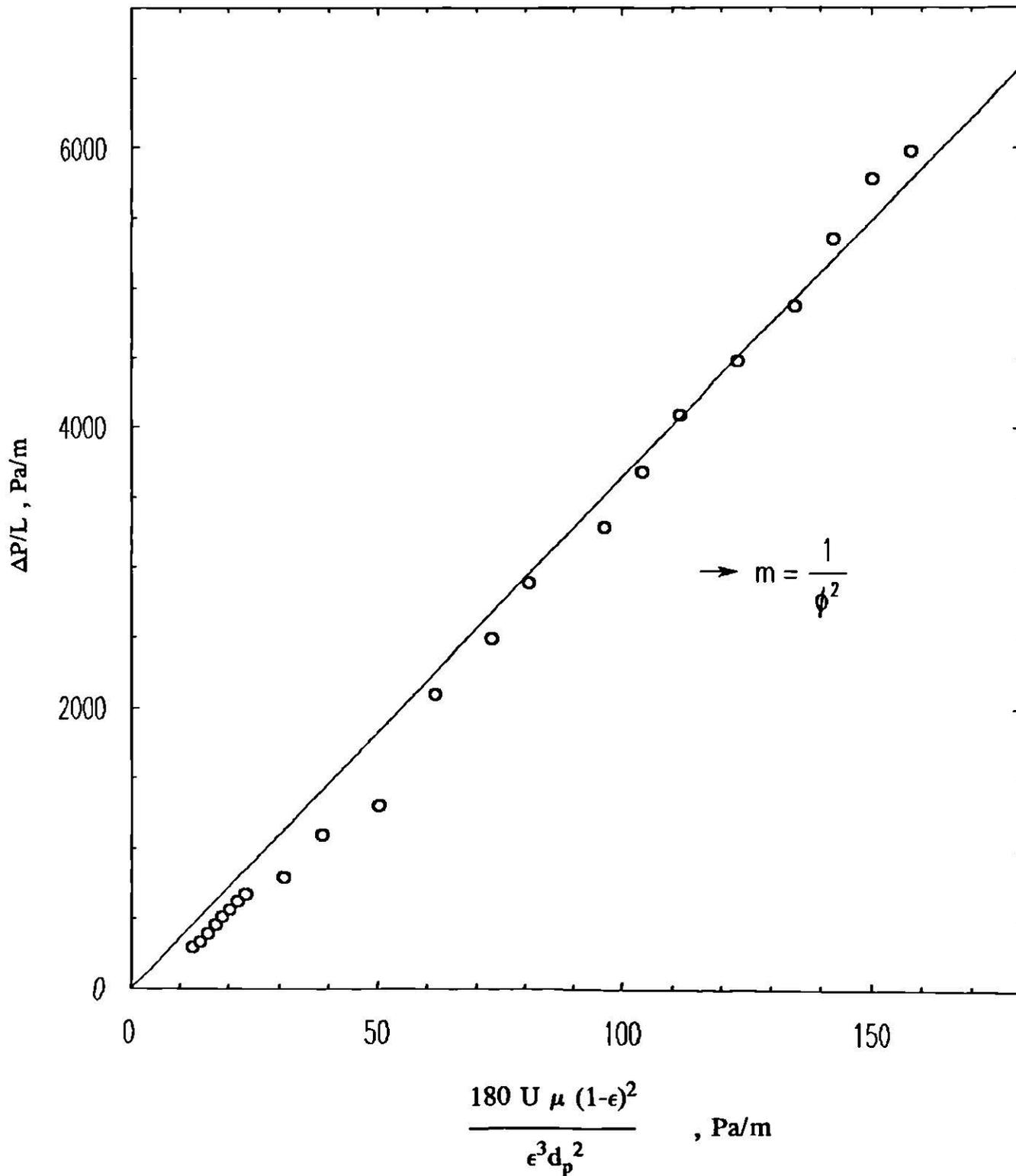


Figura 5.16 Esfericidad de las Partículas. Material Carbón Activado, Experimento 3-BC,  $d_p=0.1419$  cm,  $h_o=40.0$  cm,  $d_T=2.54$  cm, ( $N_{Re} > 10$ ).

**Tabla 5.6 Valores de la Esfericidad de las Partículas ,  $\phi$** 

Material	$d_p$ (cm)	Esfericidad , $\phi$
Arena Sílica	0.1419	0.4047
	0.0717	0.6093
	0.0506	0.6497
	0.0358	0.7964
	0.0273	0.9080
Pirita	0.1419	0.4675
	0.0717	0.7557
	0.0506	0.6780
	0.0358	0.6457
Carbón Activado	0.2007	0.1463
	0.1419	0.1654
	0.1000	0.2030
	0.0717	0.1985
	0.0440	0.2384

## 6. DISCUSION DE RESULTADOS

### 6.1 DATOS EXPERIMENTALES DE LA HIDRODINAMICA DEL LECHO FLUIDIZADO.

La hidrodinámica del lecho fluidizado se estudio realizando 19 experimentos usando arena sílica como empaque, 15 experimentos con pirita y 19 experimentos con carbón activado. Las condiciones de operación de estos experimentos se muestran en la Tabla C.1. (Ver Apéndice C). Para cada diámetro de partícula de los diferentes materiales se efectuaron experimentos a alturas iniciales de empaque de 20 y 40 cm. Se usaron dos columnas de diámetros de 2.54 cm y 5.00 cm y partículas de diámetro de 0.2000, 0.1419, 0.0717, 0.0506, 0.0440, 0.0358 y 0.0273 cm.

Los datos experimentales de la hidrodinámica del lecho fluidizado se obtuvieron en el equipo descrito en el Capítulo 3. En general la operación del equipo resulto muy aceptable. Las ligeras variaciones que se presentaron en el gasto volumétrico cuando se cambiaba el cabezal de la bomba se redujeron usando los rotámetros en los intervalos de medición de menor error experimental. Para el rotámetro de 0.005 a 0.03 L/min el intervalo de operación fue de 0.008 a 0.03 L/min y para el de 0.01 a 0.2 L/min fue de 0.05 a 0.2 L/min debido a que fuera de estos intervalos para ambos rotámetros se presentan porcentajes de desviaciones considerables. El uso de este equipo ofrece ventajas tales como facilidad de ensamble y adecuada distribución de las tomas de presión.

Las mediciones de la caída de presión para los experimentos de arena sílica y pirita estuvieron dentro del rango de 0.9 a 9.9 pulgadas H<sub>2</sub>O (223.95 a 2463.52 Pa), por lo cual no hubo problemas en la medicion pero para los experimentos usando carbón activado los intervalos de medición en ocasiones fueron menores a 0.1 pulgadas H<sub>2</sub>O (24.88 Pa) y en este caso se tuvieron dificultades en la medición. Otro de los problemas que presento el carbón activado, por ser esta una partícula muy ligera,  $\rho_p = 1.5105$  a  $1.5969$  g/cm<sup>3</sup>, es que algunas de las partículas efluyeron de la columna por las tomas de presión quedando estas atrapadas en las mangueras de los manómetros y ocasionando errores en la lectura de caída de presión y ligeras perdidas de masa. En el caso de arena sílica y pirita esto no sucedió porque estas partículas son más pesadas.

## 6.2 DENSIDAD DE LAS PARTICULAS

El procedimiento para evaluar la densidad de la partículas dio resultados satisfactorios. Los valores experimentales de la arena sílica se encuentran dentro del intervalo de 2.567 a 2.667 g/cm<sup>3</sup> y muestran una desviación promedio del 2.52 % con respecto a los valores reportados en la literatura (Ford, 1975) que son de 2.536 a 2.660 g/cm<sup>3</sup>. En la pirita los valores experimentales se encuentran en el intervalo de 3.450 a 3.571 g/cm<sup>3</sup> y la desviación promedio es de 40.64% en comparación con los valores reportados en la literatura (Ford, 1975) y que son de 4.95 a 5.10g/cm<sup>3</sup>. Los valores experimentales de la partícula de carbón activado estan dentro del intervalo de 1.5105 a 1.6251 g/cm<sup>3</sup> y muestran una desviación promedio de 3.47% con respecto al valor de 1.518 g/cm<sup>3</sup> reportado en la literatura (Ford, 1975).

## 6.3 DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS

Los valores experimentales de la densidad aparente de arena sílica estan dentro del intervalo de 2.557 a 2.593 g/cm<sup>3</sup> y la desviación promedio es de 3.31% con respecto al valor reportado en la literatura (Ford, 1975) de 2.66 g/cm<sup>3</sup>. La densidad aparente de las partículas de pirita se encuentran en el intervalo de 2.535 a 3.587 g/cm<sup>3</sup> mostrando una desviación promedio de 40.17% comparando con el valor de 5.10 g/cm<sup>3</sup> reportado en la literatura (Ford, 1975). Los datos experimentales de la densidad aparente del carbón activado estan en el intervalo de 0.669 a .894 g/cm<sup>3</sup> la desviación promedio es de 40.82% respecto a los valores de 1.26 a 1.37 g/cm<sup>3</sup> reportados en la literatura (Ford, 1975). Los resultados siguientes indican que el procedimiento para evaluar la densidad aparente de las partículas es el adecuado.

#### 6.4 CAIDA DE PRESION EN EL LECHO.

Los resultados de la caída de presión vs. velocidad superficial muestran el comportamiento esperado de la caída de presión en lechos empacados y fluidizados, este comportamiento se ilustra en las Figuras 5.2 a 5.6. Para lechos fijos la caída de presión aumenta linealmente con el aumento de la velocidad superficial y la región del lecho fluidizado debe presentar un comportamiento de  $\Delta P$  constante con el incremento de la velocidad superficial.

Los datos experimentales que se graficaron en las Figuras 5.2 a 5.6 muestran un comportamiento ligeramente diferente al comportamiento ideal. Al inicio de la fluidización, es decir, al alcanzar la velocidad mínima de fluidización la caída de presión aumenta ligeramente y posteriormente disminuye ligeramente hasta mantenerse constante. Este efecto se atribuye a que las partículas más pequeñas se fluidizan primero y se encuentran en la capa superior del lecho mientras que las más grandes están en la parte inferior. Este efecto es muy suave ya que en todos los experimentos se procuro que el diámetro de partícula promedio no variará significativamente con respecto a los diámetros de partícula mínimo y máximo de las mallas usadas en el tamizado.

En cada experimento se analizó el aumento de la masa total del empaque (arena sílica, pirita y carbón activado) y se determinó que al aumentar la masa del empaque se aumenta la caída de presión total del sistema aunque la caída de presión por unidad de longitud es independiente de la cantidad de masa empacada.

#### 6.5 POROSIDAD DEL LECHO.

En las Figuras 5.8 a 5.13 se representan los datos experimentales de la velocidad superficial,  $U$ , vs. la fracción hueca,  $\epsilon$ , el comportamiento de estos datos corresponde al de lechos empacados y fluidizados.

En estas gráficas se nota que la fracción hueca permanece constante en el lecho fijo, y al alcanzar la velocidad mínima de fluidización, la fracción hueca aumenta de manera lineal con la velocidad superficial. Este cambio de región no ocurre puntualmente sino paulatinamente. En el cambio de región se nota cierta curvatura, este efecto se debe a la distribución de tamaños de partícula en el lecho; es decir, las partículas ligeramente más pequeñas se fluidizan primero. Por lo tanto la velocidad mínima de fluidización es una función del tamaño de partícula.

## 6.6 ESFERICIDAD DE LAS PARTICULAS.

La esfericidad de las partículas se evaluó por el método propuesto por Casal y colaboradores (1985). En las Figuras 5.14 a 5.16 se observa el comportamiento lineal reportado en dicho método. El límite de aplicación de esta ecuación es  $N_{Re} < 10$ .

En los experimentos realizados con partículas de arena sílica (diámetros de 0.1419, 0.0717, 0.0506 y 0.0358 cm), pirita (diámetros de 0.1419, 0.0717 y 0.0506 cm) y carbón activado (diámetros de 0.2001 y 0.1419), el método anterior se usó aún a pesar de que el  $N_{Re} > 10$ . En estos casos también se observó un comportamiento lineal y por esta razón se considera que se puede aplicar el método sugerido por Casal y colaboradores (1985).

En la Figura 6.1 se muestra gráficamente la esfericidad vs. porosidad para los datos reportados por Brown (1955), Serrato (1993) y los datos obtenidos en este estudio, se observó que los datos se encuentran dentro del intervalo de valores reportado en la literatura. La esfericidad de la arena sílica tiende a la unidad a medida que el diámetro de la partícula disminuye (Ford, 1975) y en las partículas de pirita y carbón activado esto no sucede porque las primeras tienen una forma cúbica y las segundas una forma muy irregular.

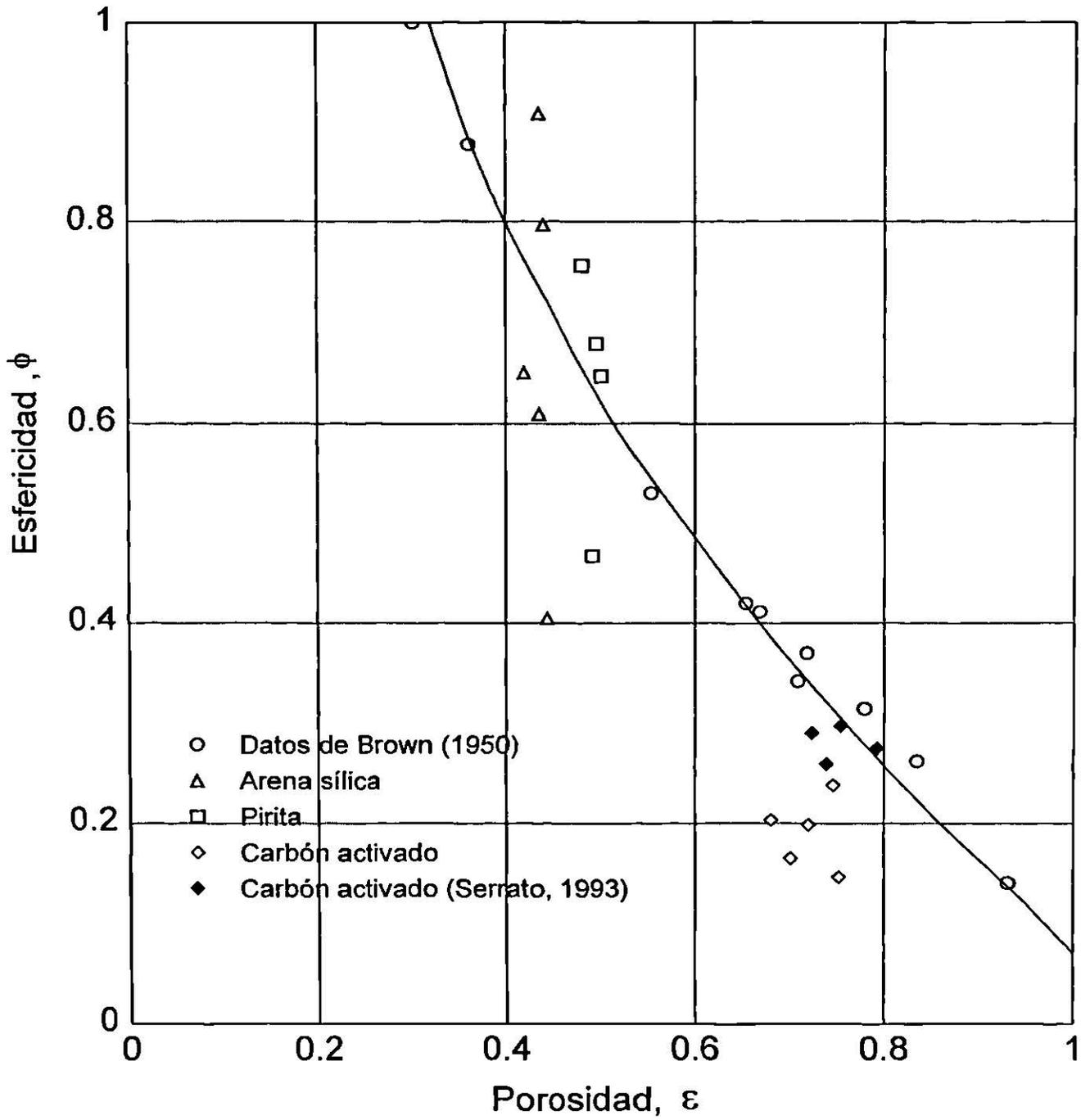


Figura 6.1 Esfericidad de Partículas Irregulares vs. Porosidad del Lecho Empacado.

## 6.7 VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION.

En la Tabla 5.5 se reportan los resultados experimentales de la velocidad mínima de fluidización,  $U_{mf}$ , evaluada por los dos métodos empleados. Ambos métodos dieron resultados ligeramente diferentes.

En el método de la caída de presión contra la velocidad superficial no se puede asegurar que exista un punto en el cual ocurra la máxima caída de presión, pues esta región de transición de lecho fijo a lecho fluidizado exhibe una ligera curvatura, como se observa en las Figuras 5.2 a 5.7. La linealización de los datos experimentales elimina la curvatura, pero no se puede afirmar que la velocidad mínima de fluidización evaluada por este método sea más exacta.

En el método de la fracción hueca, la zona de transición de lecho fijo a lecho fluidizado presenta variaciones menores que en el otro método. La linealización de los datos experimentales en este método muestra que la velocidad mínima de fluidización se puede evaluar con un error menor que en el método de la caída de presión. Como se observa en la Tabla 5.5 los valores de  $U_{mf}$  obtenidos por ambos métodos no difieren entre sí significativamente.

La velocidad mínima de fluidización se determinó variando el diámetro de partícula, la densidad de la partícula, la masa de empaque y el diámetro de la columna con el fin de estudiar el efecto que tienen estas variables sobre la  $U_{mf}$ . Se observó que la velocidad mínima de fluidización no es afectada por la cantidad de masa de empaque en el lecho pero si es afectada por el diámetro de la partícula y diámetro de la columna. La  $U_{mf}$  disminuye levemente con el aumento del diámetro de la columna, esto se debe a que entre mayor sea el diámetro de la columna, las partículas tienen menor contacto con las paredes de la columna y por lo tanto la fricción entre las partículas y pared disminuye.

La densidad y diámetro de la partícula afectan a la  $U_{mf}$ . Al disminuir la densidad ó el diámetro, la  $U_{mf}$  también disminuye. Esto es obvio ya que al disminuir la densidad o el diámetro de partícula se reduce la masa de la partícula y entre más ligera sea la partícula menor es la fuerza que se requiere para fluidizarla.

Para comparar los datos experimentales de  $U_{mf}$  con los que predicen las correlaciones de la literatura, se emplearon los datos obtenidos por el método de la fracción hueca que como ya se mencionó se considera que tienen un menor porciento de error.

En primer lugar se usaron las ecuaciones de Bourgeois y Greiner (1968), Riba y colaboradores (1978) y Narsimham (1965) y se encontró que estas correlaciones sobrestiman bastante los valores experimentales de  $U_{mf}$  ya que se obtuvieron porcientos de desviación promedio de 782.5%, 186.6% y 161.1%, respectivamente. Estas tres correlaciones fueron desarrolladas para partículas esféricas y de diámetros pequeños y por esta razón muestran desviaciones muy importantes.

Los datos experimentales también se compararon con los valores que predice la ecuación de Wen y Yu (Ec. 2.3) y con esta correlación se obtuvo un porciento de desviación promedio del 85.0 %. Los resultados se muestran en la Tabla 6.1 y se graficaron en la Figura 6.2. Al comparar gráficamente la correlación se nota que es bastante aceptable para las partículas de diámetros de 0.0717, 0.0506 y 0.0358 cm para los tres tipos de materiales, y los datos experimentales del carbón activado exhiben mayor desviación probablemente porque estas partículas tienen una forma muy irregular.

La esfericidad y porosidad de las partículas son variables que no intervienen en la ecuación de Wen y Yu ya que estos autores propusieron dos correlaciones de estos dos parametros. Estas ecuaciones fueron obtenidas correlacionando datos experimentales y son las ecuaciones 2.4 y 2.5.

**Tabla 6.1 Comparación de la Velocidad Mínima de Fluidización Calculada por la Ecuación de Wen y Yu y Experimental.**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	Wen y Yu (cm/min)	%Error*
1-A	2.54	0.1419	36.4140	87.3692	-139.9%
2-A			42.7620	89.5024	-109.3%
4-A	5.00		42.1260	89.9348	-113.5%
1-B	2.54	0.0717	24.9420	31.0495	-24.5%
2-B			22.0980	28.4941	-28.9%
4-B	5.00		21.7140	30.2050	-39.1%
1-C	2.54	0.0506	12.4740	14.4839	-16.1%
2-C			11.9100	14.8230	-24.5%
4-C	5.00		11.7060	15.8741	-35.6%
5-C			11.7660	14.1357	-20.1%
1-D	2.54	0.0358	5.8200	7.7036	-32.4%
2-D			7.9140	7.1634	9.5%
1-E		0.0273	4.2840	3.8235	10.8%
2-E			4.6140	4.5229	2.0%
1-AP		0.1419	87.8400	120.9232	-37.7%
2-AP			76.4700	119.1779	-55.8%
4-AP	5.00		61.9080	117.4724	-89.8%
1-BP	2.54	0.0717	36.7080	41.5828	-13.3%
2-BP			32.2500	40.6459	-26.0%
4-BP	5.00		25.0380	38.8172	-55.0%
1-CP	2.54	0.0506	22.1220	21.1410	4.4%
2-CP			18.0600	20.6547	-14.4%
4-CP	5.00		14.0400	19.1745	-36.6%
1-DP	2.54	0.0358	9.8700	11.2777	-14.3%
2-DP			7.3200	11.0105	-50.4%
1-AC		0.2000	20.8080	54.9182	-163.9%
2-AC			17.0100	54.9182	-222.9%
1-BC		0.1419	8.6520	37.0935	-328.7%
2-BC			10.3080	35.6043	-245.4%
4-BC	5.00		7.6920	35.6043	-362.9%
1-CC	2.54	0.1000	7.2420	20.6271	-184.8%
2-CC			6.5880	19.2363	-192.0%
4-CC	5.00		6.2880	19.6915	-213.2%

$$\%Error = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

**Tabla 6.1 (Continuación)**

No. de Exp.	$d_T$ (cm)	$d_p$ (cm)	$(U_{mf})_{exp}$ (cm/min)	Wen y Yu (cm/min)	%Error*
1-DC	2.54	0.0717	4.4820	10.6992	-138.7%
2-DC			4.7820	9.6977	-102.8%
4-DC	5.00		4.2600	9.9399	-133.3%
5-DC			4.4520	9.4485	-112.2%
1-EC	2.54	0.0440	3.2700	3.2680	0.1%
2-EC			2.6400	3.3540	-27.0%
1-AL		0.2010	27.5100	59.7635	-117.2%
2-AL		0.1410	24.6396	37.9885	-54.2%
3-AL		0.1000	16.5096	21.7294	-31.6%
4-AL		0.0440	4.6200	3.9604	14.3%
5-AL	5.00	0.2010	24.3300	59.7635	-145.6%
6-AL		0.0440	2.9900	3.9604	-32.5%

\* 
$$\%Error = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

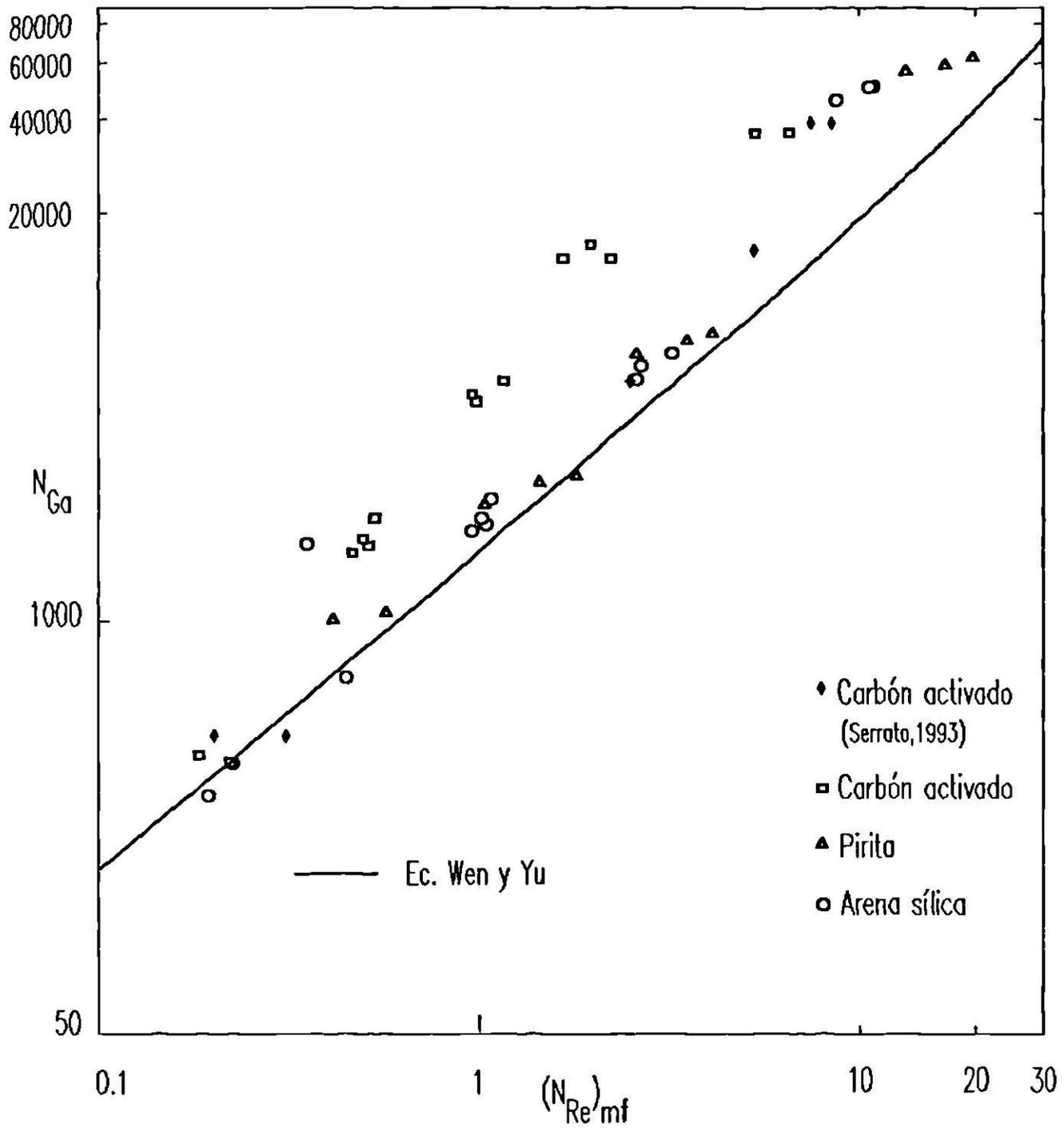


Figura 6.2 Comparación entre el  $(N_{Re})_{mf}$  Experimental y el Calculado por la Ec. de Wen y Yu.

Con el objeto de analizar si la desviación promedio de la ecuación de Wen y Yu era causada por las correlaciones de  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  los datos experimentales de  $\epsilon_{mf}$  vs.  $\phi_s$  se correlacionaron por las ecuaciones siguientes:

$$1 - \epsilon_{mf} = K_1 \phi_s^2 \epsilon_{mf}^3 \quad (6.1)$$

$$\frac{1}{\phi_s} = K_2 \epsilon_{mf}^3 \quad (6.2)$$

Estas ecuaciones son similares a las ecuaciones propuestas por Wen y Yu (1966). Los valores de las constantes  $K_1$  y  $K_2$  se calcularon por el método de mínimos cuadrados que usa el algoritmo de Rosenbrock, los valores obtenidos son los siguientes:

$$K_1 = 14.69$$

$$K_2 = 14.20$$

Los valores de  $K_1$  y  $K_2$  reportados por Wen y Yu son 11 y 14, respectivamente y como se nota estos valores están cercanos a los obtenidos en este estudio.

En las Figuras 6.3 y 6.4 se graficaron las ecuaciones obtenidas por Wen y Yu (Ecuaciones 2.4 y 2.5) y las ecuaciones sugeridas en este estudio (6.1 y 6.2). Como se puede observar en estas Figuras las diferencias entre estas ecuaciones no son muy significativas. Por lo tanto se puede concluir que las ecuaciones entre  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  propuestas por Wen y Yu correlacionan también adecuadamente los resultados obtenidos en este estudio.

En base a lo anterior se sugieren las dos ecuaciones siguientes que están basadas, al igual que la ecuación de Wen y Yu, en la ecuación de caída de presión de Ergun:

$$N_{Ga} = a(N_{Re})_{mf}^2 + b(N_{Re})_{mf} \quad (6.3)$$

$$N_{Ga} = 24.5(N_{Re})_{mf}^2 + b'(N_{Re})_{mf} \quad (6.4)$$

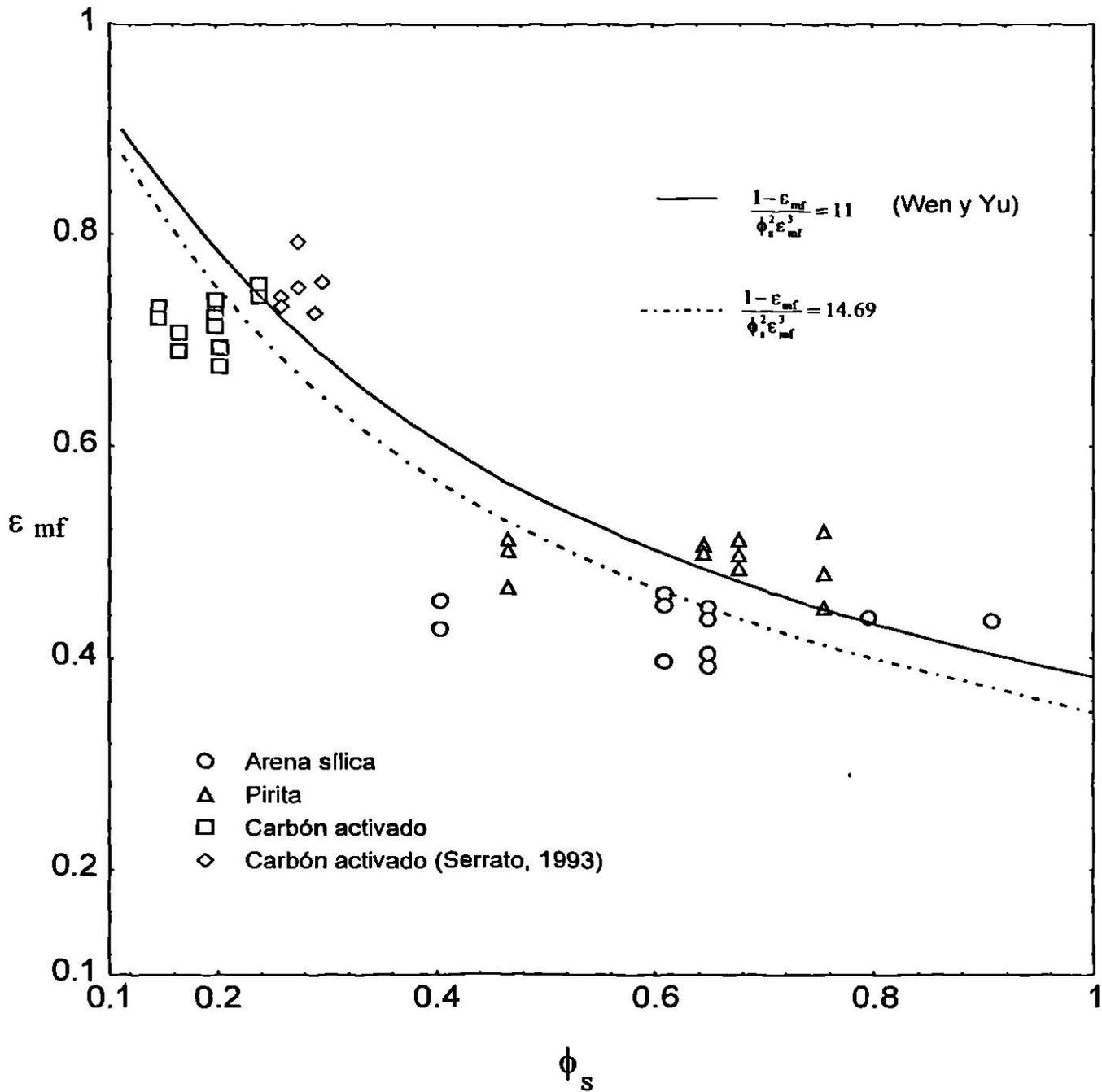


Figura 6.3 Relación entre  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  Propuesta por Wen y Yu (1966).

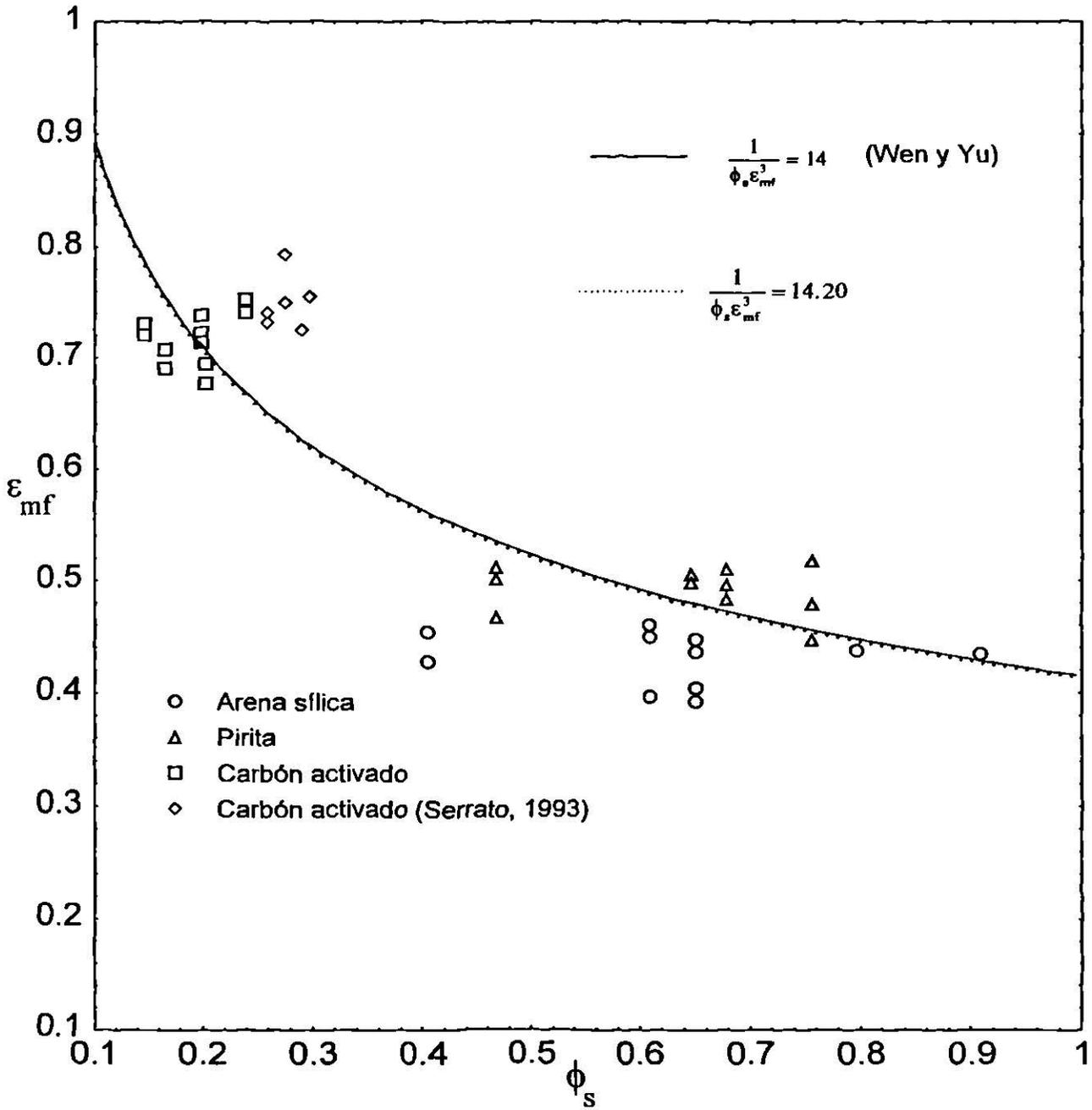


Figura 6.4 Relación entre  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  Propuesta por Wen y Yu (1966).

Los valores de las constantes de a y b de la ecuación 6.3 se calcularon usando todos los datos experimentales y un método de mínimos cuadrados que usa el método de Newton.

Los valores obtenidos son :

$$a = -64.045$$

$$b = 4803.052$$

Esta correlación presento un porciento de desviación máximo de 85.2.1 % y un porciento de desviación promedio de 42.9 %.

La ecuación (6.4) se propuso considerando que en la ecuación de Ergun (2.3) el termino  $1.75 / \phi_s \epsilon_{mf}^3$  se puede evaluar usando la relación entre  $\epsilon_{mf}$  y  $\phi_s$  propuesta por Wen y Yu y que es casi igual a la propuesta en este estudio, esta relación es:

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14$$

entonces

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 1.75 \times 14 = 24.5$$

El valor de la constante b' se obtuvo por medio de un método de mínimos cuadrados que usa el algoritmo de Newton, el resultado final es el siguiente :

$$b' = 3655.260$$

Esta correlación da un porciento de desviación máximo de 127.4 % y un porciento de desviación promedio de 40.4 %. En Tabla 6.2 se muestran los resultados. Las predicciones de  $U_{mf}$  que se obtienen de estas dos correlaciones propuestas son mejores que las de la ecuación de Wen y Yu. La ecuación (6.4) presenta un porciento de desviación menor y por esta razón se recomienda. La correlación final es:

$$N_{Ga} = 24.5 (N_{Re})_{mf}^2 + 3655.260 (N_{Re})_{mf} \quad , \quad (6.4)$$

En la Figura 6.5 se graficaron los datos experimentales y las dos correlaciones propuestas.

**Tabla 6.2 Comparación de la Velocidad Mínima de Fluidización Calculada por la Ecuación 6.4 y Experimental.**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal (cm/min)	% Error*
1-A	2.54	0.1419	36.4140	48.0518	-32.0%
2-A			42.7620	49.8165	-16.5%
4-A	5.00		42.1260	50.0571	-18.8%
1-B	2.54	0.0717	24.9420	14.6804	41.1%
2-B			22.0980	13.3756	39.5%
4-B	5.00		21.7140	14.2369	34.4%
1-C	2.54	0.0506	12.4740	6.6360	46.8%
2-C			11.9100	6.7960	42.9%
4-C	5.00		11.7060	7.2936	37.7%
5-C			11.7660	6.4722	45.0%
1-D	2.54	0.0358	5.8200	3.4992	39.9%
2-D			7.9140	3.2514	58.9%
1-E		0.0273	4.2840	1.7307	59.6%
2-E			4.6140	2.0485	55.6%
1-AP		0.1419	87.8400	69.3391	21.1%
2-AP			76.4700	67.8622	11.3%
4-AP	5.00		61.9080	66.4423	-7.3%
1-BP	2.54	0.0717	36.7080	19.7976	46.1%
2-BP			32.2500	19.3061	40.1%
4-BP	5.00		25.0380	18.3558	26.7%
1-CP	2.54	0.0506	22.1220	9.7430	56.0%
2-CP			18.0600	9.5103	47.3%
4-CP	5.00		14.0400	8.8056	37.3%
1-DP	2.54	0.0358	9.8700	5.1337	48.0%
2-DP			7.3200	5.0103	31.6%
1-AC		0.2000	20.8080	29.3600	-41.1%
2-AC			17.0100	29.3600	-72.6%
1-BC		0.1419	8.6520	18.3525	-112.1%
2-BC			10.3080	17.4893	-69.7%
4-BC	5.00		7.6920	17.4893	-127.4%
1-CC	2.54	0.1000	7.2420	9.6773	-33.6%
2-CC			6.5880	8.9805	-36.3%
4-CC	5.00		6.2880	9.2075	-46.4%

$$\% \text{Error} = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

**Tabla 6.2 (Continuación)**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal (cm/min)	% Error*
1-DC	2.54	0.0717	4.4820	4.9052	-9.4%
2-DC			4.7820	4.4344	7.3%
4-DC	5.00		4.2600	4.5479	-6.8%
5-DC			4.4520	4.3178	3.0%
1-EC	2.54	0.0440	3.2700	1.4801	54.7%
2-EC			2.6400	1.5193	42.5%
1-AL		0.2010	27.5100	32.2353	-17.2%
2-AL		0.1410	24.6396	18.7449	23.9%
3-AL		0.1000	16.5096	10.1950	38.2%
4-AL		0.0440	4.6200	1.7947	61.2%
5-AL	5.00	0.2010	24.3300	32.2353	-32.5%
6-AL		0.0440	2.9900	1.7947	40.0%

$$\% \text{Error} = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

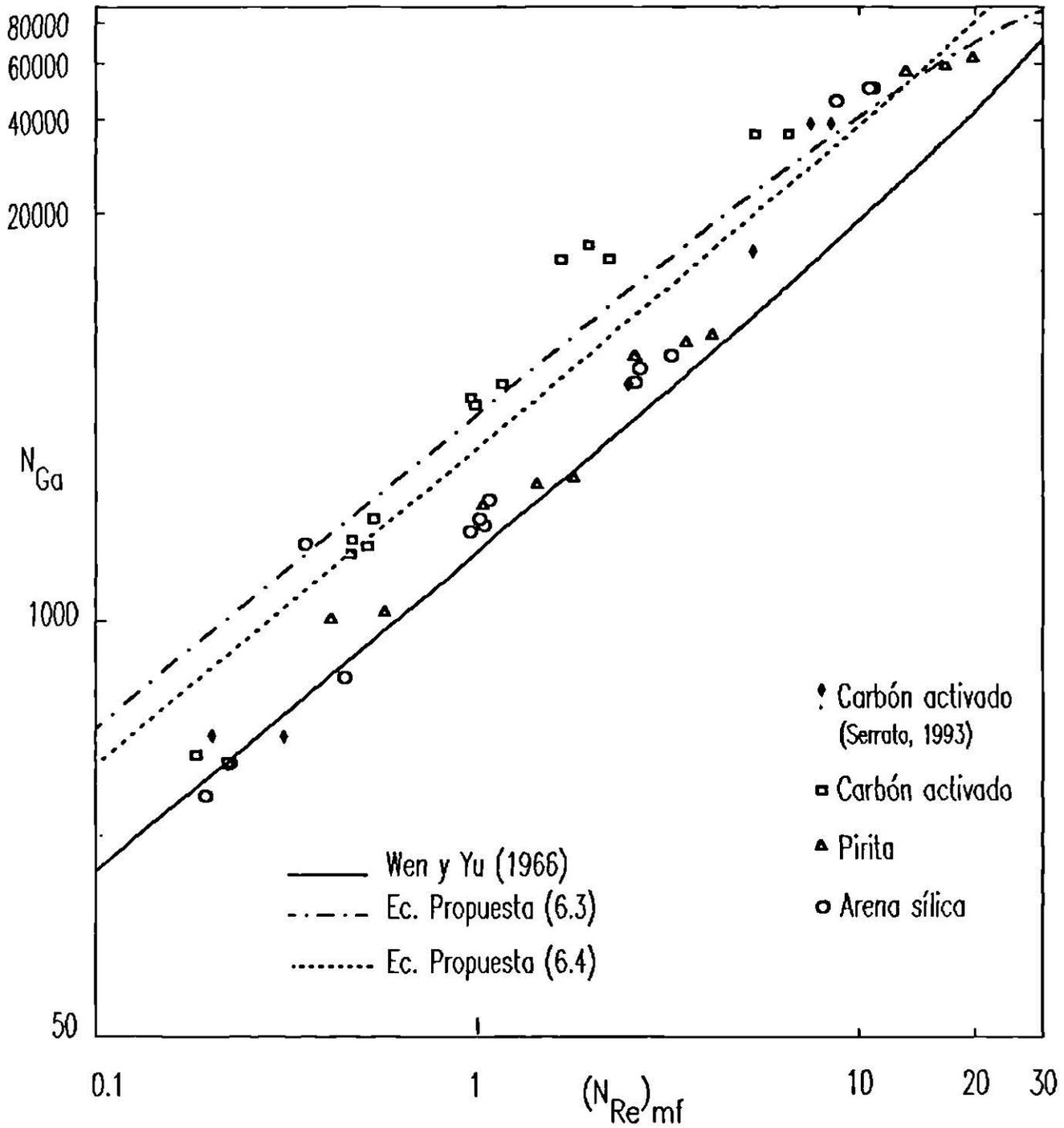


Figura 6.5 Correlaciones para Predecir la Velocidad Mínima de Fluidización (Ecuaciones 6.3 y 6.4).

La  $U_{mf}$  también se predijo por medio de las ecuaciones de Johnson (1950), Leva (1959), Davies y Richardson (1966) y Pillai y Raja Rao (1971) y los porcentos de desviación fueron mayores que los de la ecuación de Wen y Yu, a excepción de la correlación de Johnson. Los datos se encuentran en la Tabla 6.3

**Tabla 6.3 Porcentaje de Desviación Promedio entre la  $U_{mf}$  Calculada y  $U_{mf}$  Experimental.**

Correlación	% Error Prom.
Johnson (1950)	44.5
Leva (1959)	106.8
Davies y Richardson (1966)	127.4
Pillai y Raja Rao (1971)	152.2

En las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8 se comparan gráficamente estas ecuaciones y como ya se mencionó sobreestiman el valor de  $U_{mf}$ .

Los porcentos de desviación tan altos que presentan las ecuaciones de Leva (1959), Davies y Richardson (1966) y Pillai y Raja Rao (1971) se deben a que estas correlaciones fueron desarrolladas principalmente para sistemas gas-sólido. La única correlación que se desarrolló también para sistemas líquido-sólido, fue la de Johnson (1950) y esta es la que presenta un porcentaje de error menor. Estas cuatro correlaciones son similares ya que se pueden reducir a la forma siguiente :

$$(N_{Re})_{mf} = a N_{Ga}^b \quad (6.5)$$

En base a esto los datos experimentales se correlacionaron por la ecuación (6.5) y los valores de las constantes  $a$  y  $b$  se obtuvieron por un método de mínimos cuadrados basado en el algoritmo de Newton, los valores que se obtuvieron son los siguientes:

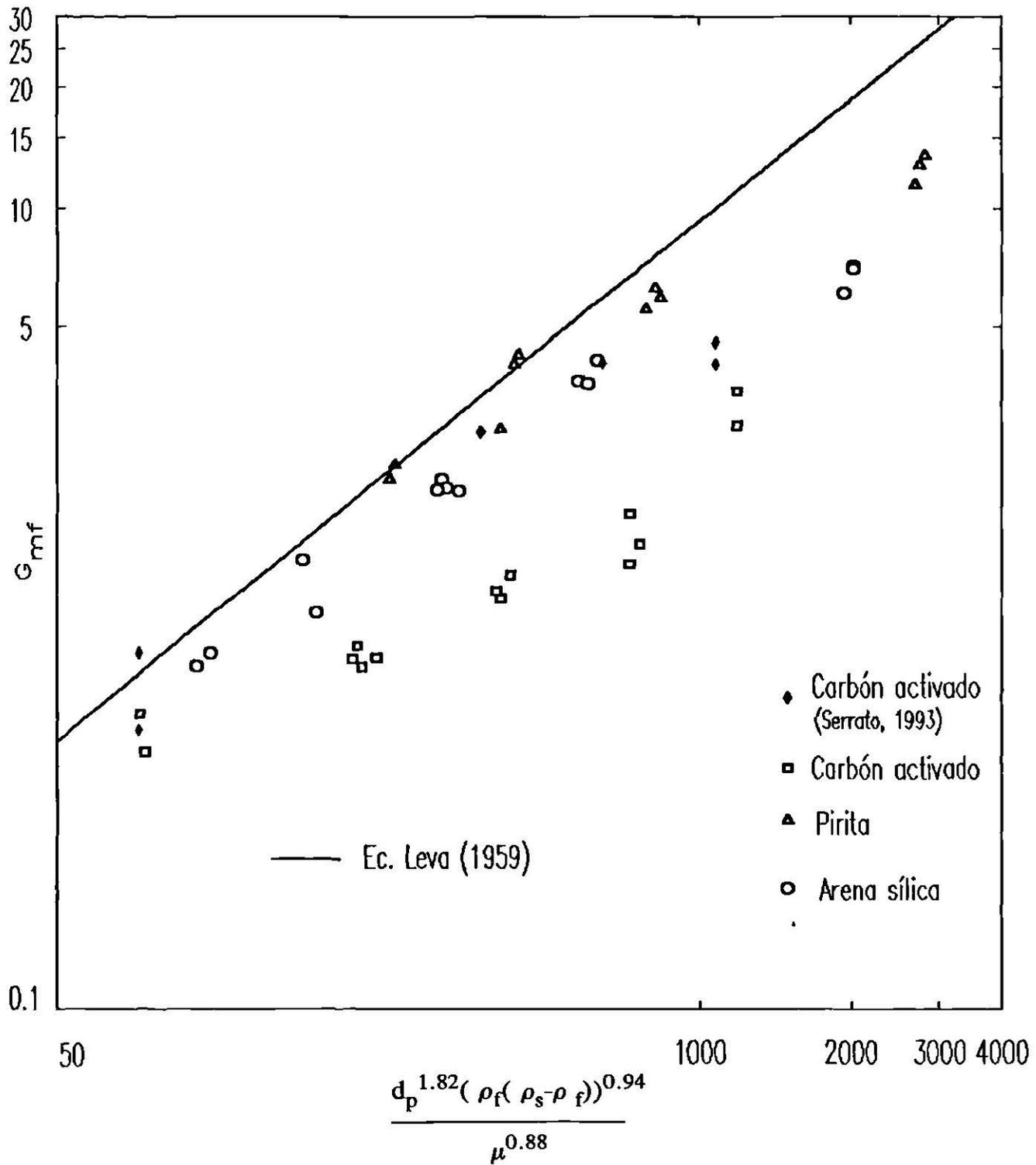


Figura 6.6 Comparación de los Datos Experimentales con la Ecuación de Leva (1959).

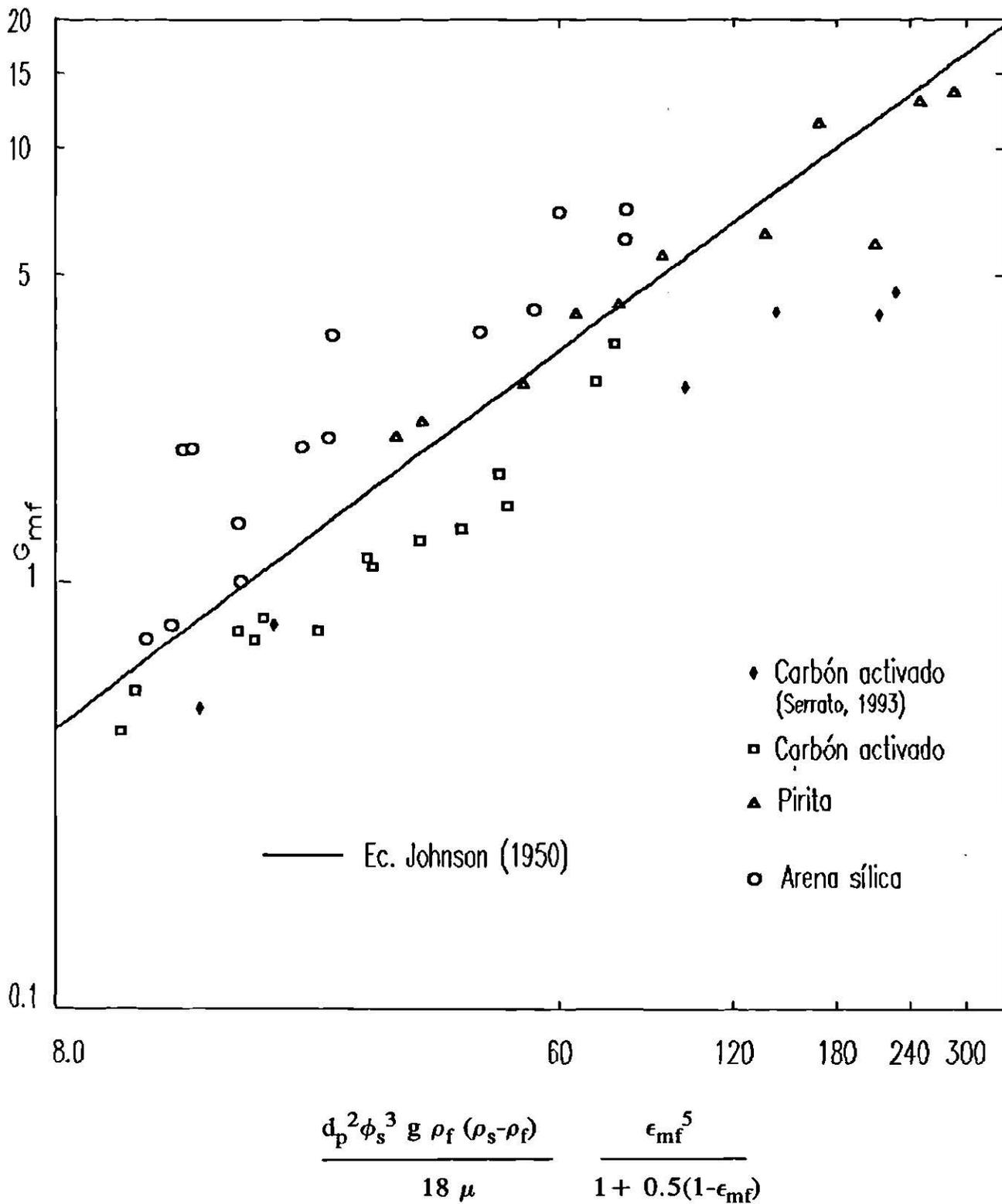


Figura 6.7 Comparación de los Datos Experimentales con la Ecuación de Johnson (1950).

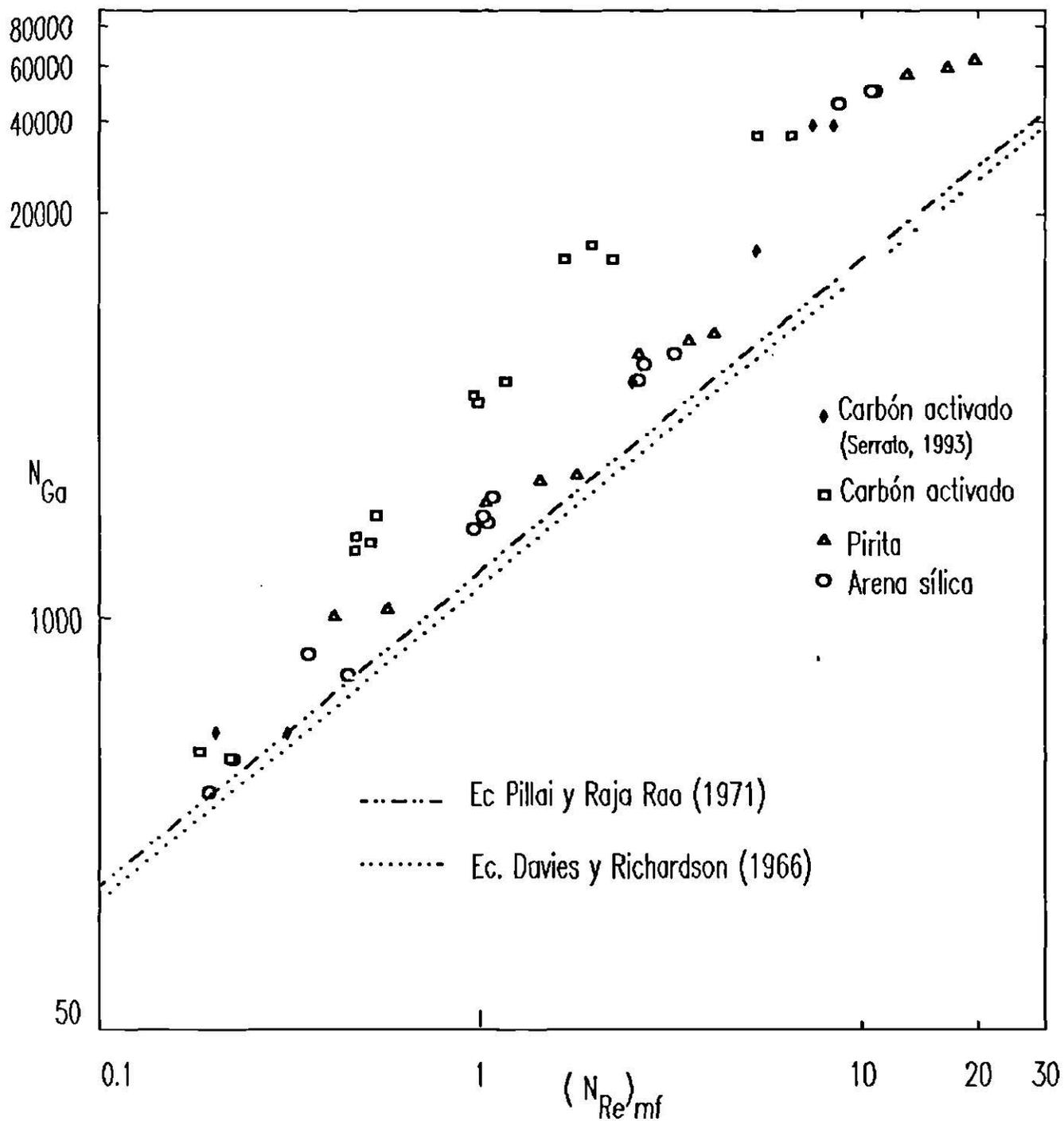


Figura 6.8 Comparación entre el  $(N_{Re})_{mf}$  Calculado y Experimental.

$$a = 0.000162$$

$$b = 1.03776$$

Esta correlación presenta porcentos de desviación máximo de 98.3 % y promedio de 45.36%. La correlación es :

$$(N_{Re})_{mf} = 0.000162 N_{Ga}^{1.03776} \quad (6.6)$$

En la Figura 6.9 se graficaron los datos experimentales y los que predice la correlación propuesta y en la Tabla 6.4 se muestran los porcentos de desviación.

Finalmente la velocidad mínima de fluidización se calculó por la ecuación propuesta por Ergun (Grewal y Saxena ,1980) y el porcentaje de desviación promedio fue de 44.60%. Esta correlación, a diferencia de las otras, involucra el factor de esfericidad y la porosidad. En la Figura 6.10 se exhibe la ecuación de Ergun y los datos experimentales.

En base a la ecuación de Ergun se propone la siguiente correlación para predecir la velocidad mínima de fluidización :

$$G_{mf} = K \frac{(\phi_s d_p)^2 \rho_f (\rho_f - \rho_s) g}{\mu} \left[ \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right] \quad (6.7)$$

El valor de la constante K se obtuvo usando todos los datos experimentales y un método de mínimos cuadrados y el algoritmo de Newton, el resultado es el siguiente:

$$K = 0.004663$$

Con el valor de esta constante se obtienen porcentos de desviación máximo de 94.1 % y promedio de 24.0 %.

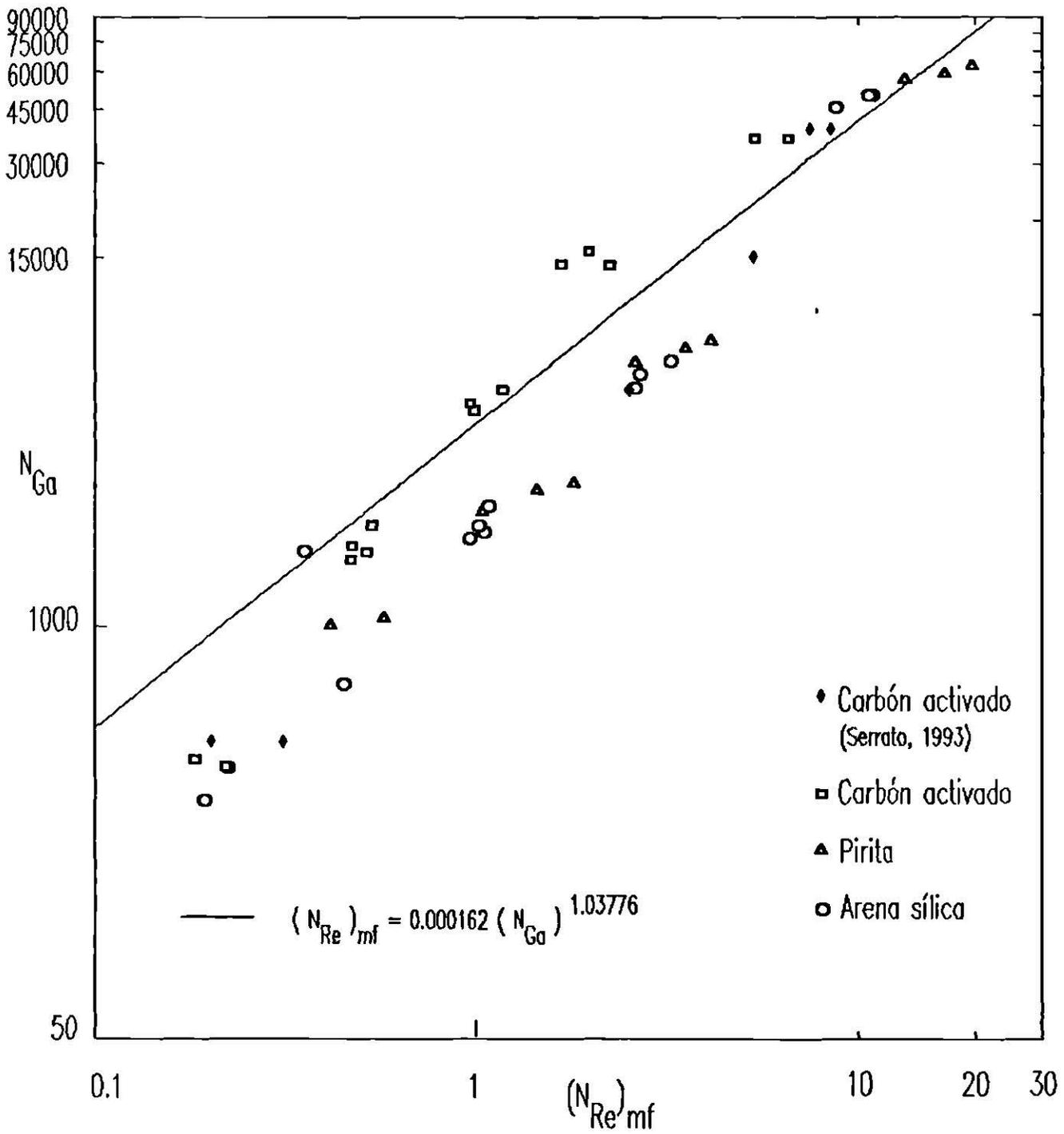


Figura 6.9 Correlación para Predecir la Velocidad Mínima de Fluidización Ecuación (6.6).

**Tabla 6.4 Comparación de la Velocidad Mínima de Fluidización Calculada por la Ecuación 6.6 y Experimental.**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal. (cm/min)	%Error*
1-A	2.54	0.1419	36.4140	45.9871	-26.3%
2-A			42.7620	48.1607	-12.6%
4-A	5.00		42.1260	48.3933	-14.9%
1-B	2.54	0.0717	24.9420	12.3110	50.6%
2-B			22.0980	11.1130	49.7%
4-B	5.00		21.7140	11.8929	45.2%
1-C	2.54	0.0506	12.4740	5.2616	57.8%
2-C			11.9100	5.3991	54.7%
4-C	5.00		11.7060	5.8289	50.2%
5-C			11.7660	5.1211	56.5%
1-D	2.54	0.0358	5.8200	2.6691	54.1%
2-D			7.9140	2.4660	68.8%
1-E		0.0273	4.2840	1.2701	70.4%
2-E			4.6140	1.5172	67.1%
1-AP		0.1419	87.8400	68.8130	21.7%
2-AP			76.4700	66.9250	12.5%
4-AP	5.00		61.9080	65.1346	-5.2%
1-BP	2.54	0.0717	36.7080	16.7376	54.4%
2-BP			32.2500	16.2785	49.5%
4-BP	5.00		25.0380	15.3960	38.5%
1-CP	2.54	0.0506	22.1220	7.8437	64.5%
2-CP			18.0600	7.6404	57.7%
4-CP	5.00		14.0400	7.0279	49.9%
1-DP	2.54	0.0358	9.8700	3.9680	59.8%
2-DP			7.3200	3.8651	47.2%
1-AC		0.2000	20.8080	27.4499	-31.9%
2-AC			17.0100	27.4499	-61.4%
1-BC		0.1419	8.6520	16.1044	-86.1%
2-BC			10.3080	15.2496	-47.9%
4-BC	5.00		7.6920	15.2496	-98.3%
1-CC	2.54	0.1000	7.2420	8.0341	-10.9%
2-CC			6.5880	7.4026	-12.4%
4-CC	5.00		6.2880	7.6076	-21.0%

\* 
$$\% \text{Error} = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

**Tabla 6.4 (Continuación)**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal. (cm/min)	%Error*
1-DC	2.54	0.0717	4.4820	3.8968	13.1%
2-DC			4.7820	3.4937	26.9%
4-DC	5.00		4.2600	3.5905	15.7%
5-DC			4.4520	3.3944	23.8%
1-EC	2.54	0.0440	3.2700	1.0965	66.5%
2-EC			2.6400	1.1278	57.3%
1-AL		0.2010	27.5100	30.3569	-10.3%
2-AL		0.1410	24.6396	16.4101	33.4%
3-AL		0.1000	16.5096	8.4645	48.7%
4-AL		0.0440	4.6200	1.3395	71.0%
5-AL	5.00	0.2010	24.3300	30.3569	-24.8%
6-AL		0.0440	2.9900	1.3395	55.2%

\* 
$$\%Error = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

Esta es la correlación propuesta que mejor ajusta los datos experimentales en comparación con las otras tres propuestas (Ecuaciones 6.3, 6.4 y 6.6). Esto se debe a que en esta ecuación se usan el factor de esfericidad y la porosidad de las partículas que se estudiaron y el porcentaje de desviación disminuye porque son partículas irregulares y no esféricas. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5 y la representación gráfica de la correlación en la Figura 6.10

La correlación propuesta que mejor predice la velocidad mínima de fluidización es la ecuación 6.7, esta correlación es similar a la ecuación de Ergun (Grewal y Saxena ,1980). La ecuación 6.7 predice la  $U_{mf}$  en forma muy aceptable en todo el rango de diámetros de partículas usados en este estudio y es la correlación recomendada. El empleo de esta correlación requiere de los valores del factor de esfericidad y porosidad. En la Tabla 6.6 se exhiben los porcentajes de desviación de las diferentes correlaciones probadas y propuestas y en la Tabla 6.7 se enlistan dichas ecuaciones.

**Tabla 6.5 Comparación de la Velocidad Mínima de Fluidización Calculada por la Ecuación 6.7 y Experimental.**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal (cm/min)	%Error*
1-A	2.54	0.1419	36.4140	24.6980	32.2%
2-A			42.7620	25.1139	41.3%
4-A	5.00		42.1260	20.6914	50.9%
1-B	2.54	0.0717	24.9420	16.9522	32.0%
2-B			22.0980	14.0703	36.3%
4-B	5.00		21.7140	9.3102	57.1%
1-C	2.54	0.0506	12.4740	7.7432	37.9%
2-C			11.9100	7.2040	39.5%
4-C	5.00		11.7060	5.2294	55.3%
5-C			11.7660	5.1723	56.0%
1-D	2.54	0.0358	5.8200	5.6177	3.5%
2-D			7.9140	5.4719	30.9%
1-E		0.0273	4.2840	3.8878	9.2%
2-E			4.6140	4.2623	7.6%
1-AP		0.1419	87.8400	78.0276	11.2%
2-AP			76.4700	69.8312	8.7%
4-AP	5.00		61.9080	51.4102	17.0%
1-BP	2.54	0.0717	36.7098	56.3390	-53.5%
2-BP			32.2500	40.1579	-24.5%
4-BP	5.00		25.0398	29.2415	-16.8%
1-CP	2.54	0.0506	22.1196	20.8181	5.9%
2-CP			18.0600	18.1695	-0.6%
4-CP	5.00		14.0400	15.1704	-8.1%
1-DP	2.54	0.0358	9.8700	9.5602	3.1%
2-DP			7.3200	8.7943	-20.1%
1-AC		0.2000	20.8080	16.5127	20.6%
2-AC			17.0100	15.2765	10.2%
1-BC		0.1419	8.6520	10.6578	-23.2%
2-BC			10.3080	10.3107	0.0%
4-BC	5.00		7.6920	8.8936	-15.6%
1-CC	2.54	0.1000	7.2420	7.5059	-3.6%
2-CC			6.5880	6.0939	7.5%
4-CC	5.00		6.2880	6.2414	0.7%

\* 
$$\% \text{Error} = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

**Tabla 6.5 (Continuación)**

No. de Exp.	d <sub>T</sub> (cm)	d <sub>p</sub> (cm)	(U <sub>mf</sub> ) exp (cm/min)	(U <sub>mf</sub> ) cal (cm/min)	%Error*
1-DC	2.54	0.0717	4.4820	5.0719	-13.2%
2-DC			4.7820	4.0497	15.3%
4-DC	5.00		4.2600	3.8931	8.6%
5-DC			4.4520	3.6525	18.0%
1-EC	2.54	0.0440	3.2700	2.4812	24.1%
2-EC			2.6400	2.3202	12.1%
1-AL		0.2010	27.5100	50.6798	-84.2%
2-AL		0.1410	24.6420	31.3858	-27.4%
3-AL		0.1000	16.5120	22.3267	-35.2%
4-AL		0.0440	4.6200	4.5771	0.9%
5-AL	5.00	0.2010	24.3300	47.2149	-94.1%
6-AL		0.0440	2.9880	3.2061	-7.3%

\* 
$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Experimental} - \text{Calculado}}{\text{Experimental}} \times 100\%$$

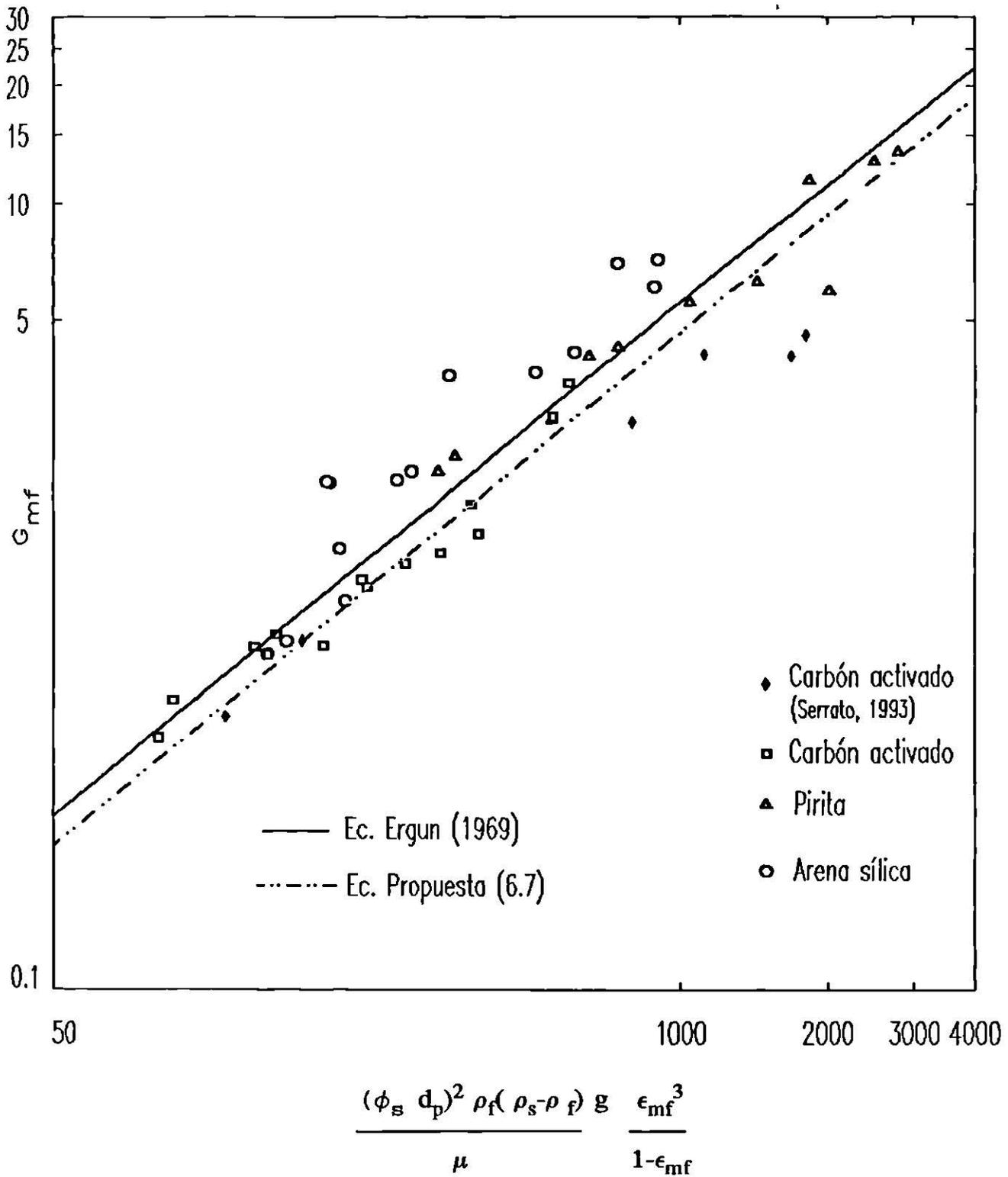


Figura 6.10 Comparación de los Datos Experimentales con la Ecuación de Ergun (1959) y la Ecuación Propuesta 6.7.

**Tabla 6.6 Porcientos de Desviación de las Correlaciones Reportadas en la Literatura y las Propuestas en este Estudio.**

Ecuación	% Desviación	
	Promedio	Máxima
Wen y Yu (1966)	85.0	362.9
Johnson (1950)	44.5	192.8
Ergun (1959)	44.6	117.4
Leva (1950)	106.8	422.7
Davies y Richardson (1966)	152.2	565.1
Pillai y Raja Rao (1971)	127.4	492.7
Propuesta (6.3)	42.9	85.2
Propuesta (6.4)	40.4	127.4
Propuesta (6.6)	43.5	98.3
Propuesta (6.7)	24.0	94.1

**Tabla 6.7 Correlaciones para Predecir la Velocidad Mínima de Fluidización.**

Autor	Ecuación *
Wen y Yu (1966)	$(N_{Re})_{mf} = \sqrt{(33.7)^2 + 0.0408 N_{Ga}} - 33.7$
Propuesta (6.3)	$(N_{Re})_{mf} = \sqrt{1406.0828 - 0.0156 N_{Ga}} - 37.4978$
Propuesta (6.4)	$(N_{Re})_{mf} = \sqrt{(74.60)^2 + 0.0408 N_{Ga}} - 74.60$
Propuesta (6.6)	$(N_{Re})_{mf} = 0.000162 (N_{Ga})^{1.03776}$
Ergun (1950)	$G_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{150 \mu} \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right)$
Propuesta (6.7)	$G_{mf} = 0.004709 \frac{(\phi_s d_p)^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right)$
Johnson (1950)	$G_{mf} = \frac{d_p^2 \phi_s^2 g \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{18 \mu} \left( \frac{\epsilon_{mf}^5}{1 + 0.5(1 - \epsilon_{mf})} \right)$
Leva (1959)	$G_{mf} = 0.0093 \frac{d_p^{1.82} (\rho_f (\rho_s - \rho_f))^{0.94}}{\mu^{0.88}}$
Davies y Richardson(1966)	$G_{mf} = 0.00078 \frac{d_p^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu}$
Pillai y Raja Rao (1971)	$G_{mf} = 0.000701 \frac{d_p^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu}$

\* Cada una de estas ecuaciones tiene ciertas restricciones o aplicaciones. Ver Capítulo 2. Revisión Bibliográfica.

## 7. CONCLUSIONES

El lecho fluidizado experimental que se utilizó para obtener los datos hidrodinámicos se ensambla y opera con relativa facilidad. Por otro lado el distribuidor del líquido cumplió su objetivo ya que se logró una adecuada distribución del líquido a la entrada del lecho.

La densidad de la partícula de cada material se determinó por el método del desplazamiento de agua en un picnómetro, este método no presentó problemas y los resultados obtenidos se encuentran dentro de los valores reportados en la literatura.

La esfericidad de las partículas es un factor de forma que corrige los efectos causados por la forma irregular de las partículas. La relación entre los valores experimentales de la esfericidad y la fracción hueca del lecho son similares a los reportados por Brown (1950) y por lo tanto se considera que el método usado para evaluar la esfericidad es correcto.

La caída de presión y fracción hueca de los lechos fijos y fluidizados exhibieron el comportamiento típico reportado en la literatura.

La velocidad mínima de fluidización se midió por los métodos de la caída de presión y de la fracción hueca. Estos dos métodos dieron resultados ligeramente diferentes entre sí y se recomienda usar el método de la fracción hueca ya que en éste método el punto de transición entre lecho fijo y fluidizado presenta un menor porcentaje de desviación.

Como se esperaba la  $U_{mf}$  es independiente de la cantidad de masa de empaque y altura inicial del lecho pero es dependiente del diámetro y densidad de la partícula. La  $U_{mf}$  disminuye muy ligeramente con el diámetro de la columna y esto se debe a que los efectos de pared en la columna disminuyen. Por otro lado al aumentar el diámetro y la densidad de la partícula se incrementa la velocidad mínima de fluidización.

Se compararon los datos experimentales de  $U_{mf}$  con los valores que predicen las correlaciones de Bourgeois y Greiner (1968), Riba y colaboradores (1978), Narsimham (1965), Leva (1959), Davies y Richardson (1966) y Pillai y Raja Rao (1971) y se encontró que estas sobreestiman bastante la velocidad mínima de fluidización. Se concluyó que este resultado se debe a que estas correlaciones fueron desarrolladas para partículas de forma esférica o regular y las partículas usadas en este estudio tienen una forma irregular, además las tres últimas correlaciones fueron obtenidas para sistemas gas-sólido.

También se probaron las correlaciones de Wen y Yu (1966), Johnson (1950) y Ergun (1959) y se notó que estas presentan desviaciones mucho menores. Estas correlaciones a excepción de la ecuación de Wen y Yu toman en cuenta el factor de la esfericidad de la partícula y porosidad del lecho y por esta razón estas correlaciones ajustan mejor los datos experimentales. En general los valores experimentales de  $U_{mf}$  fueron inferiores a los que predicen las correlaciones.

En base a las diferentes formas de correlaciones reportadas en la literatura se propusieron cuatro nuevas correlaciones para predecir  $U_{mf}$  y que son las ecuaciones 6.3, 6.4, 6.6 y 6.7. Las tres primeras ecuaciones dieron mejores resultados que los reportados en la literatura pero no incluyen el factor de esfericidad y fracción hueca del lecho. La ecuación 6.7 basada en la ecuación de Ergun (1959) correlaciona los datos experimentales mucho mejor que las correlaciones reportadas en la literatura y las tres ecuaciones propuestas, y presenta un porcentaje de desviación promedio de  $\pm 24\%$  y de  $\pm 94\%$ , respectivamente.

En general se recomienda que se use esta ecuación en el cálculo de  $U_{mf}$  para sistemas líquido-sólido de forma irregular.

## NOMENCLATURA

$A_t$  = Area transversal de la columna , cm.

$d_e$  = Diámetro equivalente de partícula , cm.

$d_p$  = Diámetro de partícula , cm.

$d_T$  = Diámetro de la columna , cm.

$G$  = Número adimensional.

$g$  = Constante gravitacional , cm/s<sup>2</sup>.

$G_{mf}$  = Velocidad másica a la velocidad mínima fluidización , g/cm<sup>2</sup>s.

$h_0$  = Altura total del lecho fluidizado , cm.

$h_f$  = Altura total del lecho fijo , cm.

$K$  = Constante de Blake-Kozeny , 180

$L$  = Distancia entre las tomas de presión , cm.

$m$  = Masa total de material , g.

$m_m$  = Masa de material agregado al picnómetro , g.

$m_p$  = Masa del picnómetro aforado con agua , g.

$m_{pm}$  = Masa del picnómetro con el material y aforado con agua , g.

$N_{Ga}$  = Número de Galileo.

$(N_{Re})_{mf}$  = Número de Reynolds a la velocidad mínima de fluidización.

$N_{Ret}$  = Número de Reynolds en condiciones terminales.

$U$  = Velocidad superficial , cm/min.

$U_{mf}$  = Velocidad mínima de fluidización , cm/min.

$V_p$  = Volumen de la partícula , cm<sup>3</sup>.

$V_T$  = Volumen total de las partículas , cm<sup>3</sup>.

## LETRAS GRIEGAS

$\Delta P$  = Caída de presión total , in H<sub>2</sub>O.

$\epsilon$  = Fracción hueca.

$\epsilon_0$  = Porosidad del lecho fijo.

$\epsilon_f$  = Porosidad del lecho fluidizado.

$\epsilon_{mf}$  = Fracción hueca a la velocidad mínima de fluidización.

$\phi_s$  = Esfericidad de las partículas.

$\mu$  = Viscosidad del fluido , g/cm s.

$\rho_a$  = Densidad aparente de la partícula , g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_f$  = Densidad del fluido , g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_s$  = Densidad del sólido , g/cm<sup>3</sup>.

## BIBLIOGRAFIA

Barnea, E. y Mednick, R.L., 1975, Correlation for Minimum Fluidisation Velocity, Trans. Instn. Chem. Engrs., 53, 278-281.

Bourgeois, P. y Greiner, P., 1968, Ratio of Terminal Velocity to Minimum Fluidizing Velocity for spherical Particles, Can. J. Chem. Eng., 60, 859-862.

Brown, G.G., 1955, Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, 226, Marín, Barcelona.

Casal, J., Lucas, A., Arnaldos, J., 1985, A New Method for the Determination of Shape Factor and Particle Density, Chem. Eng. J., 30, 155-158.

Ford, W.E., 1975, Tratado de Mineralogía, 477, 515, C.E.C.S.A.

González Hernández, C.M. y Jonguitud Moreno, V., 1990, Hidrodinámica de un Adsorbedor de Lecho Fluidizado Líquido-Sólido, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas, Univ. Autónoma de San Luis Potosí.

Grewal, N.S. y Saxena S.C., 1980, Comparison of Commonly Used Correlations for Minimum Fluidization Velocity of Small Solid Particles, Powder Technol., 26, 229-234.

Kunii, D. y Levenspiel, O., 1969, Fluidization Engineering, 9, 16, Wiley, New York.

Leyva Ramos, R., González Hernández, C.M. y Jonguitud Moreno, V., 1990, Hidrodinámica de un Adsorbedor de Lecho Fluidizado Líquido-Sólido, Avances en Ingeniería Química, 942-967.

Narsimham, G., 1965, On a Generalized Expression for Prediction of Minimum Fluidization Velocity, A.I.Ch.E. J., 11, (3), 550-554.

Rao, K.V.K. y Prakash, S.G., 1982, Some Aspects of Liquid-Solid Fluidized Beds, Can. J. Chem. Eng., 60, 859-862.

Riba, J.P., R. Routie, J.P., Couderc, 1978, Conditions Minimales de Mise en Fluidisation par un Liquide, Can.J.Chem.Eng., 56, 26-30.

Serrato Villegas, L.E., 1993, Hidrodinámica de un Lecho Semifluidizado, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas, Univ. Autónoma de San Luis Potosí.

Wen, C.Y. y Yu, Y.H., 1966, A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity, A.I.Ch.E. J., 12, (3), 610-612.

Wen, C.Y. y Yu, Y.H., 1966, Mechanics of Fluidization, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 62, 62, 100-111.

## APENDICE A

DATOS EXPERIMENTALES DE LA CALIBRACION DE LOS ROTAMETROS

Todos los datos experimentales del apéndice A se encuentran en el diskette anexo.  
Para consultarlos es necesario disponer del editor del sistema operativo.

## APENDICE A

Si desea los datos de la Tablas A.1 a A.4 consulte el archivo apendiA. ASC

## **A P E N D I C E B**

**DATOS EXPERIMENTALES PARA CALCULAR LA DENSIDAD  
APARENTE Y DE PARTICULA**

Todos los datos experimentales del apéndice B se encuentran en el diskette anexo. Para consultarlos es necesario disponer del editor del sistema operativo.

## APENDICE B

Si desea los datos de las Tablas B.1 a B.6 consulte el archivo apendiB. ASC

## APENDICE C

### DATOS EXPERIMENTALES DE LA HIDRODINAMICA DE LECHOS FLUIDIZADOS

Todos los datos experimentales del apéndice C se encuentran en el diskette anexo.  
Para consultarlos es necesario disponer del editor del sistema operativo.

## APENDICE C

Si desea los datos de la Tablas

Consulte el archivo:

C.1 a C.10

ApendiC1.ASC

C.11 a C.20

ApendiC2.ASC

C.21 a C.35

ApendiC3.ASC

C.36 a C.45

ApendiC4.ASC

C.46 a C.54

ApendiC5.ASC

## **A P E N D I C E D**

### **RESULTADOS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LA HIDRODINAMICA DE LECHOS FLUIDIZADOS**

Todos los datos experimentales del apéndice D se encuentran en el diskette anexo.  
Para consultarlos es necesario disponer del editor del sistema operativo.

## APENDICE D

Si desea los datos de las Tablas

Consulte el archivo:

D.1 a D.10

ApendiD1.ASC

D.11 a D.19

ApendiD2.ASC

D.20 a D.34

ApendiD3.ASC

D.35 a D.44

ApendiD4.ASC

D.45 a D.53

ApendiD5.ASC

