

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACEUTICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS ALIMENTOS Y TECNOLOGIA QUIMICA

---

SERIE  
MONOGRAFIAS SOBRE INGENIERIA EN ALIMENTOS  
PUBLICACION N° 10

"CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO EN LA INGENIERIA EN ALIMENTOS:  
I APLICACION AL DISEÑO DE UN CONGELADOR DE LECHO FLUIDIZADO"

013971

Prof. Ing. Eduardo S. Castro M.

1 9 8 9

A TERESA

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi ayudante, Sr. Misael Miranda M., por sus sugerencias en la confección de esta publicación, como también a la Sra. Nadira Kifafi O., por la paciencia que ha tenido para mecanografiarlo.

## P R O L O G O

Debido al avance que ha tenido la exportación de productos hortofrutícolas congelados, es necesario que los Ingenieros en Alimentos y profesionales afines, cuenten con modelos actualizados de diseño de equipos de congelación de lecho fluidizado.

## INDICE DE MATERIAS

	Página
INTRODUCCION .....	1
Flujo de fluidos en lecho poroso .....	2
Fluidización .....	18
Diseño de un congelador de lecho fluidizado .....	30
Optimización de la velocidad de producción .....	35
BIBLIOGRAFIA .....	42

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1	Caída de presión para flujo en lecho poroso .....	6
FIGURA N° 2	Valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds, en función de la porosidad y de la esfericidad .....	8
FIGURA N° 3	Valores del coeficiente de frotamiento $F_f$ , en función de la porosidad y de la esfericidad .....	9
FIGURA N° 4	Representación gráfica de la función que liga a la esfericidad con la porosidad. Se refiere a lechos empaquetados al azar, constituidos por partículas de tamaño uniforme .....	10
FIGURA N° 5	Representación de la porosidad en función de la relación de diámetros $D_s/D_c$ .....	10
FIGURA N° 6	Valor del coeficiente de frotamiento modificado ( $f/F_f$ ), en función del número de Reynolds modificado ( $Re$ ), para partículas empaquetadas al azar y para esferas apiladas .....	11
FIGURA N° 7	Distintos sistemas de carga ordenada de un lecho formado por esferas, y su influencia en la porosidad .....	12
FIGURA N° 8	Fluidización de un lecho de partículas sólidas .....	19

Indice de Figuras (Continuación)

	Página	
FIGURA N° 9	Valores del coeficiente de frotamiento (coeficiente de arrastre) en función del número de Reynolds, para partículas de diversa esfericidad .....	20
FIGURA N° 10	Correlación del coeficiente de transmisión de calor para alimentos de diferentes formas .....	33
FIGURA N° 11	Efecto de la mezcla longitudinal por área unitaria de la malla en la velocidad de producción .....	35
FIGURA N° 12	Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción (L=4m) .....	36
FIGURA N° 13	Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción (L = 2m) .....	37
FIGURA N° 14	Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción (L = 8m) .....	38
FIGURA N° 15	Nomograma para calcular las condiciones de velocidad de producción máxima .....	40

## INTRODUCCION

Chile está participando en forma destacada en el abastecimiento mundial de productos hortofrutícolas, ya sean frescos o elaborados.

Entre los productos elaborados destacan los congelados, porque mantienen características más semejantes a los naturales y por ello el consumidor está exigiendo calidades mejores.

El sistema de congelación por lecho fluidizado, permite obtener productos de calidad alta para satisfacer estos requerimientos y esto plantea un desafío a los profesionales dedicados al diseño de equipos y procesos.

El diseño de un congelador de lecho fluidizado, requiere el estudio de los fundamentos del flujo de fluidos en lecho poroso y su aplicabilidad en distintas situaciones. Existe un gran número de alimentos, que para su congelación requieren transporte a través de un lecho fluidizado y es por eso que la primera parte de este trabajo está dedicado a dicha materia. Finalmente, se presenta el desarrollo del diseño de un congelador de lecho fluidizado.

FLUJO DE FLUIDOS EN LECHO POROSO

Se considera un lecho poroso, al que está formado por partículas contiguas que dejan entre ellas huecos o espacios libres y a través de ellos circula el fluido.

La cantidad de espacio libre depende de las variables siguientes:

- Porosidad de la capa
- Diámetro de las partículas
- Esfericidad o forma de las partículas
- Orientación o disposición del empaquetado de las partículas
- Rugosidad de las partículas

Es de interés aclarar la velocidad lineal real del fluido a través de los huecos del lecho poroso, que se puede expresar en función de la velocidad lineal superficial (calculada como velocidad de flujo del fluido por la sección transversal total no obstruida del lecho) y de los parámetros ya mencionados (Brown et al., 1950).

También el número de Reynolds tiene modificaciones que toman en cuenta las características del lecho; en forma análoga hay que corregir el coeficiente de roce.

Así:

$$Re' = \frac{D_p F_{Re} v \rho}{\mu} \quad (1)$$

$$\overline{lwf} = \frac{v^2 L f F_f}{2g_c D_p} \quad (2)$$

$$f = \frac{2g_c D_p \overline{lwf}}{L v^2 F_f} = \frac{2g_c D_p (-\Delta p) f}{F_f L v^2 \rho} \quad (3)$$

siendo:

$D_p$  : diámetro de la partícula. Si tienen todas el mismo tamaño,  $D_p$  es el tamaño medio de tamizado. Para tamaños mixtos se aplica:

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum \frac{m_i}{D_i}}{\sum \frac{m_i}{D_i^2}}} \quad (4)$$

$m_i$  : fracción de masa correspondiente a un tamaño dado  $D_i$  de partícula.

$D_i$  : diámetro de las partículas, en cada una de las fracciones, según tamaños tomados como valores medios aritméticos de las aberturas de tamices utilizados para aislar las partículas.

$v$  : velocidad superficial, velocidad calculada, como si el tubo no contuviese partículas, m/s.

$\rho$  : densidad del fluido,  $\text{kg/m}^3$

$\mu$  : viscosidad del fluido,  $\text{cP}$

$L$  : espesor de la capa porosa, en la dirección del flujo, m

$-\Delta p_f$  : pérdida de carga, debido a pérdidas por roce,  $\text{kg/m}^2$

$F_{Re}$  : coeficiente de corrección del Reynolds

$F_f$  : coeficiente de corrección del roce

Porosidad:

$$X = \frac{\text{Volumen ocupado por los huecos}}{\text{Volumen total del lecho}} \quad (5)$$

Esfericidad:  $\Psi$ , área de la esfera de volumen igual al de la partícula, dividida por área de la superficie de la partícula.

La pérdida de carga en flujo laminar en un lecho poroso, está dada por la relación de Carman-Kozeni (Foust et al., 1960):

$$\frac{(-\Delta p)_f \rho_c}{L} = 180 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu v}{\epsilon^3 D_p^2} \quad (6)$$

y

$$f = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

en que:

$\epsilon$  : porosidad

Para números de Reynolds altos, la pérdida causada por la energía cinética se torna significativa y la ecuación de Burke-Plummer (Foust et al., 1960) es la que sirve para predecir la pérdida de carga a través del lecho poroso.

$$\frac{(-\Delta p)_f \rho_c}{L} = k_3 \frac{\int v^2}{\frac{4 \epsilon D_p}{6(1-\epsilon)}} = k_4 \frac{\int v^2}{D_p} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (8)$$

Para tomar en cuenta la pérdida de carga total, debido al flujo entre las partículas y al efecto de la energía cinética, se pueden sumar ambas ecuaciones y se tiene:

$$\frac{(-\Delta p)_f \rho_c}{L} = k_2 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu v}{D_p^2} + k_4 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\int v^2}{D_p} \quad (9)$$

Suponiendo expansión isotérmica del gas ideal e integrando una forma diferencial de la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{(-\Delta p)_f G_c}{L} = k_2 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu v_{sm}}{D_p^2} + k_4 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{v_{sm}}{D_p} \quad (10)$$

donde:

$v_{sm}$  : velocidad superficial a la presión media entre la de entrada y salida del lecho, pie/s

$G$  : caudal másico ( $\rho v$ ), basado en la sección transversal del lecho, lb/s

Esta ecuación se puede arreglar a:

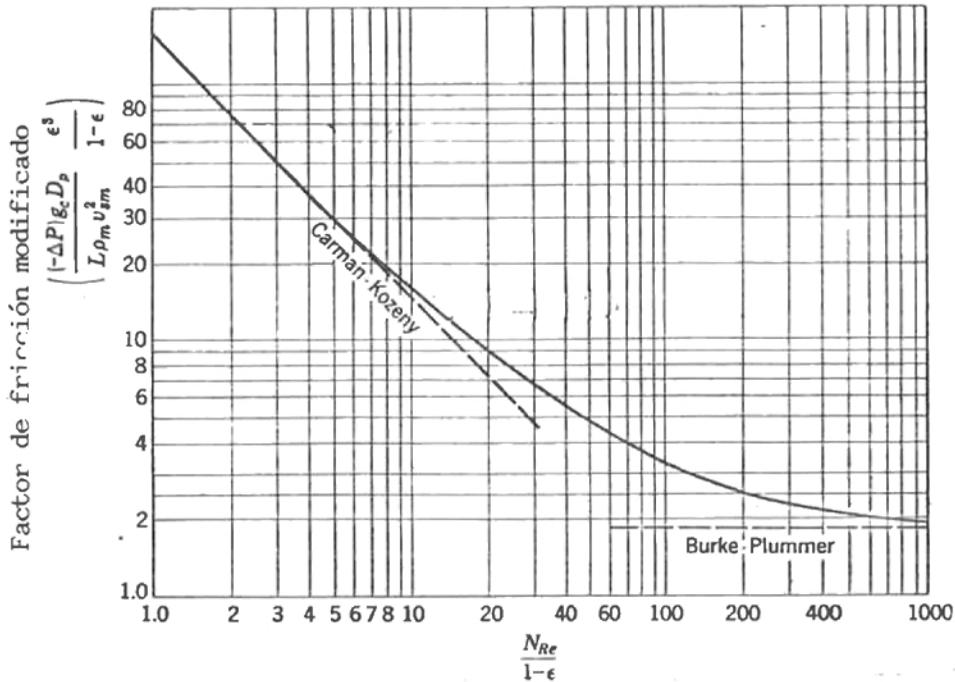
$$\frac{(-\Delta p)_f G_c}{L} \frac{D_p^2}{\mu v_{sm}} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} = k_2 + k_4 \frac{N_{Re}}{(1-\epsilon)} \quad (11)$$

Las constantes evaluadas experimentalmente son  $k_2 = 150$  y  $k_4 = 1,75$ .

Reemplazando y ordenando, se tiene:

$$\frac{(-\Delta p)_f G_c}{L} \frac{D_p}{\rho v_{sm}^2} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)} = 150 \frac{(1-\epsilon)}{N_{Re}} + 1,75 \quad (12)$$

Esta relación adimensional se presenta en la Figura N° 1, en función del número de Reynolds corregido  $N_{Re} / (1-\epsilon)$ .



**FIGURA N° 1:** Caída de presión para flujo en lecho poroso (Foust et al., 1960).

Los datos experimentales se alejan de la predicción realizada por la ecuación anterior en un máximo de 20%, lo que está indicando que es un buen modelo.

Otras relaciones para predecir la pérdida de carga en lecho poroso, se han encontrado en forma empírica, como la de Leva y Grummer (Foust et al., 1960).

$$\frac{(-\Delta p)_f \rho_c}{L} = \frac{0,0243 G^{1,9} \mu^{0,1} \lambda^{1,1}}{D_p^{1,1} \rho} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (13)$$

$D_p$  = o diámetro de la partícula, calculado por la expresión dada, es muy sensible, respecto a las fracciones de material fino presente en la muestra.

Un método más general, es calcular el  $D_p$  mediante medidas de la permeabilidad  $K$ , obtenida de la ecuación de Darcy.

$$v = \left( \frac{g_c D_p^2 F_{Re}}{32 F_f} \right) \left( \frac{(-\Delta P)_f}{L \mu} \right) = K \frac{(-\Delta P)_f}{L u} \quad (14)$$

y  $K$  por definición es:

$$K = \frac{g_c D_p^2}{32} \frac{F_{Re}}{F_f} \quad (15)$$

En función de  $s$  que es el área de las partículas por unidad de volumen de las mismas.

$$v = g_c \frac{s^{-2} X^3}{5(1 - X^2)} \frac{(-\Delta P)_f}{L \mu} \quad (16)$$

Esta última relación se puede aplicar a lechos formados por materiales, como lana de vidrio, fibras o materiales, cuyos tamaños no pueden expresarse en términos de una dimensión, como el diámetro o por análisis granulométrico.

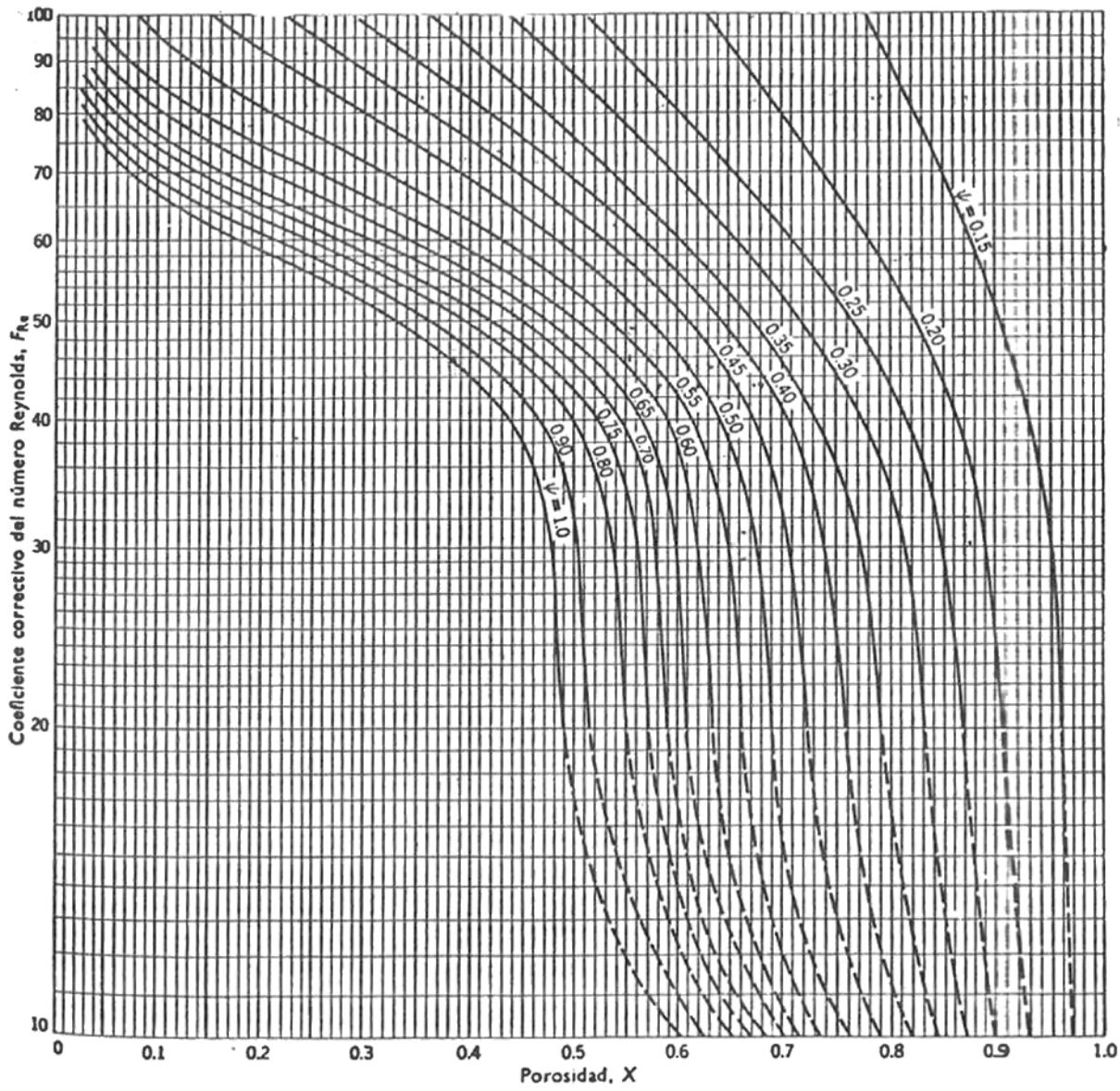
La constante puede variar entre 5 y 5,5 (Brown y Asociados, 1950.)

$\lambda$  es el factor de forma que se obtiene de:

$$\lambda = 0,205 \frac{A_p}{V_p^{2/3}} \quad (17)$$

La relación de Leva y Grummer (Foust et al., 1960), es válida para  $N_{Re}$  altos y partículas relativamente grandes.

Brunell y Katz (Foust et al., 1960) correlacionaron el  $N_{Re}$  y el  $f$  con factores  $F_f$  y  $F_{Re}$  para partícula fina, estos se pueden obtener de los gráficos que se presentan a continuación y los factores correctivos dependen de la porosidad y esfericidad del lecho.



**FIGURA N° 2:** Valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds, en función de la porosidad y de la esfericidad. (Brown y Asociados, 1950).

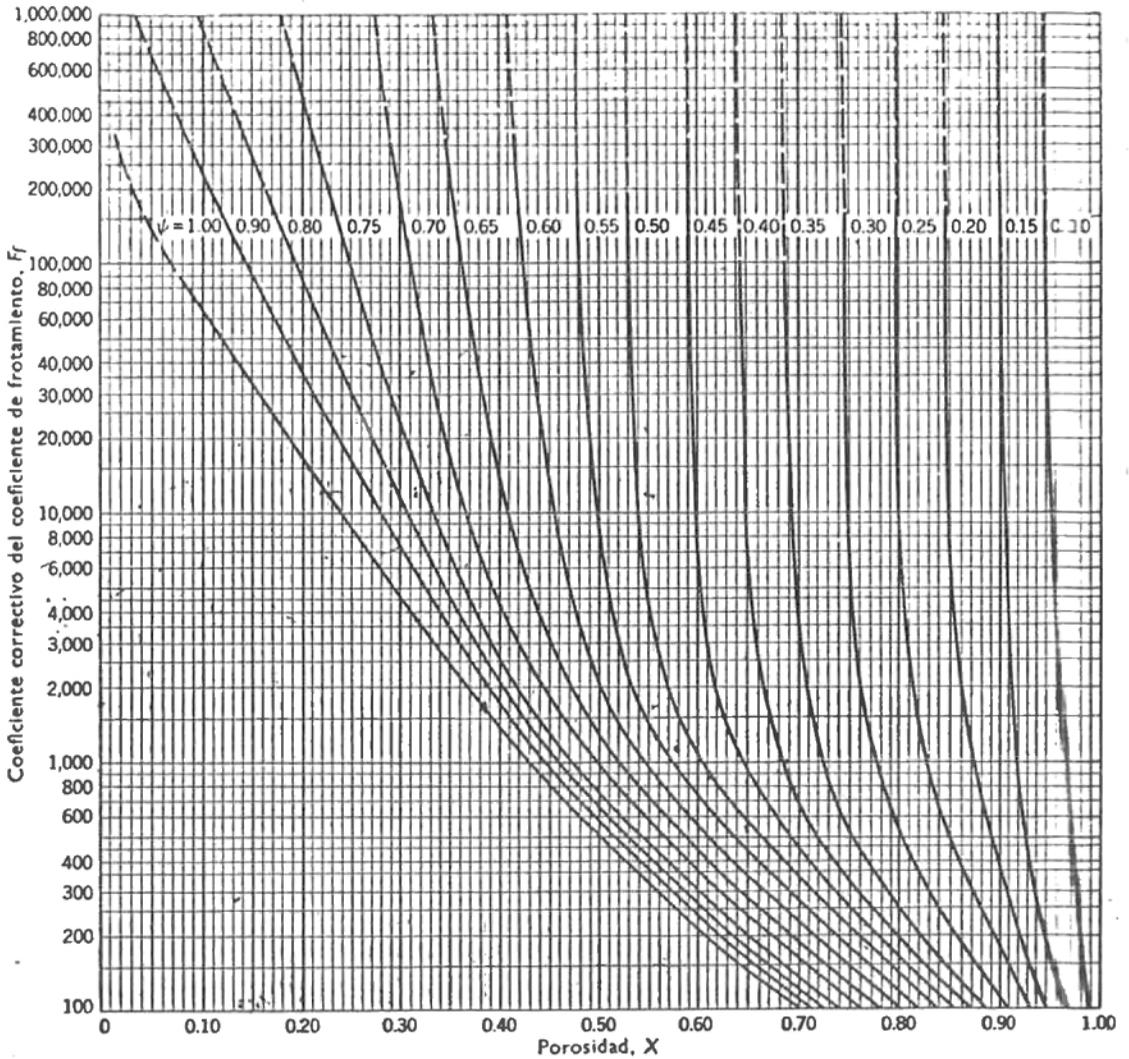
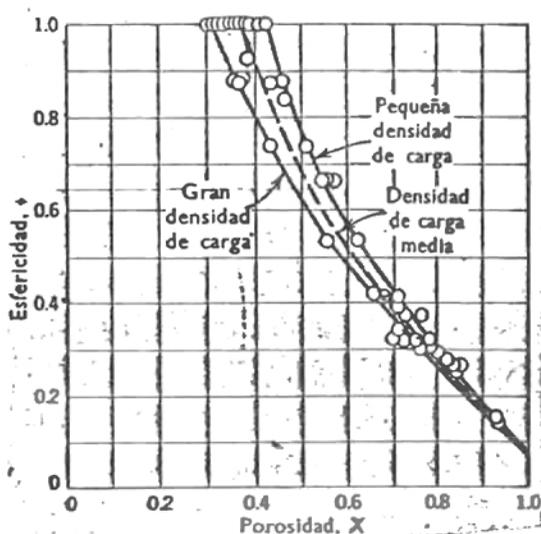


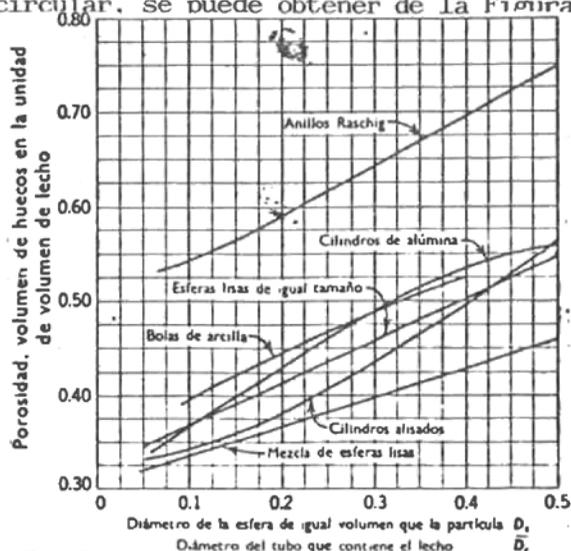
FIGURA N° 3: Valores del coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento  $F_f$ , en función de la porosidad y de la esfericidad. (Brown y Asociados, 1950).

La porosidad se puede calcular a partir de la esfericidad, según se presenta en la Figura N° 4.



**FIGURA N° 4:** Representación gráfica de la función que liga a la esfericidad con la porosidad. Se refiere a lechos empaquetados al azar, constituidos por partículas de tamaño uniforme. (Brown y Asociados, 1950).

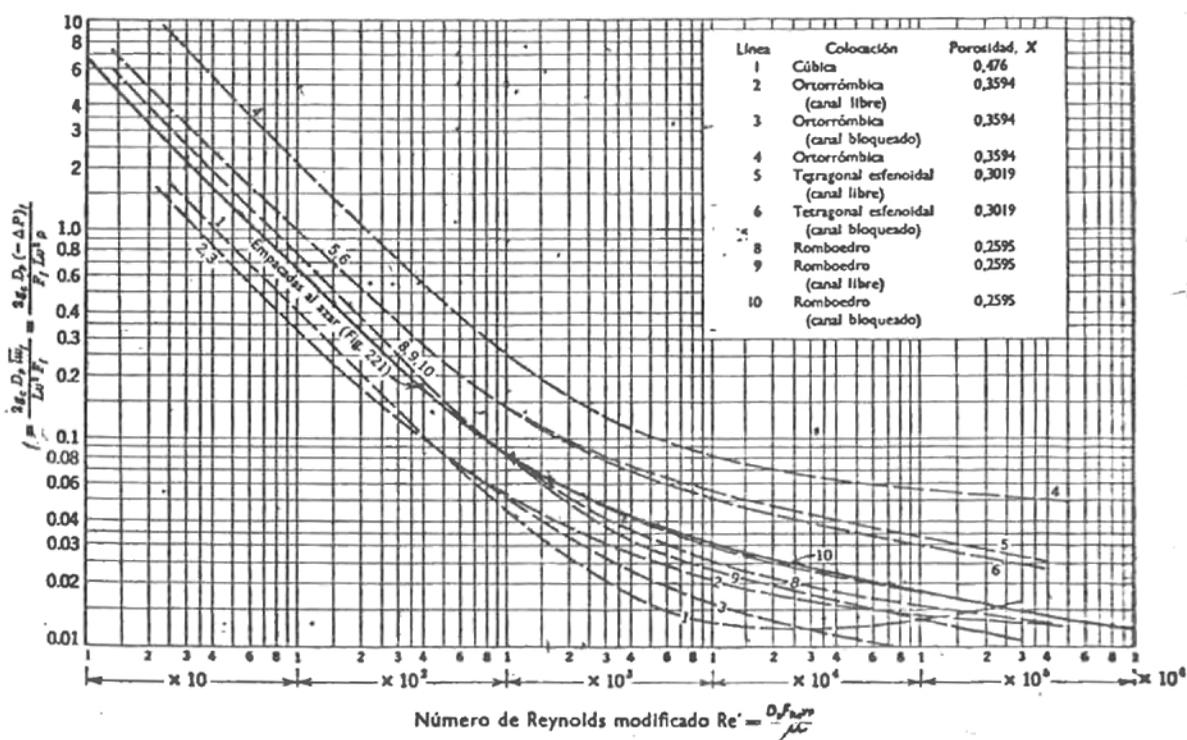
y si está en un tubo circular, se puede obtener de la Figura N° 5:



**FIGURA N° 5:** Representación de la porosidad en función de la relación de diámetros  $D_s/D_c$ . (Brown y Asociados, 1950).

La rugosidad de las partículas tiene una importancia menor y los datos experimentales han indicado que su efecto se puede despreciar (Brown y Asociados, 1950).

La orientación es una variable importante en casos, como los indicadores en la Figura N° 6; en forma experimental se obtuvieron curvas que presentan la influencia de la orientación de las partículas en el Reynolds modificado y en  $f/F_f$ .



**FIGURA N° 6:** Valor del coeficiente de fricción modificado ( $f/F_f$ ), en función del número de Reynolds modificado ( $Re'$ ), para partículas empaquetadas al azar y para esferas apiladas. (Brown y Asociados, 1950).

La influencia de la distribución diferente de esferas apiladas en la porosidad, se presenta en la Figura N° 7.

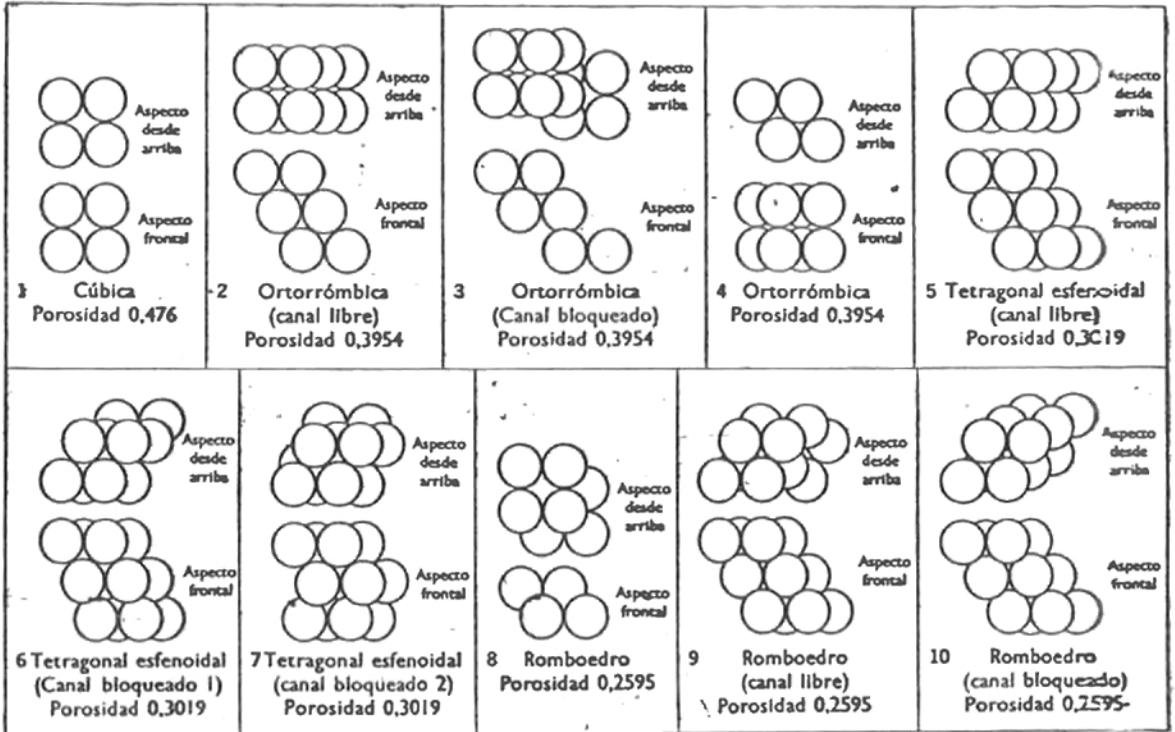


FIGURA N° 7: Distintos sistemas de carga ordenada de un lecho formado por esferas, y su influencia en la porosidad. (Brown y Asociados, 1950).

Ejemplo:

Se desea averiguar el gasto de una corriente de aire que pasa por un trozo de tubo normal de 4 pulgada, que contiene una capa de anillos Raschig de 3/8 de pulgada (9,5 mm), en las condiciones siguientes:

- Espesor de lecho o capa	0,60 m
- Gradiente de presión	82 cm de agua
- Temperatura del aire	32°C
- Presión barométrica	745 mm de Hg
- Porosidad del lecho	0,5545
- Diámetro exterior de los anillos	0,385 pulg = 0,78 mm
- Altura de los anillos	0,397 pulg = 10,1 mm
- Espesor de la pared de los anillos	0,0836 pulg = 2,12 mm
	(Brown et al.)

Solución:a) Cálculo de la esfericidad:

Area de la superficie de los anillos:

-Superficie externa:

$$(3,1416) (0,978) (1,01) = 3,10 \text{ cm}^2$$

-Superficie interna:

$$(3,1416) [0,978 - 2(0,212)] 1,01 = 1,76 \text{ cm}^2$$

-Superficie de la bases:

$$\frac{2\pi}{4} \left\{ (0,978)^2 - [0,978 - 2(0,212)]^2 \right\} = 1,02 \text{ cm}^2$$

-Superficie total de la partícula:

$$3,10 + 1,76 + 1,02 = 5,88 \text{ cm}^2$$

-Volumen de un anillo Raschig:

$$= \frac{\tilde{V}}{4} \left\{ (0,978)^2 - [0,978 - 2(0,212)]^2 \right\} 1,01 = 0,519 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{\tilde{V} D^3}{6} = 5,19 \text{ cm}^3$$

$$D = 0,997 \text{ cm} \approx 1 \text{ cm}$$

$$A = \tilde{V} D^2 = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$\psi = 3,14/5,88 = 0,534$$

b) Cálculo de  $F_{Re}$  y  $F_f$ :

De la Figura N° 2 con  $\psi = 0,534$  se obtiene  $F_{Re} = 49$  y de la Figura N° 3 se obtiene  $F_f = 1600$ .

c) Cálculo de la velocidad:

El gradiente de presión de 82 cm de agua es equivalente a 60,3 mm de Hg. Debido a la variación pequeña de presión, puede utilizarse el medio aritmético de la densidad.

Con el peso molecular medio del aire 29 y a la presión media de 775 mm de Hg, la densidad media del aire, se calcula como para un gas ideal.

$$\rho = \frac{MP}{RT} = \frac{(29)(1,01)}{(0,082)(305)}$$

$$\rho_{\text{medio}} = 1,17 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,0182 \text{ cP}$$

$$Re = \frac{D_p F_{Re} \rho v}{\mu} = \frac{9,78(10^{-3})(49)(1,18)v}{(0,0182)(10^{-3})} = 31100 v$$

$$\frac{f}{F_f} = \frac{2 g_c D_p (-\Delta P)_f}{L F_f v^2} = \frac{2(9,81)(9,78)(10^{-3})(60,3)(13,6)}{(0,60)(1,18)(1600)v^2} = \frac{0,1385}{v^2}$$

Combinando estas ecuaciones, se tiene:

$$\frac{f}{F_f} = \frac{(0,1385) (31,100)^2}{(Re')^2} = \frac{1,34 (10^8)}{(Re')^2}$$

$$\log \frac{f}{F_f} = \text{constante} - 2 \log (Re')$$

En la Figura N° 6 se traza una recta de pendiente -2 hasta que corte la curva de empaquetamiento al azar.

$$\text{Para } v = 1 \text{ m/s} \quad Re' = 31.100 \text{ y } \frac{f}{F_f} = 0,1385$$

$$\text{Para } v = 0,2 \text{ m/s} \quad Re' = 6220 \text{ y } \frac{f}{F_f} = 3,46$$

Llevados estos puntos al gráfico N° 6, la recta trazada por ellos, corta a la curva de empaquetamiento al azar en  $Re' = 80.000$ .

$$v = \frac{80.000}{31.100} = 2,57 \text{ m/s}$$

que es la velocidad superficial media del aire, a través de la superficie de la sección transversal del tubo de 4 pulg no obstruido.

#### d) Cálculo del gasto:

La cantidad de aire que pasa por esta sección de relleno es:

$$2,57 \text{ m/s} (8,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2) (3600 \text{ s/h}) (1,18 \text{ kg/m}^3) = 89,7 \text{ kg/h}$$

Este valor está de acuerdo con la intensidad de flujo observada (96,5 kg/h) en un ensayo experimental realizado en las condiciones antes indicadas (Brown et al., 1950).

Ejemplo:

Un lecho de cubos de 1/4 pulg, se utiliza como relleno para un calentador regenerativo. Los cubos forman un lecho de 10 pie en el calentador regenerativo que es un cilindro. El aire que fluye a través del lecho poroso entra a 80°F y 100 psia y sale a 400°F.

El caudal másico es de 1000 lb/h. pie<sup>2</sup> de sección transversal libre. Calcular la caída de presión a través del lecho. (Foust et al., 1960).

Solución:a) Cálculo de la porosidad:

Para cubos de 1/4 pulg:

$$D_p = \frac{6 V_p}{S_p} = \frac{6 \cdot (0,25)^3}{6 \cdot (0,25)^2} = 0,25 \text{ pulg}$$

$$\psi = \frac{\tilde{V} \left( \frac{6 V_p}{\tilde{V}} \right)^{2/3}}{A_p} = \frac{\tilde{V} \left( \frac{6}{\tilde{V}} \right)^{2/3} [(0,25)^3]^{2/3}}{6 (0,25)^2} = \left( \frac{\tilde{V}^{3/2} \cdot 6}{63/2 \tilde{V}} \right)^{2/3} = 0,806$$

De la Figura N° 4, se tiene:

$$X \text{ o } \epsilon = 0,44$$

b) Cálculo del  $v_{sm}$ :

Suponiendo que la pérdida de carga en el lecho es pequeña comparada con la presión del sistema y este  $\Delta p$  produce efectos pequeños en la densidad.

Se tendría:

$$\rho_1 = \frac{PM}{RT_1} = \frac{100 (29)}{(10,73) (540)} = 0,500 \text{ lb/pie}^3$$

$$\rho_2 = \frac{PM}{RT_2} = \frac{100 (29)}{(10,73) (860)} = 0,314 \text{ lb/pie}^3$$

$$v_{sm} = \frac{\frac{1000}{0,500} + \frac{1000}{0,314}}{2} = 2595 \text{ pie/h}$$

c) Cálculo de la pérdida de carga:

$$\frac{NRe}{1-\epsilon} = \frac{\frac{D_p G}{\mu}}{1-\epsilon} = \frac{(0,25) (1000)}{12 (1-0,44) (0,023 \times 2,42)} = 669$$

Con este valor se entra a la Figura N° 1, y se obtiene:

$$\frac{(-\Delta p)_f g_c D_p}{L \rho v_{sm}^2} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)} = 2,00$$

Se resuelve para  $(-\Delta p)_f$ , considerando que  $\rho v_{sm} = G = 1000$   
lb/h.pie<sup>2</sup>.

$$-\Delta p = \frac{2 \times 10 \times 1000 \times 2595 \times 0,56}{[32,2 \times (3600)^2] \frac{0,25}{12} (0,44)^3} = 40,4 \text{ lbf/pie}^2$$

$$-\Delta p = 0,28 \text{ psi}$$

Otro método para determinar la pérdida de carga en lecho poroso, es el seguido por Ergun (Loncin y Merson, 1979), que llegó a la ecuación siguiente:

$$Da \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} = 300 \frac{(1 - \epsilon)}{NRe} + 3,5 \quad (18)$$

en que:

$$Da: \text{ número de Darcy, } Da = \frac{2 D_p \Delta p}{v^2 \int_1 h}$$

en este caso, 3,5 representa la influencia de la energía cinética en la pérdida de carga (Loncin y Merson, 1979).

### Fluidización:

Si la velocidad superficial empieza a aumentar progresivamente, la pérdida de carga empieza a aumentar hasta que el peso aparente del lecho es equilibrado con el gas que pasa por el lecho. Si la velocidad continúa aumentando, la pérdida de carga se mantiene aproximadamente constante y las partículas del lecho se separan unas de otras, provocando un aumento de la altura del lecho.

Al observar la superficie superior del lecho, se ve como si estuviera horizontal y ya se puede hablar de lecho fluidizado.

En la Figura N° 8, se ilustra el comportamiento de la pérdida de carga en un lecho al variar el NRe.

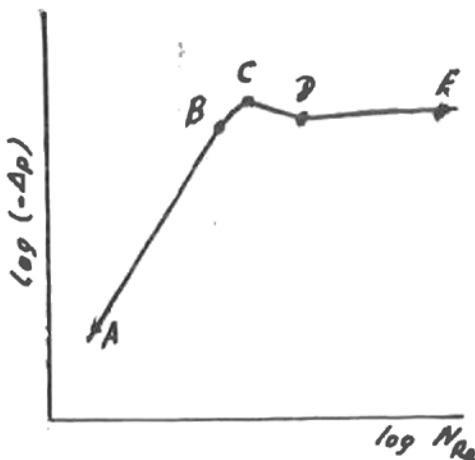


FIGURA N° 8: Fluidización de un lecho de partículas sólidas.  
(Foust et al., 1960)

El lecho es estable entre los puntos A y B; la pérdida de carga y el número de Reynolds están relacionados por:

$$\frac{(-\Delta p)_f g_c}{L} \frac{D_p}{\rho v^2} \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} = 150 \frac{1 - \epsilon}{NRe} + 1,75 \quad (20)$$

La pérdida de carga equilibra el peso del lecho en el punto B.

El lecho es inestable entre los puntos B y C; y las partículas se acomodan para ofrecer una resistencia mínima al flujo de gas. El arreglo más flojo entre las partículas, se logra en el punto C, que es el punto de fluidización.

Al estar el lecho fluidizado, las partículas se mueven libremente y tienden a moverse, de modo que ofrezcan la resistencia máxima,

El coeficiente de frotamiento  $f$ , se encuentra en función del  $NRe$  para distintas esfericidades en el Gráfico N° 9:

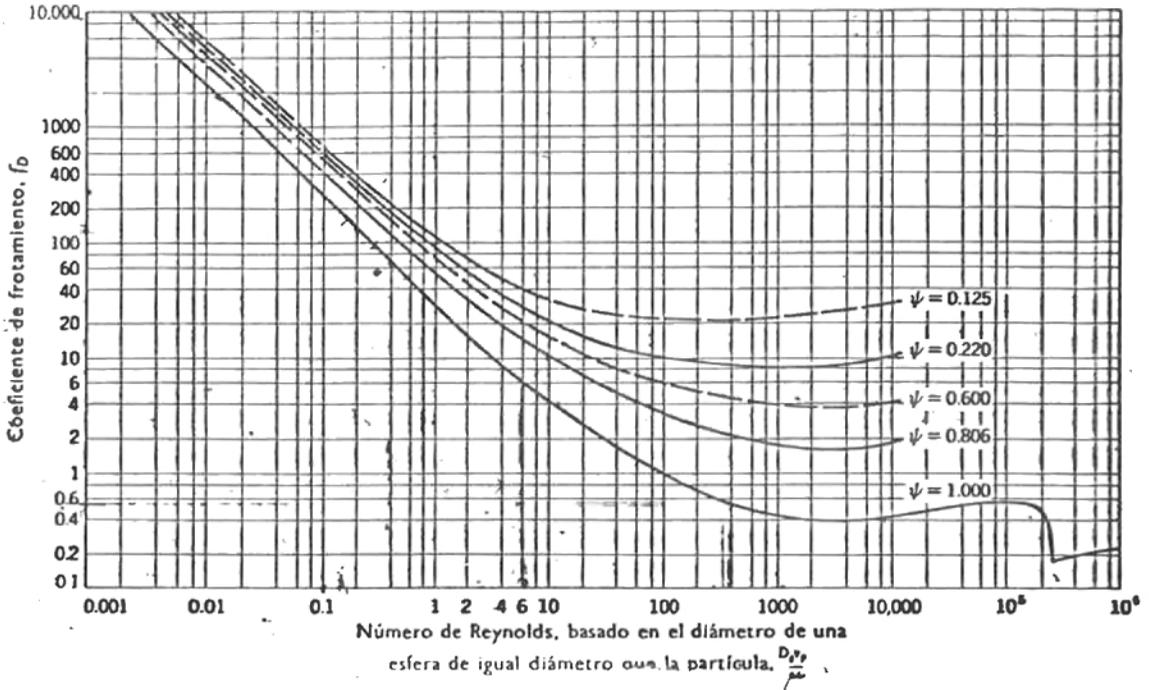


FIGURA N° 9: Valores del coeficiente de frotamiento (coeficiente de arrastre) en función del número de Reynolds, para partículas de diversa esfericidad. (Brown y Asociados, 1950).

Hay que tener presente que las curvas se basan en un diámetro  $D_s$ , que no corresponde con el tamaño de la partícula, determinado mediante un análisis por tamizado (valor medio entre las aberturas de las mallas de los tamices límites de la serie). El tamaño de la malla del tamiz se aproxima a la dimensión seguida por orden decreciente de las dimensiones de la partícula.

Por ejemplo, un prisma de lado  $a \times 2a \times 3a$ , tiene como dimensión efectiva  $2a$ , que determina un tamaño granulométrico por tamizado, pero el diámetro de una esfera que posee el mismo volumen ( $D_s$ ) es de  $1,127 (2a) = 2,254a$ .

Un cubo de arista  $a$  tiene este mismo valor como diámetro, efectuado en el análisis por tamizado y de  $(1,24 a)$  como diámetro ( $D_s$ ) de la esfera de volumen igual a dicho cubo (Brown et al., 1950).

Las partículas se mueven libremente más allá del punto C, colisionando unas con otras.

Las partículas al alcanzar el punto D están en pleno movimiento.

Los aumentos del  $NRe$  producen incrementos pequeños en la pérdida de carga pasado el punto D.

El lecho continúa expandiéndose y las partículas tienen movimiento libre, cada vez más rápido y más independiente.

Llega un momento en que las partículas se mueven con el fluido y el lecho deja de existir, que es lo que sucede en el punto E.

Dos tipos de fluidización se han encontrado en los estudios experimentales:

a) Fluidización particular:

Se produce cuando las densidades del sólido y del fluido no son muy diferentes, las partículas son pequeñas y la velocidad del fluido es baja. El lecho se fluidiza homogéneamente y cada partícula se mueve individualmente en un espacio libre uniforme. La fase sólida presentó las características de un fluido.

b) Fluidización agregativa:

Se presenta cuando las densidades del sólido y del fluido son diferentes, las partículas son grandes y la velocidad del fluido es relativamente alta.

La fluidización es dispareja y el fluido pasa por zonas preferenciales, produciendo surtidores de partículas en la superficie del lecho. El lecho se comporta como si fuera un líquido con burbujeo de gas a través de él.

El número que es característico para separar los distintos tipos de fluidización, es el de Froude (Foust et al., 1960).

$$Fr = v^2/Dg \quad (21)$$

Si  $Fr < 1$ , se produce la fluidización particular y si  $Fr > 1$ , se produce la fluidización agregada.

Pero, hay que tener presente que experimentalmente se ha encontrado, que si el fluido es líquido, se produce la fluidización particular y la fluidización agregativa se produce cuando el fluido es gas.

#### Cálculo de las caídas de presión:

En el estado de fluidización, las fuerzas que tienden a elevar las partículas, son las de flotación y roce por fricción y son iguales al peso total de las partículas.

$$\frac{g}{gc} (1 - X) (LA) \rho + (-\Delta p)_f A = \frac{g}{gc} (1 - X) (LA) \rho_s \quad (22)$$

$\rho$  : densidad del fluido

$\rho_s$  : densidad de las partículas sólidas

$(-\Delta p)_f$  : caída de presión, necesario para la fluidización

despejando:

$$(-\Delta p)_f = L (1 - X) (\rho_s - \rho) \left(\frac{g}{gc}\right) \quad (23)$$

ó

$$\frac{(-\Delta p)_f}{L (1 - X)} = (\rho_s - \rho) \left(\frac{g}{gc}\right) \quad (24)$$

La expansión del lecho se puede calcular de:

$$L_1 (1 - \epsilon_1) = L_2 (1 - \epsilon_2) \quad (25)$$

$L_1$  : altura del lecho no fluidizante, m

$\epsilon_1$  : porosidad del lecho no fluidizante

$L_2$  : altura del lecho fluidizado, m

$\epsilon_2$  : porosidad del lecho fluidizado

Reemplazando  $h_2 = h_2 (\epsilon_2)$  en:

$$Da \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} = 300 \frac{(1 - \epsilon)}{NRe} + 3,5 \quad (26)$$

(unidades métricas)

se obtiene una ecuación de 3er grado para  $\epsilon_2$ .

Foust et al. (1960), presenta la relación entre el estado expandido y no expandido del lecho.

$$\frac{150 \mu}{g(\rho_s - \rho) D_p^2} (v_{sm} - v_{sm0}) = \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} - \frac{\epsilon_0^3}{1 - \epsilon_0} \quad (27)$$

los subíndices cero indican la condición de la velocidad del fluido, insuficiente para expandir el lecho.

#### Ejemplo:

Un catalizador formado por partículas esféricas de  $D_p=50 \mu\text{m}$  y  $\rho_s = 1,65 \text{ g/cm}^3$ , se utiliza en un reactor de lecho fluidizado a  $900^\circ\text{F}$ , para tratar un hidrocarburo en estado vapor. En las condiciones de operación, la viscosidad del fluido es  $0,02 \text{ cP}$  y la densidad es  $0,21 \text{ lb/pie}^3$ .

Calcular la velocidad superficial del gas, necesaria para fluidizar el lecho, la velocidad a la cual el lecho se va con el gas, la expansión del lecho cuando la velocidad del gas es el promedio de las velocidades determinadas. ¿Podría producirse una fluidización particular? (Foust et al., 1960).

Solución:

a) Cálculo de la porosidad:

De la Figura N° 4, para esferas de pequeña densidad de carga, dá:

$$\epsilon = 0,42$$

b) Cálculo de la velocidad de fluidización:

$$v_{sm0} = \frac{\epsilon_0^3}{1 - \epsilon_0} \frac{(\rho_s - \rho_g) D_p^2}{150 \mu}$$

$$= \frac{(0,42)^3}{0,58} \frac{(1,65 \times 6,24 - 0,21) 32,2 \left(\frac{0,050}{25,4 \times 12}\right)^2}{150 (0,02 \times 0,000672)}$$

$$v_{sm0} = 0,0056 \text{ pie/s}$$

que es la velocidad al comenzar el lecho a fluidizarse.

c) Cálculo de la velocidad, en la cual el lecho se va con el gas:

Esto sucede cuando la velocidad del gas es igual a la velocidad de caída libre de la partícula.

El flujo es laminar para estas partículas pequeñas y la velocidad de caída libre es:

$$v_t = \frac{(\rho_s - \rho) g D_p^2}{18 \mu} = \frac{102,8 \times 32,2 (0,0269 - 10^{-6})}{18 (0,02 \times 0,000672)}$$

$$v_t = 0,37 \text{ pie/s}$$

d) Cálculo de la expansión del lecho:

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} &= \frac{150 \mu}{g (\rho_s - \rho) D_p^2} (v_{sm} - v_{sm}^e) + \frac{\epsilon_0^3}{1 - \epsilon_0} \\ &= \frac{0,002014}{32,2 \times 102,8 \times 0,0269 \times 10^{-6}} \left( \frac{0,37 + 0,0056}{2} - 0,0056 \right) + \frac{(0,42)^3}{0,58} \end{aligned}$$

$$\frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} = 4,308$$

$$\epsilon = 0,855$$

e) Cálculo del Fr:

$$Fr = \frac{v_{sm}^2}{D_p g_c} = \frac{(0,0056)^2}{0,161 \times 10^{-3} \times 32,2}$$

$$Fr = 0,0061$$

f) Por ser  $Fr < 1$ , se produciría una fluidización particular.

Ejemplo:

Se desea establecer un contacto íntimo, en estado fluidizado, entre 25 kg de un catalizador, formado por partículas esféricas de superficie lisa, de diámetro de 4,4 mm, con  $600 \text{ m}^3/\text{h}$  de un gas, cuya densidad es  $2,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ , y de viscosidad igual a  $0,011 \text{ cP}$  en las condiciones de trabajo. La densidad del catalizador es de  $1,370 \text{ g}/\text{cm}^3$  y la porosidad de un lecho del mismo, bien empaquetado es igual a  $0,383$ .

Hallar el tamaño del reactor que deberá utilizarse.

(Brown et al., 1950)

Solución:

El reactor debe tener la longitud suficiente para contener el lecho en estado de expansión.

El diámetro del lecho puede determinarse mediante la velocidad másica del gas, bajo las condiciones de trabajo. La velocidad másica del gas ha de tener un valor tal, que el  $N_{Re}$  con el cual trabaja, el sistema sea superior al  $N_{Re}$  al que tiene lugar la fluidización. El  $N_{Re}$  de trabajo puede elegirse, arbitrariamente, igual a tres veces el  $N_{Re}$  crítico, en el punto de fluidización. La altura del reactor debe ser, al menos, igual a la del lecho en estado fluidizado.

Al graficar el  $\log N_{Re}$  vs  $\log$  porosidad, se puede determinar la porosidad del lecho en las condiciones de operación, esto permite hallar la altura del reactor.

a) Cálculo del Reynolds en el punto de fluidización:

$$\begin{aligned} \frac{(-\Delta P)_f}{L} &= \frac{g}{gc} (1 - X) (\rho_s - \rho) \\ &= (1) (1 - 0,383) (1370 - 2,3) \\ &= 843 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{m} \end{aligned}$$

La velocidad superficial  $v$  del gas en el punto de fluidización se obtiene por tanteo.

Se supone  $v = 0,945$  m/s y con la porosidad y esfericidad de la Figura N° 2 se obtiene  $FRe = 46,0$  y

$$\frac{D_p v \rho FRe}{\mu} = \frac{(4,4 \times 10^{-3}) (0,945) (2,3) (46)}{1,1 \times 10^{-5}} = 40.000$$

$f/Ff$  se obtiene de la Figura N° 6 con la línea empaquetado al azar.

$$\frac{f}{Ff} = \frac{2gc D_p}{v^2 Ff} \frac{-\Delta Pf}{L} = 0,022$$

y  $Ff = 1600$  se obtiene de la Figura N° 3 y por lo tanto,

$$\frac{-\Delta Pf}{L} = \frac{(0,022) (0,945)^2 (2,3) (1600)}{(2) (9,81) (4,4 \times 10^{-3})} = 840$$

Luego, el  $v = 0,945$  m/s es correcta.

El  $NRe$  en el punto de fluidización es:

$$NRe = \frac{D_p \cdot v \rho}{\mu} = \frac{(4,4 \times 10^{-3}) (0,945) (2,3)}{1,1 \times 10^{-5}} = 870$$

#### b) Cálculo de una velocidad de fluido adecuada a la operación

Esto significa algo superior al correspondiente punto de fluidización.

$NRe$  elegido arbitrariamente igual a 3 veces el crítico:

$$NRe = 3 (870) = 2610$$

La velocidad del gas será 3 veces 0,945:

$$v = 2,835$$

c) Cálculo del diámetro del reactor

La superficie del reactor es:

$$A = \frac{600}{3600} \cdot 2,835 = 0,0588 \text{ m}^2$$

El diámetro del reactor es:

$$\phi = \sqrt{\frac{0,0588}{3,14}} = 0,273 \text{ m} = 27,3 \text{ cm}$$

d) Cálculo del NRe para la sedimentación libre

Este cálculo se realiza por tanteo, suponiendo una velocidad límite de 9,75 m/s.

$$NRe = \frac{D_p v \rho}{\mu} = \frac{(4,4 \times 10^{-3}) (9,75) (2,3)}{1,1 \times 10^{-5}} = 9000$$

Con este valor se entra a la Figura N° 9 que da el coeficiente de roce en función del NRe para distintas esfericidades y se obtiene:

$$f_D = \frac{4 (\rho_s - \rho) g D}{3 v_m^2 \rho} = 0,40$$

De aquí se calcula la velocidad de sedimentación libre:

$$v_m = \frac{4(1370 - 2,3) (9,81) (4,4 \times 10^{-3})}{3 (0,40) (2,3)} = 9,24 \text{ m/s}$$

Este valor no presenta mucha diferencia con el valor supuesto.

e) Cálculo de la altura del lecho fluidizado

Para ello se debe construir el gráfico log porosidad versus log NRe.

$$1.- X = 0,383$$

$$NRe = 870$$

$$2.- X = 1,0$$

$$NRe = 9000$$

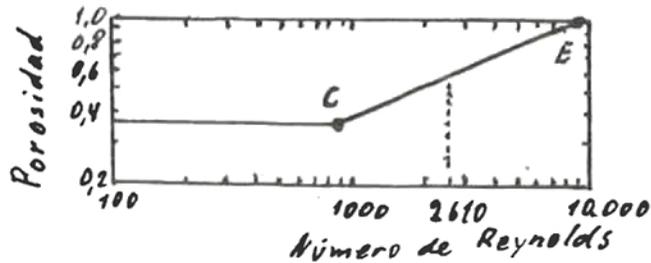


FIGURA N° 9 : Resolución gráfica del ejemplo numérico mediante la representación del logaritmo del número Reynolds en función de los correspondientes logaritmos de la porosidad.

(Brown y Asociados, 1950)

Se traza una horizontal desde la porosidad 0,383 hasta el  $NRe = 870$  que es el mínimo de fluidización.

Este punto C se une con los valores del punto E,  $X = 1,0$  y  $NRe = 9000$ .

Entrando al gráfico, con el  $NRe = 2610$  se obtiene  $X = 0,58$ .

Volumen del lecho fluidizado:

$$V = \frac{25}{(1370)(1-0,58)} = 0,0435 \text{ m}^3$$

Altura del lecho fluidizado:

$$\frac{0,0435}{0,0588} = 0,74 \text{ m}$$

f) Altura del reactor

La altura debe ser suficiente para impedir el arrastre de las partículas sólidas proyectadas por encima del lecho.

Se puede tomar una altura igual al doble de la altura calculada del lecho:

$$2 \times 0,74 = 1,48 \text{ m}$$

DISEÑO DE UN CONGELADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Este método establecido por De Michelis y Calvelo (1985), considera que el tiempo de residencia de las partículas en el congelador de lecho fluidizado es por lo menos igual al tiempo de congelación de la partícula.

El congelador tiene una longitud de correa L (m) y ancho W (m) con una alimentación másica F (kg/s), el producto tiene una temperatura inicial  $T_i$  (°C) y el fluido gaseoso enfriado tiene una temperatura  $T_f$  (°C).

El tiempo de congelación es estimado por el modelo de Nagaoka (Nagaoka et al., 1955) (Castro, 1986).

$$t_c = \left[ 1 + 0,008 (T_i - T_e) \right] \frac{\Delta \bar{H} \rho_s}{T_e - T_f} \left( \frac{D_p}{6h} + \frac{D_p^2}{24 k_s} \right)$$

en que:

$T_e$  : temperatura que comienza la congelación (°C)

$\Delta \bar{H}$  : cambio de entalpía del producto desde  $T_i$  a  $T_r$  (J/kg)

$T_r$  : temperatura final del producto congelado (°C)

- $\rho_s$  : densidad del alimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $D_p$  : diámetro de la partícula (m)  
 $h$  : coeficiente de transferencia de calor a la partícula ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )  
 $k_s$  : conductividad térmica de la partícula congelada ( $\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$ )

El cambio de entalpía  $\Delta \bar{H}$ , puede calcularse por medio de:

$$\Delta \bar{H} = C_{ps} (T_i - T_e) + Y_o \lambda_f \omega + C_{pe} (T_e - T_r)$$

en que:

- $C_{ps}$  : calor específico de la partícula no congelada ( $\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$ )  
 $C_{pe}$  : calor específico de la partícula congelada ( $\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$ )  
 $Y_o$  : contenido de agua de la partícula en base húmeda  
 $\lambda_f$  : calor de solidificación del agua ( $\text{J}/\text{kg}$ )  
 $\omega$  : fracción de hielo a la temperatura  $T_r$

El  $\Delta \bar{H}$  se puede calcular a partir de los gráficos entalpía versus humedad o las tablas correspondientes (Castro, 1986).

Por otra parte el calor transferido de la partícula al medio ambiente, se puede evaluar con:

$$q = h (T_s - T_f)$$

en que:

- $q$  : flujo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $T_s$  : temperatura en la superficie de la partícula ( $^\circ\text{C}$ )

El aire entra a temperatura  $T_{g_1}$  al lecho poroso y empieza a variar a medida que lo cruza, su valor depende de la altura del lecho y de la posición longitudinal. Al final, las partículas no están en

posición estacionaria y se mueven al azar, estando expuestas a temperaturas diferentes.

Entonces, la ecuación anterior se reemplaza por:

$$q = h_{\text{eff}} (T_s - T_{g1})$$

donde  $T_{g1}$  es la temperatura de entrada del aire al lecho, y

$$h_{\text{eff}} = \frac{G \hat{C}_p}{a H} \left( 1 - e^{-h a H / G \hat{C}_p} \right)$$

con,

$$G = \rho V_o \quad a = 6 (1 - \epsilon) / D_p$$

donde:

$G$  : caudal másico superficial de aire ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )

$\rho$  : densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_o$  : velocidad superficial del aire ( $\text{m}/\text{s}$ )

$\hat{C}_p$  : calor específico del aire ( $\text{J}/\text{kg C}$ )

$D_p$  : diámetro efectivo de la partícula ( $\text{m}$ )

$H$  : altura del lecho expandido

Con estos antecedentes De Michelis y Calvelo (1985), plantean que se puede calcular el tiempo de congelación de cualquier partícula del lecho, reemplazando  $T_f$  por  $T_{g1}$  y  $h$  por  $h_{\text{eff}}$  en la expresión de Nagaoka.

Por otra parte, utilizando el factor de Colburn, lograron la siguiente correlación:

$$j_H = 0,204 \text{ Re}'^{-0,563} \text{ Ar}^{0,179}$$

donde:

$$Re' : \text{Reynolds modificado } Re' = \frac{V_o D_p}{\mu (1-\epsilon)}$$

$\mu$  : viscosidad del aire (kg/ms)

$$Ar : \text{número de Arquímedes } Ar = \frac{D_p^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$$

que también entregaron en la Figura N° 10.

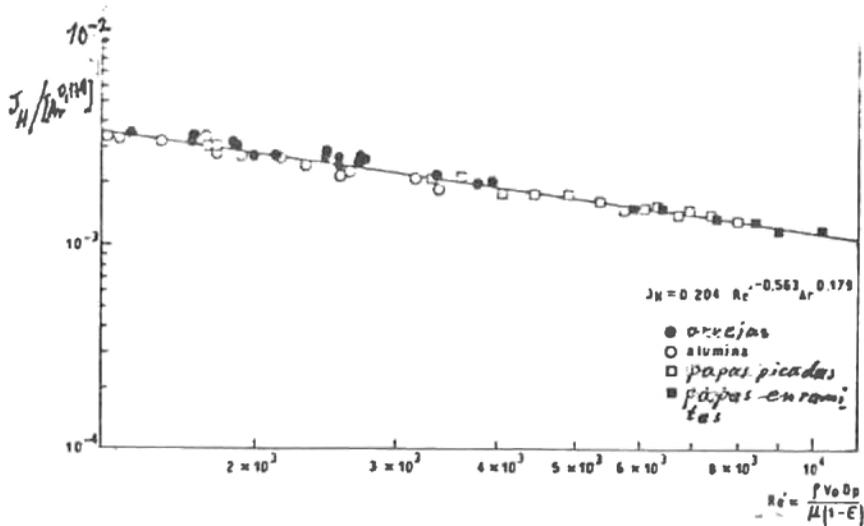


FIGURA N° 10: Correlación del coeficiente de transmisión de calor para alimentos de diferentes formas. (Vásquez y Calvelo, 1983)

y

$$j_H = Nu Re^{-1} Pr^{-1/3}$$

donde:

$$Nu : \text{número de Nusselt, } Nu = \frac{h D_p}{K}$$

$$Pr : \text{número de Prandtl, } Pr = \frac{C_p \hat{C}}{K}$$

Con respecto a la pérdida de carga en el lecho, la ecuación de Ergun da respuestas bastante satisfactorias (De Michelis y Calvelo, 1983a) y la velocidad superficial de fluidización se puede obtener aplicando los métodos ya expuestos.

De Michelis y Calvelo (1983b), propusieron un modelo para el tiempo de residencia, que asegura que el 95% de las partículas de alimento están congeladas al salir del lecho fluidizado.

$$\frac{F}{WL} = \frac{H (1-\epsilon) \rho_s}{t_{\min}} \left[ 1 - \sqrt{5,41 t_{\min} Dz/L^2} \right]$$

Esta ecuación es válida si  $Pe > 2$ .

donde:

Pe : número de Peclet,  $Pe = FL/Dz \rho_s (1-\epsilon) HW$

Dz : es el coeficiente de dispersión longitudinal que fue correlacionado experimentalmente con la altura del lecho expandido y con la velocidad superficial del aire.

$$Dz = K H^b V_o^c$$

con,

$$K = 9,51 \times 10^{-2} ; \quad b = 2,60 \quad \text{y} \quad c = 3,54$$

H puede calcularse según los modelos vistos anteriormente, como:

$$H = H_o \frac{1-\epsilon_o}{1-\epsilon}$$

en que:

$H_o$  : altura mínima de fluidización (m)

y la porosidad del lecho expandido se puede calcular con:

$$\epsilon = \epsilon_o \left( \frac{V_o}{V_{mf}} \right)^{0,437}$$

en que:

$V_{mf}$  : velocidad superficial del aire a condiciones mínimas de fluidización (m/s).

$V_{mf}$  puede ser calculada utilizando los modelos de fluidización de lechos porosos ya vistos. De Michelis y Calvelo (1985), aplicaron con éxito el modelo de Ergun en arvejas.

Si el tiempo de residencia en el lecho fluidizado  $t_{min}$  se hace igual al  $t_c$ , por lo menos se asegura que el 95% de las partículas estarán congeladas en la salida del lecho.

#### OPTIMIZACION DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCION

De Michelis y Calvelo (1985) buscaron las condiciones óptimas de operación, asunto que no es tan sencillo de resolver, debido a que se presentan efectos como los de mezcla longitudinal; la influencia de este efecto se puede comparar con el de flujo tapón en la figura siguiente:

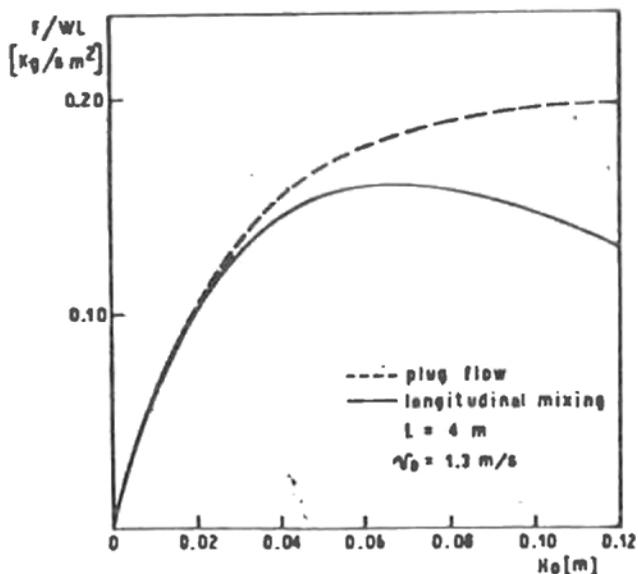
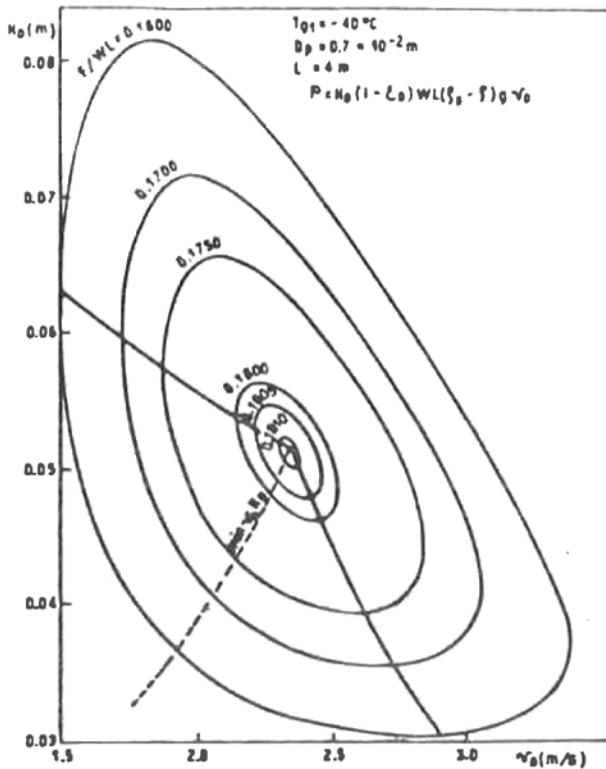


FIGURA N° 11: Efecto de la mezcla longitudinal por área unitaria de la malla en la velocidad de producción (De Michelis y Calvelo, 1985)

Se puede concluir que un incremento de la velocidad del aire aumenta la diferencia al aumentar la mezcla longitudinal de sólidos durante un traslado en el congelador continuo.

A la vez presentaron curvas de igual velocidad de producción y que éstas tienen un valor óptimo.



**FIGURA N° 12:** Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción ( $L = 4 \text{ m}$ ).

(De Michelis y Calvelo, 1985)

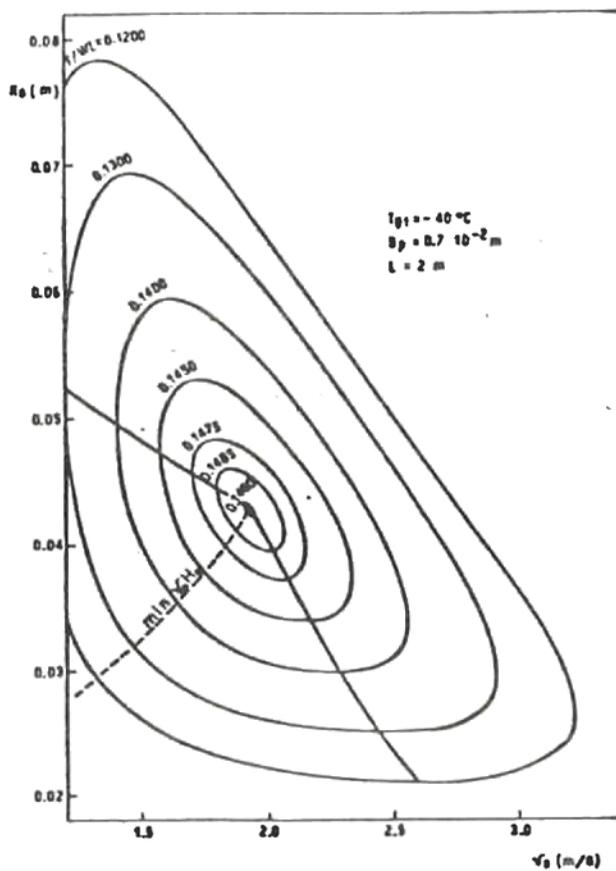


FIGURA N° 13: Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción ( $L = 2\text{ m}$ )

(De Michelis y Calvelo, 1985)

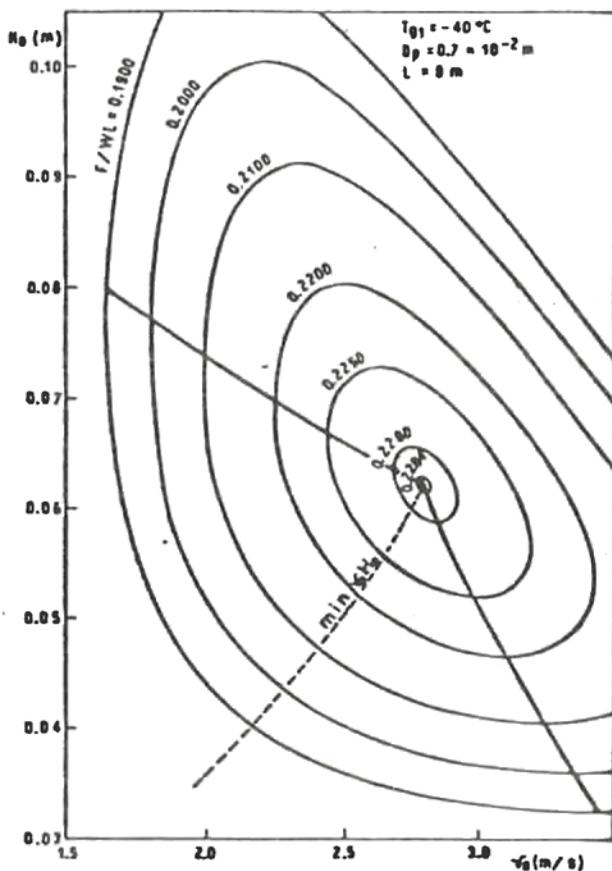


FIGURA N° 14: Influencia de la altura del lecho y de la velocidad superficial del aire en la velocidad de producción ( $L = 8\text{ m}$ )

(De Michelis y Calvelo, 1985)

No hay que olvidar que las variaciones de velocidad del gas están relacionados con la potencia necesaria del soplador.

$$\frac{P}{WL} = V_o \Delta p = V_o H_o (1-t_o) (\rho_s - \rho)_g$$

en que:

P : Potencia consumida por los sopladores (W)

En las Figuras N°s. 12, 13 y 14 se indica el valor  $V_o H_o$  que minimiza la potencia de los sopladores para una velocidad de producción dada y que se cumple:

$$\begin{aligned} (F/WL) \text{ máx} &= \alpha + \beta V_o \\ (F/WL) \text{ máx} &= \alpha' + \beta' H_o \\ (F/W) \text{ máx} &= d L^{e+1} \end{aligned}$$

en que  $\alpha, \alpha', \beta, \beta', d$  y  $e$ , se encuentran en función de la temperatura del gas refrigerante en la Tabla N° 1.

TABLA N° 1  
CONSTANTES PARA PREDECIR LA VELOCIDAD MAXIMA DE PRODUCCION  
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE

Temperatura (°C)	$\alpha$	$\beta$	$\alpha'$	$\beta'$	d	e
- 45	- 0,030	0,100	- 0,031	4,71	0,137	0,314
- 40	- 0,029	0,090	- 0,023	4,11	0,119	0,315
- 35	- 0,022	0,077	- 0,019	3,57	0,100	0,315
- 30	- 0,020	0,064	- 0,015	3,00	0,083	0,315
- 25	- 0,016	0,055	- 0,016	2,50	0,068	0,319
- 20	- 0,015	0,044	- 0,008	1,93	0,051	0,322

(De Michelis y Calvelo, 1985)

Si se conoce  $F/W$  y  $Tg_1$ , se puede conocer  $L$  de:

$$(F/W)_{\text{máx}} = d L^{e+1}$$

con  $F/WL$  se puede ocupar el nomograma siguiente (Figura N° 15), del que se obtiene  $Vo$  y  $Ho$ .

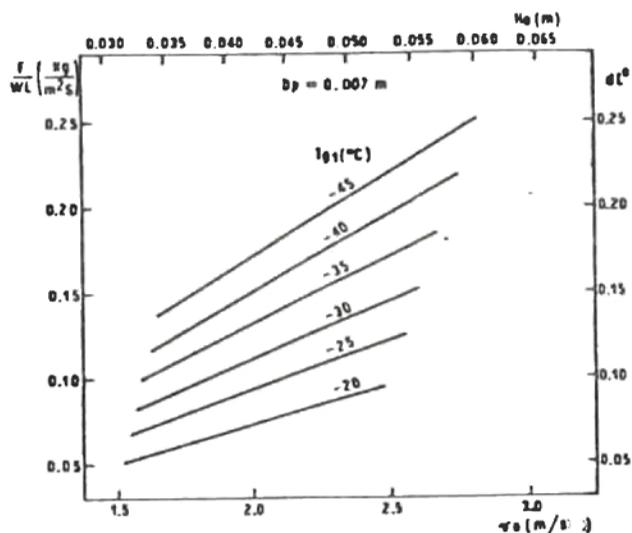


FIGURA N° 15: Nomograma para calcular las condiciones de velocidad de producción máxima.

(De Michelis y Calvelo, 1985)

Hay que recalcar que una vez fijada  $Tg_1$ , las condiciones de operación para la velocidad máxima de producción, están completamente determinados para cualquier parámetro de diseño ( $F/WL$ ,  $Ho$ ,  $Vo$  o  $L$ ).

Cuando es necesario imponer más de un parámetro de diseño, la velocidad máxima de producción no se obtendría, porque las diferentes alternativas deben analizarse con las Figuras N°s. 12, 13 y 14 o con las ecuaciones de diseño; en estos casos, un requerimiento adicional sería la minimización de la potencia del soplador.

Las ecuaciones de diseño fueron obtenidas y probadas para arvejas y se obtuvo una diferencia entre 4 y 20%, entre lo predicho y lo obtenido en un equipo Frigoscandia, para las condiciones de operación óptima; ésto implica altura del lecho entre 4,4 y 6,4 cm.

La optimización y las relaciones se obtuvieron con partículas de  $D_p = 0,7 \times 10^{-2}m$ .

No se debe perder de vista, que las ecuaciones de diseño están hechas en general y las formas de las partículas influyen a través de la esfericidad.

El otro factor necesario para el proyectista, es la pérdida de carga a través del lecho, valor relacionado con la potencia de los sopladores. Este valor se puede obtener para lechos formados por partículas de diferentes formas, tal como está desarrollado en la primera parte.

BIBLIOGRAFIA

- BROWN, G.G. y ASOCIADOS (1950). "Principios de Operaciones Básicas de Ingeniería Química". Marín y Cía., Barcelona, España. Págs. 76-88, 222-241.
- CASTRO, E. (1986). "Propiedades térmicas de los alimentos". Monografías sobre Ingeniería de Alimentos N° 8. Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile. Págs. 1-20.
- DE MICHELIS, A.; CALVELO, A. (1985). "Production rate optimization in continuous fluidized bed freezers". Journal of Food Science 50, págs. 669-673.
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. (1960). "Principles of Unit Operations". John Wiley & Sons Inc., N.Y. Págs. 472-481.
- LONCIN, M.; MERSON, R.L. (1979). "Food Engineering Principles and Selected Applications". Academic press, N.Y. Págs.114-117.
- VASQUEZ, A.; CALVELO, A. (1983a). "Gas-particle heat transfer coefficient for the fluidization of different shaped foods". Journal of Food Science 48, págs. 114-118.
- VASQUEZ, A.; CALVELO, A. (1983b). "Modeling of residence times in continuous fluidized bed freezers". Journal of Food Science 48, págs. 1081-1085.