



HYDRODYNAMIC STUDY OF THE FLUIDIZATION OF CYLINDRICAL PARTICLES

P. Hernández Ruelas, C. F. Cruz Fierro, J. Pinto Espinoza
Instituto Tecnológico de Durango

ABSTRACT

In this research, the hydrodynamic behavior of cylindrical particles in a liquid-solid fluidized bed is studied at laboratory scale. Since their behavior is different than that of spherical particles, it is usually inappropriate to use the same models to describe it. In many fluidized systems of industrial interest, the particles are more similar to cylinder than a sphere.

The main objective of this project is to contribute to the development of more precise descriptions of the hydrodynamic behavior of fluidized beds with particles of geometry different than spherical, specifically cylindrical particles.

Initially, 20 different types of cylindrical particles were selected by visual inspection. Each type was characterized by measuring its length, diameter, weight, density, volume, sphericity, and minimum fluidization velocity, as well as Reynolds number and Archimedes number (calculated from the minimum fluidization velocity). Preliminary fluidization tests were carried out in order to select five specific types of particles for the experimental measurements.

For the experimental stage, a 2-inch diameter fluidization column of circular cross section of 19.63 cm² was built using 6-mm thick acrylic tubing. The column is 60 cm high, it has a calming zone in order to obtain a uniform inlet flow distribution, and thus a uniform fluidization of the cylindrical particles.

Each one of 5 batches of particles was fluidized at six different values of superficial velocity. Bed expansion, minimum fluidization velocity and terminal velocity were measured in each case. The obtained data is compared with the values predicted for spherical particles of equal equivalent diameter.

INTRODUCCIÓN

Existen múltiples ejemplos de procesos químicos, fluidización entre ellos, en los que se tiene partículas sólidas en un flujo, tal como el proceso de alimento, tintes, pinturas, proteínas, emulsión fotográfica, cerámicas, impresión y elaboración de papel (Qi, 2001).

A pesar del progreso obtenido en los últimos años en el conocimiento del comportamiento de las partículas en los diferentes procesos que involucran el contacto de una fase sólida con una fase fluida, la gran mayoría de los modelos usados se basan en la suposición de que las partículas son de forma esférica.

Proceedings

La primera fluidización experimental de cilindros y discos fue reportada por Joseph *et al.* (1987). Algunas partículas coloidales son esféricas; otras son no esféricas y puede tener formas muy complejas. Por ejemplo, la forma del carbonato de calcio extensamente usado en la industria de revestimiento puede ser rómbico o cilíndrico.

La meta de este proyecto es la de contar con descripciones más precisas del comportamiento hidrodinámico de los lechos fluidizados con partículas de geometría diferente a la esfera. Las partículas que aparecen en muchos sistemas fluidizados de interés industrial tienen más similitud con una forma cilíndrica que con una forma esférica. Para describir el comportamiento del lecho, es necesario el conocer la geometría de la partícula.

La ecuación semi-empírica de Richardson-Zaki (Ecuación 1) ha sido ampliamente utilizada para describir la expansión de lechos fluidizados líquido-sólido de partículas esféricas. En este caso es aplicada para demostrar la diferencia del comportamiento de partículas cilíndricas con las partículas esféricas.

$$\ln \frac{u}{u_t} = n \ln \varepsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta ecuación es representada por una línea recta en un gráfico log-log, donde para esferas el exponente de Richardson-Zaki, es constante y para partículas con geometría diferente, puede ser variable. El valor de la fracción hueca, utilizado en la Ecuación 1, es obtenido a partir de la Ecuación 2, en base a la altura del lecho empacado, y la altura del lecho cuando es fluidizado, además de la fracción hueca del lecho empacado,

$$\varepsilon = 1 - \frac{h}{h_0} (1 - \varepsilon_0) \quad \text{Ecuación 2}$$

Para partículas esféricas, el exponente de Richardson-Zaki se puede estimar a partir del número de Arquímedes, de acuerdo a la Ecuación 3 (Wen-Ching Yang)

$$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.043 Ar^{0.57} \quad \text{Ecuación 3}$$

El objetivo general del trabajo de investigación es estudiar el comportamiento hidrodinámico de partículas cilíndricas en un lecho fluidizado. Como objetivos particulares se tiene:

- Diseñar y construir una unidad experimental de fluidización líquido-sólido.
- Seleccionar partículas cilíndricas que, por sus características físicas (tamaño, forma, densidad) abarquen diferentes condiciones de fluidización en el equipo experimental.
- Obtener datos experimentales de las características de fluidización de las partículas cilíndricas seleccionadas.

METODOLOGÍA

Se diseñó y construyó una unidad experimental para fluidización líquido-sólido, que se montó en el Laboratorio de Ingeniería Química. Basándose en el rango de condiciones de operación y a las características de las partículas a fluidizar, se seleccionaron las dimensiones del equipo y los accesorios (bomba y válvulas) e instrumentación básica (medidores de flujo) necesarios.

Enseguida se procedió a una selección física de las partículas cilíndricas que por su forma, densidad, tamaño, peso, se consideró que de forma representativa mostraban el comportamiento de un lecho fluidizado. Una vez seleccionadas las partículas, se realizaron las pruebas preliminares de fluidización de dichas partículas para así, observando el comportamiento de éstas en el lecho, identificar 5 tipos diferentes de partículas con las que se trabajó. Los parámetros adimensionales que caracterizan la fluidización de estas partículas son el número de Reynolds, el número de Arquímedes y la relación de aspecto, así como su longitud, diámetro, densidad y esfericidad. Estas partículas al ser seleccionadas se fluidizaron a 6 diferentes valores de velocidad superficial, determinando en cada caso la expansión del lecho. Cada experimento se realizó por triplicado.

Con los resultados de expansión del lecho para cada tipo de partícula, se procedió al análisis e interpretación de los datos, para así de esta manera reportar los resultados de variación obtenidos de las cinco partículas seleccionadas, que nos llevará a la vez a un mejor conocimiento del comportamiento de estos sistemas fluidizados.

RESULTADOS

Los rangos de las características de los 20 tipos de partículas inicialmente consideradas se presentan en la Tabla 1. De éstas, se seleccionaron los 5 tipos de partículas mostradas en la Figura 1.

Tabla 1. Caracterización de las partículas

Parámetro	Rango	
	Mínimo	Máximo
Diámetro (m)	0.001	0.006
Longitud (m)	0.004	0.008
Esfericidad (-)	0.62	0.87
Relación de Aspecto (-) L/d_p	0.70	4.3
Número de Reynolds (-) $Re = d_p u_{mf} \rho_L / \mu$	113	235
Densidad (kg/m ³)	1085	8061
Número de Arquímedes (-) $Ar = d_p^3 \rho_L (\rho_s - \rho_L) g / \mu^2$	6822	3218395
Velocidad mínima de fluidización (m/s)	0.046	0.193
Velocidad terminal (m/s)	0.04	0.29

El equipo de fluidización (Figura 2) se construyó con un cilindro de acrílico de 6 mm de espesor con un diámetro interior de 50 mm aprox. con un área de sección transversal de 19.6 cm², una zona de calma de 12 cm empacada con partículas esféricas para mejor distribución del flujo, y una zona efectiva de fluidización de 60 cm.

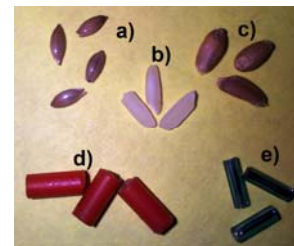
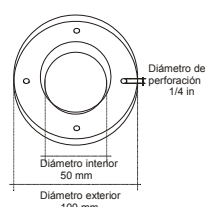


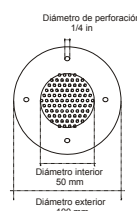
Figura 1. Tipos de partículas seleccionados. a) Alpiste. b) Arroz. c) Trigo. d) Palillo Chino. e) Canutillo



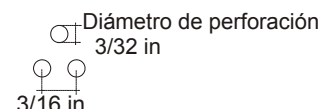
a)



b)



c)



d)

Figura 2. Columna de Fluidización. a) Fotografía de la columna. b) Bridas. c) Plato distribuidor. d) Arreglo triangular de las perforaciones en el distribuidor.

En la fluidización de los 5 tipos de partículas seleccionados se midió la velocidad mínima y la velocidad cuando el lecho esta completamente fluidizado, y expansión del lecho en cada caso, entre cada medición se permitió un tiempo de estabilización de 5 minutos. La velocidad terminal de las partículas también fue determinada experimentalmente. Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de Fluidización de Partículas Seleccionadas

Tipo	Flujo (m/s)		Expansión del Lecho (m)		Velocidad terminal (m/s)
	Fluidización Mínima	Completamente Fluidizado	Fluidización Mínima	Completamente Fluidizado	
Palillo 5mm	0.012	0.032	0.15	0.34	0.05
Palillo 7mm	0.014	0.033	0.16	0.31	0.03
Arroz	0.028	0.079	0.15	0.36	0.09
Canutillo	0.046	0.064	0.12	0.22	0.19
Alpiste	0.015	0.033	0.17	0.29	0.05
Trigo	0.021	0.065	0.16	0.27	0.09

Un conjunto representativo de datos de expansión, en este caso del arroz, se presenta en la Figura 3-a, junto con la regresión correspondiente a la Ecuación 1.

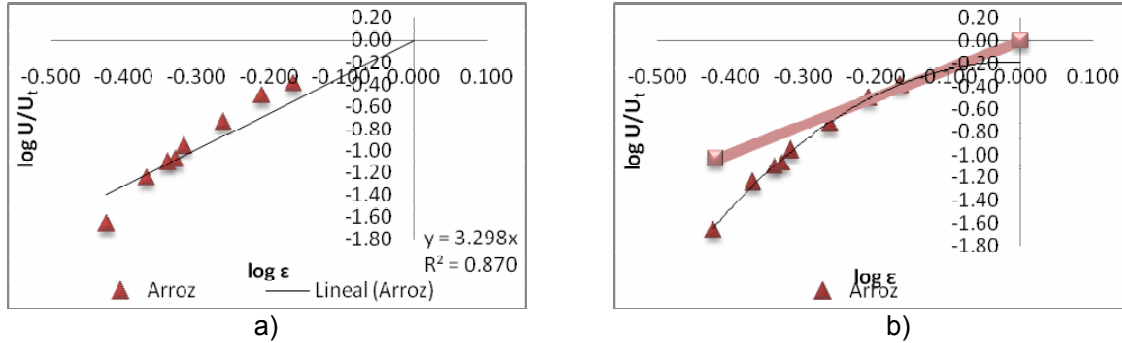


Figura 3. Datos de expansión de la fluidización del arroz. a) Exponente Richardson-Zaki con n constante. b) Exponente Richardson-Zaki con n variable (la línea recta representa $n = 2.47$, estimado con la Ecuación 3).

Aún cuando los datos se ajustan moderadamente bien con esta ecuación, el exponente predicho ($n = 3.298$) dista mucho del valor predicho por la Ecuación 3 ($n = 2.47$). En el caso de la Figura 3-b, se aprecia que los datos concuerdan muy bien con una ecuación de regresión de segundo orden, indicativo de que el exponente de Richardson-Zaki no es constante para el caso de fluidización de este tipo de partículas. Conforme el lecho se expande a mayores velocidades de fluidización, el comportamiento se acerca más al predicho por la ecuación de Richardson-Zaki.

CONCLUSIONES

- Se construyó una unidad experimental de fluidización líquido-sólido, que trabaja en los rangos deseados para las partículas seleccionadas.
- Es posible encontrar de manera natural partículas con las características deseadas, por lo que no es necesario la fabricación de estas. De acuerdo a los rangos establecidos por Levenspiel-Kunii (1991), de esfericidad para cilindros, los valores de las partículas identificadas las ubican dentro del grupo de partículas cilíndricas.
- En el grafico log-log, se puede observar que durante la velocidad mínima de fluidización el comportamiento de las partículas cilíndricas es más alejado que el predicho por la ecuación de Richardson-Zaki, conforme el lecho se va expandiendo se aproxima más al comportamiento predicho por dicha ecuación.
- Para las partículas utilizadas en este trabajo, el exponente de Richardson-Zaki, no es constante, ya que los datos no describen una línea recta, pero se pueden aproximar por medio de una línea polinomial de segundo orden.
- La expansión del lecho de partículas cilíndricas se comporta de manera diferente que la expansión del lecho de partículas esféricas por lo que al describirlos de la misma manera se introduce un cierto grado de error. Esto demuestra la necesidad de contar con modelos extendidos que predigan correctamente el comportamiento de partículas cilíndricas

Proceedings

Nomenclatura

Ar	Número de Arquímedes (-)	U	Velocidad superficial (m/s)
d_p	Diámetro de la partícula (m)	U_t	Velocidad terminal (m/s)
g	Gravedad (m/s)	V	Volumen de la partícula (m ³)
h	Altura del lecho (m)	ε	Fracción hueca (-)
h_p	Altura del lecho empacado (m)	ε_p	Fracción hueca del lecho empacado (-)
L	Longitud (m)	μ	Viscosidad del líquido (Pa s)
n	Exponente Richardson-Zaki (-)	ρ_L	Densidad del líquido (kg/m ³)
Re	Número de Reynolds (-)	ρ_s	Densidad del sólido (kg/m ³)
u_{mf}	Velocidad mínima de fluidización (m/s)		

AGRADECIMIENTOS

El apoyo económico para la realización de este proyecto fue proporcionado en parte por DGEST (proyecto 441.06-P) y por CONACYT. Se le agradece también al I.M. Jorge Caraza García por la ayuda proporcionada en el diseño y construcción del equipo.

REFERENCIAS

- Chungem Yin, Lasse Rosendahl, Soren Knudsen Kaer, Henirk Sorensen (2003). "Modelling the Motion of Cylindrical Particles in a Nonuniform Flow". Chemical Engineering Science **58**, 3489-3498.
- Dewei Qi (2001). "Simulations of fluidization of cylindrical multiparticles in a three-dimensional space". International Journal of Multiphase Flow **27**, 107-118.
- Joseph, D.D., Fortes, A.F., Lundgreen, T.S., Singh, P. (1987). "Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spheres cylinders and disks in water." Papanicolau, G. (Ed), Advances in Multiphase Flow and Related Problems, SIAM, Philadelphia, PA, 101-122.
- Levenspiel, Kunii (1991). "Fluidization Engineering". Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering.
- Miloslav Hartman, Otakar Tranka, and Karel Svoboda (1994). "Free Settling of Nonspherical Particles". Industrial Engineering Research **33**, 1979-1983.
- Wen-Ching Yang. "Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems". Siemens Westinghouse Power Corporation.