

## Estudio de la influencia de la forma y tamaño de materiales de relleno en la pérdida de carga de un lecho empacado

Salcedo, Gustavo A.<sup>1,3</sup>; Tarifa, Enrique E.<sup>2,3</sup>; Lescano, Lara V.<sup>1</sup>; Rosas, Domingo A.<sup>1</sup>; Coronel, Eve L.<sup>1</sup>

(1) *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*  
*lescanolaravaleria@gmail.com; inge.rosas@yahoo.com.ar; ecoronel@unse.edu.ar*

(2) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*  
*eetarifa@fi.unju.edu.ar*

(3) *CONICET.*  
*gusalc2.92@gmail.com*

### RESUMEN

El lecho empacado posee diversas aplicaciones industriales. El objetivo de la presente investigación fue el análisis de la influencia de la forma y tamaño de los materiales de relleno sobre la pérdida de carga a diferentes valores del cuadrado de la de velocidad superficial. Se utilizó un equipo cilíndrico de lecho empacado, y se emplearon dos dispositivos digitales, uno para medición de velocidad, y otro para pérdida de carga. Los valores más altos de velocidad superficial correspondieron en orden decreciente a la soja, fideo Ave María y arvejas. El coriandro y el fideo munición tuvieron curvas similares, pero el coriandro superó en  $v_s^2$ . El arroz largo fino ofreció al inicio cierta resistencia al flujo, y su curva tuvo el mismo comportamiento que la correspondiente a la lenteja. El comportamiento no lineal de los datos experimentales puede deberse a un cambio de régimen de laminar a turbulento en el seno del lecho empacado, demostrando ausencia de histéresis. Los modelos obtenidos responden a ecuaciones de segundo orden. Los valores experimentales obtenidos sirven de referencia para futuros experimentos con materiales de relleno que presenten características similares a las del actual trabajo, considerando la amplia gama de geometrías y tamaños utilizados en el mismo.

### ABSTRACT

The packed bed has several industrial applications. The objective of the present investigation was to analyze the influence of the shape and size of the packing materials on the head loss at different values of the square of the surface velocity. Cylindrical packed bed equipment was used, and two digital devices were employed, one for velocity measurement and the other for pressure drop. The highest surface velocity values corresponded in decreasing order to soybeans, Ave Maria noodles and peas. Coriander and ammunition noodle had similar curves, but coriander exceeded in  $v_s^2$ . Thin long rice offered at the beginning some resistance to flow, and its curve had the same behavior as that corresponding to lentil. The non-linear behavior of the experimental data may be due to a regime change from laminar to turbulent within the packed bed, demonstrating absence of hysteresis. The models obtained respond to second order equations. The experimental values obtained serve as a reference for future experiments with packing materials that present similar characteristics to those of the present work, considering the wide range of geometries and sizes used in this work.

Palabras claves: Columna empacada - ecuación de Ergun - pérdida de carga - material de relleno.

Keywords: Packed column - Ergun equation - pressure loss - backfill material.

## 1. INTRODUCCIÓN

El lecho empacado presenta diversas aplicaciones industriales, tales como la filtración, transferencia de calor, adsorción, reacciones químicas con catalizadores sólidos, intercambio iónico, deshidratación (Foust, 2006) y fotocatalizadores para la degradación de compuestos (Bandara, 2007). Dada la alta tasa de transferencia de calor desde la pared de confinamiento hasta el lecho empacado, una aplicación importante radica en el manejo de reacciones altamente exotérmicas, como la oxidación de n-butano a anhídrido maleico, y de reacciones endotérmicas, como el reformado con vapor de metano (Moghaddam, 2021).

El sistema en estudio en el presente trabajo fue una columna de lecho empacado. El lecho fue conformado con distintos alimentos de diversos tamaños y geometrías. A través del lecho, se hizo fluir aire a diferentes velocidades. Los materiales de relleno se orientaron en forma aleatoria.

Dado que el relleno estaba seco y sólo circulaba aire a través de la columna, la pérdida de carga se debía exclusivamente al conjunto de aperturas de tamaño y ubicación variable a lo largo del lecho. En este caso, el sistema obedece a la ecuación de Ergun (Urzúa Guerra, 2008). Esta ecuación posee estrecha relación con la porosidad, las características del material de relleno, y las propiedades y velocidad del aire (Alvarez, 2003). Los reactores catalíticos tubulares de lecho fijo con una relación de diámetro tubo-diámetro de material de relleno en el rango de 4-10 se emplean ampliamente en las industrias de proceso y químicas para tratar todo tipo de reacciones químicas (Moghaddam, 2021).

Otra de las aplicaciones del lecho empacado consiste en sistemas de almacenamiento energético, como una tecnología prometedora, ya que ofrece ventajas como la reducción de los costes de almacenamiento y la mejora del desarrollo de sistemas solares térmicos. El lecho empacado es una tecnología sencilla y eficiente que puede utilizarse en un amplio rango de temperaturas, ya que puede incorporarse a aplicaciones térmicas solares de baja temperatura, como los sistemas de calefacción solar por aire, así como a aplicaciones térmicas solares de alta temperatura, como las plantas de energía solar concentrada. Esta tecnología no presenta problemas de seguridad o corrosión de equipos (Gautam, 2020).

El almacenamiento de energía sensible mediante el uso de sistemas de lechos empacados ha sido una solución satisfactoria para diversas aplicaciones de baja temperatura, tales como invernaderos, para el secado de diferentes productos agrícolas o en edificios para proporcionar una contribución solar de las demandas de agua caliente sanitaria o calefacción de espacios (Díaz-Heras, 2020).

Dada la escasa investigación existente sobre la influencia de la forma y tamaño de las partículas sobre la pérdida de carga a través de los lechos del tipo descrito, en el presente trabajo se estudia dicha relación, asumiendo que, como cada uno de los materiales utilizados posee tamaño y geometría distintas, se espera obtener diferentes curvas de pérdida de carga.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción del equipo de trabajo

El equipo de lecho empacado estuvo constituido por una columna cilíndrica de polipropileno, con un diámetro interno de 37,78 mm y altura de 163,10 mm. La entrada de la misma estuvo conectada con un soplante radial de alimentación de aire. En la Fig. 1 se observa un esquema del equipo utilizado, ubicándose la toma de la presión de entrada al equipo  $p_a$  en el punto (a), y  $p_b$  en el punto (b).

Para las condiciones experimentales en las que se trabajó, se consideró despreciable la influencia de la compresión del aire, y se asumió que la velocidad superficial  $v_s$  del aire en cualquier sección transversal del equipo fue la misma.

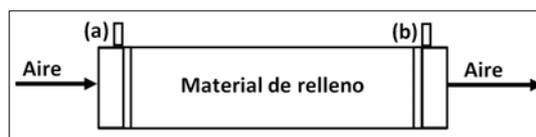


Figura 1. Equipo de lecho empacado. Fuente: Elaboración propia.

En las experiencias, se trabajó con frecuencias  $F$  en el rango de 5-60 Hz, tomando como valores intermedios múltiplos de 5 Hz, con una temperatura de aire  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2. Caracterización geométrica de los materiales de relleno

Los materiales de relleno utilizados presentaron geometrías variadas: esferas, como la soja y coriandro; semiesferas, como las arvejas partidas; cilindros largos, como el arroz largo fino; cilindros cortos, como el fideo munición; esferoides oblatos, como las arvejas; y cilindros huecos, como el fideo Ave María. Estos últimos poseen la estructura de anillo Raschig (Marek, 2017).

Cuando se coloca cada uno de estos rellenos, la trayectoria del flujo de aire se ve obstaculizada, y sigue varios canales paralelos y conectados internamente. Los canales se ensanchan y estrechan, presentando desviaciones cuando las partículas interceptan el paso. Adicionalmente, las superficies rugosas de las partículas producen pérdidas de arrastre de forma y fricción de superficie (Foust, 2006).

Se tomó una muestra de 50 unidades de cada material, y se determinaron las dimensiones características utilizando un vernier. Finalmente, se promedió cada una de las dimensiones correspondientes a cada material de relleno.

### 2.3. Pérdida de carga

Para calcular la pérdida de carga en el lecho vacío  $\Delta p_v$  y en el empacado  $\Delta p_t$ , se empleó un manómetro diferencial digital EXTECH 407910.

Para medir la resistencia al pasaje del aire ejercida exclusivamente por el lecho empacado, sin interferencia de la parte estructural del equipo, se descontó de la pérdida de carga total, la pérdida de carga registrada en el lecho vacío (Lescano, 2021).

En primer lugar, se trabajó con el lecho vacío, para determinar experimentalmente los valores de pérdida de carga de lecho vacío  $\Delta p_v$ . Seguidamente, se calculó a través de la ecuación (1), la pérdida de carga total  $\Delta p_t$  a través del lecho empacado.

$$\Delta p_t = p_a - p_b \quad (1)$$

En tercer lugar, se procedió, a través de la ecuación (2), al cálculo de la pérdida de carga neta  $\Delta p$ , para una misma velocidad superficial  $v_s$ .

$$\Delta p = \Delta p_t - \Delta p_v \quad (2)$$

Cada experiencia se realizó por triplicado.

### 2.4. Velocidad superficial

Se trabajó con el anemómetro de Pitot digital TROTEC TA400. Este instrumento mide la

velocidad máxima  $v_{m\acute{a}x}$  en el centro del cilindro, con la cual se calculó la velocidad superficial  $v_s$ . Esta última se define como la velocidad que existiría a través del lecho, si éste estuviera vacío (Foust, 2006). La ecuación (3) permite calcular la  $v_s$  a partir de la  $v_{m\acute{a}x}$ .

$$v_s = \frac{v_{m\acute{a}x}}{1 + 1,43\sqrt{f_D}} \quad (3)$$

$f_D$  es el coeficiente de fricción de Darcy.

Se estudió la pérdida de carga neta  $\Delta p$  en función del cuadrado de la velocidad superficial del aire ( $\Omega = v_s^2$ ).

Esta experiencia se realizó con valores crecientes de frecuencia de trabajo, hasta  $F = 60$  Hz, y luego se continuó trabajando con valores decrecientes de  $F$ , hasta llegar a un valor nulo de frecuencia.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterización geométrica de los materiales de relleno

Las dimensiones características promedio de los materiales utilizados en el lecho empacado se detallan en la Fig. 2.

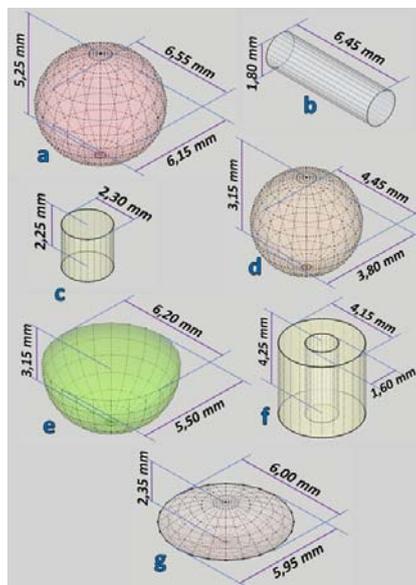


Figura 2. Dimensiones promedio de los diferentes materiales de relleno: a) soja, b) arroz largo fino, c) fideo munición, d) coriandro, e) arveja partida, f) fideo Ave María, g) lenteja. Fuente: Elaboración propia).

### 3.2. Relación entre $F$ , $v_s$ y $\Delta p$

A medida que  $F$  aumentó, también lo hicieron  $v_s$  y  $\Delta p_v$ , tal como lo muestra la Fig. 3, cuando se trabajó con el lecho vacío.

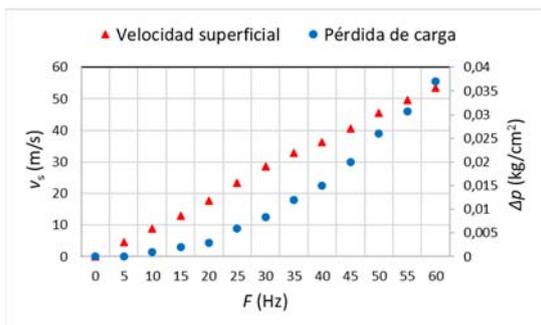


Figura 3. Evolución de la pérdida de carga y de la velocidad superficial con la frecuencia de trabajo para el lecho vacío.

El mismo análisis se realizó aislando los resultados de uno de los materiales de relleno, en este caso la soja, y obteniendo las curvas de la Fig. 4. En este caso, se trabajó con la pérdida de carga neta  $\Delta p$ .

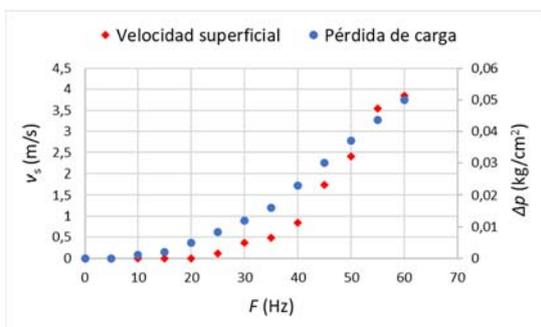


Figura 4. Evolución de la pérdida de carga neta y de la velocidad superficial con la frecuencia de trabajo para el lecho empacado.

Cada valor de frecuencia de trabajo del soplante se corresponde con un valor diferente de velocidad superficial para cada uno de los materiales.

### 3.3. Pérdida de carga

Los resultados obtenidos de pérdida de carga neta  $\Delta p$  en función del cuadrado de la velocidad superficial del aire ( $\Omega = v_s^2$ ) se muestran en la Fig 5.

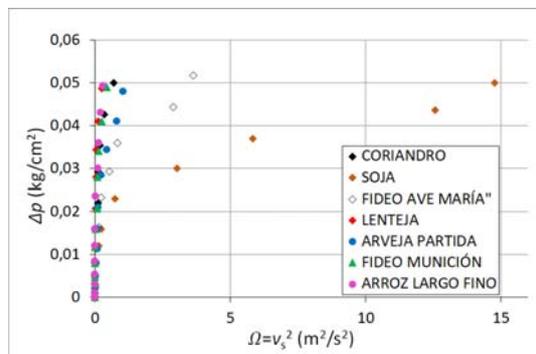


Figura 5. Valores experimentales de pérdida de carga a través de los diferentes rellenos.

La soja y el fideo Ave María presentaron un comportamiento regular. La soja presentó valores de velocidad superficial superiores al resto, lo cual puede deberse a que la superficie de contacto entre los granos se reduce a un punto, dada la geometría esférica de la misma. El fideo Ave María mostró un fuerte incremento en la pérdida de carga cuando  $F \geq 55$  Hz, y fue el segundo en registrar valores de velocidad superficial elevados (1,70-1,90 m/s).

Dado que a través de la Fig. 5 no se pudo realizar una adecuada comparación debido a las diferencias en los valores experimentales de  $v_s^2$  entre los diferentes materiales de relleno, se recurrió a la interpretación mediante una ampliación de la Fig. 5, que corresponde a la Fig. 6.

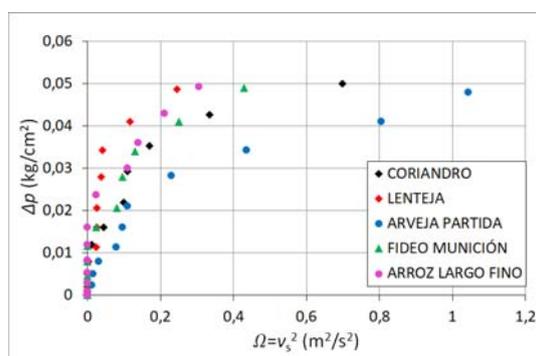


Figura 6. Valores experimentales de pérdida de carga a través de los rellenos que presentaron menores valores de  $v_s^2$ .

Las arvejas partidas presentaron una velocidad superficial máxima de 1,02 m/s, siendo la tercera en el orden de los rellenos con mayor velocidad superficial. Nuevamente, se atribuye dicho fenómeno a la geometría del material. Esta especie presentó una velocidad superficial equivalente a un cuarto del valor correspondiente a la soja.

El coriandro y el fideo munición tuvieron curvas similares en todas las frecuencias de trabajo  $F$ , pero el coriandro superó en  $v_s^2$  al fideo munición en  $0,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

El arroz largo fino ofreció al inicio cierta resistencia al flujo, lo cual puede deberse a la estructura cilíndrica del mismo, que permitió una mayor compactación del material, generando una menor fracción de espacios huecos. Cuando  $\Delta p \approx 0,025 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , comenzó a crecer  $v_s^2$  a través de este alimento. La curva del arroz largo fino tuvo el mismo comportamiento que la correspondiente a la lenteja, sólo que presentó menor  $\Delta p$  a todos los valores de  $v_s^2$  registrados.

La forma de las curvas representadas por los datos experimentales de la Fig. 6 sugirió un comportamiento no lineal, que puede deberse a un cambio de régimen de laminar a turbulento en el seno del lecho empacado, con cambios constantes de velocidad intersticial que generan una línea de tendencia sigmoideal. Este fenómeno puede explicarse de esta forma, descartando la posibilidad de histéresis, es decir, un de acomodamiento de los materiales a diferentes frecuencias de trabajo  $F$  en la matriz del lecho. Para corroborar esta postura, se aisló para un mismo material las mediciones de  $\Delta p$  y  $v_s^2$ . Luego, se compararon los puntos experimentales en los períodos de frecuencia creciente y decreciente, como se muestra en la Fig. 7.

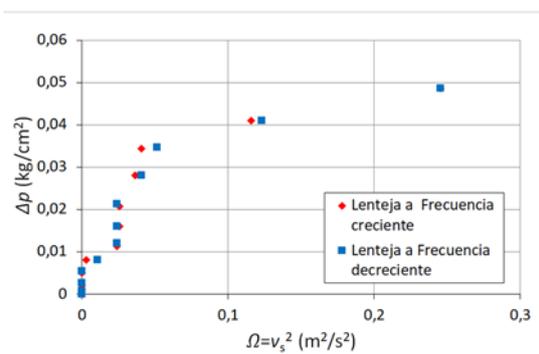


Figura 7. Valores experimentales para Frecuencias de trabajo crecientes y decrecientes.

Como puede apreciarse en la Fig. 7, los valores experimentales de  $\Delta p$  y  $v_s^2$  son similares a frecuencias crecientes y decrecientes, con lo cual se demuestra que no hay acomodamiento, y se pone de manifiesto la ausencia de histéresis.

Los datos experimentales fueron procesados para ajustar polinomios por regresión. Los resultados indicaron que existe una relación de segundo grado entre la pérdida de carga  $\Delta p$  y el cuadrado de la velocidad superficial  $v_s^2$  para todos los materiales de relleno. Los polinomios obtenidos por regresión para cada material y su coeficiente de determinación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2. Ecuaciones de pérdida de carga neta en función del cuadrado de la velocidad superficial del aire para cada material de relleno.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| Coriandro  | $R^2 = 9,47 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -1,88 \times 10^{-1} \Omega^2 + 1,94 \times 10^{-1} \Omega + 4,75 \times 10^{-3}$ (4)  |                             |
| Soja   | $R^2 = 8,89 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -3,32 \times 10^{-4} \Omega^2 + 7,57 \times 10^{-3} \Omega + 6,56 \times 10^{-3}$ (5)  |                             |
| Fideo Ave María  | $R^2 = 8,97 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -8,23 \times 10^{-3} \Omega^2 + 4,07 \times 10^{-2} \Omega + 5,99 \times 10^{-3}$ (6)  |                             |
| Lenteja  | $R^2 = 9,17 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -1,63 \times 10^0 \Omega^2 + 5,77 \times 10^{-1} \Omega + 3,51 \times 10^{-3}$ (7)     |                             |
| Arveja partida   | $R^2 = 9,49 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -6,23 \times 10^{-2} \Omega^2 + 1,04 \times 10^{-1} \Omega + 3,38 \times 10^{-3}$ (8)  |                             |
| Fideo munición   | $R^2 = 9,43 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -3,42 \times 10^{-1} \Omega^2 + 2,47 \times 10^{-1} \Omega + 4,87 \times 10^{-3}$ (9)  |                             |
| Arroz largo fino   | $R^2 = 8,95 \times 10^{-1}$ |
| $\Delta p = -4,64 \times 10^{-1} \Omega^2 + 2,78 \times 10^{-1} \Omega + 6,72 \times 10^{-3}$ (10) |                             |
| Parámetro  | Unidad                      |
| $\Delta p$   | $\text{kg}/\text{cm}^2$     |
| $\Omega = v_s^2$   | $\text{m}^2/\text{s}^2$     |

#### 4. CONCLUSIONES

Los valores más altos de velocidad superficial corresponden, en primer lugar, a la soja y, en segundo lugar, al fideo Ave María. Las arvejas partidas presentan una velocidad superficial equivalente a un cuarto del valor correspondiente a la soja. El coriandro y el fideo munición tuvieron curvas similares en todas las frecuencias de trabajo  $F$ , pero el coriandro superó en  $v_s^2$  al fideo munición en  $0,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . El arroz largo fino

ofreció al inicio cierta resistencia al flujo, y su curva tuvo el mismo comportamiento que la correspondiente a la lenteja, sólo que presentó menor  $\Delta p$  en todo su recorrido.

El comportamiento no lineal de los datos experimentales puede deberse a un cambio de régimen de laminar a turbulento en el seno del lecho empacado, demostrando ausencia de histéresis.

Los modelos obtenidos responden a ecuaciones de segundo orden, explicando el comportamiento de la pérdida de carga en función de la velocidad superficial.

Estos valores de pérdida de carga obtenidos sirven de referencia para futuros experimentos con materiales de relleno que presenten características similares a las del actual trabajo, considerando la amplia gama de geometrías y tamaños utilizados en el mismo.

## 5. REFERENCIAS

- Alvarez, G., Bournet, P. E., Flick D., Two-dimensional simulation of turbulent Flow and transfer through stacked spheres, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(13), 2459-2469. doi:10.1016/S0017-9310(02)00546-X, 2003.
- Bandara, J., Klehm, U., Kiwi, J., Raschig rings-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite photocatalyst activate in the degradation of 4-chlorophenol and Orange II under daylight irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental*, 76(1-2), 73-81. doi:10.1016/j.apcatb.2007.05.007, 2007.
- Díaz-Heras, M., Belmonte, J. F., Almendros-Ibáñez, J. A., Effective thermal conductivities in packed beds: Review of correlations and its influence on system performance, *Applied Thermal Engineering*, 171, 115048, 2020.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., Andersen, L. B., *Principios de operaciones unitarias (2a. ed.)*, Programas Educativos, S. A. de C. V., México, 2006.
- Gautam, A., Saini, R. P., A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system, *Journal of Energy Storage*, 27, 101046. doi:10.1016/j.est.2019.101046, 2020.
- Lescano, L. V., *Secado en lecho de chorro bidimensional para la deshidratación de proteínas de plasma de sangre bovina*, 2021.
- Marek, M., Numerical simulation of a gas flow in a real geometry of random packed bed of Raschig rings, *Chemical engineering science*, 161, 382-393. doi:10.1016/j.ces.2016.12.030, 2017.
- Moghaddam, E. M., Foumeny, E. A., Stankiewicz, A. I., Padding, JT, Heat transfer from wall to dense packing structures of spheres, cylinders and raschig rings, *Chemical Engineering Journal*, 407, 127994. doi:10.1016/j.cej.2020.127994, 2021.
- Urzúa Guerra, P. W., *Modelo físico predictivo de la fluidodinámica de lecho empacado para conversión continua de cobre*, Universidad de Chile Santiago de Chile, Chile, 2008