

CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ARRASTRE EN CONDUCTOS HORIZONTALES PARA GRANOS DE SOJA (GLYCINE MAX)

Mario Mattara^a, Ricardo Ponso^a, Mabel Medina^b

^a *Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Beruti 2109. (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina. gemini@fceia.unr.edu.ar*

^b *Consejo de Investigaciones. Universidad Nacional de Rosario. Escuela de Formación Básica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Pellegrini 250. (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina. mmedina@fceia.unr.edu.ar*

Keywords: modelización, conducto horizontal, fuerza de arrastre, flujo de aire

Abstract. El objetivo del trabajo es calcular la velocidad media del aire que produce el arrastre de un grano de soja en conductos horizontales considerando las dimensiones y materiales de los conductos. El grano fue modelizado como un cuerpo sólido y rígido de forma elipsoidal, depositado en la parte inferior de un tubo horizontal y sometido a distintas velocidades de aire, en la posición que ofrece menor resistencia. Se llevaron a cabo simulaciones numéricas con un algoritmo iterativo, dentro del cual se utilizó un software de elementos finitos que calcula las velocidades, presiones y tensiones del aire en todo el conducto y las fuerzas de arrastre sobre el grano. Finalmente se determinó en forma numérica la velocidad media de arrastre en función del coeficiente de rozamiento entre el grano de soja y el material de las paredes para distintos diámetros de conductos. Estos resultados pueden ser utilizados como valores de referencia en el diseño y evaluación de sistemas que utilizan transportadores neumáticos horizontales en maquinarias e instalaciones agrícolas.

1 INTRODUCCIÓN

El transporte de los granos y semillas a granel es una práctica habitual utilizada en maquinarias agrícolas y plantas de almacenamiento. Básicamente se utilizan dos métodos para el movimiento y manipulación de granos, los de tipo mecánico y neumático que eventualmente pueden ser utilizados en forma combinada. El primero consiste en realizar el transporte de granos a través de elementos mecánicos, como por ejemplo: tornillos transportadores, redlers, transportadores de cintas y paletas. Mientras que en el segundo método se utiliza una corriente de aire, lo que en algunos casos, presenta ventajas en el transporte y distribución, por lo tanto resulta de interés su análisis.

En el transporte neumático de granos, cuando existen velocidades relativas entre la semilla y el aire circundante, existe una fuerza de arrastre que es ejercida por el aire sobre la semilla. En el caso que el grano se deposite en el fondo de un conducto de sección circular, la fuerza de arrastre ejercida por el aire deberá superar la fuerza de rozamiento entre la pared del conducto y el grano para que el mismo pueda desplazarse. Cuando esta fuerza de arrastre es menor a la fuerza de rozamiento estática el grano podrá permanecer inmóvil, generándose atascamiento. El punto de equilibrio entre la fuerza de arrastre y la fuerza de rozamiento se produce con una velocidad del aire que denominaremos “velocidad media mínima de arrastre”. Un incremento en esta velocidad, tendrá como consecuencia el desplazamiento del grano que comenzará a desprenderse de la pared siendo atrapado por la corriente de flujo (Rabinovich y Kalman, 2007). La velocidad de arrastre en tubos horizontales más la velocidad de sustentación en tubos verticales son parámetros importantes en el diseño de equipos neumáticos de transporte.

Raheman y Jindal (2001), utilizaron la velocidad de sustentación para el cálculo de la velocidad de los granos en conductos verticales. En este sentido, hay diversos trabajos de índole experimental para la determinación de esta velocidad utilizando semillas de: arroz (Raheman y Jindal, 2001 y 2003), soja (Raheman y Jindal, 2001; Fernando y Hanna, 2005), algodón (Kilickan y Güner, 2006) y trigo, cebada, girasol y lentejas (Güner, 2007).

Por otro lado, muy pocos autores trabajaron con modelos matemáticos y simulación numérica. Entre estos se destacan el de: Vu-Quoc et al. (2000), en donde analizaron el transporte de partículas elipsoidales en conductos de sección rectangular, y el de Gorham y Salman (2005), en donde estudiaron el transporte neumático en conductos horizontales utilizando partículas esféricas. Para ello, determinaron previamente un campo de flujo (bidimensional) en un conducto de fronteras rectas y paralelas y finalmente calcularon el empuje que se produce en una esfera en función del coeficiente de arrastre.

Sin embargo, los trabajos existentes no proporcionan suficientes elementos como para determinar la fuerza de empuje actuando sobre los granos en general y en especial en conductos horizontales. En este aspecto, surge la necesidad de desarrollar nuevos métodos con el objetivo de determinar las velocidades de sustentación y arrastre para los granos teniendo como premisa la optimización del transporte en conductos de instalaciones y maquinarias agrícolas. En cuanto a la velocidad de sustentación ha sido tratada por los autores en Medina et al (2007 a).

El objetivo específico del trabajo es determinar la velocidad de arrastre para granos de soja (*Glycine max*) en conductos horizontales teniendo en cuenta distintos coeficientes de rozamiento entre grano y pared. Los conductos están construidos de materiales muy diversos, lo que implica que el coeficiente de rozamiento es variable, por ejemplo para paredes de acero galvanizado es 0,17 y para paredes de goma puede llegar a 0,6 (Kashaninejad et al, 2008).

2 MODELIZACIÓN

En este trabajo se realiza una modelización numérica tridimensional de los granos en conductos horizontales, se utiliza un software para obtener velocidades, presiones y tensiones que permiten calcular la fuerza de arrastre.

Se considera el flujo de aire en un conducto horizontal de sección circular. Los diámetros varían entre 0,015 m y 0,065 m (Figura 1). El grano se modeliza como un elipsoide de revolución (Deshpande et al, 1993) y se ubica en la parte inferior del tubo, en la posición que ofrece menor resistencia, con el eje mayor del grano paralelo al eje del tubo.

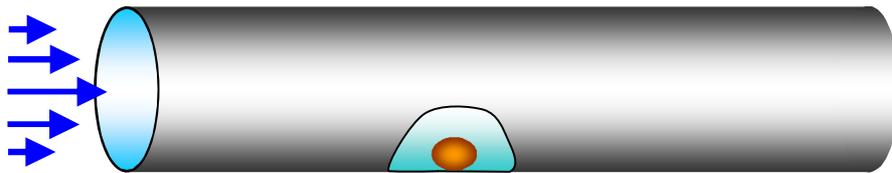


Figura 1: Conducto considerado y posición relativa del grano de soja

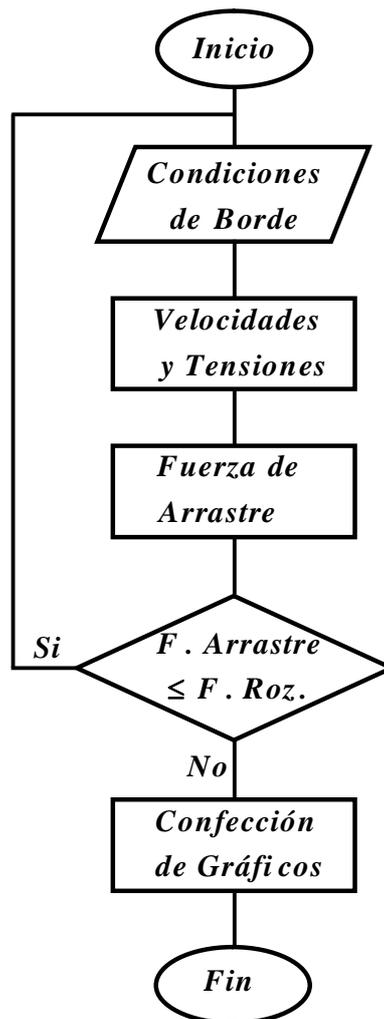


Figura 2.- Diagrama de flujo.

Para hallar la fuerza resultante sobre el grano de soja se deben conocer las tensiones ejercidas sobre su superficie. La modelización del flujo de aire con el software de elementos finitos Comsol proporciona el campo de velocidades y tensiones en el modelo analizado. Otro programa en el entorno del software MatLab permite calcular la fuerza de arrastre que se genera mediante la integración numérica de las tensiones que actúan sobre la superficie del grano (Medina et al, 2007 a, b). Para cada diámetro se determinaron las fuerzas de arrastre producidas por distintas velocidades medias del aire. Con estos datos se obtiene una función que permite relacionar velocidades medias del aire con las fuerzas de arrastre. Si la fuerza de arrastre es mayor que la fuerza de rozamiento, el grano se desplaza. En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo indicando la metodología utilizada. Los resultados se presentan en un gráfico que permite obtener las velocidades medias de arrastre del aire en función del diámetro y del coeficiente de rozamiento.

2.1 Modelización del flujo de aire

Para la simulación del flujo de aire en el conducto se utilizó un modelo tridimensional. Se plantean las ecuaciones de Navier-Stokes resueltas con una técnica de Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) standard, con un modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ (Wilcox, 1994). El algoritmo es estacionario y se resuelve con el software de elementos finitos Comsol. A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación promediada de Reynolds - Navier Stokes:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu S_{ij} - \tau_{ij}] \quad (2)$$

Donde

U_i - velocidad media en la dirección de x_i .

ρ - densidad

P - presión media

μ - viscosidad dinámica

Tensor de tensiones medio

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Tensión de tensiones de Reynolds

$$\tau_{ij} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

Viscosidad turbulenta

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Ecuación para la energía cinética turbulenta k

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

Ecuación para la tasa de disipación de energía ε

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

Donde

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad C_\mu = 0,09, \quad \sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (8)$$

Las condiciones de contorno son presiones a la entrada del tubo que permiten el desarrollo del flujo turbulento si se considera un conducto suficientemente largo. En las paredes laterales y sobre el grano se adopta flujo normal nulo.

Se utilizan elementos tetraédricos de segundo orden en velocidades y de primer orden en presiones, con mallas refinadas en la proximidad del grano. En la [Figura 3](#) se muestra un sector del mallado tridimensional alrededor del grano de soja en un tubo de 0,015 m de diámetro.

Las características del aire utilizadas para el cálculo son: densidad $\rho = 1,17 \text{ kg.m}^{-3}$ y viscosidad dinámica $\mu = 1,983 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

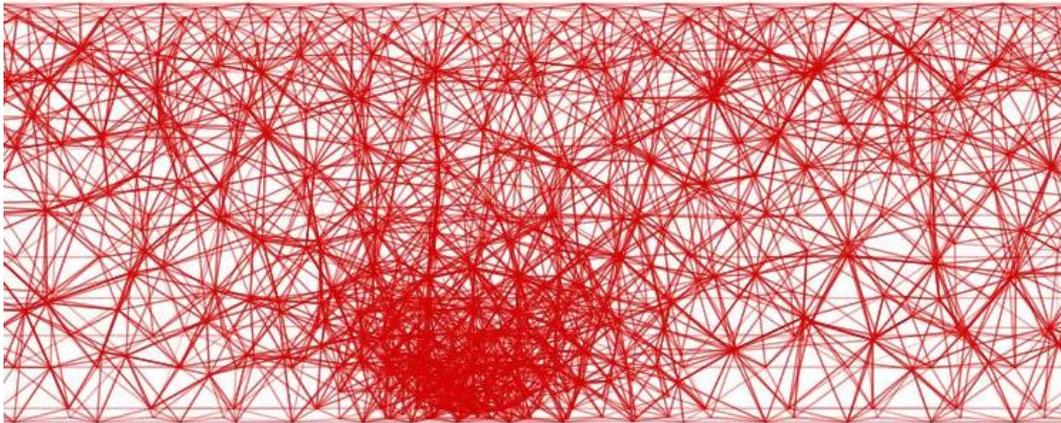


Figura 3. Malla tridimensional en un conducto de 0,015 m de diámetro con refinamiento en la zona del grano de soja.

2.2 Modelización del grano de soja

El grano se modeliza de acuerdo con [Deshpande et al. \(1993\)](#) en donde se lo considera como un elipsoide siendo sus semiejes 0,0027 m, 0,0027 m y 0,0033 m. Se adopta como densidad 1200 kg m⁻³. Para el cálculo de las fuerzas actuando sobre el grano, se discretiza la frontera con elementos de superficie de 3 lados y se definen 338 nodos y 224 triángulos.

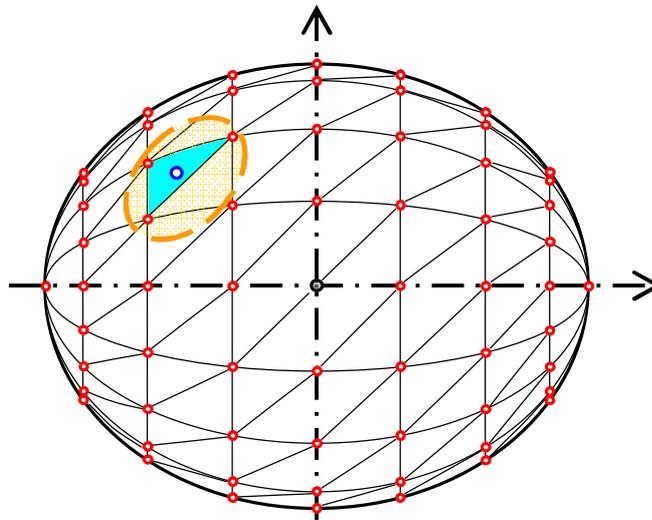


Figura 4. Mallado superficial del grano de soja.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con este modelo, se obtuvieron resultados en tensiones, presiones y velocidades en el conducto de aire y sobre el grano. Debido a la diversidad de dimensiones de tubos que se utilizan en instalaciones y maquinarias agrícolas, se realizaron simulaciones para distintas medidas, a partir de la más pequeña que se encontró en el mercado, de 0,015 m hasta 0,065 m. A modo de ejemplo se muestra en las Figuras 5, 6 y 7 el campo de módulo de velocidades en un corte longitudinal de conductos horizontales de 0,015 m, 0,025 m y 0,065 m de diámetro. Los colores rojizos en las figuras corresponden a las velocidades más altas y los azules a las más bajas. En la Figura 5 se observa como el grano interfiere en las condiciones del flujo, existiendo un incremento de velocidad en el centro del tubo después de pasar el grano. En cambio, en el caso del tubo de 0,065 m (Figura 7), el flujo se ve muy poco alterado por la presencia del grano, que se encuentra en una zona de muy baja velocidad, produciéndose poca interferencia y poco empuje sobre el grano.

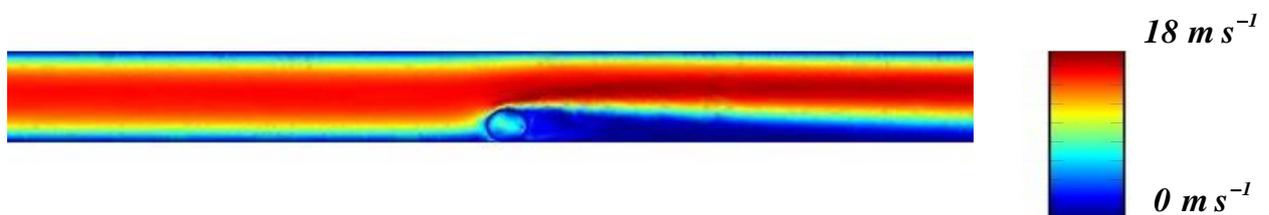


Figura 5. Campo de velocidades para un conducto de 0,015 m de diámetro, con velocidad media inicial 6,97 m/s.

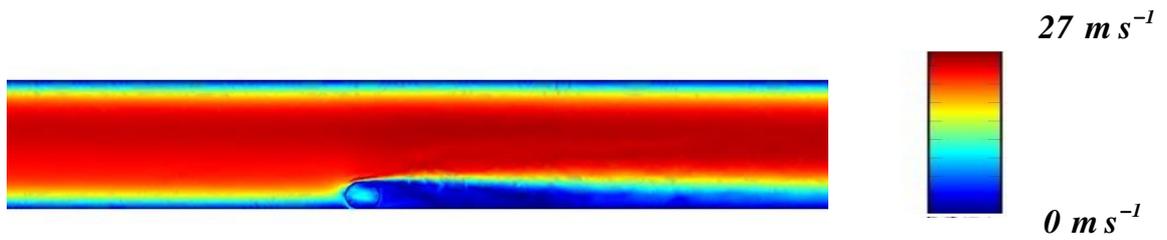


Figura 6. Campo de velocidades de un conducto de 0,025 m de diámetro, con velocidad media inicial 13,85 m/s.

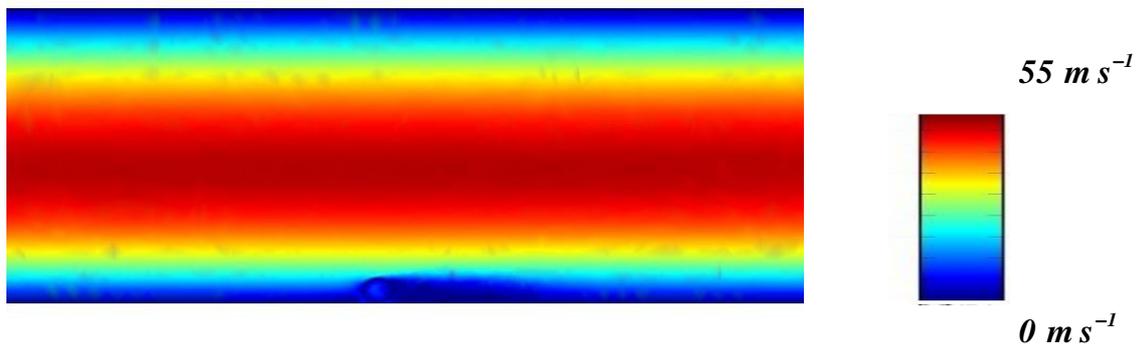


Figura 7. Campo de velocidades de un conducto de 0,065 m de diámetro con velocidad media inicial 48,54 m/s.

En la [Figura 8](#) se representan en puntos de color verde, los valores de fuerzas de arrastre (expresados en Newton) obtenidos en función de la velocidad media (metro por segundo). La línea en rojo muestra la curva del polinomio de ajuste obtenida por mínimos cuadrados. Para los tubos de diámetro 0,015 m, 0,020 m, 0,025 m, 0,030 m, 0,035 m, 0,050 m y 0,065 m se calculó el empuje con distintas velocidades medias de ingreso de aire.

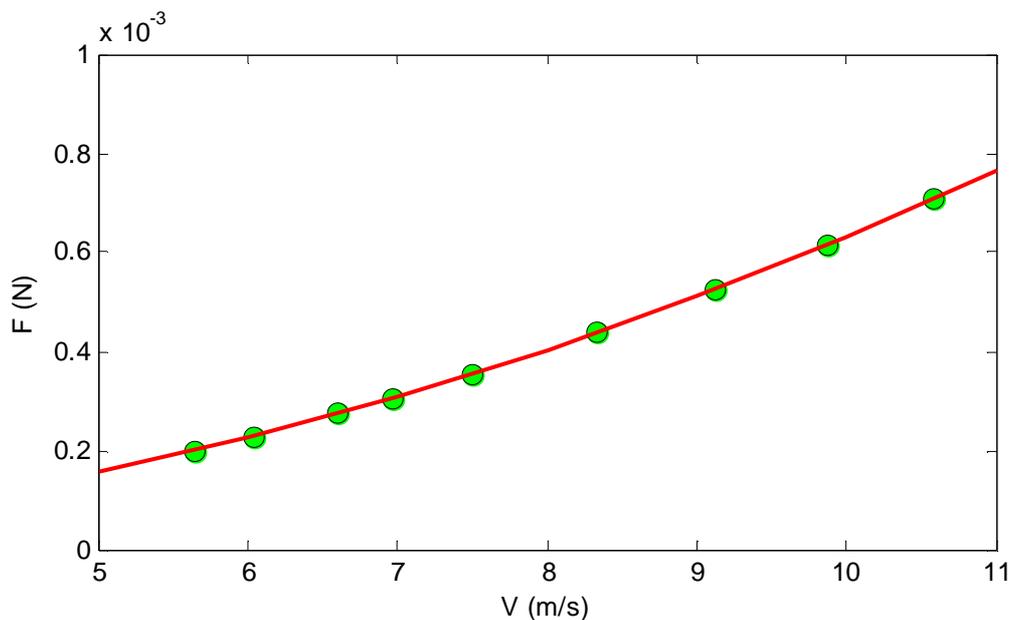


Figura 8. Fuerza de arrastre sobre el grano versus velocidad media para un conducto de 0,015 m de diámetro

Dada la gran diversidad de coeficientes de rozamiento encontrados en el trabajo de [Kashaninejad et al, \(2008\)](#) y a la variedad de diámetro de cañerías, es conveniente presentar los resultados en forma de ábaco ([Figura 9](#)), en donde se representa la velocidad media que provoca el arrastre en función del diámetro de tubo y del coeficiente de rozamiento entre grano de soja y material de pared del mismo. Por ejemplo, la curva inferior corresponde a la velocidad media de arrastre para un diámetro 0,015 m en función del coeficiente de rozamiento que varía entre 0,1 y 0,7. No se encontraron en la bibliografía coeficientes fuera de este entorno.

Respecto a los diámetros de cañerías elegidos para el cálculo, se puede decir que para el transporte neumático de cereales en maquinaria agrícolas, en tramos relativamente cortos y en caños de goma no se encontraron en el mercado, diámetros superiores a 0,05 m, que varían de milímetro en milímetro. En instalaciones fijas a veces se utilizan diámetros de alrededor 0,1 m (4 pulgadas) en tramos relativamente largos, siendo normalmente las cañerías metálicas con coeficientes de rozamiento inferiores a 0,2. En un futuro, se podrá hacer otro estudio con otras medidas superiores a las presentadas en este trabajo.

En las [Figuras 9 y 10](#) se observa como las velocidades medias de arrastre aumentan con el diámetro de las cañerías. Este fenómeno se produce porque el grano enfrenta el perfil de velocidades. Dichas velocidades son grandes cuando el diámetro es pequeño porque son las desarrolladas cerca del centro (ver [Figura 5](#)), mientras que si el diámetro es grande las velocidades son considerablemente menores porque el grano está situado cerca de la capa límite (ver [Figura 7](#)). Se observa también un aumento de las velocidades medias de arrastre con el coeficiente de rozamiento, ya que la fuerza de arrastre es proporcional a dicho coeficiente.

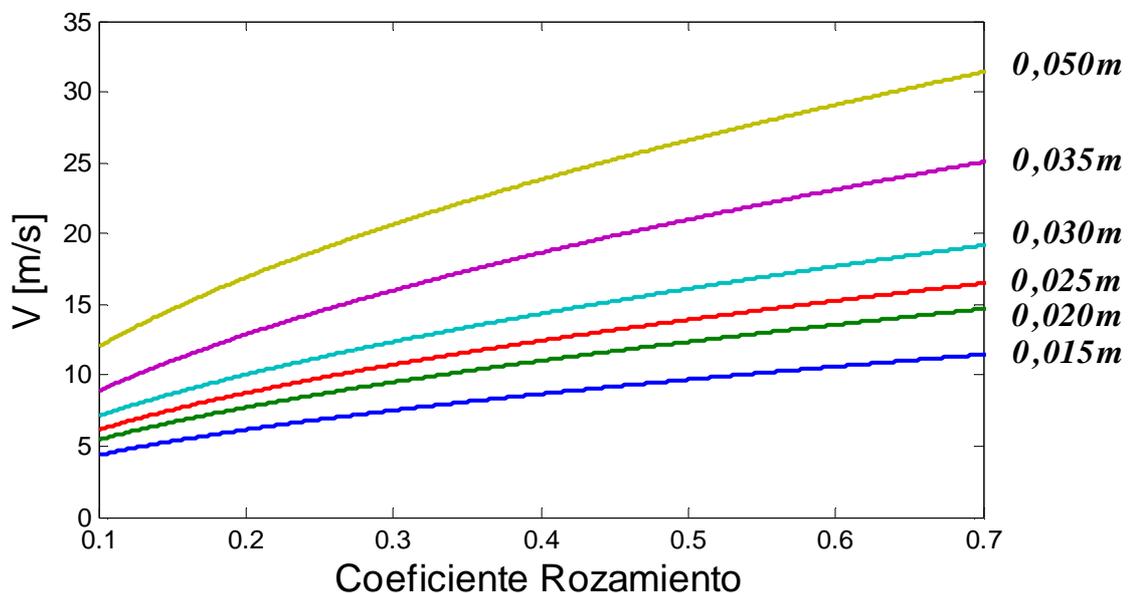


Figura 9. Velocidades medias de arrastre del grano de soja en conductos horizontales de diámetro 0,015 m, 0,020 m, 0,025 m, 0,030 m, 0,035 m y 0,050 m versus coeficiente de rozamiento.

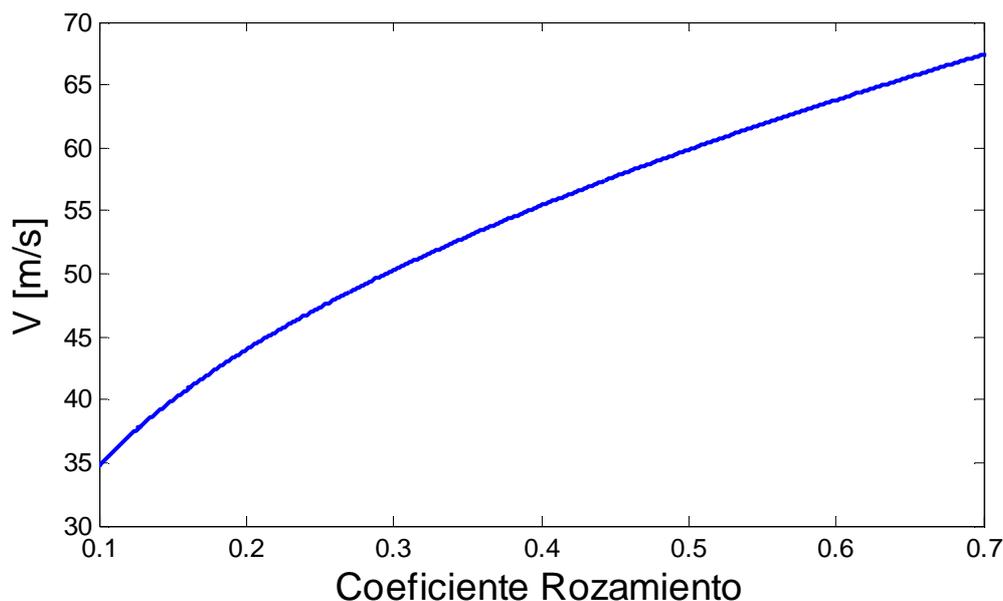


Figura 10. Velocidades medias de arrastre del grano de soja en un conducto horizontal de diámetro 0,065 m versus coeficiente de rozamiento.

4 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un ábaco que permite determinar velocidades medias de arrastre en conductos horizontales en función del diámetro interno y del coeficiente de rozamiento entre el grano de soja y el material del conducto, teniendo como objetivo minimizar el consumo de energía. Con las velocidades medias y con las dimensiones de las cañerías se podrá seleccionar adecuadamente los impulsores. Se encontró en el mercado una gran variedad de materiales y diámetros en cañerías, por ejemplo en conductos de goma, entre 0,015 m y 0,050 m se han detectado más de treinta diámetros intermedios. Esta aplicación resulta importante en maquinarias agrícolas, por ejemplo sembradoras neumáticas de precisión donde los conductos son relativamente cortos y las secciones muy variadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto PID SECYT UNR ING287 “Optimización del diseño en maquinarias e instalaciones agrícolas orientado a la manipulación de granos” al cual pertenecen los autores.

REFERENCIAS

- Deshpande, S.D.; Bal, S; Ojha, T.P. 1993. Physical properties of soybean. *J. Agric. Engng Res.* 56:89-98.
- Fernando, S.D., Hanna, M.A.. 2005. Design and development of a threshing chamber and pneumatic conveying and cleaning units for soybean harvesting. *Transactions of the ASAE*, 48(5):1681–1688.
- Gorham, D.A.; Salman, A.D. 2005. The failure of spherical particle under impact. *Wear* 580-587.
- Güner, M. 2007. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering* 80:904–913.

- Kashaninejad, M; Ahmadi, M; Daraei, A; Chabra, D. 2008. Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. *Powder Technology* 188 pp.1–8
- Kilickan, A., Güner, M. 2006. Pneumatic conveying characteristics of cotton seeds. *Biosystems Engineering* 95(4):537–546.
- Medina, M; Mattara, M; Ponso, R. 2007 a. Determinación numérica de la velocidad de sustentación de un grano de soja en un conducto vertical. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, S. Elaskar, E. Pilotta, G. Torres (Eds), Argentina,, pp 1120-1130.
- Medina, M; Mattara, M; Ponso, R. 2007 b. Simulación numérica de la trayectoria de un grano de soja en un conducto. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, S. Elaskar, E. Pilotta, G. Torres (Eds), Argentina, 2007, pp 1143-1157.
- Raheman, H., Jindal, V.K. 2001. Solid velocity estimation in vertical pneumatic conveying of agricultural grains. *Applied Engineering in Agriculture* 17(2):209–214.
- Raheman, H., Jindal, V.K.. 2003. Drag coefficients of agricultural grains in vertical pneumatic conveying. *Applied Engineering in Agriculture* 19(2):197–202.
- Vu-Quoc, L., Zhang, X; Walton, O.R.. 2000. A 3-D discrete-elemente method for dry granular flows of ellipsoidal particles. *Comput. Methods Appl. Mach. Eng.* 187:483-528.
- Wilcox, D. C. 1998. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries Inc.