

IMPORTANCIA DE LA DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE PARTICULAS

Flores, Jorge E.^{1,2}, Villafor, Gloria^{1,2,3}, Velasco, Jorge W.^{1,2,3}, Bisonard, Eduardo^{1,2}

1 Instituto de Beneficio de Minerales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5150, 4400, Salta, Argentina, jeflores@unsa.edu.ar. 2 Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta, CIUNSa., Avda. Bolivia 5150, 4400, Salta, Argentina.

3 INIQUI. CONICET, Avda. Bolivia 5150, 4400, Salta, Argentina.

RESUMEN

En las distintas operaciones de las industrias que generan polvo, se necesitan instalaciones de ventilación localizada para captar y transportar el polvo producido. Por razones de higiene y seguridad, en el transporte neumático del polvo generado a través de conductos horizontales, es ventajoso que la velocidad de diseño del flujo de aire sea la menor posible, para reducir la erosión de los conductos y el consumo energético del equipo aspirador.

La velocidad mínima de transporte del material sólido se determina empíricamente en un equipo construido a escala de planta piloto, correspondiendo a la velocidad de transporte por saltos de dichas partículas.

La literatura técnica proporciona valores de la velocidad de transporte por saltos a través de distintas correlaciones, en función de los diámetros de la cañería, del tamaño de las partículas transportadas, de su densidad y de su concentración.

En este trabajo se determina experimentalmente, para dos diámetros de conducto, la velocidad mínima de transporte para diferentes materiales y tamaños de partículas. Se verifican dichos valores con los calculados utilizando las correlaciones mencionadas. Se comprueba la influencia del tamaño del conducto en el cálculo de la velocidad de transporte por saltos o velocidad mínima.

Palabras Claves: velocidad mínima del aire, transporte de partículas, velocidad de saltos.

Abstract

Operations in different industries that generate dust localized ventilation systems to capture and transport the dust produced is needed. For reasons of hygiene and safety, in the pneumatic transport of dust generated through horizontal ducts, it is advantageous that the design speed of the air flow as small as possible, to reduce erosion of the pipes and energy consumption of the vacuum equipment.

The minimum velocity of transport of the solid material is determined empirically on a equipment built pilot plant scale, corresponding to the saltation velocity of said particles.

The technical literature provides values transport saltation velocity through different correlations, depending on the diameters of the pipe, the size of the particles transported, its density and its concentration.

This paper is determined experimentally for two pipe diameters, the minimum velocity of transport for different particle sizes and materials. These values are verified with those calculated using the correlations mentioned. The influence of the size of ducts in calculating the saltation velocity or minimum speed is checked.

Key Words: minimum air velocity, transport of particles, saltation velocity.

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones de ventilación localizada se utilizan en plantas industriales para captar y transportar el polvo generado en las distintas operaciones que involucran materiales sólidos, como por ejemplo, trituración, molienda, clasificación, transporte y almacenamiento. Estas instalaciones son importantes para cumplir con objetivos específicos de la higiene y seguridad industrial. Asimismo en la industria se transporta un amplio rango de sólidos particulados utilizando transporte neumático, desde carbón, cemento, harina o granos de cereales a pellets de alimentos balanceados. Los sistemas de transporte neumático de partículas en fase diluida se caracterizan por altas velocidades de aire, bajas concentraciones de sólidos y bajas pérdidas de carga por unidad de longitud de cañería, siendo los más usados en la industria porque son más estables y permiten mayor flujo y mayores distancias de transporte, como señalan Cabrejos et al [1].

En estos sistemas es necesario determinar la velocidad mínima de transporte de las partículas en los conductos para evitar la sedimentación de las mismas. Por razones de seguridad operativa es conveniente que la velocidad de diseño sea mayor que dicha velocidad mínima para impedir el taponamiento del conducto [2], la sedimentación de sólidos con un cierto contenido de humedad o de partículas aglomeradas por efectos electrostáticos y permitir el transporte del sólido que podría haber sedimentado debido a una incorrecta operación del sistema [3]. La deposición de sólido puede formar un lecho en la parte inferior del conducto, reduciendo su sección transversal [4]. Sin embargo, si la velocidad de diseño es excesiva puede producir la erosión de los conductos, el desgaste de las partículas y fundamentalmente el aumento del consumo energético del ventilador requerido. De esta forma, el diseño de las instalaciones de ventilación localizada, es importante no solamente desde el punto de vista de la higiene y seguridad industrial, sino también por el aspecto económico y energético, porque seleccionar una velocidad elevada en el conducto puede llevar a instalaciones sobredimensionadas, con el consecuente aumento de la energía consumida.

La definición de velocidad mínima de transporte utilizada en la literatura técnica no es precisa, ya que pueden determinarse dos velocidades mínimas, correspondientes a los tramos de conductos verticales y a los horizontales, debido a que el mecanismo de sedimentación del sólido es diferente en cada caso. En los conductos horizontales pueden definirse además, otras velocidades relacionadas con la velocidad mínima como son las velocidades de transporte por saltos y la velocidad de arranque o pickup [5].

En los conductos verticales la sedimentación del sólido comienza cuando la velocidad del aire disminuye hasta igualar la velocidad terminal de sedimentación de las partículas sólidas. En cambio, en los conductos horizontales la sedimentación es más compleja debido a que la fuerza de gravedad, o sea el peso de las partículas no coincide con la dirección en que tiene lugar el transporte. Si en estos conductos se va disminuyendo la velocidad de flujo de aire, partiendo de valores superiores al mínimo requerido para el transporte, se observa que se alcanza lo que se denomina velocidad crítica de transporte. Las trayectorias de las partículas dejan de ser continuas y se transforman en saltos en la parte inferior del conducto, esto es lo que se denomina velocidad de transporte por saltos, como indica Pocovi [3].

Tanto las instalaciones de ventilación como las de transporte neumático, por razones de seguridad operativa es conveniente que la velocidad de diseño del conducto sea mayor que la velocidad mínima de transporte o sea que la velocidad mínima alcance a ser por lo menos igual a la de transporte por saltos.

Como las instalaciones de ventilación localizada captan normalmente partículas de granulometría fina, este tipo de instalaciones pueden ser diseñadas sobre la base de considerar que la velocidad mínima de transporte es igual a la velocidad de transporte por saltos.

En la literatura técnica se encuentran propuestas distintas correlaciones semiteóricas y empíricas que permiten calcular la velocidad de transporte de partículas sólidas en conductos horizontales en función del tamaño y densidad de las partículas, de la relación sólido/aire y algunos casos de la densidad del aire y del diámetro del tubo.

El Manual de Ventilación industrial, de la American Conference of Governmental Industrial Hygienists [6], especifica valores de la velocidad mínima de flujo de aire para evitar la sedimentación de las partículas sólidas transportadas. Estos valores de velocidad varían en función de la naturaleza del material transportado, siendo los rangos de velocidades recomendados no tan precisos y no se dan en forma específica la relación de dichas velocidades con las propiedades y características de las partículas. Esto puede llevar en muchos casos al diseño de instalaciones con velocidades mayores a las requeridas, con el consiguiente aumento del consumo energético.

2. VELOCIDAD DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS EN CONDUCTOS HORIZONTALES

2.1 Cálculo teórico

Se analizan las correlaciones de Dalla Valle [7-8], Pocoví [9], Zenz [10-11], Cabrejos-Klinzing [5, 12], Molerus [13], Rizk, Rose and Duckworth [8], Schade [12] y Matsumoto [11-14]. En general, dichas correlaciones están expresadas en unidades no homogéneas. En este trabajo se conserva la nomenclatura utilizada por cada autor.

En la Tabla 1 se muestran las correlaciones de Dalla Valle y de Pocoví para calcular la velocidad mínima de transporte, igual a la velocidad de transporte por saltos. Estas correlaciones tienen en cuenta las propiedades y características de las partículas, su densidad y tamaño, pero no tienen en cuenta la concentración de sólidos en la cañería, que puede ser considerada como muy importante [8]. Sin embargo, para ventilación localizada los valores de la relación sólido/aire son bajos, disminuyendo su importancia en el cálculo de la velocidad.

Los valores de las constantes de la correlación de Dalla Valle, indicados en la Tabla 1, corresponden a transporte horizontal de partículas.

La correlación de Pocoví es válida para partículas de granulometría fina, $d_p < 0,5$ mm, tamaños normales para instalaciones de ventilación localizada. Asimismo el autor recomienda utilizar para el diseño de las instalaciones un factor de seguridad del orden del 50 al 100%, para tener en cuenta la humedad del sólido o efectos electrostáticos que tienden a aglomerar las partículas [3].

Tabla 1 Correlaciones para calcular la velocidad por saltos en función de la densidad y tamaño de las partículas.

Correlación	Velocidad, m/s	Unidades		Constantes
		Densidad del sólido, ρ_s	Diámetro de partícula, d_p	
Dalla Valle	$v_s = k \frac{\rho_s}{(\rho_s + 1000)} d_p^n$	kg/m ³	mm	k = 8,35 n = 0,4
Pocoví	$v_{\min} = 5,4 \rho_s^{0,37} d_p^{0,26}$	g/cm ³	mm	5,4

En la Tabla 2 se muestran las correlaciones propuestas por Zenz, Cabrejos-Klinzing y Molerus para calcular la velocidad de transporte por saltos, teniendo en cuenta la relación sólido/aire.

En la correlación de Zenz se calcula la velocidad de saltos a partir de $u_s = \rho_s \sqrt{k g_c d_p}$, donde k es una constante adimensional para cada valor de relación sólido/aire, m_s , siendo g_c la aceleración de la gravedad en lb ft/lbf s². Realizando la regresión de los datos experimentales publicados por Zenz [10] se obtiene $k = 0,04 e^{0,132 m_s}$.

Cabrejos-Klinzing calculan la velocidad de saltos con el diámetro de partículas, la relación de la densidad del sólido y del aire y la relación sólido/aire, μ , adim.

La correlación de Molerus tiene en cuenta el caudal de sólidos que circula por la cañería, M_s y la densidad del aire, ρ_f , pero no considera la densidad ni el tamaño de las partículas.

Tabla 2 Correlaciones para calcular la velocidad por saltos en función de la densidad y tamaño de las partículas y/o la relación sólido/aire.

Correlación	Velocidad	Unidades			Ctes
		Velocidad	Densidad	Diámetro/ Caudal sólido	
Zenz	$u_s = \sqrt{g_c d_p \rho_s^2 0,04 e^{0,132 m_s}}$	ft/s	ρ_s : lb/ft ³	d_p : ft m_s : adim.	$g_c = 32,2$
Cabrejos-Klinzing	$u_{gs} = \sqrt{g d_p 0,000224 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{1,25} \mu^{0,25}}$	m/s	ρ_p : kg/m ³ ρ_g : kg/m ³	μ : relación sólido/aire, adim.	$g = 9,81$ m/s ²
Molerus	$v_f = 5 \sqrt[5]{\frac{M_s g^2}{\rho_f}}$	m/s	ρ_f : kg/m ³	M_s : kg/s	$g = 9,81$ m/s ²

En la Tabla 3 se muestran correlaciones propuestas para calcular la velocidad de transporte por saltos que tienen en cuenta diámetro interno de la cañería, D, además de la relación sólido/aire, la densidad y el diámetro de las partículas y la densidad del aire en alguna de ellas.

Rizk calcula la velocidad de saltos a partir de la relación sólido/aire definida como $m_s = \left(\frac{1}{10^\delta}\right) Fr_s^N$, con el Número de Froude de salto $Fr_s = \frac{v_s}{\sqrt{gD}}$ siendo δ y N funciones del diámetro de partículas.

Rose and Duckworth proponen el cálculo de la velocidad de saltos a partir de la relación de la velocidad terminal de sedimentación v_t , los diámetros de la cañería y de las partículas y las densidades del sólido y del aire. Estos autores recomiendan tomar la velocidad del aire de dos a tres veces la obtenida con dicha ecuación.

Schade propone calcular la velocidad con los diámetros de cañería y de partículas y las densidades del sólido y del aire [12].

A partir de la correlación propuesta por Matsumoto (1975), $m_s = 1,11 \left(\frac{\rho_p}{\rho_a}\right)^{0,55} \left(\frac{Fr_p}{10}\right)^{-2,3} \left(\frac{Fr_s}{10}\right)^{3,0}$, se obtiene la expresión de la velocidad de transporte por saltos. Fr_p es el número de Froude de partícula, $Fr_p = \frac{u_t}{\sqrt{gd_p}}$ y Fr_s el número de Froude de salto, $Fr_s = \frac{u_s}{\sqrt{gd_p}}$. Los rangos de aplicación

recomendados por el autor corresponden a tamaños y densidades de sólidos comprendidos entre $0,29 < d_p < 2,6$ mm y $1,0 < \rho_p < 8,7$ g/cm³, respectivamente [11, 14].

Tabla 3 Correlaciones para calcular la velocidad por saltos en función del tamaño de las partículas, la densidad y la relación sólido/aire.

Correlación	Velocidad, m/s	Unidades y constantes
Rizk	$v_s = \sqrt{gD} \left(m_s 10^{1440 d_p + 1,96} \right)^{\frac{1}{1100 d_p + 2,5}}$	Densidades ρ_p, ρ_s : kg/m ³ ρ_a, ρ_g : kg/m ³ Diámetro de partículas, d_p : m Diámetro interno de cañería, D: m Constantes: $g = 9,81$ m/s ²
Rose and Duckworth	$u_s = \left[v_t 3,2 m_s^{0,2} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0,6} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)^{-0,7} (gD)^{-0,25} \right]^2$	
Schade	$u_s = (gD)^{0,5} m_s^{0,11} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0,025} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0,34}$	
Matsumoto	$u_s = \left(\left(\frac{\rho_a}{\rho_p}\right)^{0,5} g^{0,65} d_p^{-0,875} D^{1,5} 10^{1,25} \frac{m_s}{0,448} \right)^{\frac{1}{1,25}}$	

En la Tabla 4 se indican los rangos de valores de velocidades de diseño para las instalaciones de ventilación industrial localizada recomendados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists [6]. Estos valores dependen del tipo de partículas, del tamaño (muy finas, finas o gruesas), de la densidad (muy baja, baja, media o alta) y de su humedad (secas o húmedas).

Tabla 4 Rango de velocidades de diseño recomendadas por ACGIH.

Tipo de partículas	Velocidades de diseño m/s
Humos metalúrgicos	7 a 10
Muy finas y de muy baja densidad aparente	10 a 13
Finas y secas de materiales de baja densidad	13 a 18
Densidad media o baja, húmedas	18 a 20
Gruesas de alta densidad	20 a 23
Muy alta densidad o húmedas	> 23

2.2. Determinación experimental

El equipo experimental utilizado para las determinaciones de la velocidad de transporte consta de un conducto horizontal de acrílico transparente y permite intercambiar dos tubos de distinto diámetro de las siguientes dimensiones: uno de 82,5 mm de diámetro, 2540 mm de largo y 3 mm de espesor y el otro de 70 mm de diámetro, 2555 mm de largo y 3 mm de espesor (Figura 1).

El material que se transporta es alimentado en forma continua por medio de una tolva con descarga vibratoria mediante un sistema electromagnético, que permite variar los valores de la relación sólido/aire y es recuperado mediante un ciclón de alta eficiencia [9] de 200 mm de diámetro. La aspiración del caudal de aire requerido se logra por medio de un ventilador

centrífugo, accionado por un motor eléctrico de 4 Hp de 2800 rpm, regulado por un variador de frecuencia.

La velocidad de flujo del aire se mide por medio de un anemómetro compacto Testo 425, con sonda térmica de velocidad y empuñadura telescópica, calibrado con el variador de frecuencia para medir la velocidad de flujo de aire.

Para apreciar mejor el movimiento de las partículas, una parte del conducto de acrílico está iluminado por un tubo de 30 luces led y 2 lámparas dicroicas, que otorgan una clara visión del interior del tubo.



Figura 1 *Equipo experimental para la determinación de la velocidad de transporte por saltos.*

2.3. Programa de cálculo

Se realizó una Planilla de Cálculo en Excel para determinar las velocidades de transporte por saltos utilizando las correlaciones propuestas en la literatura técnica por Dalla Valle, Pocoví, Zenz, Cabrejos-Klinzing, Molerus, Rizk, Rose and Duckworth, Schade y Matsumoto, en función de la densidad, granulometría y concentración de sólidos de cada material, densidad del aire y diámetro del conducto, según corresponda.

Para calcular el diámetro de las partículas, si la granulometría es estrecha, se toma como diámetro medio la media aritmética de las aberturas de malla correspondiente a los dos tamices estándar consecutivos que caracterizan la fracción granulométrica. Si la granulometría del sólido es amplia, lo que es frecuente en la práctica, deberá tomarse como diámetro medio la fracción granulométrica estrecha más gruesa presente.

Se calcula además la potencia del ventilador que es función del caudal de aire, de las caídas de presión y de la eficiencia mecánica del mismo. Es conveniente por lo tanto que la velocidad de diseño del flujo de aire sea la menor posible para reducir el consumo energético del equipo de aspiración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron los ensayos experimentales por triplicado utilizando tres materiales secos distintos: arena, colemanita y mineral de manganeso, con fracciones estrechas de tamaño correspondientes a Mallas ASTM: 30-50 M, 50- 70 M y 70-100 M. Estos ensayos fueron realizados con dos tubos distintos, de 82,5 mm y de 70 mm de diámetro, respectivamente.

Los ensayos se llevaron a cabo con valores bajos de la relación sólido/aire, tales como los utilizados en ventilación localizada. Se trabajó con relaciones sólido/aire iguales a 0,11; 0,23; 0,36 y 0,45.

Los ensayos se realizaron comenzando con altas velocidades de flujo, las que progresivamente se fueron disminuyendo mediante el regulador de frecuencia, hasta que se observó que el material empezó a ser transportado por saltos (Figura 2), registrando en ese momento su velocidad.

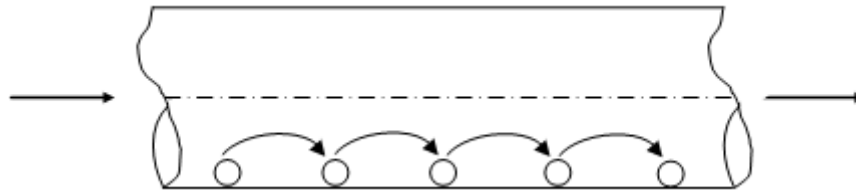


Figura 2 Transporte de partículas por saltos.

Utilizando la Planilla de Cálculo desarrollada se determinaron las velocidades de transporte por saltos con las correlaciones propuestas en la literatura técnica y se compararon con los valores obtenidos experimentalmente y los recomendados por American Conference of Governmental Industrial Hygienists en Industrial Ventilation.

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados experimentales obtenidos de la velocidad de transporte por saltos, la densidad y el diámetro medio de partícula, para los materiales y tamaños estudiados, para una relación sólido/aire de 0,11.

Tabla 5 Resultados experimentales de la velocidad de transporte por saltos para un diámetro de 82,5 mm.

Material	Densidad g/cm ³	Fracción M	Dp mm	v _{ts} m/s
Arena	2,5	30-50	0,446	4,18
		50-70	0,254	3,94
		70-100	0,18	3,80
Colemanita	2,1	30-50	0,446	4,18
		50-70	0,254	3,71
		70-100	0,18	3,48
Mineral de Manganeseo	4,8	30-50	0,446	5,34
		50-70	0,254	4,87
		70-100	0,18	4,41

Tabla 6 Resultados experimentales de la velocidad de transporte por saltos para un diámetro de 70 mm.

Material	Densidad g/cm ³	Fracción M	dp mm	v _{ts} m/s
Arena	2,5	30-50	0,446	4,00
		50-70	0,254	3,52
		70-100	0,18	3,20
Colemanita	2,1	30-50	0,446	3,93
		50-70	0,254	3,50
		70-100	0,18	3,33

En las Figuras 3 a 7 se representa la velocidad de transporte por saltos para los materiales estudiados, arena, colemanita y mineral de manganeso. Se representan los valores determinados mediante los ensayos experimentales realizados con los dos tamaños de tubo y los obtenidos con la Planilla de cálculo aplicando las correlaciones mencionadas.

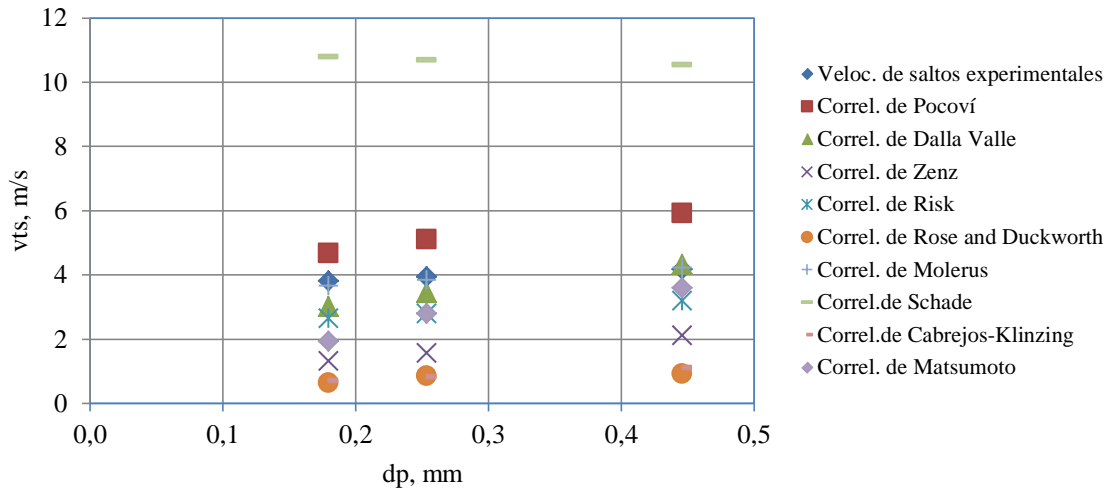


Figura 3 Velocidad de transporte de saltos en función del diámetro de partícula para arena y diámetro de conducto de 82,5 mm.

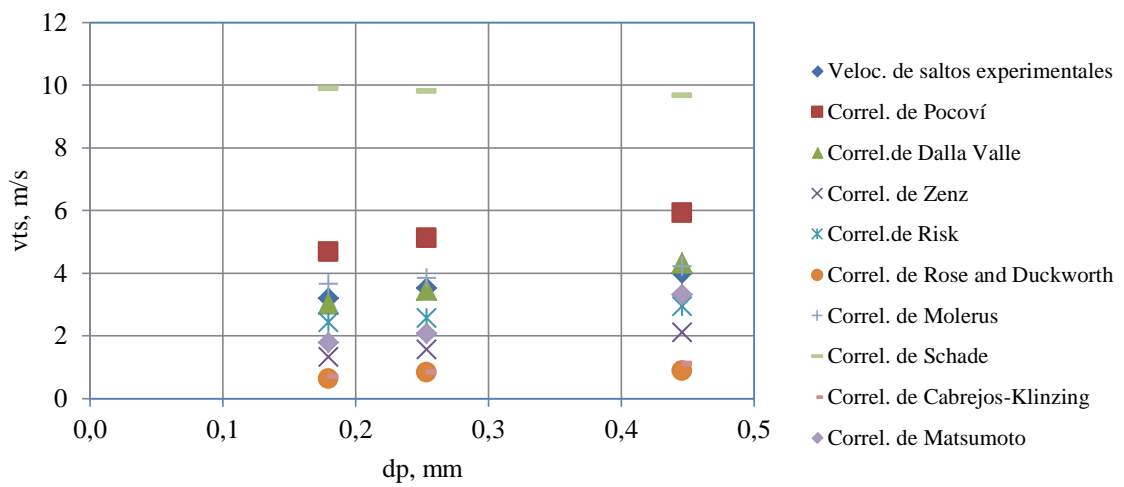


Figura 4 Velocidad de transporte de saltos en función del diámetro de partícula para arena y diámetro de conducto de 70,0 mm.

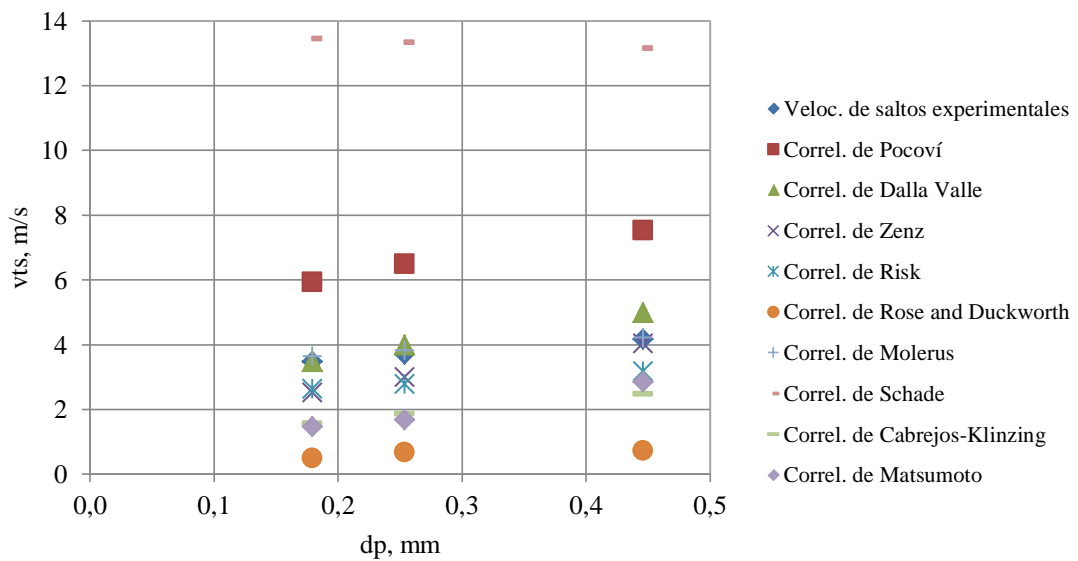


Figura 5 Velocidad de transporte de saltos en función del diámetro de partícula para colemanita y diámetro de conducto de 82,5 mm.

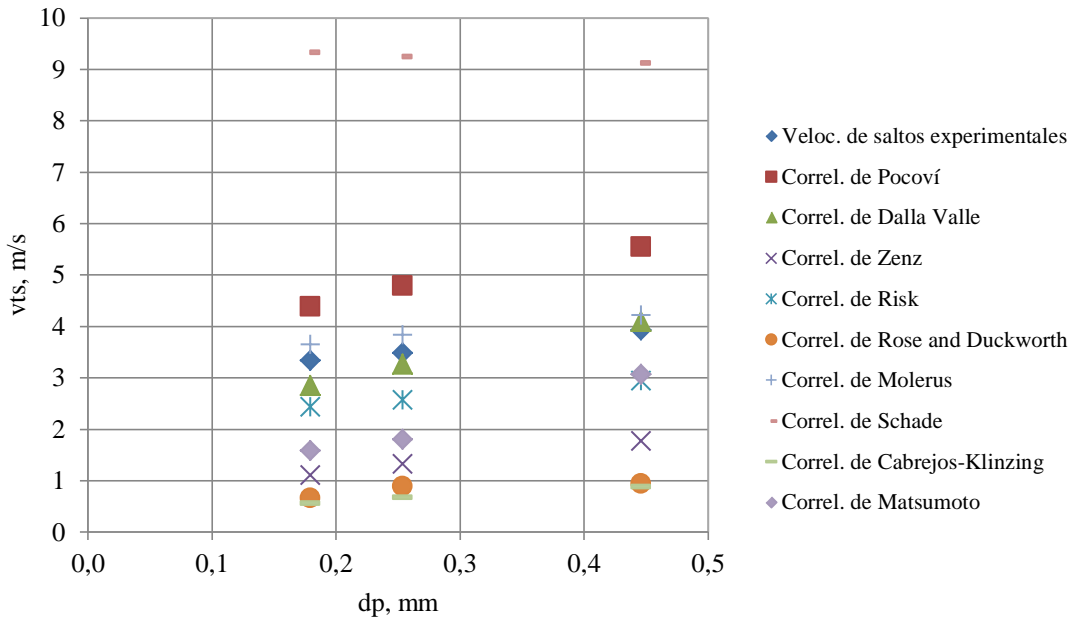


Figura 6 Velocidad de transporte de saltos en función del diámetro de partícula para colemanita y diámetro de conducto de 70,0 mm.

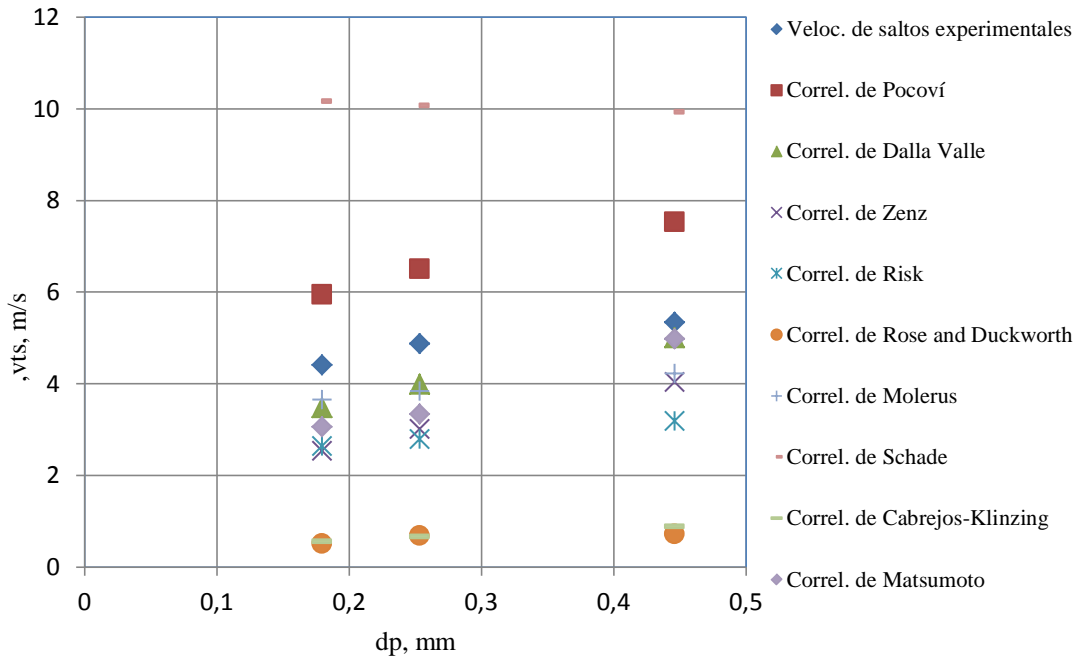


Figura 7 Velocidad de transporte de saltos en función del diámetro de partícula para manganeso y diámetro de conducto de 82,5 mm.

Los valores obtenidos, para relación sólido/aire igual a 0,11, aplicando las correlaciones de Pocoví, Dalla Valle, Rizk, Molerus y Matsumoto difieren en menos del 50 % con respecto a los valores experimentales. La correlación de Zenz difiere en valores mayores al 50 % y las de Rose and Duckworth y Cabrejos-Klinzing en alrededor del 80 %. En cambio la correlación de Schade difiere en más del 100 %, razón por la cual no se aconseja su uso para estas condiciones. Además, a diferencia de las otras correlaciones, que están en función del diámetro del conducto, la correlación de Schade parece mostrar que la velocidad de saltos disminuye con el aumento del tamaño de partícula, lo que tampoco ocurre con los datos obtenidos experimentalmente.

La correlación de Zenz, salvo para el caso de mineral de manganeso donde da valores similares a la de Risk, se aleja de los valores obtenidos experimentalmente.

Las correlaciones de Dalla Valle, Pocoví, Rizk, Molerus y Matsumoto, mencionadas anteriormente, se aproximan mucho más a los valores obtenidos experimentalmente que los indicados por el Manual de Ventilación Industrial para el cálculo de la velocidad de diseño en los conductos de ventilación. Se considera que la razón de esta diferencia se debe, evidentemente, a la aplicación de un factor de seguridad alto por dicho Manual de Ventilación, del orden de 3 a 3,5.

En la elección del factor de seguridad se debe tener cuidado, ya que un alto valor del factor significa un incremento elevado de la velocidad de flujo y un aumento de la potencia consumida por el ventilador, lo que demuestra la importancia de seleccionar adecuadamente la velocidad de flujo de diseño.

Aumentando las relaciones sólido/aire entre 0,23; 0,36 y 0,45 se observó que las correlaciones de Risk y de Matsumoto correlacionan mejor los valores experimentales, siendo éstas las más recomendadas para transporte neumático de sólidos en fase diluida y para tamaños mayores de partículas la correlación de Matsumoto.

Con respecto a la variación del diámetro del conducto las correlaciones estudiadas muestran muy poca influencia en la variación de la velocidad de transporte de saltos con el aumento del mismo.

Se continuará trabajando con valores mayores de la relación de sólido/aire, correspondiente a transporte de sólidos, con distintos materiales y con los dos diámetros de tubo disponibles, a fin de seleccionar las correlaciones, con sus rangos de validez, que más se ajusten a los valores experimentales.

Con respecto a la influencia sobre de la potencia consumida por el ventilador al trabajar con velocidades menores disminuye el consumo energético del mismo, lo que demuestra la importancia de seleccionar adecuadamente la velocidad de transporte de las partículas.

4. CONCLUSIONES

Los valores de velocidad determinados experimentalmente para los materiales ensayados y para los tamaños utilizados, pueden ser mejor representados por las correlaciones de Dalla Valle, Pocoví, Rizk, Molerus y Matsumoto. Si bien es cierto que las dos primeras correlaciones no tienen en cuenta la relación sólido/aire, la baja concentración de sólidos existente en los sistemas de ventilación localizada, hace que dicha relación tenga menor importancia en el cálculo de la velocidad. Asimismo, la velocidad predicha por la correlación de Matsumoto se aproxima más a los valores experimentales a medida que aumenta la relación sólido/aire y el diámetro de las partículas.

La correlación de Schade es la que más se aleja de los valores experimentales, lo que llevaría a no considerar su aplicación para las condiciones utilizadas en este trabajo.

La variación del diámetro del conducto muestra muy poca influencia en la variación de la velocidad de transporte de saltos para los valores obtenidos experimentalmente. Asimismo, las correlaciones consideradas, que tienen en cuenta el diámetro del conducto, principalmente las de Matsumoto y Risk, presentan también poca influencia.

De todas maneras los valores obtenidos con las correlaciones usadas se aproximan mucho más a los valores experimentales que los indicados por Industrial Ventilation, permitiendo así trabajar con velocidades menores y disminuyendo consecuentemente el consumo energético del ventilador.

5. REFERENCIAS

- [1] Cabrejos, F., M. I. Jofré y Rojas, J. (2004). "Transporte neumático de materiales sólidos a granel", *Congreso CONAMET/SAM*, Chile.
- [2] Hartman, M.; Pohorely, M. and Trnka, O. (2006). "Transport Velocities of Different Particulate Materials in Pneumatic Conveying", *Chem. Pap., Intitute of Chemistry, Slovak Academy of Sciences*, 60(1), 74-77.
- [3] Pocoví, R. E. (1999). "Ventilación Industrial", Ediciones Magna Publicaciones, Salta.
- [4] Jo, Y. M. and Ray, M. B. (1999). "Pneumatic Transportation of Powder in Horizontal Pipelines", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 5(1), 32-39.
- [5] Cabrejos, F. and Klinzing, G. (1994). "Minimum Conveying Velocity in Horizontal Pneumatic Transport and the Pickup and Saltation Mechanisms of Solid Particles", *Pneumatic Conveying. Bulk Solids Handling*, 14(3), 541-550.
- [6] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (1995). "Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice", 22nd. Edition, ACGIH, USA.
- [7] Anaya Durand, A.; Santamaría Rodríguez, E.G. y Martínez Pérez, K.M. (2002). "Flujo de dos fases con materiales sólidos", *Ingeniería Química*, XXXIV(387), 91-98, Madrid, España.
- [8] Jones, P.J. and Leung, L.S. (1978). "Estimation of Saltation Velocity in Horizontal Pneumatic Conveying. Comparison of Published Correlation of Pneumotransport", *Four International Conference on the Pneumatic Transport of Solids in Pipes*, June 26-28, 1-12, USA.
- [9] Pocoví, R.; Flores J.; Villaflo G.; Velasco J.; Redondo A. y Bisonard E. (2002). "Diseño de ciclones para instalaciones de ventilación localizada. Criterio para maximizar la eficiencia de separación", *Innovación*, Universidad de Antofagasta, 1(14), 25-34, Chile.
- [10] Leva, M. (1959). "Fluidization", McGraw-Hill, New York.

- [11] Matsumoto, S.; Hara M.; Saito S. and Maeda S. (1974). "Minimum Transport Velocity for Horizontal Pneumatic Conveying", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 7(6), 425-430.
- [12] Gómes, L.M., Amarante Mesquita, A.L. (2014). "On the Prediction of Pickup and Saltation Velocities in Pneumatic Conveying", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(01), 35-46.
- [13] Molerus, O and Heucke U. (1999). "Pneumatic transport of coarse grained particles in horizontal pipes", *Powder Technology*, 102, 135-150.
- [14] Matsumoto, S.; Harada M.; Saito S. and Maeda S. (1975). "Saltation Velocity for Horizontal Pneumatic Conveying", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 8(4), 331-333.