

Evaluación Morfológica de Pellets de Polietileno mediante Análisis de Imágenes Digitales

Resumen: En este trabajo se propone un método para caracterizar seis clases distintas de pellets de polietileno comerciales mediante análisis de imágenes digitales. Utilizando el software ImageJ, se definen el tamaño y la forma considerando que las partículas pueden aproximarse como cilindros. Para cada clase de pellet se proponen dos procedimientos alternativos para calcular el diámetro y la altura de cada cilindro a partir de fotografías de las superficies laterales de las partículas. Por comparación de los valores obtenidos con a) medidas directas del diámetro y la altura y b) diámetros hallados a partir de fotografías de la cara frontal de los pellets (utilizando Image J), se concluye cuál de los procedimientos resulta más confiable. Luego, se valida dicho procedimiento mediante comparación de los diámetros equivalentes en volumen calculados con valores experimentales. Los resultados obtenidos demuestran que es posible utilizar un análisis de imágenes digitales para caracterizar partículas cuya morfología se aproxima a la de un cilindro ideal.

Palabras Claves: Pellets de polietileno; Análisis de imágenes digitales; Tamaño de partícula, Esfericidad.

Abstract: In this paper, a method to characterize six types of commercial polyethylene pellets by digital image analysis is proposed. By using the ImageJ software, the size and shape of the particles (assumed as cylinders) are defined. For each type of pellet, two alternative procedures are proposed to calculate the diameter and height of each cylinder from photographs of the lateral surfaces of the particles. By comparing the obtained values with a) direct measurements of diameter and height and b) diameters derived from photographs of the pellets front face (found with Image J), it is concluded which of the procedures is more reliable. Then, the procedure is validated by comparison of the calculated volume equivalent diameters with experimental values. The results show that it is possible to use digital image analysis to characterize particles whose morphology is close to that of an ideal cylinder.

Keywords: Polyethylene pellets; Digital image analysis; Particle size, Sphericity.

Mariana Walter⁽¹⁾, Juliana Piña^(1,2), Diego E. Bertin^(1,2)

⁽¹⁾Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.

⁽²⁾PLAPIQUI, Camino La Carrindanga Km. 7, Bahía Blanca, Argentina.

Mail: dbertin@plapiqui.edu.ar

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La industria plástica en Argentina superó, ya a fines del siglo XX, el millón de toneladas de materias primas plásticas procesadas, concentrándose el 90% del consumo de estos insumos en seis productos principales: polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno y politereftalato de etileno (Ramal, 2003). Todos estos productos, obtenidos a partir del procesamiento de petróleo o gas natural, llegan a la industria transformadora en forma de pellets, para ser procesados, moldeados y transformados en productos finales. Así, los sistemas de transporte neumático resultan ser ampliamente convenientes para las empresas productoras de pellets poliméricos, específicamente durante la etapa final del proceso de producción en que las partículas plásticas deben ser transportadas hacia los sectores de empaque o almacenamiento.

En el diseño y/o evaluación de un sistema de transporte neumático se requiere calcular dos variables fundamentales: la velocidad mínima del gas que asegura fase diluida y la caída de presión en la línea de transporte (Holdich, 2002). La velocidad mínima que asegura transporte en fase diluida es una de las variables más importantes para los ingenieros que diseñan y evalúan sistemas de transporte neumático (Mills, 2004). Junto con la caída de presión del sistema, la velocidad mínima del gas define los límites de operación de un sistema de transporte neumático, a partir de los cuales es posible establecer las condiciones operativas con márgenes de seguridad suficientes como para evitar la deposición indeseada de sólidos y el eventual bloqueo de las cañerías (Martinussen, 1996).

Actualmente, si bien el análisis del flujo de un gas libre de sólidos en una cañería está bien establecido, el comportamiento del flujo partículas-gas no se comprende lo suficiente como para contar con leyes

físicas universales que describan cualquier sistema de transporte neumático (Vásquez et al., 2008). Diferentes autores demostraron que el diámetro equivalente en volumen, la esfericidad y la densidad son propiedades de las partículas muy influyentes sobre la velocidad mínima para fase diluida y la caída de presión (Henthorn et al., 2005; Holdich, 2002; Pakh y Klinzing, 2008; Vásquez et al., 2008).

En este trabajo se realiza una caracterización morfológica de seis clases distintas de pellets de polietileno comerciales mediante un análisis de imágenes digitales (AID). En el rango de diámetros de los pellets (1-6 mm), un AID ofrece numerosas ventajas frente a los demás métodos de medición. Es mucho más rápido que la medición directa con calibre, ya que proporciona información sobre la distribución de tamaño mediante el análisis de una muestra de partículas. Respecto al tamizado, no tiene una resolución limitada por el número y tamaño de apertura de los tamices. El AID permite, además, cuantificar la forma de las partículas.

Un software ampliamente utilizado para realizar AID es ImageJ, el cual permite medir distancias y determinar descriptores de tamaño y forma de partículas a partir de fotografías del material particulado (Ferreira y Rasband, 2012). Entre los descriptores de tamaño de partículas proporcionados por ImageJ se encuentran: área, perímetro y diámetros máximo y mínimo de Feret. Dentro de los descriptores de forma de partículas que brinda ImageJ se encuentran la circularidad y la relación de aspecto, entre otros.

En partículas irregulares, y debido a que el AID procesa imágenes proyectadas 2D para representar partículas 3D, una tendencia común para cuantificar el tamaño y la forma de las partículas consiste en aproximarlas a cuerpos ideales (i.e., cubos, esferas, cilindros, prismas, etc.) y determinar las dimensiones de interés

a partir de los descriptores de tamaño y forma mediante definiciones geométricas (Ljungqvist et al., 2011). Sin embargo, no existe una regla general para realizar este procedimiento. Por lo tanto, un segundo aporte de este trabajo consiste en identificar los descriptores de tamaño y forma más confiables para ser utilizados en el cálculo del tamaño y la forma de las partículas, así como en proponer y validar un procedimiento confiable para calcular el diámetro equivalente en volumen y la esfericidad de las partículas en función de los descriptores de tamaño y forma provistos por el AID.

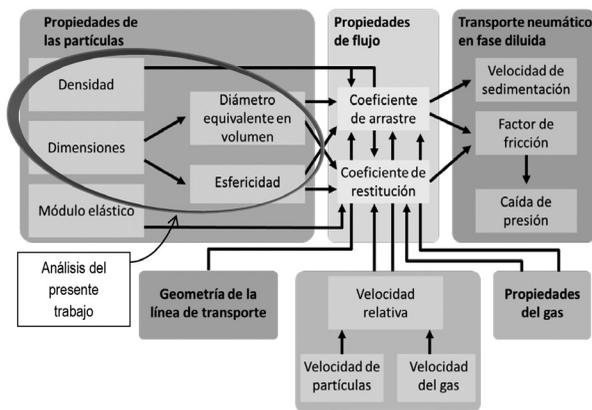


Figura 1. Esquema del proyecto general de trabajo.

La presente contribución es una etapa preliminar dentro de un proyecto más amplio, que tiene como objetivo analizar la influencia de las propiedades físicas de los pellets de polietileno (tamaño, forma, densidad, módulo elástico) sobre el caudal y la presión del gas necesarios para asegurar un transporte eficiente de sólidos particulados en fase diluida. En la Figura 1 se esquematiza la contribución de este trabajo al proyecto global. En actividades futuras, se medirá el módulo elástico de los pellets y se realizarán experiencias en un sistema de transporte neumático a escala piloto para determinar la velocidad de

sedimentación y la caída de presión para diferentes materiales poliméricos y caudales de partículas y de gas. Por último, se correlacionarán la caída de presión y la velocidad de sedimentación en función de variables asociadas al flujo tales como los coeficientes de arrastre y de restitución.

METODOLOGÍA

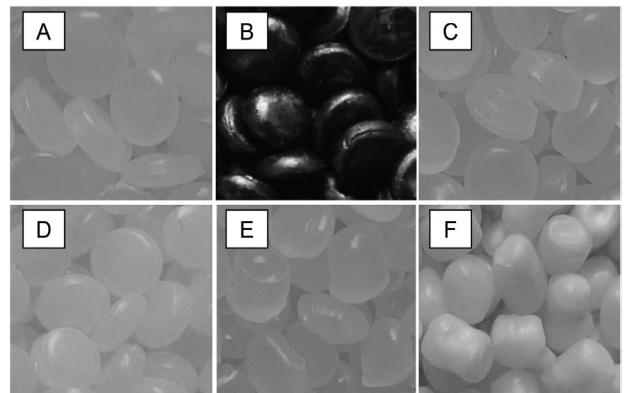


Figura 2. Pellets comerciales de polietileno analizados.

Clase	Tipo de polietileno	Forma de los pellets
A	HDPE	Discos 
B	MDPE	
C	LLDPE	
D	LLDPE	
E	HDPE	Cilindros 
F	LLDPE	

Tabla 1. Características representativas de los pellets de polietileno (HDPE: polietileno de alta densidad, MDPE: polietileno de media densidad, LLDPE: polietileno de baja densidad lineal).

Como se mencionó en la sección anterior, el caudal y presión del gas necesarios para un asegurar transporte eficiente de sólidos particulados dependen, entre otras variables, del diámetro equivalente en volumen y de la esfericidad de las partículas transportadas. El diámetro equivalente en volumen d_v se define como el diámetro de una esfera con volumen igual al de la partícula, y para un cilindro resulta ser:

$$d_v = \left(\frac{6}{\pi} V_p\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3}{2} D_c^2 L_c\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

donde V_p es el volumen de la partícula. La esfericidad φ es la relación entre la superficie de una esfera con el mismo volumen que la partícula y la superficie real de la misma (S_p):

$$\varphi = \frac{\pi d_v^2}{S_p} = \frac{\left(\frac{3}{2} \sqrt{D_c} L_c\right)^{\frac{2}{3}}}{L_c + \frac{D_c}{2}} \quad (2)$$

El AID para determinar D_c y L_c para cada clase de pellet se realizó mediante el software ImageJ. Para ello, mediante una cámara fotográfica convencional se tomaron dos fotografías a muestras representativas de cada clase de pellet: una visualizando la cara frontal y otra mostrando la superficie lateral de las partículas. La Figura 3 ilustra la imagen proyectada de la partícula observada desde las dos posiciones fotografiadas, así como las dimensiones que se pueden extraer de cada una. Como se observa en la Figura 3, el diámetro D_c de cada partícula puede ser determinado de ambas fotografías, pero la altura L_c sólo puede obtenerse de la imagen que muestra su superficie lateral. En las dos subsecciones siguientes se proponen dos procedimientos alternativos para obtener D_c y L_c a partir del AID de las fotografías de las superficies laterales.

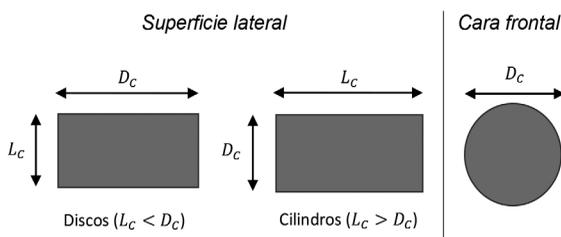


Figura 3. Visualización de los pellets en sus distintas posiciones y de las dimensiones asociadas.

Procedimiento 1: Cálculo de D_c y L_c a partir del Área y la Relación de Aspecto

ImageJ define la relación de aspecto como la relación entre el eje mayor y el eje menor de una elipse con igual área, orientación y centroide que la figura proyectada de la partícula (ver Figura 4):

$$AR = \frac{\text{Eje mayor}}{\text{Eje menor}} \quad (3)$$

Para el caso de un rectángulo, la ecuación se convierte en:

$$AR = \begin{cases} \frac{L_c}{D_c} & \text{si } L_c \geq D_c \\ \frac{D_c}{L_c} & \text{si } L_c < D_c \end{cases} \quad (4)$$

Considerando la Ecuación 4 y que el área proyectada del rectángulo es $A_{proj} = D_c L_c$, se obtiene:

- Para pellets con relación $L_c < D_c$ (discos A-D):

$$D_c = \sqrt{A_{proj} AR} \quad (5)$$

$$L_c = \sqrt{\frac{A_{proj}}{AR}} \quad (6)$$

- Para pellets con relación $L_c \geq D_c$ (cilindros E-F):

$$D_c = \sqrt{\frac{A_{proj}}{AR}} \quad (7)$$

$$L_c = \sqrt{A_{proj} AR} \quad (8)$$

Procedimiento 2: Cálculo de D_c y L_c a partir de los Diámetros Máximo y Mínimo de Feret

El diámetro máximo de Feret de la imagen proyectada de una partícula es la máxima distancia entre pares de líneas paralelas tangentes al contorno proyectado de la partícula. Análogamente, el diámetro

mínimo de Feret es la mínima distancia entre pares de líneas paralelas tangentes al contorno proyectado de la partícula. En el caso de un rectángulo, los diámetros máximo y mínimo de Feret corresponden a su diagonal y lado más pequeño, respectivamente (ver Figura 4). Por lo tanto, se obtiene:

- Para pellets con relación $L_c < D_c$ (discos A-D):

$$D_c = \sqrt{F_{max}^2 - F_{min}^2} \quad (9)$$

$$L_c = F_{min} \quad (10)$$

- Para pellets con relación $L_c \geq D_c$ (cilindros E-F):

$$D_c = F_{min} \quad (11)$$

$$L_c = \sqrt{F_{max}^2 - F_{min}^2} \quad (12)$$

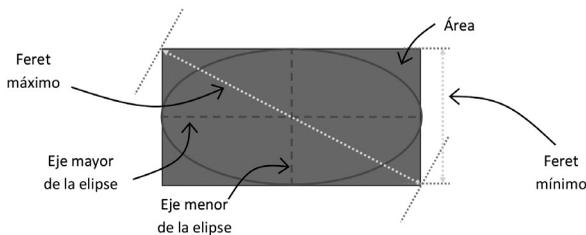


Figura 4. Descriptores de tamaño utilizados en las Secciones 3.1 y 3.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección está dividida en cuatro subsecciones. En la primera, se verifica la suposición “la superficie proyectadas de las partículas se aproximan a rectángulos” realizada en el AID de las fotografías de superficiales laterales. En la segunda, se corrobora la aproximación de los pellets a formas cilíndricas. En la tercera se valida el diámetro equivalente en volumen de las seis clases de pellets comparando los valores calculados con valores experimentales obtenidos a partir del peso de un número conocido de pellets y

la densidad de los mismos. Por último, en la cuarta subsección se reporta la esfericidad de los pellets.

AID de las Fotografías de las Superficies Laterales de los Pellets

Para verificar cuál de los dos procedimientos propuestos es más consistente con la hipótesis de que la superficie lateral proyectada de los pellets se aproxima a un rectángulo, mediante el software ImageJ se midieron las longitudes de los pellets sin utilizar los descriptores de tamaño y forma. Para ello, se dibujaron segmentos sobre la imagen del pellet (Figura 5), y luego el software identificó la intensidad de gris en cada uno de los píxeles de los segmentos. El cambio de intensidad indica los límites de la partícula. Para cada partícula analizada, se midió el diámetro y la altura tanto en el centro como en los bordes, tal como se esquematiza en la Figura 5. De esta manera, para cada partícula se obtuvieron tres medidas para D_c y tres medidas para L_c . Este método de obtención de D_c

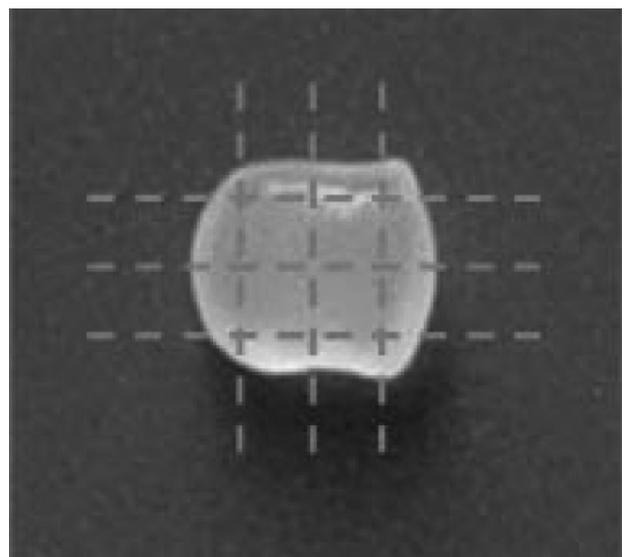


Figura 5. Ejemplo del método de medición directa de D_c y L_c .

y L_c tiene la ventaja de proveer valores directos de los diámetros y alturas de los pellets. Sin embargo, presenta dos desventajas importantes: a) requiere medir cada pellet en forma individual, lo cual demanda considerable tiempo, y b) el método es subjetivo al observador dado que éste debe reconocer la orientación de la partícula. Por estas razones, esta opción sólo se utilizó en pocos pellets (12), siendo imposible obtener información de la distribución de tamaño de partículas.

En la Tabla 2 se muestran los diámetros promedio calculados mediante los procedimientos presentados en la Sección 2, así como el diámetro promedio obtenido por medición directa. Considerando los resultados de la medición directa como valores de referencia, en dicha tabla también se presentan los errores relativos de ambos procedimientos. La tabla también incluye la desviación estándar de los diámetros obtenidos por ambos procedimientos, valor indicativo de la dispersión de tamaños para cada clase de pellet. Los resultados indican que el Procedimiento 1 es una aproximación muy buena de los valores obtenidos por medición directa. Para todas las clases de pellets, y a diferencia del Procedimiento 2, el error cometido siempre resultó menor al 10%. La Tabla 3 es similar a la Tabla 2, pero presenta los valores de L_c en lugar de D_c . Nuevamente, se observa que los resultados calculados por el Procedimiento 1 son mucho más cercanos a los obtenidos por medición directa que los correspondientes al Procedimiento 2. Solamente para los pellets de la clase B, el error relativo fue mayor al 10%. Esto puede deberse a la dificultad del software ImageJ para distinguir partículas oscuras de la sombra que proyectan (como se muestra en la Figura 2, sólo los pellets de la clase B son negros).

Clase	Medición directa	Procedimiento 1		Procedimiento 2	
	D_c promedio (mm)	D_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)	D_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)
A	4.68	4.31 ± 0.18	-7.78	4.22 ± 0.24	-9.90
B	4.71	4.44 ± 0.19	-5.73	4.23 ± 0.38	-10.19
C	4.62	4.34 ± 0.19	-6.14	3.68 ± 0.23	-20.35
D	4.55	4.20 ± 0.18	-7.32	3.95 ± 0.30	-7.96
E	3.99	3.82 ± 0.08	-4.24	4.28 ± 0.11	7.34
F	3.69	3.59 ± 0.18	-2.84	4.04 ± 0.23	9.26

Tabla 2. Valores promedio de D_c (mm) obtenidos por medición directa y por los procedimientos presentados en la Sección 2.

Clase	Medición directa	Procedimiento 1		Procedimiento 2	
	L_c promedio (mm)	L_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)	L_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)
A	1.85	1.95 ± 0.29	5.63	2.22 ± 0.32	20.18
B	1.99	2.30 ± 0.29	11.56	2.67 ± 0.33	34.17
C	2.69	2.87 ± 0.18	6.78	3.21 ± 0.21	19.48
D	2.29	2.27 ± 0.13	-0.80	2.51 ± 0.13	9.69
E	4.45	4.54 ± 0.27	1.90	3.02 ± 0.39	-32.16
F	4.69	4.73 ± 0.51	0.97	3.63 ± 0.84	-22.51

Tabla 3. Valores promedio de L_c (mm) obtenidos por medición directa y por los procedimientos presentados en la Sección 2.

Comparación del AID de las Fotografías de las Superficies Laterales con las de las Caras Frontales

Como se mencionó anteriormente, el diámetro D_c puede obtenerse del AID de las fotografías de las caras frontales. Para un cilindro perfecto, la cara frontal corresponde a un círculo perfecto (ver Figura 3). El diámetro equivalente de área proyectada se define como el diámetro de un círculo con igual área proyectada que la partícula:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\text{frontal}}}{\pi}} \tag{13}$$

donde A_{frontal} es el área frontal de las partículas. En la Tabla 4 se presentan los diámetros promedios obtenidos con la Ecuación 13 para las fotografías de área frontal y por los procedimientos de la Sección 2. Como se observa, para el Procedimiento 1 los errores son menores al 13%, lo que permite concluir que la ecuaciones 5 (o 7) y 13 son consistentes. Además, si

se utiliza el Procedimiento 1 para calcular D_c y L_c , la hipótesis “los pellets se pueden aproximar a cuerpos cilíndricos” es aceptable.

Clase	Cara frontal		Procedimiento 1		Procedimiento 2	
	D_c promedio (mm)	D_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)	D_c promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)	
A	4.69 ± 0.32	4.31 ± 0.18	-8.10	4.22 ± 0.24	-10.02	
B	4.33 ± 0.16	4.44 ± 0.19	2.54	4.23 ± 0.38	-2.31	
C	4.97 ± 0.05	4.34 ± 0.19	-12.68	3.68 ± 0.23	-25.96	
D	4.70 ± 0.13	4.20 ± 0.18	-10.64	3.95 ± 0.30	-15.95	
E	3.76 ± 0.18	3.82 ± 0.08	1.60	4.28 ± 0.11	13.83	
F	3.81 ± 0.16	3.59 ± 0.18	-5.78	4.04 ± 0.23	6.04	

Tabla 4. Valores promedio de D_c (mm) obtenidos de la cara frontal de los pellets y por los procedimientos presentados en la Sección 2.

Diámetro Promedio Equivalente en Volumen

Para validar el Procedimiento 1, para cada clase de pellet se compara el diámetro promedio equivalente en volumen (d_v) teórico derivado del Procedimiento 1 con un valor experimental. Para el valor teórico, se reemplazan las ecuaciones 5-8 en la Ecuación 1:

- Para pellets con relación $L_c < D_c$ (discos A-D):

$$d_v = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{A_{proj}} AR^{\frac{1}{6}} \tag{14}$$

- Para pellets con relación $L_c \geq D_c$ (cilindros E-F):

$$d_v = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{A_{proj}} AR^{-\frac{1}{6}} \tag{15}$$

El valor experimental de d_v se determina dividiendo la masa promedio de un pellet por la densidad del mismo. La masa promedio se obtuvo pesando un número conocido de pellets y dividiendo el peso por el número de pellets. La densidad de cada clase de pellet se midió mediante picnometría. En la Tabla 5 se muestran los valores de d_v experimentales y calculados por

el Procedimiento 1. Los errores son menores al 10%, salvo para la clase E en donde el error es 14.3%. Como se mencionó en la sección 3.1, el error cometido en la clase B se debe probablemente a que el software no fue capaz de diferenciar la partícula de la sombra que proyecta. De la Tabla 5 se concluye que el Procedimiento 1 es un método aceptable para estimar el tamaño de los pellets.

Clase	Experimental	Procedimiento 1	
	d_v promedio (mm)	d_v promedio y desviación estándar (mm)	Error relativo (%)
A	3.69	3.78 ± 0.22	2.43
B	3.73	4.07 ± 0.16	9.12
C	4.44	4.32 ± 0.17	2.70
D	3.90	3.92 ± 0.13	0.51
E	4.05	4.63 ± 0.13	14.3
F	4.28	4.50 ± 0.21	5.14

Tabla 5. Valores promedio del diámetro equivalente en volumen (mm) experimental y calculado por el Procedimiento 1.

Esféricidad de los Pellets

Reemplazando las ecuaciones 5-8 en la Ecuación 2, se obtiene:

- Para pellets con relación $L_c < D_c$ (discos A-D):

$$\varphi = \frac{\left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{2}{3}} AR^{\frac{1}{3}}}{1 + \frac{AR}{2}} \tag{16}$$

Para pellets con relación $L_c \geq D_c$ (cilindros E-F):

$$\varphi = \frac{\left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{2}{3}} AR^{-\frac{1}{3}}}{1 + \frac{1}{2AR}} \tag{17}$$

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos de esfericidad para las seis clases de pellets. Las clases A-D tienen menores valores de esfericidad porque consisten en discos y, por ende, su forma se aleja más de la una esfera en comparación con los pellets de las clases E y F. Dentro de las clases A-D, la clase A tiene la esfericidad más baja mientras que la clase C presenta

el valor más alto. Este resultado se debe a que los pellets de la clase A son los discos con menor altura mientras que los pellets de la clase C son los discos con mayor espesor (ver Tabla 3). Por otro lado, las partículas de las clases B y D mostraron alturas de cilindro y esfericidad similares. Con respecto a las clases E y F, los valores de D_c y L_c (Tablas 2 y 3) indican que los pellets de la clase F son los más angostos, resultado que justifica la menor esfericidad obtenida en comparación con la clase E.

Clase	Esfericidad promedio y desviación estándar
A	0.807 ± 0.023
B	0.828 ± 0.014
C	0.856 ± 0.006
D	0.835 ± 0.009
E	0.871 ± 0.002
F	0.865 ± 0.006

Tabla 6. Esfericidad de los pellets calculada a partir del procedimiento 1.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que es posible dimensionar partículas cuya morfología se aproxime a la de un cilindro ideal, a partir de un análisis de

imágenes digitales. Los valores de área y relación de aspecto de las partículas que proporciona el procesamiento de imágenes pueden combinarse para obtener el diámetro y altura de los pellets. Las esfericidades calculadas mediante el Procedimiento 1 se consideran aceptables debido a que el método fue validado por comparación de los diámetros equivalentes en volumen calculados con valores experimentales.

En actividades futuras, se determinará el módulo elástico de las partículas estudiadas para completar la caracterización física de los pellets. Posteriormente, se vincularán las propiedades de los sólidos con la caída de presión y la velocidad mínima de gas que asegura transporte neumático en fase diluida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Lic. Fernanda Cabrera (PLAPIQUI) por su colaboración en este trabajo así como al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Universidad Nacional del Sur (UNS) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por el soporte financiero.

REFERENCIAS

Ferreira T, Rosband W. (2012). *ImageJ user guide. IJ 1.46r*.

Fuente: www.imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf

Henthorn K.H., Park K., Curtis, J.S. (2005). *Measurement and Prediction of Pressure Drop in Pneumatic Conveying: Effect of Particle Characteristics, Mass Loading, and Reynolds Number. Ind. Eng. Chem. Res., 44.*

Holdich R.G. (2002). *Fundamentals of Particles Technology. Midland Information Technology & Publishing, England.*

Ljungqvist M.G, Engelbrecht Nielsen M., Kjaer Ersboll B., Frosch S. (2011). *Image Analysis of Pellet Size for a Control System in Industrial Feed Production. PLoS ONE. Volume 6, Issue 10.*

Martinussen S.E. (1996). *The Influence of the Physical Characteristics of Particulate Materials on their Conveyability in Pneumatic Transport Systems. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Greenwich.*

Mills D. (2004). *Pneumatic Conveying Design Guide. Elsevier Butterworth-Heinemann.*

Pahk J.E., Klinzing G.E. (2008). *Comparison of flow characteristics for dilute phase pneumatic conveying for two different plastic pellets. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 39.*

Ramal M. (2003). *Estudio 1.EG.33.6 – Estudios Sectoriales – Componente: Industria de los Derivados de la Petroquímica. Estudio de la Oficina de la CEPAL-ONU en Bs As. Web: <http://www.cepal.org>.*

Rhodes M. (1998). *Introduction to Particle Technology. Wiley, West Sussex, England.*

Vasquez N., Jacob K., Cocco R., Dhodapkar S., Klinzing, G.E. (2008). *Visual Analysis of Particle Bouncing and its Effect on Pressure Drop in Dilute Phase Pneumatic Conveying. Powder Technology, 179.*