Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 811-817

ANÁLISIS DE IMÁGENES DE ESPUMAS DE FLOTACIÓN: CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA ESPUMA EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CORRELACIÓN CRUZADA NORMALIZADA

R. H. Estrada-Ruiz [*]*, R. Pérez-Garibay*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 811-817

ANÁLISIS DE IMÁGENES DE ESPUMAS DE FLOTACIÓN: CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA ESPUMA EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CORRELACIÓN CRUZADA NORMALIZADA

R. H. Estrada-Ruiz *, *R. Pérez-Garibay*

Dpto. de Metalurgia Extractiva, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN. Ramos Arizpe, Coah. México

** E-mail: rosa.estrada@cinvestav.edu.mx*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

La velocidad con la que fluye la espuma de flotación al concentrado es un parámetro importante para diagnosticar el estado de operación del proceso y estimar la cantidad de mineral que se recupera. En este trabajo se profundiza y evalúa la técnica de correlación cruzada normalizada para estimar la velocidad de la espuma mediante el análisis de imágenes de la superficie de espumas mineralizadas. La técnica de correlación fue validada mediante mediciones manuales. Las pruebas fueron llevadas a cabo en una columna de flotación de laboratorio a la cual se le instaló un sistema de adquisición de imágenes. Se concluye que la técnica de correlación cruzada concuerda con las mediciones de referencia de la velocidad con la que fluye la superficie de la espuma (R^2=0.95).

Palabras Claves: *Velocidad de espuma, Espumas de flotación, Correlación cruzada.*

Abstract

The velocity with which the froth flotation flows to the concentrate is an important parameter to diagnose the operational process performance and to estimate the mineral recovery. This work study in depth and evaluate the normalized cross correlation technique to estimate the froth velocity using image analysis of the surface of mineralized froths. The correlation technique was validated by means of manual measurements. The test was carried out in a laboratory flotation column in which was installed an image acquisition system. It concludes that the cross correlation technique coincide with the reference velocity measurements with the flowing froth (R^2=0.95).

Keywords*: Froth velocity, froth flotation, cross correlation.*

1. INTRODUCCIÓN

En la última década se han desarrollado diferentes técnicas para el monitoreo y control de los sistemas de flotación de minerales, con el afán de mejorar la eficiencia del proceso. Una de estas técnicas ha sido el desarrollo de máquinas de visión artificial, las cuales han sido elaboradas para estandarizar, de forma cuantitativa, el monitoreo que realizan los operadores para controlar el proceso de flotación. Inclusive, en los últimos años se han enfocado esfuerzos en crear lazos de control que utilicen la información provista por estas máquinas y realizar control automático, Brown *et al.* [1], Olst *et al.* [2].

Hätönen *et al.* [3], Moolman *et al.* [4], Bonifazi *et al.*[5,6], Hargrave y Hall [7], han reportado que una de las variables que monitorean los operadores para el control del proceso es el color de la espuma, ya que este se encuentra fuertemente relacionado al tipo de mineral y a su concentración. Por otra parte, Moolman *et al.* [4] reportaron que la movilidad, estabilidad y el tamaño de burbuja son las características más significativas de la espuma, ya que están relacionadas al grado de mineralización de la espuma. Investigadores como Cillers *et al.* [8] y Ventura-Medina y Cillers [9] han utilizado estas características para evaluar la eficiencia del proceso y estimar la cantidad de mineral que se recupera.

Una de las características más importantes, de las antes mencionadas, es la velocidad de la espuma, ya que este es el indicador más significativo de la cantidad de mineral que se recupera y por consecuencia del estado en el que opera el proceso.

El régimen de movilidad es caracterizado por espumas líquidas con flujo libre y el régimen de inmovilidad por una espuma seca y viscosa. De acuerdo a Moudgil [10] la cantidad de mineral hidrofóbico establece la mineralización de la espuma la cual influye fuertemente en la viscosidad de la espuma. Si la viscosidad es muy baja la espuma puede estar muy inestable y fluida para retener partículas valiosas, por otra parte una alta viscosidad puede retardar el drenado de partículas hidrofóbicas para el lavado. Esto puede ser el resultado de una espuma con un contenido de mineral que es muy alto y da como resultado una disminución en el grado y recuperación del concentrado.

En este trabajo se estudia y evalúa la técnica de correlación cruzada normalizada para estimar la velocidad de la espuma. Esta técnica ha sido sugerida por Barbian *et al.* [11] para describir el comportamiento físico de la espuma. Por otra parte, Kaartinen *et al.* [12] la emplean para estimar la velocidad de la espuma. Sin embargo, el desarrollo de ésta técnica ha sido muy brevemente difundido. Las pruebas de las cuales se obtuvieron las imágenes de la superficie de la espuma fueron realizadas en una columna de flotación de laboratorio a la cual se le instaló un sistema de adquisición de imágenes. Las mediciones de velocidad obtenidas por la técnica de correlación fueron validadas mediante mediciones manuales.

2. ANTECEDENTES

2.1 Generalidades sobre la técnica de Correlación

El principal uso de la correlación es para determinar que tan similares son dos imágenes. En este proceso f(x,y) es una imagen que contiene objetos de interés. Si se quiere determinar si f contiene un objeto en particular, se genera una plantilla de ese objeto, w(x,y). Por tanto, si existe una concordancia, la correlación de las dos funciones será máxima en la ubicación donde w encuentra similitud en f.

La Figura 1 muestra el procedimiento de correlación, en donde la plantilla w(x,y) es de tamaño J X K dentro de la imagen f(x,y), la cual es de tamaño M X N, asumiendo que J≤ M y K ≤ N. El origen de f es en la parte superior izquierda y el origen de w es en su centro. Para un valor de (x,y), digamos (x_0,y_0) dentro de f, se obtiene un valor de correlación. Al variar las coordenadas x y y, la plantilla se mueve alrededor del área de la imagen, dando una función de correlación. El máximo valor de la función de correlación indica la posición en la cual w tiene mejor igualación (González y Wood [13]).

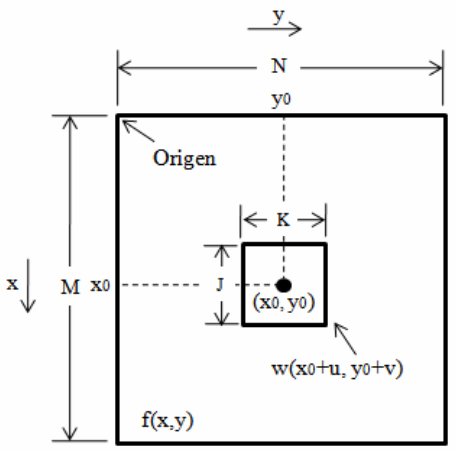


Figura 1. Arreglo para obtener la correlación de f y w en un punto (x_0,y_0).

2.2 Correlación cruzada normalizada (CCN)

Lewis [14], señala que el uso de correlación cruzada para igualar una máscara o plantilla es motivada por la medición de distancia (Distancia Euclideana cuadrada)

$$d^2_{f,w}(u,v) = \sum_{x,y} \left[f(x,y) - w(x+u, y+v) \right]^2 \quad (1)$$

donde f es la imagen y la suma es sobre x,y bajo la ventana que contiene a la plantilla w colocada en u,v. En la expansión de d^2

$$d_{f,w}(u,v) = \sum_{x,y} \left[f^2(x,y) - 2f(x,y)w(x+u,y+v) + w^2(x+u,y+v) \right] \quad (2)$$

El término $\sum w^2(x+u, y+v)$ es constante. Si el término $\sum f^2(x,y)$ es aproximadamente constante, entonces lo que permanece en el término de correlación cruzada es

$$c(u,v) = \sum_{x,y} f(x,y)w(x+u, y+v) \quad (3)$$

esta es la medición de la similitud entre la imagen y la plantilla.

Existen varias desventajas en el uso de la ecuación 3 para la igualación de la plantilla:

- Si el brillo de la imagen $\sum f^2(x,y)$ varía con la posición, la igualación con la ecuación (3) puede fallar. Por ejemplo, la correlación entre la plantilla y una región que es igual en la imagen puede ser menor que la correlación entre la plantilla y un punto brilloso.
- El rango de $c(u,v)$ depende del tamaño de la plantilla.
- La ecuación 3 no es invariante a los cambios en la amplitud de la imagen, tal como aquellos causados por el cambio de iluminación a través de la secuencia de imágenes.

El coeficiente de correlación supera estas dificultades mediante la normalización de los vectores de la imagen y la plantilla a una longitud de 1, arrojando un coeficiente de correlación

$$\gamma(u,v)=\frac{\sum_{x,y}\left[f(x,y)-\overline{f_{u,v}}\right]\left[w(x+u,y+v)-\overline{w}\right]}{\left\{\sum_{x,y}\left[f(x,y)-\overline{f_{u,v}}\right]^2\sum_{x,y}\left[w(x+u,y+v)-\overline{w}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Donde $\overline{w}$ es la media de la plantilla y $\overline{f_{u,v}}$ es la media de $f(x,y)$ en la región bajo la plantilla. La ecuación 4 se presenta como la correlación cruzada normalizada.

3. APARATO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La fase experimental fue realizada en una columna de flotación de laboratorio de 10 cm de diámetro. La Figura 2 muestra la instrumentación de la columna. En lo que corresponde a los dispositivos para efectuar la flotación se empleó un tanque acondicionador de 100 l de capacidad, al cual se le instaló una salida aproximadamente a 10 cm del fondo para suministrar la pulpa a la columna y en la parte superior se ubicaron los soportes de las mangueras para la recepción del concentrado y las colas. Para el mezclado se utilizó un agitador con doble paleta impulsado por un motor trifásico. La temperatura de la pulpa se mantuvo constante mediante una resistencia eléctrica que fue controlada mediante un termopar que abre y cierra el circuito para mantener la temperatura.

Para el manejo de los flujos de alimentación, colas y agua de lavado, se emplearon tres bombas. La bomba de alimentación fue utilizada para mantener estable la interfase entre la zona de espuma y de colección, mediante un controlador automático y un transductor de presión. El suministro de aire fue realizado mediante un compresor que fue conectado en serie a un regulador de aire con un rotámetro para ajustar el flujo de aire introducido a la columna.

El sistema de adquisición de imágenes de la superficie de la espuma fue conformado por una cámara de alta velocidad ubicada a 120 cm del labio de rebose de la columna, la cual fue conectada a una tarjeta de adquisición de imágenes en una PC. Además se instaló una cubierta que aísla la toma de las fotografías de la luz exterior y una lámpara de halógeno de 90 W que se colocó a 80° de la superficie de la columna, a una altura de 80 cm del labio de rebose.

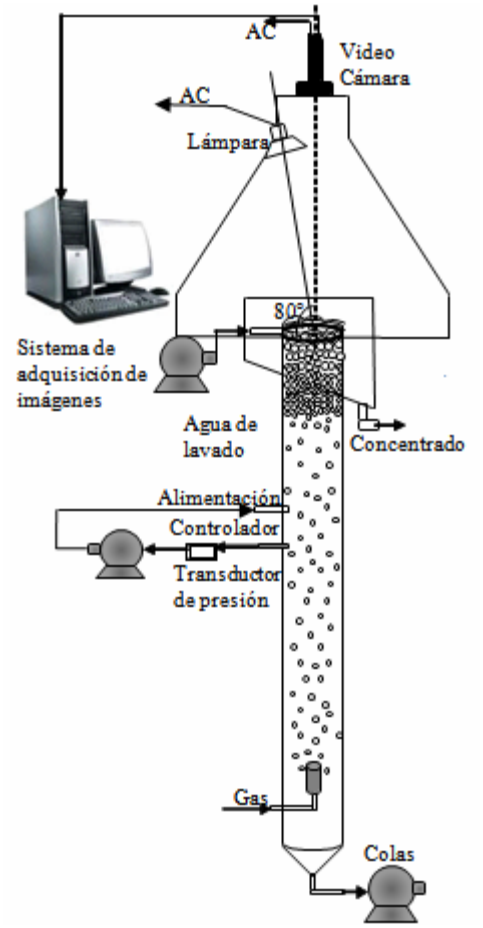


Figura 2. Sistema experimental.

La prueba de flotación fue llevada a cabo utilizando concentrado de mineral de esfalerita, el cual representó el 12% en peso. Los reactivos empleados fueron Sulfato Cúprico como activador, Xantato Isopropílico de sodio como colector, Hidróxido de sodio para elevar el pH y Metil Isobutil Carbinol como espumante.

El acondicionamiento del mineral fue llevado a cabo en un tanque al que se le depositó 85 l de agua, a la cual se elevó su temperatura manteniéndola constante en 30°C. Habiendo alcanzado la temperatura se agregó el mineral y manteniendo la agitación constante se elevó el pH de la solución a 10. Transcurridos 15 min se adicionó el activador mezclándose por otro periodo de 15 min, posteriormente se añadió el colector y el espumante, acondicionándose por el mismo periodo de tiempo utilizado anteriormente.

La pulpa químicamente acondicionada se re circuló en la columna de flotación ubicando las velocidades de los flujos en los valores óptimos para establecer el nivel de cama de espuma deseado. Para establecer una operación en estado estable del proceso se mantuvo en circulación la pulpa por un tiempo de 15 min.

Cabe mencionar que el nivel de cama de espuma se modificó en cinco ocasiones por periodos de tiempos definidos, esto para modificar el tiempo de residencia de las burbujas dentro de la cama de espuma.

3.1Adquisición de imágenes

Las imágenes de la superficie de la espuma de flotación fueron adquiridas creando una interfase entre el software de la cámara y el software Matlab®. Esto fue logrado elaborando un programa en Matlab®, en donde el intervalo de tiempo de adquisición fue de 0.09 s y el formato de las imágenes fue RGB. El total de imágenes obtenidas para cada espesor de cama de espuma fue de 728.

4. RESULTADOS

Las imágenes de la superficie de la espuma fueron obtenidas de cinco diferentes espesores de cama de espuma. Para cada espesor se seleccionaron cinco secuencias de fotografías de las 728 que se tomaron de cada una. Estas fueron analizadas por dos métodos, el primero fue mediante medición manual de la velocidad de la espuma y el segundo utilizando la técnica de correlación cruzada normalizada.

La medición manual de velocidad de la espuma se realizó primeramente ubicando una sección en la imagen para analizar, Figura 3. La sección se encuentra ubicada a la derecha del área transversal de la columna, siendo ésta rectangular, comprendiendo desde el centro de hasta el labio de rebose. Esto con el objetivo de considerar un desplazamiento horizontal de las burbujas y medir la velocidad de las que finalmente se desplazan al concentrado.

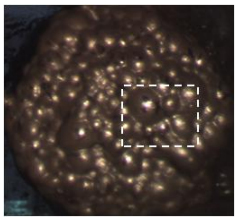


Figura 3. Sección de las fotografías considerada para el análisis.

El cálculo de velocidad manual se realizó en el software Image Pro®, y consistió en elegir una burbuja en la primer imagen de la secuencia seleccionada, Figura 4(a), a la cual se le dio seguimiento hasta que rebosara o estallara, Figura 4(b), teniendo en consideración el área de análisis que se definió anteriormente. Habiendo identificado el recorrido de dicha burbuja se procedió a crear un macro en Image Pro®, en donde manualmente se trazó el contorno de la burbuja al inicio del recorrido. Este macro se aplicó en la imagen donde la burbuja termina su desplazamiento, de tal forma que se obtiene la imagen en donde se presentan los dos contornos, Figura 4(c). Posteriormente se midió la distancia recorrida.

Habiendo obtenido la distancia recorrida, conociendo el número de imágenes en el que se desplazó y el tiempo de adquisición de las fotografías se calcula la velocidad.

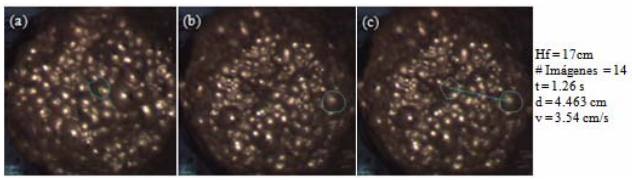


Figura 4. Proceso de medición manual de velocidad de una burbuja en la superficie de la espuma.

El procedimiento anterior se empleó en las secuencias de fotografías para los cinco espesores de cama de espuma. La Figura 5 muestra los resultados

obtenidos para los cinco espesores de cama de espuma analizados. Las mediciones realizadas indican que para espesores de cama de espumas mayores la velocidad de la espuma es baja, conforme este va disminuyendo el espesor de la cama de espuma, esta es más fluida. En el caso de la altura de 4cm se observa que la velocidad medida es menor a lo que indicaría la tendencia, esto debido a que en la prueba de flotación la espuma fluía un poco más del lado opuesto a la sección de análisis.

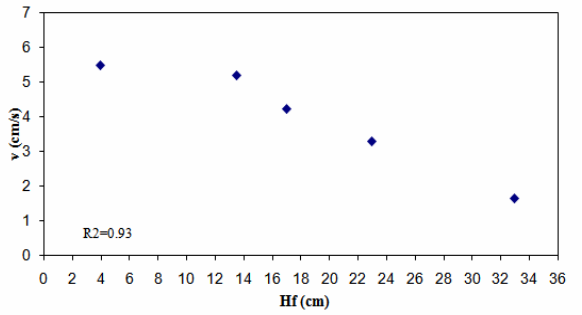


Figura 5. Correlación entre los diferentes espesores de cama de espuma y su velocidad promedio medida manualmente.

Para realizar los cálculos de velocidad de la espuma mediante correlación cruzada normalizada se utilizó el programa Matlab®. El algoritmo programado en este software utiliza una instrucción que tiene el siguiente procedimiento general para obtener la correlación cruzada normalizada, Lewis [14], Haralick *et al.* [15]:

1.- Calcula la correlación cruzada en el dominio del espacio o de la frecuencia, dependiendo del tamaño de las imágenes.

2.- Calcula sumas locales mediante el pre cálculo de corridas de sumas.

3.- Utiliza sumas locales para normalizar la correlación cruzada y obtener los coeficientes de correlación.

La implementación de lo anterior sigue cercanamente la ecuación 4.

El cálculo de velocidad se llevó a cabo analizando las secuencias de fotografías que se emplearon en la medición manual, así como las mismas secciones de análisis. El proceso para llevar a cabo la técnica de correlación cruzada se ilustra en la Figura 4. Primeramente se toman las secciones de análisis de una secuencia de imágenes, Figura 6(a). Estas secciones se digitalizan y normalizan a valores de 0 y 1, sección (b).

Habiendo normalizado las imágenes se aplica la técnica de correlación cruzada, en donde la primer imagen actuará como la plantilla que será sobre puesta en la siguiente para calcular el nivel de correlación entre las dos, Figura 6(c). Posteriormente se determina la traslación total entre las imágenes, la cual depende en la ubicación del pico de correlación en la matriz de correlación cruzada, conociendo el espaciamiento de píxel en unidades físicas, mm/píxel, se calcula la distancia Euclideana correspondiente a la traslación y considerando el tiempo de adquisición entre imágenes se calcula la velocidad, Figura 6(d).

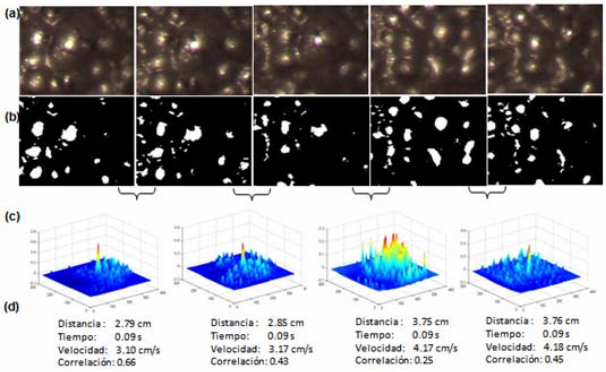


Figura 6. La sección (a) secuencia de imágenes del espesor de cama de espuma de 17 cm, la sección (b) imágenes normalizadas a 0 y 1. Sección (c) gráficos de correlación de los pares de imágenes y (d) resultados de los cálculos de distancia y velocidad.

Como se mencionó anteriormente, la técnica de correlación cruzada normalizada se aplicó a las secuencias de imágenes que se analizaron manualmente. La Figura 7 muestra los resultados de velocidad calculados con el programa, en donde se puede apreciar un buen factor de correlación (R^2=0.862).

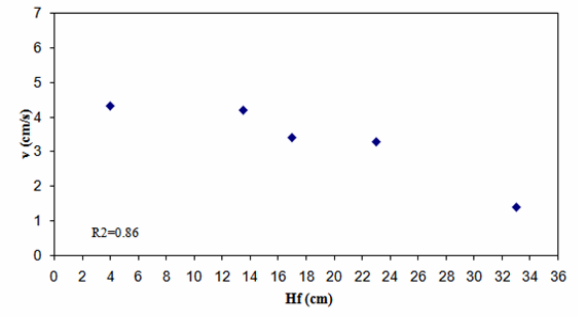


Figura 7. Correlación entre los diferentes espesores de cama de espuma y su velocidad promedio medida manualmente.

Es importante mencionar que cuando ocurren cambios altamente significativos de una imagen a otra, debido al grado de explosión de burbujas, la técnica de correlación reporta valores de velocidad no congruentes con los registrados en la mayoría de la secuencia analizada. Debido a esto se estableció un criterio de discriminación para estos casos. Una posible amortización del error generado sería la disminución del tiempo de adquisición de fotografías y el análisis de una mayor cantidad de imágenes.

Por otra parte, la relación entre la velocidad medida manualmente y mediante la técnica de correlación cruzada normalizada para cada nivel de cama de espuma se presenta en la Figura 8, mostrando una alta correlación (R^2= 0.949). Además se puede observar que al disminuir el espesor de la cama de espuma, los valores calculados mediante la técnica de correlación son menores a los medidos manualmente, esto puede ser debido a que el tiempo de adquisición de las imágenes sea insuficiente para el nivel de fluidez en los espesores de espuma de 17, 13 y 4cm.

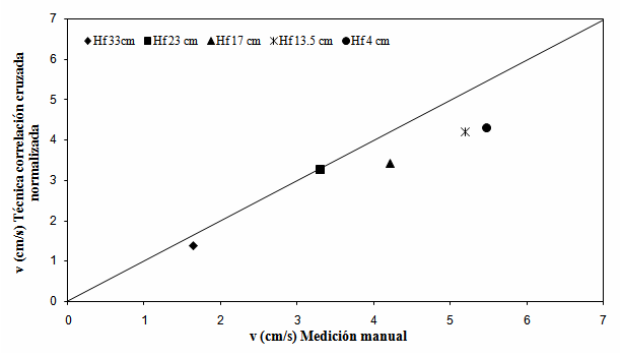


Figura 8. Correlación entre la velocidad medida manualmente y la calculada utilizando la técnica correlación cruzada normalizada (R^2= 0.949).

5. CONCLUSIONES

La medición de la velocidad de la espuma es de gran importancia en los procesos de flotación ya que es un fuerte indicador de la cantidad de mineral que se recupera y por consecuencia del estado operacional del proceso. Por tanto, resulta de gran importancia conocer técnicas de análisis de imágenes que reporten este parámetro. La técnica de correlación cruzada normalizada estudiada en este trabajo, mostró buenos resultados en la medición de la velocidad de la espuma de flotación. Para obtener mejores resultados, y como trabajo a futuro, es conveniente disminuir el tiempo de adquisición de las imágenes y analizar una mayor cantidad de estas.

6. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) México por el financiamiento recibido y a J. A. González por el apoyo técnico en el laboratorio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Brown N., Dioses J., Olst M. V. 2001. Advances in flotation process control at Cadia Hill gold mine using froth imaging technology. In Proceedings of the SME annual meeting, Denver, USA.

[2] Olst M. V., Brown M., Bourke P., Ronkainen S. 2000. Improving flotation plant performance at Cadia by controlling and optimizing the rate of froth recovery using outokumput Frothmaster. In Proceedings of the AusIMM seventh mill operators' conference, Melbourne, Australia.

[3] Hätönen J., Hyötiniemi H. Y., Miettunen J., Carlsson L. E. 1999. Using image information and partial least squares method to estimate mineral concentrations in mineral flotation. Proceedings of the 2nd Int. Conf. on intelligent processing and manufacturing of material, July 10-15. Vol. 1, pp. 459-464.

[4] Moolman D. W., Eksteen J. J., Aldrich C., van Deventer J. S. J. 1996. The significance of flotation frtoh appearance for machine vision control. International Journal Mineral Processing. Vol. 48, pp. 135-158.

[5] Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. 1998. Flotation froth characterization by closed domain (bubbles) color analysis. In: 4th Int. Conf, on quality control by artificial vision, November 10-12, Takamatsu, Japan, pp. 131-137.

[6] Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. 1999b. Characterization of flotation froth color and structure by machine vision. In GEOVISION 99, may 6-7, Liege, Belgium.

[7] Hargrave J. M., Hall S. T. 1997. Diagnosis of concentrate grade and mass flowrate in tin flotation from color and surface texture analysis. Minerals Engineering. Vol. 10, pp. 613-621.

[8] Cilliers J. J., Asplin R. A., Woodburn E. T. 1998. Kinetic flotation modeling using froth imaging data. Chapter 10. Frothing in flotation II. Gordon and Breach Science Publishers, pp.336.

[9] Ventura-Medina A., Cilliers J. J. 2002. A model to describe flotation performance based on physics of foams and froth image analysis. International Journal of Mineral Processing. Vol. 67, pp. 79-99.

[10] Moudgil B. M. 1993. Correlation between froth viscosity and flotation efficiency. Minerals and Metallurgical Processing. 10(2):. 100-101.

[11] Barbian N. Cilliers J. J., Morar S. H., Bradshaw D. J. 2007. Froth imaging, air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance. International Journal of Mineral Processing. Vol. 84, pp. 81-88.

[12] Kaartinen J., Hätönen J., Hyötyniemi H., Miettunen J. 2006. Machine-vison-based control of zinc flotation- A case study. Control Engineering practice. Vol. 14, pp. 1455-1466.

[13] González R. C., Woods R. E. 2002. Digital Image Processing Second Edition. Prentice Hall, pp. 793.

[14] Lewis J. P. 2003. Fast normalized cross-correlation. Available from: (www.idiom.com/~zilla/index.html#Publications).

[15] Haralick J. M. Shapiro L. G. 1992. Computer and Robot Vision, Addison-Wesley. Vol. II, pp. 316-317.