

ESTUDIO DEL CORTOCIRCUITO DE FINOS EN HIDROCICLONES OPERADOS CON SUSPENSIONES POLIMINERALES DE LA INDUSTRIA CEMENTERA

M.O. Bustamante, L. M. Chica

Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

E-mai: mobustam@unal.edu.co; lmchica@unal.edu.co

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos a partir de un trabajo de investigación experimental, para determinar las principales variables operacionales que están asociadas al cortocircuito de finos y al fenómeno “fish hook” en hidrociclones de 10 pulgadas de diámetro que se emplean como clasificadores en un circuito cerrado de molienda industrial cuando se opera con suspensiones polimineraleas propias de la industria cementera. Las principales conclusiones apuntan a que el cortocircuito está influenciado por el empaquetamiento de los minerales en suspensión (consecuencia de la diferencia de forma y tamaño) y el contenido de sólidos, y que conforme el fenómeno se reporta en tamaños de partículas más finos se hace más profundo, independientemente de la composición.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las operaciones más importantes en el procesamiento de minerales dentro de la industria del cemento, es la reducción de tamaño de las materias primas: caliza y crudo, siendo este último un compuesto formado por una mezcla de arena silíceas y arcillas con alto contenido de alúmina en suspensión acuosa. Este proceso, generalmente se realiza en un circuito de molienda cerrado con un hidrociclón. Particularmente, la clasificación de la suspensión de crudo en hidrociclones es compleja, pues los minerales que participan en la clasificación poseen diferencias en sus características químicas, mineralógicas y morfológicas, y por lo tanto, generan respuestas en los índices de clasificación diferentes dependiendo de la proporción de cada uno de los minerales en la mezcla, para lo cual se tiene alguna evidencia de datos operaciones directamente obtenidos en planta. Por otro lado, dado que el crudo es una mezcla de varios minerales se denominará a esta suspensión como polimineral. En la literatura poco se ha encontrado sobre el manejo de hidrociclones con suspensiones polimineraleas. Este artículo presenta los resultados de un estudio experimental que evalúa el impacto de cambios en parámetros operacionales sobre el funcionamiento de un hidrociclón en una clasificación típica operando con suspensiones polimineraleas de la industria cementera, refiriéndose particularmente al cortocircuito de finos y a la aparición del fenómeno de “fish hook”.

2. GENERALIDADES

El hidrociclón es uno de los equipos más empleados en la clasificación de minerales debido a su gran versatilidad. La comprensión de los fenómenos dinámicos asociados al hidrociclón ha tomado importancia dentro del estudio del procesamiento de minerales debido a que la clasificación es la operación que controla tanto el tamaño del producto final como la carga circulante en un circuito cerrado de molienda. La operación del hidrociclón y su respuesta ante cambios en variables geométricas y operativas, se evalúa mediante la curva de separación, el cortocircuito de finos, y la función clasificación $C(x)$ y los parámetros derivados de ella: el índice de claridad SI y el diámetro de corte d_{50} (Figura 1). La variable de respuesta denominada cortocircuito, el cual representa la cantidad de partículas finas en la corriente de descarga, es un parámetro crítico en la industria cementera, dado que afecta substancialmente los balances de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , etc) que se requieren a la entrada de los hornos de clinkerización. De esta manera, las variaciones del cortocircuito exigen una permanente corrección del balance de estos óxidos; mediante el uso de correctores (bauxitas, arenas de cuarzo,

etc.), lo que da razón de la importancia del control de este parámetro en la molienda de crudo en la industria del cemento.

La literatura clásica [1] sugiere que el cortocircuito es igual a la cantidad de agua alimentada que se recupera en la descarga. Sin embargo Austin y Klimpel (1984) y Bustamante (1992) demostraron que esta equivalencia no es verdadera, pero si existe la proporcionalidad entre ambos términos (Nageswararao, 2000).

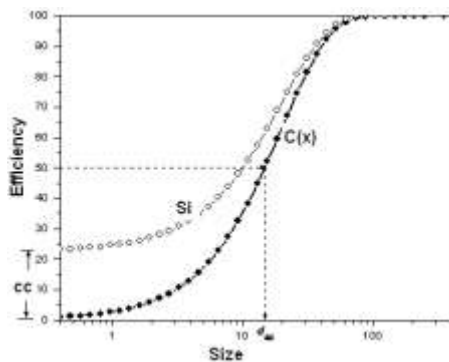


Figura 1. Curvas de separación y clasificación típicas.

De otro lado, diferentes estudios [Finch, 1983; Del Villar y Finch, 1992; Roldán-Villasana *et al.*, 1993; Kraipech *et al.* 2002; Schubert, 2004], muestran que en algunas en curvas de clasificación de hidrociclones, la recuperación de partículas finas en la descarga se incrementa repentinamente en tamaños por debajo del diámetro de corte, fenómeno que se conoce como “fish hook” y es esquematizado en la Figura 2.

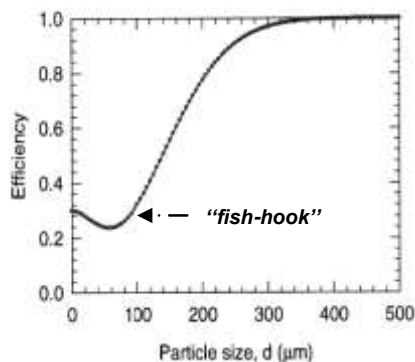


Figura 2. Curva de separación mostrando el efecto “fish hook”

Los argumentos fenomenológicos y algunos resultados experimentales [Bustamante, 2002; Tavares *et al.*, 2002 y Neesse *et al.*, 2004;] permiten considerar que la distribución de tamaños de partícula en el alimento y la presión a la entrada son los parámetros que más afectan el movimiento de las partículas al interior del hidrociclón y por lo tanto, tienen un efecto mayor sobre la clasificación cuando se opera con suspensiones monominerales [Neesse *et al.*, 2004]. Sin embargo, para el caso de mezclas poliminerales sometidas a clasificación, la comprensión de los fenómenos inherentes a la clasificación en hidrociclones es muy incipiente.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento de un hidrociclón clasificador operando con suspensiones poliminerales, se llevaron a cabo en un circuito industrial como el mostrado en la Figura 3. Dicho circuito está

conformado por un molino de bolas Allis Chalmers, un hidrociclón de 10 pulgadas de diámetro, un tanque acondicionador y una bomba de sólidos.

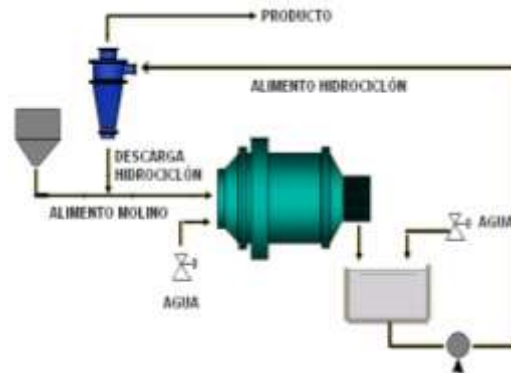


Figura 3. Esquema circuito de molienda

3.1 Material de prueba

Se emplearon suspensiones formadas por diferentes proporciones caolín/arena. La caracterización de las suspensiones alimentadas al hidrociclón, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización alimento

Kaolin (%)	Humedad (%)	Densidad de pulpa (g/l)	Viscosidad μ (cp)	Φ_v
0	83,75	1145	10,20	6,82
30	81,33	1090	9,38	8,01
40	83,33	1101	9,33	7,07
50	77,38	1109	7,35	10,0
60	79,52	1117	6,08	8,95
70	84,69	1120	6,37	6,46
80	78,21	1123	6,48	9,65
90	85,32	1131	6,98	6,20
100	79,73	1156	8,08	8,91
Φ_v Promedio				8,00

3.2 Procedimiento experimental

El desarrollo experimental estuvo dirigido a la evaluación de la clasificación del hidrociclón, ante cambios en los parámetros de operación (presión, fracción volumétrica de sólidos en el alimento, y composición del alimento) sobre la referencia de condiciones típicas de operación (Tabla 2). En cada prueba fueron medidas la presión a la entrada y los caudales de las tres corrientes: alimento, rebalse y descarga. Así mismo, para cada una de esas corrientes, se realizó la caracterización de humedad, densidad, viscosidad y distribución de tamaño de partícula.

Tabla 2. Cambios generados en la operación del circuito de molienda

Parámetro	Variable manipulada	Refer.	Cambio
Fracción volumétrica sólidos Φ_v	Flujo agua gpm	84	± 14
	Flujo sólidos tph	5.6	± 1.7
Presión	Presión psi	12-15	8-18
Composición	Razón mezcla arcilla/arena	60/40	0/100 – 100/0

3.3 Condiciones referencia

La Figura 4, muestra el histograma correspondiente a cada corriente del hidrociclón: alimento, rebalse y descarga revelando el comportamiento bimodal de la distribución del tamaño de partícula.

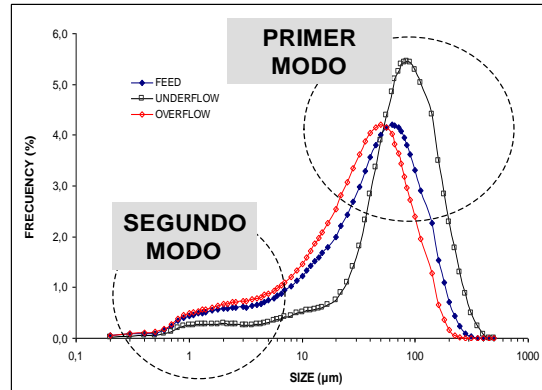


Figura 4. Histograma correspondiente a las corrientes del hidrociclón. Condiciones referencia

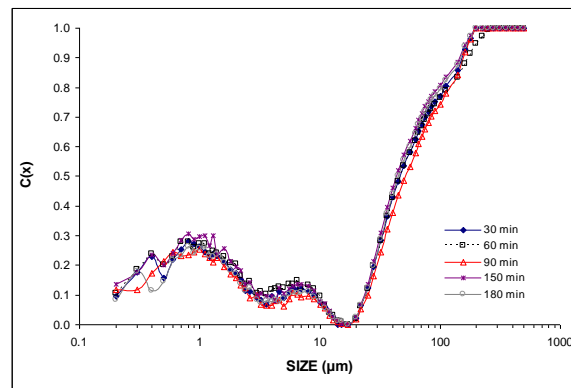


Figura 5. Curvas de clasificación para condiciones referencia

El circuito opera de manera estable con una razón de recirculación C promedio de 2.6. Observando la curva de clasificación para condiciones normales se ve que no existen grandes variaciones en el tiempo (ver Figura 5), y se mantiene un d_{50} promedio de $48 \mu\text{m}$, una claridad de la separación SI relativamente baja (0.34) y un cortocircuito de finos elevado del 40%. Adicionalmente, se registra la aparición del efecto "fish hook" en todas las curvas.

4. RESULTADOS

Las funciones de clasificación encontradas para cambios en parámetros de operación se observan en las Figuras 6, 7 y 8. En general, a medida que la presión y la viscosidad aumentan (bien sean por las variaciones de la razón arcilla/arena K/A y/o variación de la fracción volumétrica de sólidos Φ_v del alimento) disminuye el tamaño de corte d_{50} . Puede notarse, además, que las curvas de clasificación evidencian la presencia del efecto "fish hook" excepto para 100% caolín que no mostró la ocurrencia marcada del efecto (ver Figura 6).

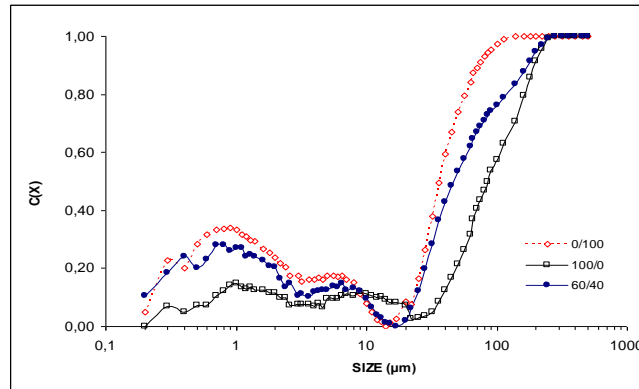


Figura 6. Función clasificación diferentes razones K/A. Condiciones operación: 84 gpm, 5.6 tph, 15 psi

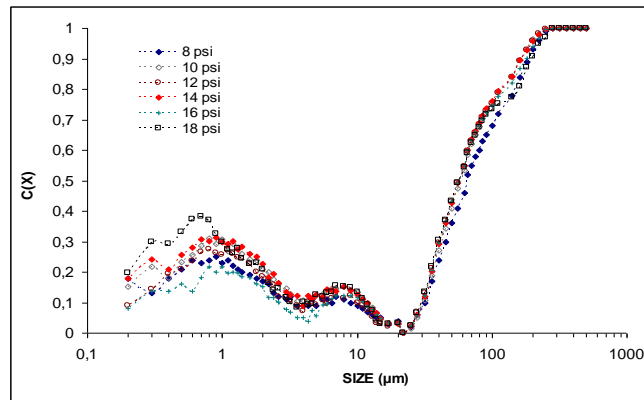


Figura 7. Función clasificación diferentes presiones. Condiciones operación: 84 gpm, 5.6tph, K/A60/40

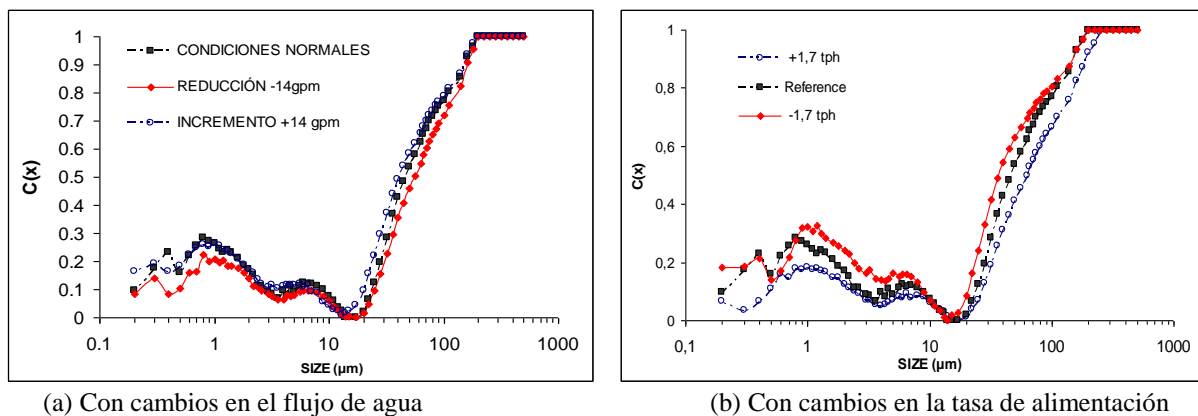


Figura 8. Función clasificación cambios en fracción volumétrica alimento. Condiciones de operación: K/A 60/40, 15 psi

La evaluación de las variables asociadas a la viscosidad de la suspensión que se alimenta al hidrociclón presenta un comportamiento reológico bastante complejo. En la Figura 10 la viscosidad posee un intervalo de disminución a medida que se incrementa el porcentaje de arcilla caolínica (a fracción volumétrica Φ_v fija), pero por otro lado, la viscosidad de la suspensión a razones de arcilla/arena de 60/40 (Figura 11), posee intervalos de disminución de viscosidad con incrementos de la fracción volumétrica Φ_v . Estos dos fenómenos, asociados posiblemente al empaquetamiento de las partículas controlan el tamaño de corte y el efecto de “fish hook”, como se detallará más adelante.

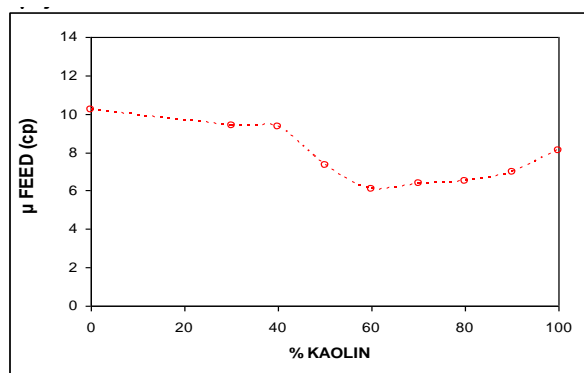


Figura 10. Viscosidad alimento para diferentes mezclas arcilla/arena. Fracción volumétrica fija

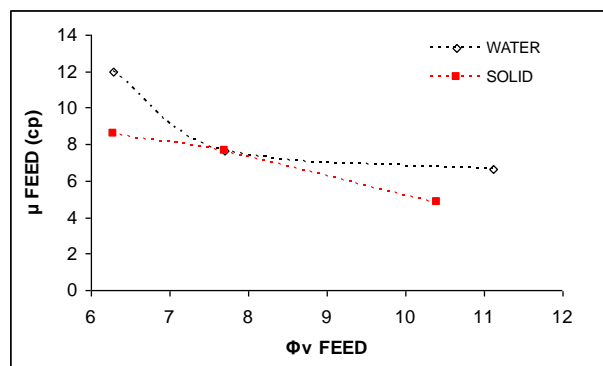


Figura 11. Viscosidad alimento con cambios en la fracción volumétrica. Razón arcilla/arena 60/40 fija

De otro lado, para las suspensiones poliminerales estudiadas, se encontró que el cortocircuito de finos es proporcional a la recuperación de agua en la descarga R_v aún con cambios en las variables de operación (Figura 12), pero no son exactamente iguales las magnitudes de estos dos parámetros.

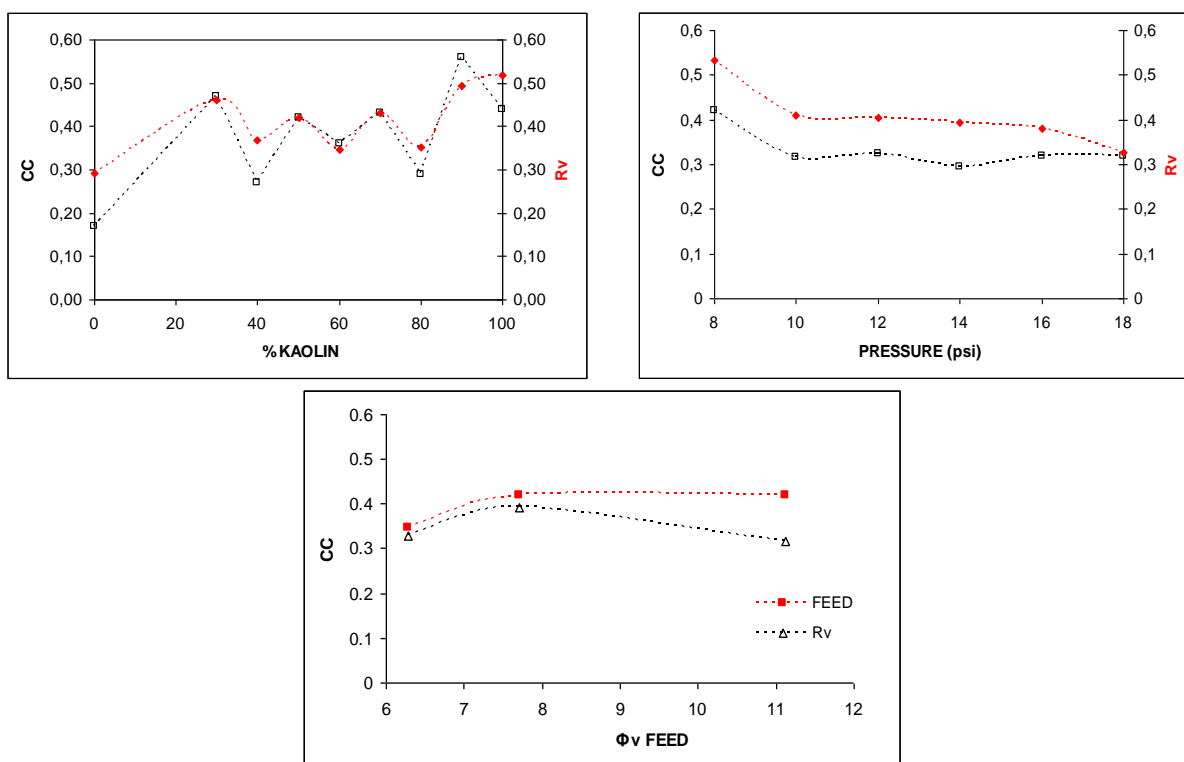


Figura 12. Correspondencia entre el cortocircuito de finos y la recuperación de agua en la descarga

Los valores de cortocircuito para diferentes razones de mezcla, permiten concluir que para suspensiones entre 40 y 90% de caolín este valor oscila alrededor de un valor promedio de 0.41. La Figura 13, relaciona el cortocircuito con cambios en variables de operación (Presión, Φ_v y Razón arcilla/arena). De manera general, el cortocircuito aumenta con incrementos en la fracción volumétrica de sólidos, y es independiente de la presión y de la composición para suspensiones con un contenido de caolín entre 40 y 90%. El cortocircuito más bajo se encontró en suspensiones sólo de arena, que además mostraron un SI alta (0.55).

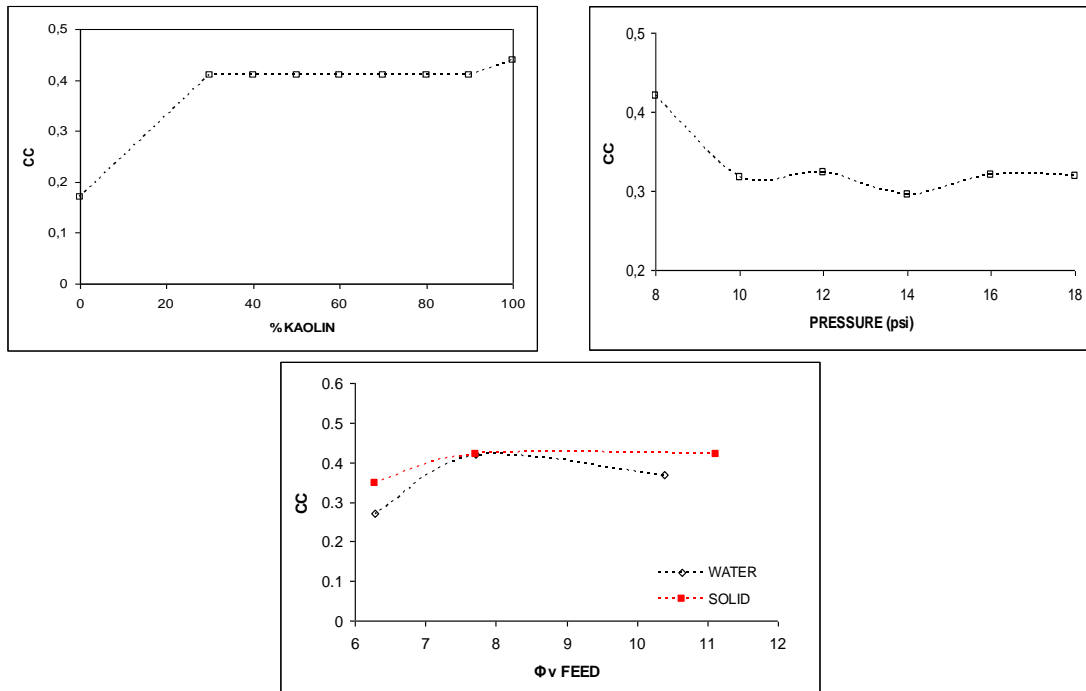


Figura 13. Cortocircuito de finos para cambios en variables de operación

Los resultados obtenidos sugieren que arcilla adicionada entre 40 y 90% sólo controla el diámetro de corte, y no tienen efectos significativos sobre demás parámetros de clasificación (*SI*, por ejemplo). Los cambios en la fracción volumétrica Φ_v en el alimento debidas a variaciones en el flujo de sólidos generan cortocircuitos un poco mayores debido a la sedimentación obstaculizada y el incremento de las partículas finas arrastradas por las gruesas hacia la descarga. Así mismo, los resultados de este estudio experimental son concluyentes al mostrar que al igual que el cortocircuito de finos la profundidad del “fish hook” es función de la fracción volumétrica de sólidos y de la composición de la suspensión (Figura 14) y que el efecto de la presión sobre el “fish hook” es menos significativo que el generado por otros parámetros operativos. La dependencia común a ciertas variables de operación del cortocircuito de finos y el efecto “fish hook” permite inferir la existencia de una correlación entre ambos conceptos.

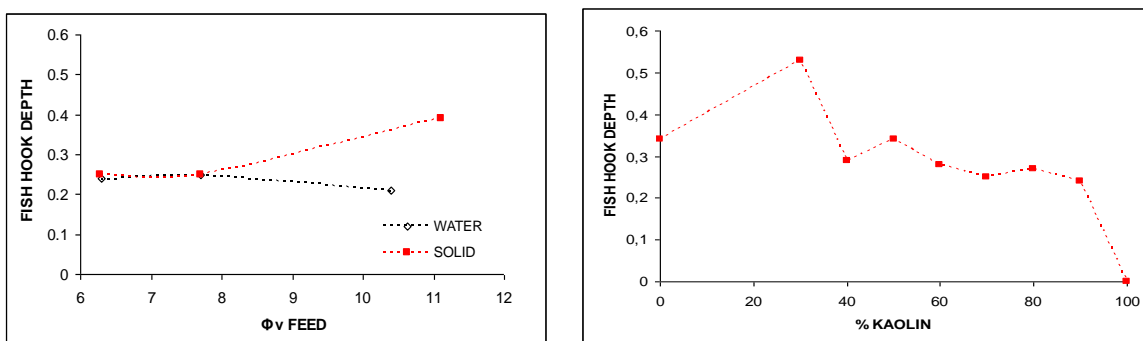


Figura 14. Dependencia del “fish hook” con la fracción volumétrica de sólidos y la composición de la suspensión

5. CONCLUSIONES

Se evaluó la clasificación en hidrociclones que operan en circuito de molienda de suspensiones poliminerales de la industria del cemento, en lo referido al cortocircuito de finos y el efecto conocido como “fish hook”. Los

resultados experimentales permitieron concluir que el empaquetamiento de las partículas juega un papel decisivo tanto en el comportamiento reológico de la suspensión alimentada, como en la acción clasificadora del hidrociclón. Adicionalmente se estableció que el cortocircuito de finos es función de la fracción volumétrica de sólidos y de la composición del alimento, especialmente para contenidos de caolín <30%. Las suspensiones monominerales de caolín y arena marcan los extremos mostrando que el cortocircuito tiende a incrementarse desde un valor mínimo (que ocurre cuando la suspensión es 100% arena) hasta el máximo global cuando la suspensión es de 100% caolín. Los datos experimentales permitieron también determinar la influencia de estas variables operativas sobre la aparición del efecto “*fish hook*”. A partir de estos resultados, se sugiere un profundizar en la relación que puede existir entre la bimodalidad de las distribuciones de tamaño de partículas y el “*fish hook*”, en el caso de suspensiones poliminerales.

REFERENCIAS

1. Kelsall, D.F., “A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone”; Trans. Inst. Chem. Eng. 30 (1952) p. 87–108.
2. K. Nageswararao, “A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers”; Chemical Engineering Journal 80 (2000), p. 251–256.
3. J.A. Finch, “Modelling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves”; Powder Technology 36 (1983), p.127–129.
4. R. del Villar, and J. A. Finch. “Modelling the cyclone performance curves with a size dependent entrainment factor”; Miner. Eng. 5 (1992), p. 661–669.
5. E. J. Roldan-Villasana, R. A. Williams and T. Dyakowski, “The origin of the fish-hook effect in hydrocyclone separators”; Powder Technol. 77 (1993), p.243–250.
6. W. Kraipech, W. Chen, F. J. Parma. “Modelling the fish-hook effect of the flow within hydrocyclones”; International Journal Minerals Process 66 (2002), p. 49–65.
7. H. Schubert, “On the Origin of “Anomalous” Shapes of the separation curve in hydrocyclone separation of fine particles”; Particulate Science and Technology 22 (2004), p.219–234.
8. O. Bustamante, “Efecto de la geometría de un hidrociclón sobre las condiciones normales de operación”. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Metalúrgica (1992), p.1-170.
9. Th. Neesse, J. Dueck and L. Minkov, “Separation of finest particles in hydrocyclones”; Minerals Engineering 17 (2004), p.689-696.
10. L.M. Tavares, L. Souza, R.B. Lima, JM. and V. Possa, “Modeling classification in small-diameter hydrocyclones under variable rheological conditions”; Minerals Engineering 15 (2002), p. 613–622.
11. O. Bustamante, “Modelación matemática del tensor de esfuerzo y de la viscosidad de una suspensión mineral”. Tesis de doctor en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Metalúrgica (2002), p. 1-109.
12. H. Gómez, “Modelación de la clasificación de minerales en hidrociclones de diámetro pequeño”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Ingeniería de Materiales (2005), p.1-80.
13. A. Majumder, H. Shah, P. Sukla and J. Baenwal, “Effect of operating variables on shape of “fish hook” curves en hidrociclones”; Minerals Engineering 20 (2007), p. 204-207.
14. L.G. Austin, R. R. Klimpel & P. T. Luckie. Procees Engineering of Size Reduction: Ball Milling. AIME, 1984.