

CONTROL DE VARIABLES EN EL ESPESADOR DE CONO PROFUNDO EN LA RECUPERACIÓN DE RELAVES ALTAMENTE FLUIBLES

Carlos Ames Ramírez (1), Daniel Lovera Dávila (2)

RESUMEN

El presente artículo incluye pruebas en un Espesador Piloto de Cono Profundo considerando las condiciones de proceso para la óptima floculación con pruebas de laboratorio determinando el tipo de floculante, concentración de sólidos en la alimentación y dosificación para maximizar el ratio de tratamiento (TPD/m²). El objetivo es determinar las condiciones de floculación adecuada que permita la máxima claridad del líquido y máxima densidades en la descarga con el mínimo de dosificación que permita seleccionar las condiciones de alimentación para la operación del espesador piloto. Determinadas las condiciones de alimentación sigue una serie de ratios de tratamiento para determinar la máxima carga posible bajo condiciones óptimas de floculación en términos de TPD/m². Durante estas series, se mantiene constante el nivel de sólidos y se monitorea la densidad del underflow manteniendo el balance alimentación descarga. Muestras del rebose, descarga y alimentación fueron tomadas con la mayor frecuencia posible para determinar cualquier variación en las características de la alimentación que puedan afectar la floculación y en consecuencia la claridad del rebose y espesamiento. Típicamente, cambios en la distribución granulométrica, tipo de mineral, y pH tienen un gran impacto.

Palabras Clave: Cono Profundo, Sedimentación, Consolidación, Floculación, Yields Stress

1 Docente de la EAP Ing. Metalúrgica- UNMSM. Email: dloversad@unmsm.edu.pe

2 Tesista de la EAP de Ing. Metalúrgica – UNMSM. Email :

I.-INTRODUCCION

Uno de los temas importantes asociados a las faenas mineras corresponde, a todo aquello relacionado con las obras constructivas de disposición en la superficie de la tierra de los “Depósitos de Relaves”; cuyos residuos que contienen provienen de Plantas de Concentración de minerales por Flotación. Esto se debe a que en la Industria Minera estos depósitos han ido adquiriendo mayor relevancia, debido principalmente a que las leyes de los minerales en los yacimientos en explotación han disminuido, lo que ha obligado a las empresas mineras, extraer grandes volúmenes de minerales para lograr mantener los niveles de producción de finos, y se han incrementado así, la cantidad de desechos que deben ser dispuestos, ya sea como material estéril o en la forma de pulpas de relaves. Por lo tanto, se hace necesario tener muy presente los riesgos asociados a los pequeños, medianos y grandes depósitos de relaves, en cuanto a los ámbitos técnicos constructivos como los ambientales.

Hasta hace algunas décadas atrás era común, deshacerse por ejemplo, de los relaves derivados de las operaciones minero metalúrgicas, arrojándolos en lechos de ríos, lagunas, quebradas, valles o al mar próximo y cuando en las cercanías de alguna faenas mineras no se disponía de estos sectores naturales tan "convenientemente", los empresarios mineros solían acumular los relaves en áreas de contención, que amurallaban con terraplenes levantados con los mismos relaves y una vez que se agotaba el yacimiento, estos depósitos quedaban abandonados.

La normativa vigente que regula todo lo relacionado con los “Depósitos de Residuos Masivos Mineros”, en lo técnico y ambiental exige que se cumplan diversos requerimientos de seguridad, destinados a la protección de las personas y el medio ambiente, por ello todos los esfuerzos que se hagan para establecer criterios a tener en cuenta sobre el control de los riesgos son muy importantes. Los espesadores son controlados con un proceso continuo de sedimentación y espesamiento, donde los sólidos son descargados al mismo ritmo que ellos son alimentados. (Lovera, 1997,1999). Para mantener la densidad en la descarga del espesador, el control estándar es el empleo de floculante en el flujo de masa entrante, manteniendo relativa cama constante para asegurar el tiempo de residencia para el espesamiento, mientras se mantiene la razón de sólidos en la descarga equivalente al de la alimentación. Ver figura N° 1

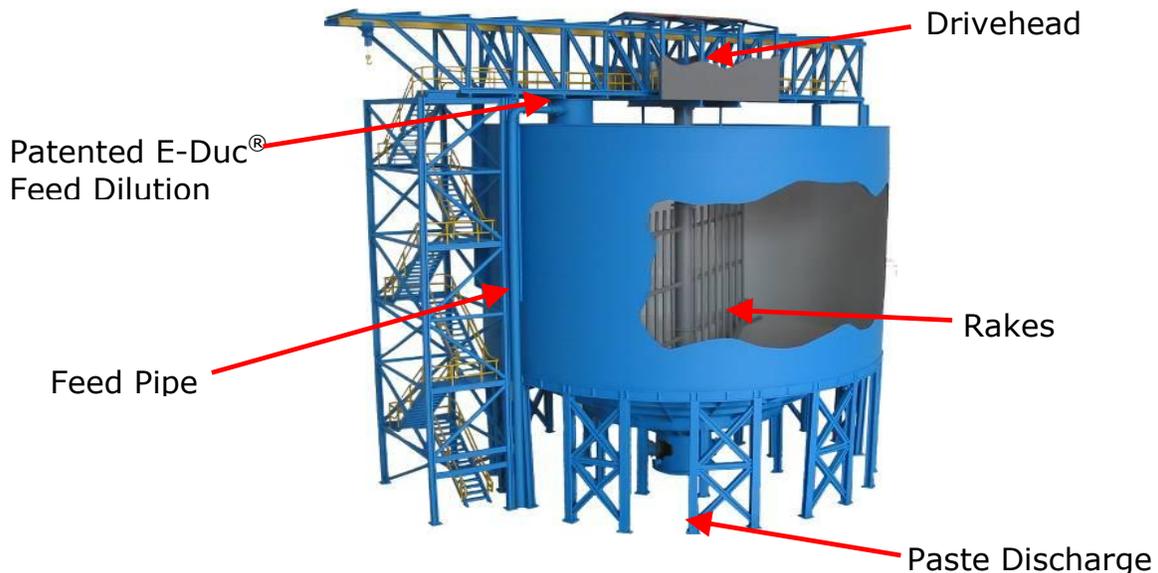


Figura N° 1: Espesador de Cono Profundo y sus partes. (Ames,2012)

II.-CONTROL DE OPERACIÓN

Es muy importante tener un control de la operación, pues los resultados de la operación llevarán a una optimización del proceso, en donde las variables de procesos permitirán alcanzar niveles aceptables tanto en el porcentaje de sólidos, Yield Stress, en la descarga, como en la claridad del agua en el rebose.

Los espesadores son controlados con un proceso continuo de sedimentación y espesamiento, donde los sólidos son descargados al mismo ratio que ellos son alimentados. (Kynch,1952),(Concha,1988), (How& Bunnal,1992), (Lovera,1997).

Para mantener la densidad en la descarga del espesador, el control estándar es el empleo de floculante en el flujo de masa entrante, manteniendo relativa cama constante para asegurar el tiempo de residencia para el espesamiento, mientras se mantiene la razón de sólidos en la descarga equivalente al de la alimentación. Ver figura N° 2

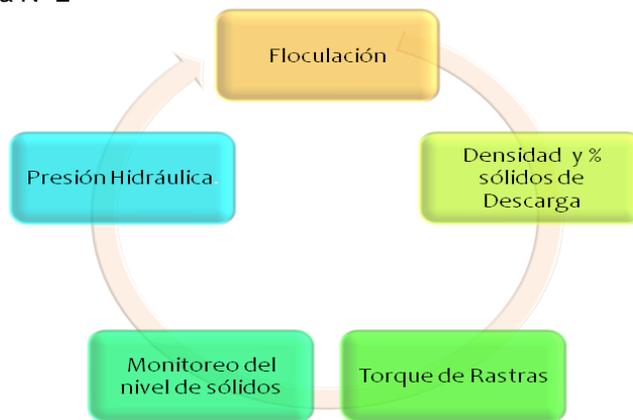


Figura N° 2: Ciclo de Control del Espesador (Ames, 2012)

Los principales elementos de control del espesador son:

- Torque de Rastras
- Monitoreo del nivel de sólidos
- Presión inventario de sólidos
- Densidad de la descarga
- Adición de floculante basado en la razón de alimentación, Tm/h del espesador.

2.1 OPERACIÓN NORMAL

La mayor diferencia del espesador de cono profundo al espesador convencional es el control de nivel utilizado. Para lograr la descarga o “pasta”, la operación del espesador de cono profundo debe controlarse más estrictamente que los espesadores convencionales.

La siguiente tabla muestra los indicadores de la actuación para el espesador de pasta de cono profundo así como los indicadores del control y variables de control usados para mantener el rendimiento aceptable. Ver figura 3 y Tabla N° 1

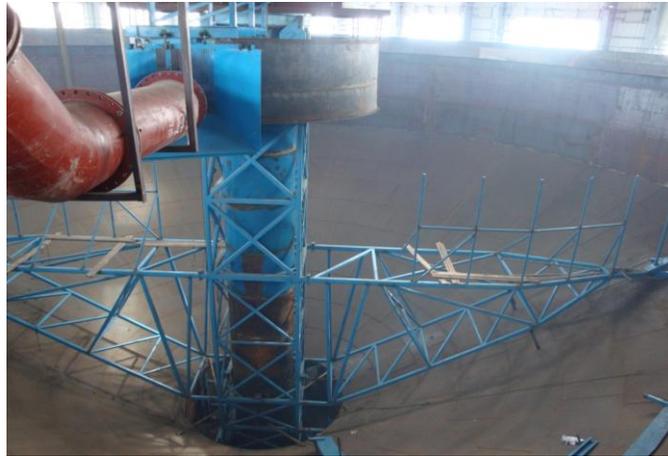


Figura N° 3: Vista superior del Espesador de Cono Profundo (Ames, 2012)

Tabla N° 1: Indicadores del Espesador de Cono Profundo

INDICADOR DEL RENDIMIENTO	INDICADORES DE CONTROL	VARIABLES DE CONTROL
Claridad del Efluente	Indicador del torque	Dosificación del floculante
Densidad de la descarga	Sensor de Nivel de cama	Ajuste de bombeo de la descarga
	Transmisor de presión de cama de sólidos	Velocidad del rastrillo
		Ajuste de alimentación

A continuación se detalla cómo puede usarse información de los indicadores de control para determinar qué ajustes deben hacerse a las variables de control para lograr la concentración de la descarga deseada del espesador de cono profundo. (FLSMITH, 2009)

2.2 INDICADOR DEL TORQUE

La lectura del torque es típicamente obtenida mediante una celda de carga instalada en la parte superior del reductor planetario. El accionamiento del mecanismo es mediante variadores de velocidad para controlar la velocidad y registrar el torque representado por la resistencia del material a fluir.

La medida de torque es una indicación de la densidad del inventario de sólidos y la fuerza necesaria para mover las rastras dentro de los sólidos. Cuando el torque alcanza el 40% una alarma es captada en el sistema supervisor y un sonido será generado en campo alertando en la operación. Si a pesar de los procedimientos el torque continúa y alcanza hasta el 85%, el drive se detendrá para proteger el mecanismo.

La primera acción a tomar es cuando el torque llega al 40% o más, la acción correctiva es incrementar la razón de descarga, de acuerdo al control descrito, hasta que el porcentaje de torque alcance un valor inferior del 35% y al mismo tiempo se debe realizar una recirculación baja, es decir recircular la pasta al mismo cilindro de descarga permitiendo aliviar el torque mientras el incremento de la razón de bombeo de descarga retira el material altamente densificado, que es la causante de lecturas de alto torque.

La velocidad de inicio para los dos casos de control son:

- Velocidad de rastras inicial: 0.15 rpm
- Velocidad de rastras máxima: 0.20 rpm
- Velocidad de rastra mínima: 0.10 rpm

2.3 NIVEL DE CAMA

El nivel de sólidos en el espesador se monitorea usando un sensor de nivel óptico de 3 ó 7 cristales dependiendo que parámetro se desee medir. El nivel de interfase o el nivel de sólidos, por la experiencia en nivel de sólidos en el espesador debe estar al menos un metro por debajo de la base del Feedwell. Generalmente, un incremento en el nivel de sólidos, o tiempo de residencia de sólidos, incrementará la densidad de la descarga, presión en la base del espesador y valores de torque.

Optimizado el espesador en el proceso de acondicionamiento, se deberá elaborar una tabla que relaciones el nivel de cama, presión de la cama y torque. Predicciones iniciales han sido realizadas en base de los resultados de las pruebas de laboratorio usadas para el diseño del espesador. Sin embargo. La interacción referida en variantes en la operación a escala industrial y los ajustes a las predicciones son comunes, luego del inicio de operaciones.

2.4 PRESION DE LA CAMA

La presión de cama es una medida que nos orienta o predice cuanto de altura de cama se está obteniendo.

1. Un alto nivel de cama no necesariamente significa que la presión de cama también será alta.
 - a. Si se suministra insuficiente floculante, una cama ligera puede desarrollarse, con baja densidad, y esto se puede observar a través del sensor de Presión situado en la base del espesador.
 - b. También cabe la posibilidad que una cama de este tipo de material puede ser profunda, pero tiene baja densidad.
 - c. Por otro lado, si el nivel de cama es alta pero la presión de la cama es baja la dosificación del floculante debe incrementarse.
2. El incremento del floculante debería causar que los sólidos se consoliden y sedimenten más rápido, pero un exceso de floculante no producirá éste efecto.
3. Otra medida correctiva ante una altura de cama baja es disminuir la velocidad de la descarga de espesador a modo de retener más sólidos y formar una cama óptima.
4. Cabe resaltar que un incremento en la altura de cama da como resultado aumento de los sólidos en la descarga así como aumento de la presión en la base del espesador y en la tubería de descarga.

III.- DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 ANALISIS GRANULOMETRICO

Se procedió a realizar análisis granulométrico en diferentes días y tomando muestras horarias. Ver Tabla N° 2 y Figura 4

Tabla N° 2: Análisis Granolumétrico

ANALISIS GRANULOMETRICO N° 1					
MALLA	ABERTURA (micrones)	PESO	% PESO	ACUMULADO (+)	PASANTE(-)
70	212	28.57	6.69	6.69	93.31
100	150	41.24	9.66	16.35	83.65
140	104	53.34	12.49	28.84	71.16
200	75	53.28	12.48	41.32	58.68
270	53	46.22	10.82	52.15	47.85
325	45	21.4	5.01	57.16	42.8427561
400	38	24.04	5.63	62.79	37.21
400		158.89	37.21	100.00	0.00
TOTAL		426.98	100.00	D50	56.22
				D80	139.06

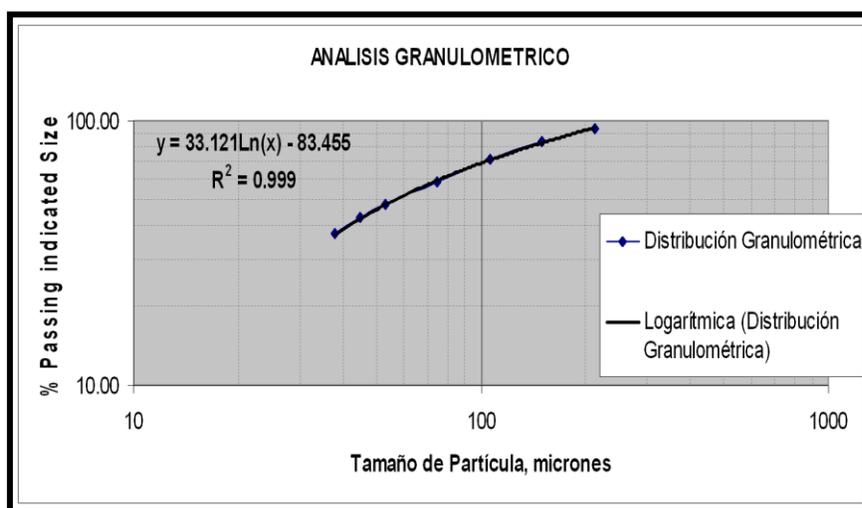


Figura 4: Análisis Granulométrico

3.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Se llevaron a cabo mediciones de la gravedad específica que se muestran en la Tabla N° 3

Tabla N° 3: Gravedad Específica

Muestra	W (Muestra gr)	W (fiola+Agua+Muestra)	W (fiola+Agua)	Gravedad específica
RELAVE	30.00	185.85	162.84	4.29
RELAVE	30.00	185.23	162.22	4.29
PROMEDIO	30.00	185.54	162.53	4.29

3.3 SEDIMENTACION Y CONSOLIDACION

Se considero 4 floculantes para esta prueba el PHP 30, PHP40 (FLSMIDTH), MAGNAFLOC, y el PHP40 PLUS (Cerro Lindo) el cual es utilizado actualmente en Planta. El que dio mejores resultados fue el floculante utilizado por Cerro Lindo (PHP 40 PLUS). (Palomino & Lovera, 1999) Ver Figuras N° 5 y 6

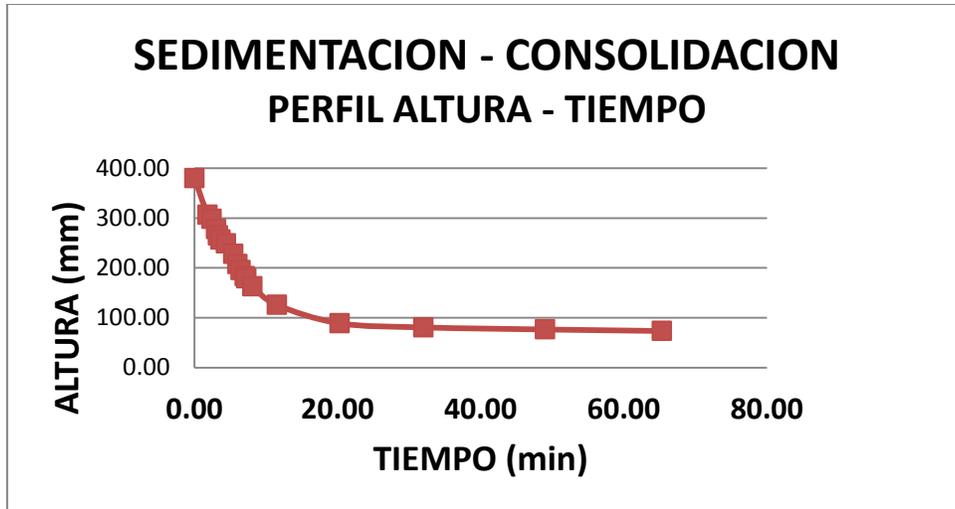


Figura 5: Perfil de Altura - Tiempo

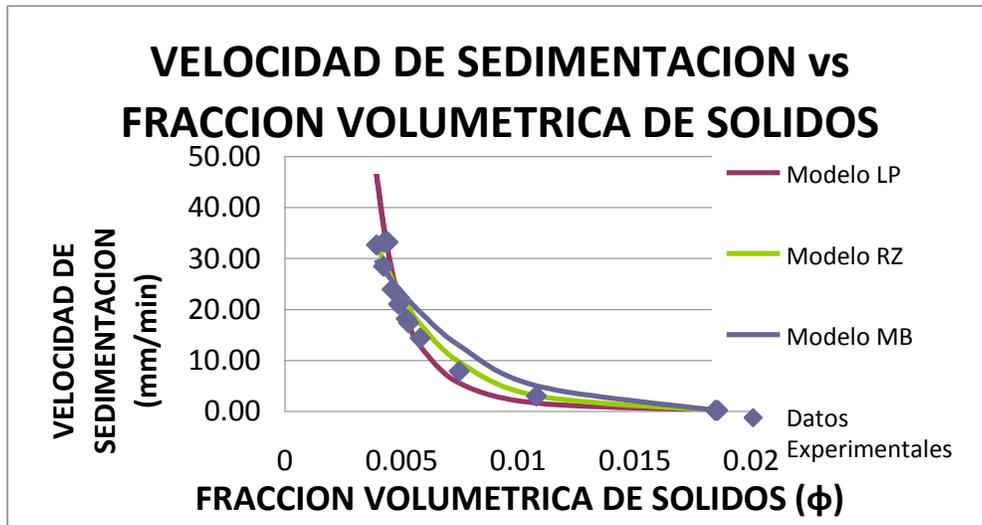


Figura 6: Velocidad de Sedimentación – Fracción Volumétrica de Sólidos

3.4 MUESTRAS EN LA ALIMENTACIÓN

Se procedió a tomar muestra de alimentación y Porcentaje de Sólidos a modo de saber la densidad promedio que se tratará en el presente pilotaje. Ver Tablas N° 4,5,6 y 7

Tabla N° 4: Variables de Alimentación

Hora	Alimentación (Feed)					
	Flujo	Densidad Inicial	%Sólido Inicial	Tratamiento Sólidos	Densidad Diluido	%Sólido Diluido
	m3/hr	Ton/m3	%	Ton/hr	Ton/m3	%
1	7.500	1.360	34.26%	3.494	1.07	8.47%
2	7.600	1.370	34.95%	3.639	1.08	9.59%
3	7.800	1.360	34.26%	3.634	1.08	9.59%
4	7.800	1.370	34.95%	3.735	1.07	8.47%
5	7.700	1.360	34.26%	3.587	1.08	9.59%

6	7.900	1.400	36.97%	4.089	1.1	11.76%
7	7.800	1.380	35.64%	3.836	1.08	9.59%
8	7.800	1.360	34.26%	3.634	1.1	11.76%
9	7.800	1.380	35.64%	3.836	1.1	11.76%
10	7.600	1.410	37.63%	4.032	1.16	17.85%
12	8.610	1.350	33.55%	3.900	1.07	8.47%
12	8.600	1.350	33.55%	3.895	1.12	13.87%
14	7.400	1.400	36.97%	3.831	1.04	4.98%
15	8.135	1.350	33.55%	3.685	1.15	16.88%
16	8.300	1.380	35.64%	4.082	1.08	9.59%
17	8.200	1.400	36.97%	4.245	1.13	14.89%
18	8.500	1.370	34.95%	4.070	1.17	18.80%
19	8.400	1.370	34.95%	4.022	1.17	18.80%
20	8.200	1.340	32.84%	3.608	1.1	11.76%
21	7.200	1.400	36.97%	3.727	1.1	11.76%
22	8.600	1.400	36.97%	4.452	1.18	19.74%
23	8.300	1.440	39.54%	4.726	1.1	11.76%
24	8.100	1.400	36.97%	4.193	1.1	11.76%

Tabla Nº 5: Promedio de Medidas

Flujo	Densidad Inicial	%Sólido Inicial	Tratamiento Sólidos	Densidad Diluido	%Sólido Diluido
m3/hr	Ton/m3	%	Ton/hr	Ton/m3	%
7.993	1.378	35.49%	3.911	1.106	12.24%

3.5 MUESTRA DE FLOCULACIÓN

Tabla Nº 6: Parámetros de Floculación

Floculante			
Concentración	Flujo	Dosis	Agua de dilucion
gr/lt	m3/hr	gr/ton	m3/hr
0.20	0.090	5.15	0.24
0.20	0.090	4.95	0.23
0.20	0.090	4.95	0.23
0.20	0.090	4.82	0.23
0.20	0.090	5.02	0.25
0.20	0.090	4.40	0.30
0.20	0.090	4.69	0.30
0.20	0.102	5.61	0.31
0.20	0.099	5.16	0.31
0.20	0.099	4.91	0.31
0.20	0.102	5.23	0.31
0.20	0.096	4.93	0.31

0.20	0.102	5.33	0.31
0.20	0.100	5.43	0.20
0.20	0.100	4.90	0.20
0.20	0.100	4.71	0.20
0.20	0.100	4.91	0.20
0.20	0.100	4.97	0.20
0.20	0.100	5.54	0.20
0.20	0.090	4.83	0.20
0.20	0.090	4.04	0.20
0.20	0.060	2.54	0.20
0.20	0.102	4.87	0.20

Tabla N° 7: Promedio de Medidas

Concentración	Flujo	Dosis	Agua de dilución
g/l	m3/h	g/ton	m3/h
0.20	0.09	4.87	0.25

3.6 MUESTRA DE DESCARGA

Se tomaron también las mediciones para determinar los parámetros de descarga. Ver Tablas N° 8 y 9.

Tabla N° 8: Parámetros de Descarga de Sólidos

Descarga			
Flujo	Densidad	% Solido	Tratamiento Sólidos
m3/h	Ton/m3	%	Ton/h
1.500	1.90	61.30%	1.747
1.100	2.40	75.49%	1.993
1.100	2.80	83.19%	2.562
1.200	2.93	85.24%	2.997
1.100	2.85	84.00%	2.634
1.200	3.10	87.67%	3.261
1.600	3.10	87.67%	4.348
1.800	2.89	84.63%	4.403
1.800	2.96	85.69%	4.566
2.000	2.88	84.48%	4.866
1.660	2.80	83.19%	3.867
1.740	2.78	82.86%	4.008
1.450	2.72	81.83%	3.228
1.400	2.81	83.36%	3.279
1.400	2.84	83.84%	3.334
1.400	2.88	84.48%	3.406

2.400	2.80	83.19%	5.591
2.400	2.73	82.01%	5.373
2.400	2.80	83.19%	5.591
1.380	3.01	86.42%	3.590
1.400	3.09	87.53%	3.787
1.300	2.81	83.36%	3.045
1.300	2.74	82.18%	2.927

Tabla N° 9: Promedio de Medidas

Flujo	Densidad	% Sólido	Tratamiento Sólidos
m3/h	Ton/m3	%	Ton/h
1.57	2.81	0.83	3.67

3.7 PRUEBAS DE REOLOGÍA

Datos experimentales obtenidos en la descarga del Espesador de cono profundo para encontrar parámetros reologicos que nos permitan comprender mejor la compresión de los sólidos. Ver figuras N° 7,8 y 9.

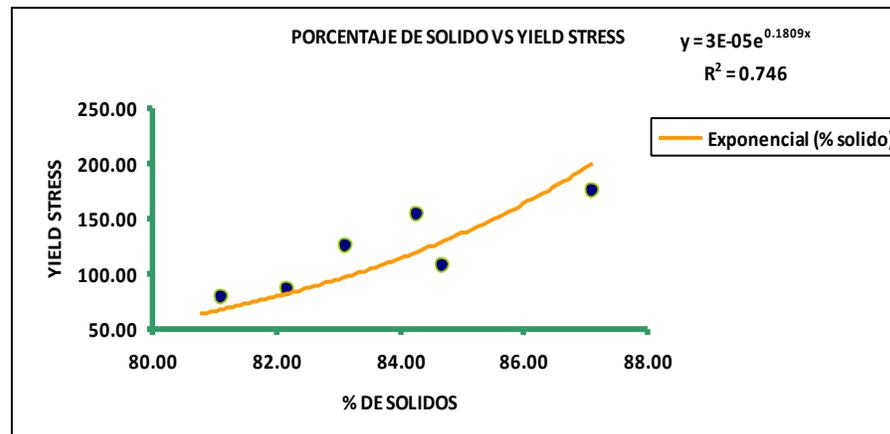


Figura 7: Gráfica % Sólidos Vs Yield Stress

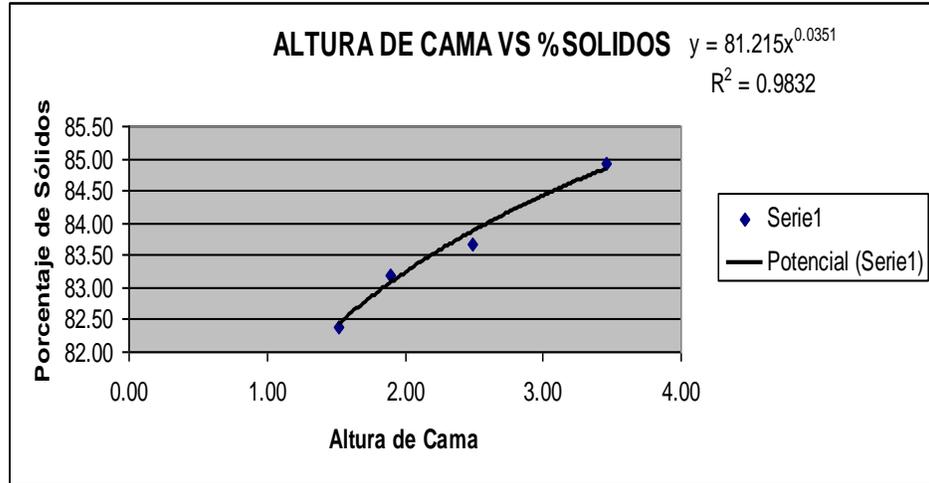


Figura Nº 8: Altura de Cama Vs %Sólidos

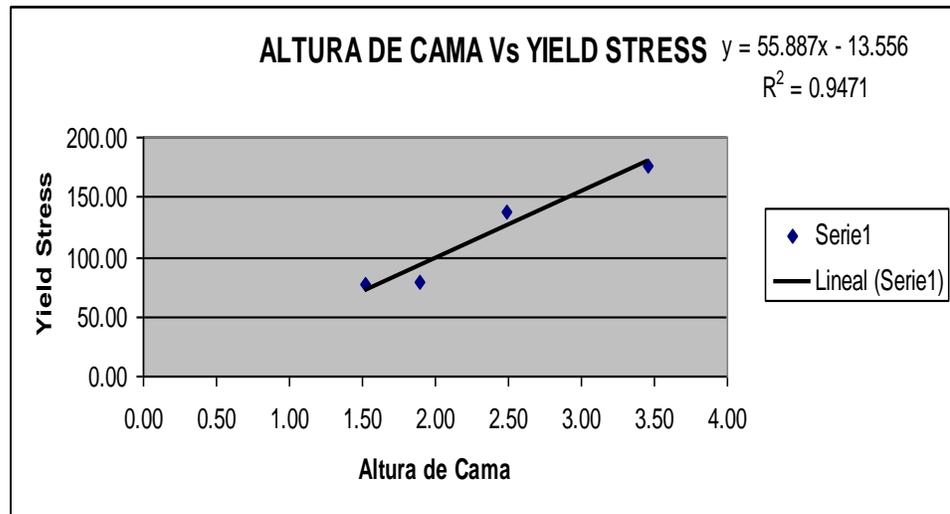


Figura Nº 9: Altura de Cama Vs Ys

Los valores de fuerza de cadencia para un determinado porcentaje de sólidos en peso debe considerarse de amplio rango debido a la variación en la calidad de las arcillas que constituyen el relave. Sin embargo, para 80% de sólidos en peso el valor medio sin cizallar es de 142 Pa y cizallado es de 71Pa.



Figura N° 10: Obtención de la Pasta Sólida de Relave

3.6 MEDIDA DEL YIELD STRESS

Frecuentemente se hacen pruebas para medir el Yield Stress. Ver Figura 11

$$T' = 0.5 - 0.5 (h / H) 0.5$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$\text{Slurry Density} = \text{g/l}$$

$$H = \text{cylinder height, cm}$$

$$h = \text{slump distance, cm}$$



Figura N° 11: Mediciones de Yield Stress

El rango de dosificación de floculante, independientemente de la variación de granulometría y mineralogía en la alimentación, ha sido de 12 a 15 g/Tm. La turbidez de la solución recuperada es como promedio de NTU y el pH fluctúa de 9.5 a 10. Ver figura 12



Figura N° 12: Agua Clarificada

3.7 Perfil Esfuerzo Efectivo de Sólidos

Se desarrollaron cálculos del Esfuerzo efectivo de Sólidos empleando modelos convencionales de Concha – Barrientos, Tiller y Shirato entre otros. (Valenzuela , 1994), (Concha, 1998) Ver figuras 13, 14 y 15

3.7.1 Modelo Concha – Barrientos

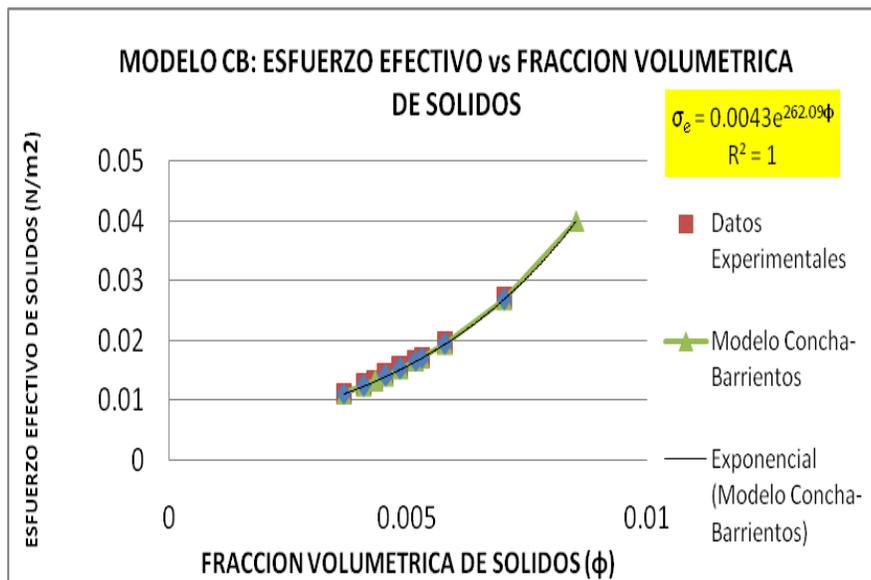


Figura N° 13: Esfuerzo Efectivo y Fracción Volumétrica de Sólidos

3.7.2 Modelo Tiller

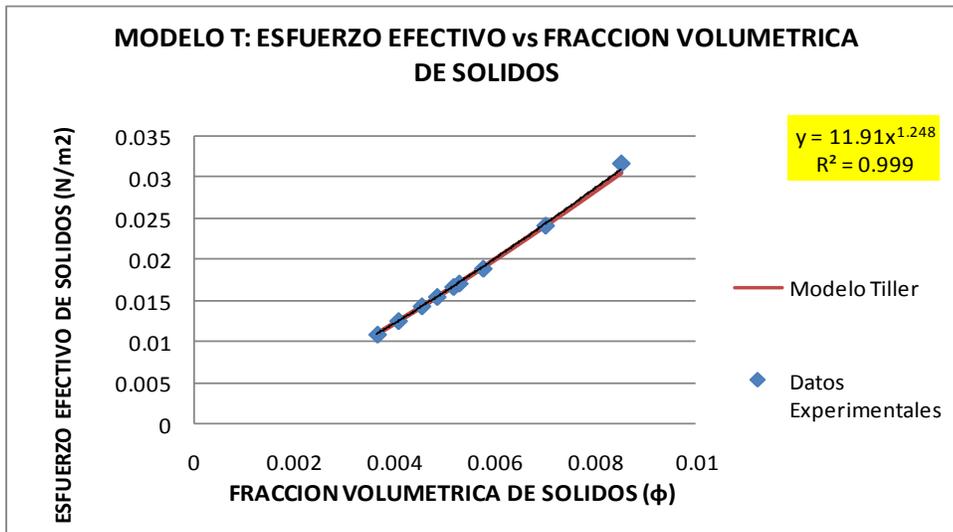


Figura N° 14 – Esfuerzo Efectivo – Fracción Volumétrica de Sólidos – Modelo Tiller

3.7.3 Modelo Shirato

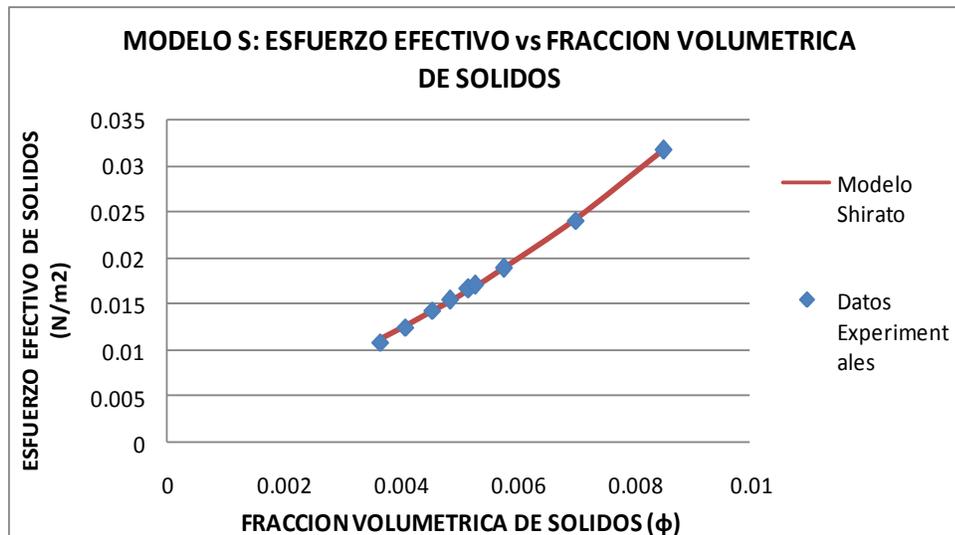


Figura N° 15 – Esfuerzo Efectivo y Fracción Volumétrica de Sólidos

IV.- CONCLUSIONES

Se eligió como floculante óptimo el CL PHP40 PLUS y como segunda opción el floculante MAGNAFLOC 155.

Se observó en las pruebas de pilotaje que la rastra a 0.1 rpm efectiviza la acción del floculante hasta un 0.12 RPM para aliviar el torque.

Se realizó el análisis granulométrico en mallas encontrándose el mayor porcentaje pasante en malla 200. Por último se concluye que un espesador de cono profundo industrial, no debe descargar porcentajes de sólidos muy elevados a 84%, dado que el Yield Stress se eleva y ya no es bombeable, luego a eso es recomendable usar Filtros para incrementar el % sólidos a 92% como máximo.

V.-AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica que a través de sus investigadores apoyaron la tesis de Investigación, a la Empresa FLSMIDTH por la información técnica y data experimental.

VI.-REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. M.C. and Concha F. Simulation of Batch Sedimentation with Compression. AIChE, 34: 859-361. Bustos. (1988).
2. Kynch, G.J., Theory of sedimentation. Trans. Faraday Soc., 48:1 66-175. (1952).
3. Lovera D. Proceso de Sedimentación Cinemática-Dinámica de Pulpas Metalúrgicas. VII Congreso Nacional de Metalúrgica. (1997). Huancayo - Perú.
4. Lovera, D. Modelamiento de la Fenomenología del Espesamiento en el tratamiento de Relaves Metalúrgicos. Revista del Instituto de Investigación. FIGMMG – UNMSM, Vol. II N° 04. (1999).
5. FLSMIDTH , Manual de Operación, Instalación, Lubricación y Mantenimiento de Espesadores de Cono Profundo. (2009).
6. Manual de Filtración, Fernando Concha Arcil, Centro de Tecnología Mineral. (1998).
7. Palomino. A., y Lovera D. Modelamiento del Proceso de Sedimentación Cinemático y Dinámico. I Congreso Nacional "La Ingeniería de Procesos en el Desarrollo Industrial del País". Universidad Nacional de Piura. (1999). Piura - Perú.
8. Hogg R. And Bunnal P. Sediment. compressibility in thickening of flocculated suspensions. Minerals & Metallurgical Processing, 184-188. November (1992).
9. Ames, J.C. Control de Variables en el Espesador de Cono Profundo en la Recuperación de Relaves altamente Fluibles, 2012, Tesis Ingeniería Metalúrgica . UNMSM
10. Valenzuela, R. Determinación simultánea de las ecuaciones constitutivas para el esfuerzo efectivo de sólidos y la permeabilidad de suspensiones floculadas. 1994. Tesis Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción. Chile.