

# Revisión de los equipos de decantación para estériles de mina: del espesador convencional al de cono profundo para la producción de pasta

■■■■  
Carlos Grima-Olmedo<sup>1</sup>, José Antonio Butragueño-Muñoz<sup>2</sup>, Alvaro Ramírez-Gómez<sup>3</sup>, Dulce Gómez-Limón Galindo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid

<sup>2</sup> FLSmidth S.A.

<sup>3</sup> BIPREE Research Group

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7424>

## 1. INTRODUCCIÓN

En la industria de procesamiento de minerales uno de los objetivos principales ha sido la eliminación de los residuos generados y la minimización o recuperación del agua utilizada. El empleo de nuevos equipos de decantación junto con el uso más eficiente de los reactivos (coagulantes y floculantes) ha permitido la generación de lodos de proceso en forma de pasta, posibilitando su apilamiento en superficie o su bombeo para relleno de mina, consiguiéndose importantes mejoras medioambientales (Scoble et al., 2000 y Franks et al., 2011).

Con el paso de los años, los espesadores de lodos han experimentado una gran reducción en el tamaño y área de sedimentación requerida para igual caudal de alimentación de sólidos. La Figura 1 muestra los diferentes equipos de espesado y las características principales de operación, destacando la progresión en la reducción de diámetro que han experimentado los espesadores, desde los de tipo “convencional” hasta los modernos diseños denominados de “alta capacidad”, “alta densidad” y “cono profundo o de pasta”. Esta reducción de tamaño de los equipos de espesado ha sido posible gracias a dos grandes avances acontecidos en los últimos años: por un lado el desarrollo de

floculantes sintéticos de alto rendimiento y por otro el diseño de sistemas de alimentación de alta eficiencia para la alimentación del espesador.

La mayoría de espesadores instalados en la industria minera desde hace años, especialmente desde 1990, han sido diseñados para operar con el empleo de floculantes poliméricos que mejoran el rendimiento del espesador y reducen sustancialmente el tamaño del equipo y por tanto la inversión de costes de capital. Los espesadores instalados hace más de 30 años pueden o no, haber sido diseñados para su uso con los modernos floculantes que existen actualmente en el mercado, pero la tendencia general hacia el incremento de la capacidad de tratamiento, tiene como resultado en estas unidades la operación

con floculantes modernos que necesitan de un sistema de alimentación que se adapte a las condiciones de operación óptimas requeridas. El coste del reactivo usado en la floculación, puede ser importante y en ocasiones representa un coste de operación alto. Por tanto, cualquier sistema que mejore la eficiencia del uso del floculante, que contribuya a unos costes de operación menores para el proceso y la planta, deben de ser tenidos en cuenta por el operador.

Una de las claves para producir pasta o espesado de estériles en un espesador es asegurar que el diseño de la campana de alimentación y del sistema de dilución, si es necesario, proporcione las condiciones adecuadas de floculación (Banisi et al., 2008).

Para el diseño de un sistema de pasta los factores más importantes que hay que considerar son el tamaño del espesador, el diseño del embalse de relaves, el bombeo del hundido y el sistema de control (Klein et al., 2009 y Klepper et al., 1998).

Siguiendo la investigación y aplicación en esta área en los últimos años, uno de los fundamentos del diseño en los modernos sistemas de espesado, requiere un control importante de la floculación, y también manejar de forma

Geometry	Sludge bed	Residence Time	Max Diameter	Factor “K”	Pasta Production	%Solids underflow
 Thickener (~10°)	1 m	Medium	125 m	<30	No	1= Low (15-40%)
 Thickener HCT (~10°)	1 m	Medium	100 m	<30	No	1= Low (15-40%)
 Thickener HRT (~10°)	1 m	Medium	100 m	<30	No	1= Low (15-40%)
 Thickener Cone 60° (Without Mechanism)	2-6 m	Low	15 m	-	Yes	2 (15-50%)
 High Density Thickener HDT (~15°-20°)	3 m	High	100 m	>100	Yes	3 (30-60%)
 Deep Cone Thickener (30-45° Cone)	8 m	High	50 m	>150	Yes	4 (40-80%)
 Thickening and Filtration	-	-	-	-	Yes	5=Very High (80-95%)

Figura 1: Tipo de espesadores y características (Frank Baczek, 2004)

correcta cómo las partículas sólidas y el floculante son puestas en contacto durante la alimentación del espesador. Igualmente es necesario el conocimiento de las variables intensivas y extensivas (si dependen o no de la cantidad de sustancia o tamaño del cuerpo) que participan en el proceso de decantación, cuyo proceso ha sido simplificado y modelizado por varios autores (Betancourt et al., 2013 y Burgos et al., 2005 y Diehl et al., 2000).

La revisión de la tecnología de espesadores desarrollada en este trabajo se centra en los aspectos de diseño de los equipos y en el uso de floculantes para la deposición de lodos y la recuperación del agua contenida en ellos.

## 2. LA EVOLUCIÓN EN EL DISEÑO DE LOS ESPESADORES

La práctica industrial de la concentración de sólidos por decantación y la producción de un rebose clarificado en el mismo equipo denominado “espesador”, data de 1907, en el que un recipiente circular cilíndrico incorporaba un sistema de rasquetas que acercaba las partículas decantadas hacia el centro para su evacuación en forma de lodo, en tanto que el agua clara desbordaba por un canal periférico (Concha et al., 2003). Son los tanques “Dorr”, cómo se conoce a los primeros espesadores convencionales utilizados en la industria minera. En este tipo de espesadores se esperaba que el tiempo de retención de la pulpa fuese lo suficientemente largo, para permitir que todos los sólidos sedimentaran por gravedad, tal como se extrapolaba de la sedimentación observada en el ensayo en probeta de laboratorio. Esta operación resultaba extremadamente lenta, lo que motivaba que sólo pudieran estar rellenos con un 95% de líquido clarificado, y una pequeña capa de sólidos decantados en el fondo, obteniéndose un bajo porcentaje de sólidos en el hundido.

La caída libre del sólido se regula por la *ley de Stokes* y su velocidad es proporcional a la diferencia de su densidad y la del líquido que le rodea y más significativamente al cuadrado del diámetro de la partícula. Cualquier acción que pudiera incrementar los parámetros anteriores, aumentará la sedimentación, y es por eso que los coagulantes y flocu-

lantes entraron a formar parte decisiva en el proceso de decantación y espesado: el uso de ciertas sustancias como goma, caliza, pegamento y otros agentes químicos tuvieron cierto éxito en los comienzos; pero en realidad, con la invención y desarrollo de los polielectrolitos sintéticos es cuando se producirá una nueva dimensión y avance en la práctica de la floculación. Los ratios de sedimentación podían ser incrementados por diez, veinte o más veces, y por primera vez materiales de difícil decantación comienzan a poder ser sedimentados con cierta rapidez.

Los usuarios de los equipos de sedimentación respondieron con el incremento de la producción en tanques de sedimentación convencionales con un margen sustancial, generalmente de tres a cinco veces más grandes comparado con las prácticas de espesado anteriores a la primera mitad del siglo XX.

La aceptación de la industria minera y metalúrgica de mecanismos de espesado mucho mayores y su funcionamiento efectivo con floculantes específicos, llevó a la investigación para sacar mayor provecho sobre el efecto y condiciones de utilización, circunstancia que ya se conocía en el laboratorio, pero que sólo a partir de los años 70 se puso en práctica con la introducción de los espesadores de “alta capacidad” (*High Capacity Thickener* = HCT, o también “High Rate Thickener” =HRT).

En el desarrollo de estos equipos, primero se consideró la eficiencia y el uso económico de los floculantes. Las sobredosis de reactivos podrían alcanzar los resultados deseados pero en muchos casos resultaban muy costosos. En segundo lugar, con tiempos de retención cortos, la claridad del rebose podía sufrir una merma en su calidad y claridad, teniendo como resultado grandes pérdidas de material por el rebose. En tercer lugar, a la vista de que los flujos de alimentación son menos uniformes, y con cambios bruscos, era primordial diseñar un sistema de alimentación que regulara estas variaciones. Finalmente sería necesario un equilibrio razonable entre la capacidad del equipo y la densidad requerida del hundido.

El diseño de la alimentación del tanque se ha optimizado a lo largo de los años para proporcionar la dilución de la pulpa y su mezcla con el floculante. Se basan en aprovechar la energía del flujo

de la pulpa a alimentar, controlando sus ratios de esfuerzo y la energía a la entrada de la campana de alimentación, dentro de la campana y a la salida de ésta. Actualmente, los equipos incorporan un sistema de autodilución con eductor<sup>1</sup> para alimentaciones con un alto contenido en sólidos, así como campanas con baffles interiores para controlar la energía del flujo de pulpa alimentada, sin necesidad de accionamientos y turbinas.

Entre toda la gama de reactivos existente en el mercado (aniónicos, catiónicos, sin carga, etc.), se debe elegir el que mejor ratio y velocidad de sedimentación presente en el tratamiento de los sólidos. Además, se valoran otros factores como claridad del rebose, tiempo de formación y tamaño del flóculo, etc.

El ensayo de diversos floculantes ayuda a identificar el reactivo que tiene mejor comportamiento con los sólidos que se quieren sedimentar. En la mayoría de los casos, la concentración ideal de la alimentación está normalmente entre el 5% y el 15% para la mayoría de los floculantes utilizados. En cualquier caso, es siempre recomendable la realización de ensayos de laboratorio para determinar las condiciones óptimas del proceso.

En la zona alta de la campana se produce la dilución de la pulpa y es donde el floculante empieza a dispersarse. Aguas abajo, siguiendo el recorrido de la pulpa en la campana de alimentación, los ratios de turbulencias son bajos con una agitación suave que facilita el crecimiento del flóculo. Finalmente el material floculado sale de la campana de alimentación y entra en el cuerpo del espesador para su sedimentación.

Las pruebas con este nuevo diseño Eimco HCT tuvieron lugar en el laboratorio con una unidad de 0,3 m de diámetro, seguida de plantas piloto, casi industriales, de 1,5 m de diámetro, para finalizar con una unidad piloto de 2,4 m de diámetro y 2,1 m de profundidad, que fue probada en campo primeramente

<sup>1</sup> Eductor: boquilla de alimentación donde se mezcla uniformemente la pulpa con el líquido sobrenadante arrastrado hacia el interior junto con el floculante dosificado, antes de la entrada en la campana de alimentación del espesador.

con estériles de carbón (Tabla I) y posteriormente con otras pulpas de distintas aplicaciones, en circuitos simples (por ejemplo mineral de hierro, Figura 2) o de decantación a contracorriente (CCD).

En resumen, el desarrollo de los espesadores de “alta capacidad” ha mostrado que con su modo de operación y características se obtienen importantes beneficios y se optimiza el uso de floculante, principalmente por los siguientes factores:

- Se produce una mezcla rápida entre el floculante y la pulpa.
- La adición por etapas del floculante se debe realizar en al menos tres etapas. La introducción de los sólidos floculados se hace en la parte superior del lecho de lodos para una máxima floculación y mejor claridad del rebose.
- En la zona de placas inclinadas y en la parte superior de la entrada de la alimentación se produce la ruptura de las fluctuaciones que pudieran existir en la alimentación.
- Suficiente volumen de compresión sobre la entrada de la alimentación proporciona mayor densidad del hundido.
- Existe un mayor par de arrastre en

las rasquetas al manejar una mayor carga por unidad de área.

Por todo ello, los espesadores de “alta capacidad” (HCT/HRT) representaron una respuesta a la escalada en los costes de inversión de los grandes equipos convencionales que encontraron un uso creciente en diversos campos de la minería. El diseño HCT /HRT optimiza la efectividad en el desarrollo de la ope-

ración de espesado, mientras se minimizan los costes de inversión y los costes de operación.

En la tecnología del espesado de estériles existe otra serie de equipos importantes por su utilización en esta tarea y que se operan actualmente. Estos equipos son los espesadores de “alta densidad” conocidos como HDT. Constituyen una tecnología moderna aparecida y desarrollada coincidiendo con el

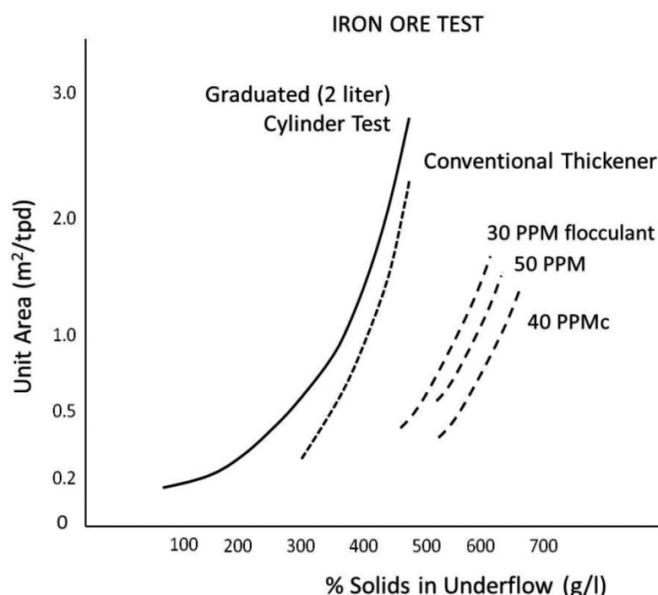


Figura 2: Resultados en planta piloto con estériles de mineral de Fe (Frank Baczek, 2004)

Plant	Solids Weigh % t	Total Load m <sup>2</sup> /tpd	Overflow Velocity m/h	Solids Underflow %	Polymer Dosing (ppm)
Nº. 1	2-4	0.09-0.13	12.2-15.8	33-37	10-16
Nº. 2	9-12	0.09-0.12	3.6-4.9	34-39	20-30
Nº. 3	8-15	0.03-0.07	3.9-19.7	29-35	13-20
Nº. 4	6-8	0.04-0.07	6.6-8.5	25-35	1-10

Tabla I: Resultados de los ensayos en estériles de carbón (Roger Summerhays, 1979)

Neutralization		
Parameters	Conventional Thickener	Thickener HDT
Unitary Area (m <sup>2</sup> /tpd)	0.01-0.06	0.03-0.07
Ratio lift (m/h)	-	0.7-2.0
Solid sunk (% weight)	45-65	51-63
Flocculant (libras/t solid)	-	0.012-0.026
Solids overflow (ppm)	-	105-170
Precipitation of the acid solution		
Parameters	Conventional Thickener	Thickener HDT
Unitary Area (m <sup>2</sup> /tpd)	8.4	0.6-1.4
Ratio lift (m/h)	-	0.5-1.5
Solid sunk (% weight)	4.0	4-8.5
Flocculant (libras/t solid)	-	0.13-0.53
Solids overflow (ppm)	300	132-489

Tabla II: Espesador HDT vs. Convencional con mineral de uranio (Roger Summerhays, 1979)

uso general de sistemas de alimentación con dilución y el empleo de floculantes a base de polímeros.

En la tabla II se realiza una comparación de los espesadores convencionales con los HDT para diferentes operaciones en la concentración de mineral de uranio.

Los espesadores HDT de alta densidad en el hundido, se comenzaron a desarrollar para ir sustituyendo a los espesadores convencionales y de alta capacidad en el tratamiento de los estériles mineros, a medida que las necesidades de tratamiento crecían con los grandes yacimientos puestos en operación en los últimos años. Su aplicación surge con la necesidad de eliminar una mayor cantidad de agua en las pulpas de estériles con grandes ratios de alimentación de sólidos en forma de pulpa. Por tanto, era necesario desarrollar un equipo que alcanzara mayores tasas de sólidos en el hundido capaz de tratar grandes tonelajes pero sin un coste de inversión excesivo.

Al desarrollarse los espesadores HDT con sistemas de alimentación más eficientes, se comprobó que el equipo producía en el hundido unos lodos espesados con alta tensión de fluencia, que era la necesaria para facilitar la deposición de los estériles y a la vez, se recuperaba una mayor cantidad de agua que con otros sistemas convencionales y de alta capacidad (Patil et al., 2007). Estos espesadores no llegan a alcanzar una pasta en los lodos del hundido, como en el espesador de cono profundo, pero consiguen considerables concentraciones de sólidos en el hundido, dando como resultado un fluido no-Newtoniano (Klein et al., 2009 y McCrabb et al., 2004).

Pasta: suspensión homogénea de material no sedimentable de alto contenido en sólidos (> 60 %) con una reología no newtoniana. Se puede considerar una pulpa como pasta, obtenida del espesado de estériles mineros, si tiene un límite de fluencia superior a 50 Pa.

Fluido no newtoniano: aquel cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Cuando se vierte en un plano inclinado, puede fluir o no dependiendo de si la fuerza de gravedad aplicada por la inclinación del plano es suficiente para alcanzar el valor del límite elástico de la pasta aplicada sobre el terreno.

Hoy en día, para el tratamiento de estériles se usan ambos equipos, y la elección dependerá de los caudales de alimentación y las características necesarias en los lodos espesados para su deposición o tratamiento posterior.

En la Figura 3 se recogen las características básicas del sistema de alimentación, la tensión del hundido, así como el talud de descarga del tanque espesador y el par necesario del mecanismo de movimiento de las rasquetas.

### 3. TECNOLOGÍA DEL ESPESADO EN PASTA

A principios del siglo XX, se desarrollaron los primeros espesadores de cono para el espesado de estériles, que finalmente han evolucionado en el espesador de cono profundo actual para la producción de pasta. Estos equipos tenían la característica de disponer de

una altura lateral mucho mayor que los espesadores convencionales, lo cual permitía un alto lecho de lodos en su interior, mucho mayor comparado con otros espesadores de la época. Así, los primeros modelos de conos profundos aparecen y se patentan en EE.UU., por ejemplo la patente 854,520 sobre el "Callow Cone" del año 1907, se muestra en la Figura 4 a).

No es hasta mediados de los años 50 cuando surge una nueva patente en Alemania, con el número 749,736 del año 1953 donde se muestra un equipo que mejora la separación sólido-líquido mediante la sedimentación, representado en la Figura 4 b). Este equipo consiste en un espesador con una geometría similar al espesador de pasta actual, pero basado en los mismos principios que sus predecesores: mantener un lecho de lodos de gran profundidad.

Es a principios de los años 60 cuando se comienza a estudiar en serio la

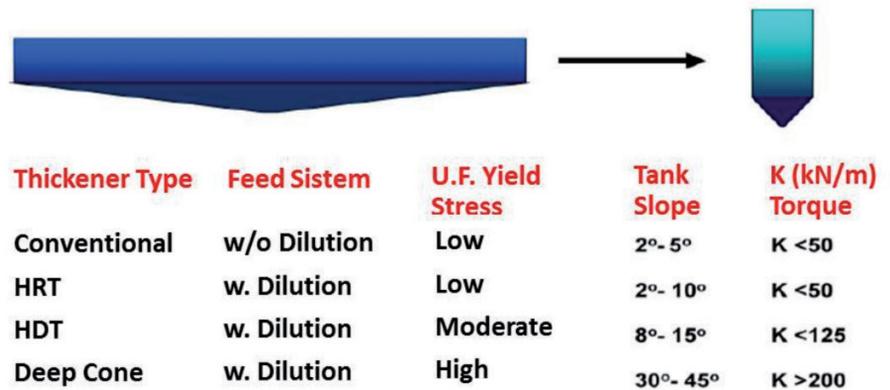


Figura 3: Características del espesador Convencional, HRT, HDT y de Cono Profundo (Mark Neiderhauser, 2011)

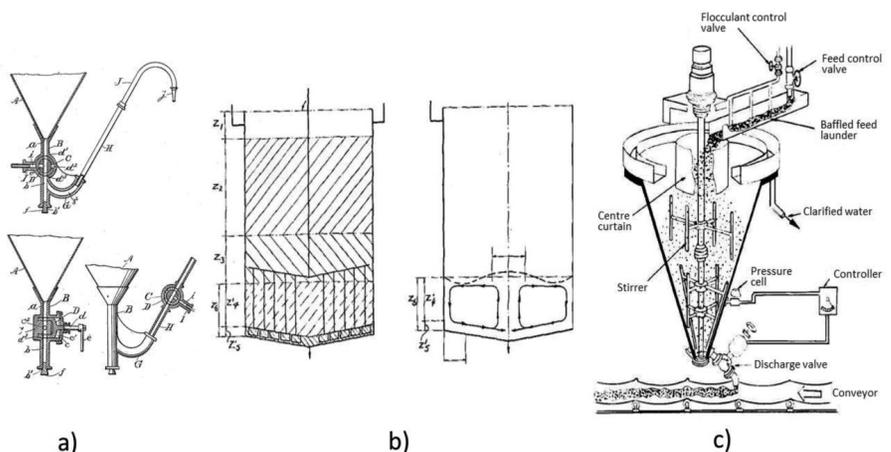


Figura 4 a) - Callow Cone; patente 854,520. EE.UU. b) - Espesador de lecho profundo 1953. Alemania. c) - Espesador de cono profundo National Coal Board

posibilidad de realizar equipos que hoy pueden considerarse como el inicio de los espesadores de pasta actuales. Es en el Reino Unido, con la aplicación y la investigación en el *National Coal Board*, donde comienzan a instalarse espesadores de forma cónica con dimensiones de 4,2 metros de diámetro y 6 metros de profundidad, provistos de rasquetas internas, donde se conseguirán con estériles de carbón densidades del hundido de hasta el 55-65% de sólidos en peso y que son capaces de descargar el hundido sobre cinta transportadora, Figura 4 c).

Sin embargo en esta época, se reconocen los aspectos críticos que deben ser controlados en los espesadores de cono profundo y que afectan a los resultados de la operación, como son: una floculación efectiva, un sistema de alimentación de alto rendimiento, una mayor inclinación del fondo y un sistema eficaz de piquetas internas para liberar el líquido atrapado en el lecho de lodos sedimentado.

Otro avance significativo en el desarrollo de los espesadores de cono profundo, fueron las investigaciones realizadas por la compañía de aluminio *Alcan*. Esta empresa desarrolló y patentó sus propios espesadores de cono profundo para sus procesos de espesado de alúmina. Sus investigaciones comenzaron en los años 70, en Jamaica y Canadá, con el objetivo de espesar los lodos rojos del proceso de tratamiento de la bauxita.

En este caso el modelo sería un espesador de cono profundo igual a los espesadores de pasta actuales, con dimensiones de 10 metros de diámetro y 14 metros de altura lateral en la virola, que llevaba incorporada un mecanismo de rasquetas, y con el cual se obtenía un contenido en sólidos en el hundido del 30-21% en peso frente al 15-17% que se obtenía en los espesadores convencionales. En el año 1993, Alcan tenía en sus factorías de alúmina 30 equipos de espesadores de cono profundo operando en sus instalaciones.

El espesador *Alcan Deep Thickener* fue introducido por EIMCO (ahora FLSmidth) en aplicaciones fuera del campo de la alúmina, en 1996 bajo licencia, siendo comercializado como espesador de Cono Profundo Eimco (Slottee et al., 1999 y Tao et al., 2010). La relación típica de altura/diámetro del

equipo estándar es de 1 a 2, parámetro que influye en la concentración obtenida en el espesado (Slottee et al., 1999 y Tao et al., 2010). Dispone de rasquetas interiores con un talud del cono inferior que varía entre 30° y 45° (Figura 3), y que varía según sea la geometría del tanque y la naturaleza del lodo a tratar (Wang Yong et al., 2011). Esta geometría le proporciona una alta compresión

de la capa de lodo y un elevado lecho de lodos, consiguiendo así alcanzar la máxima concentración de sólidos en el hundido, llegando al denominado rango de "pasta" (Figura 5).

La etapa de introducción del equipo para el tratamiento de estériles en las operaciones mineras, no resultó fácil en un primer momento por las desconfianza inicial de los clientes y operadores a

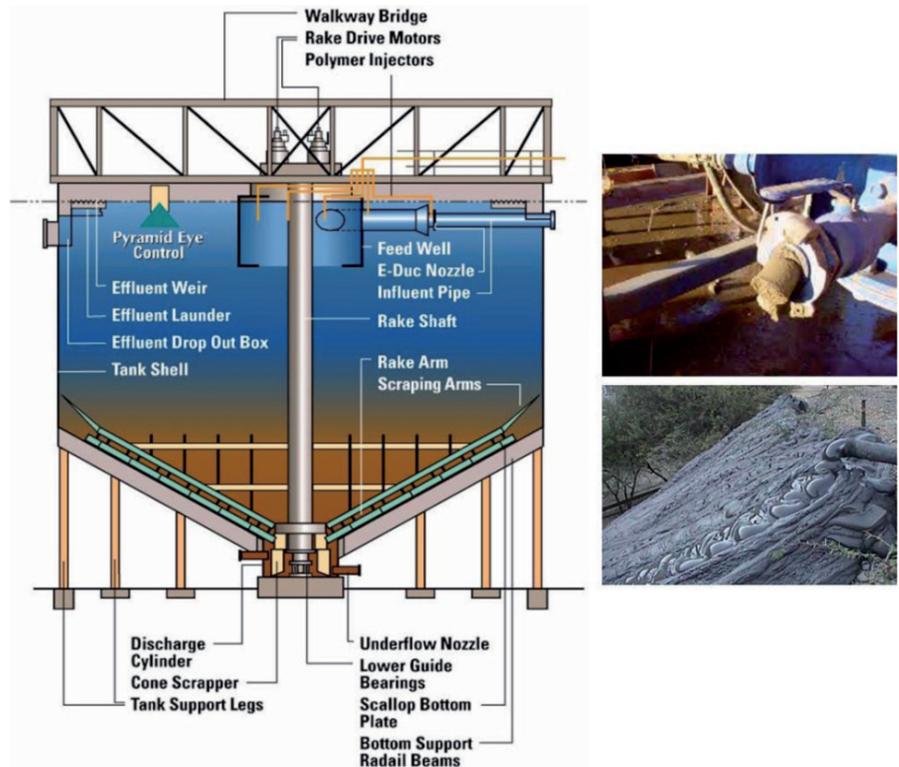


Figura 5: Espesador de cono profundo Eimco: "Pasta" (Frank Baczek, 2006)

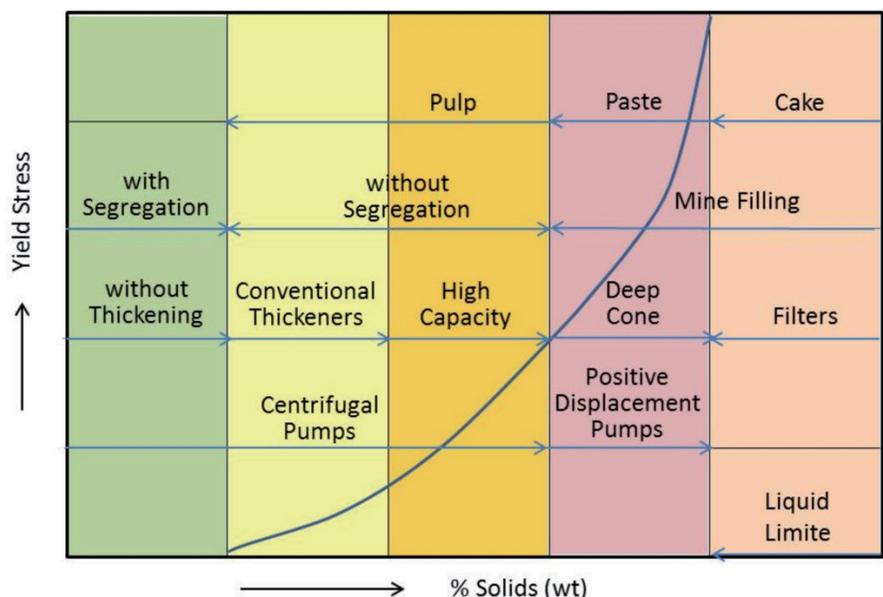


Figura 6: Tensión de fluencia en los espesadores de estériles (Elaboración propia)

adquirir un equipo que tenía un coste capital muy superior al de otros equipos de espesado (HCT/HRT, HDT), pero que sin embargo era capaz de proporcionar muchos beneficios en la operación del espesado de los estériles de planta y en la recuperación de las aguas de proceso. Sin embargo, hoy ha sido reconocido como una de las mejores tecnologías disponibles en esta área.

En la Figura 6, se observan las principales diferencias de espesado y las características de los lodos producidos.

Para establecer unos límites aproximados de la tensión de fluencia alcanzada en cada uno de los tipos de equipos, se pueden considerar los datos siguientes:

- Espesadores convencionales y de alta capacidad HCT/HRT: donde la tensión de fluencia se situaría entre 0 y 50 Pa, con un contenido en sólidos del hundido máximo de 30-45%, dependiendo de las características del sólido a tratar.
- Espesadores de alta densidad del hundido HDT: con una tensión de fluencia situada entre 50-150 Pa, con una concentración en el hundido de entre 40-65% como máximo.
- El último grupo serían los espesadores de cono profundo donde se alcanzan tensiones de fluencia en el hundido desde 150-200 Pa has-

ta más de 500 Pa, y donde se puede alcanzar concentraciones del hundido desde 60% hasta el 80% (Wu Ai-xiang et al., 2012).

#### 4. APLICACIONES DEL ESPESADOR DE CONO PROFUNDO

Algunas de las aplicaciones típicas para este tipo de equipos de espesado de alta densidad o espesado en pasta son:

- El espesado de estériles para apilado en superficie o relleno de mina (Schoenbrunn et al., 2009 y Shelley et al., 2000).

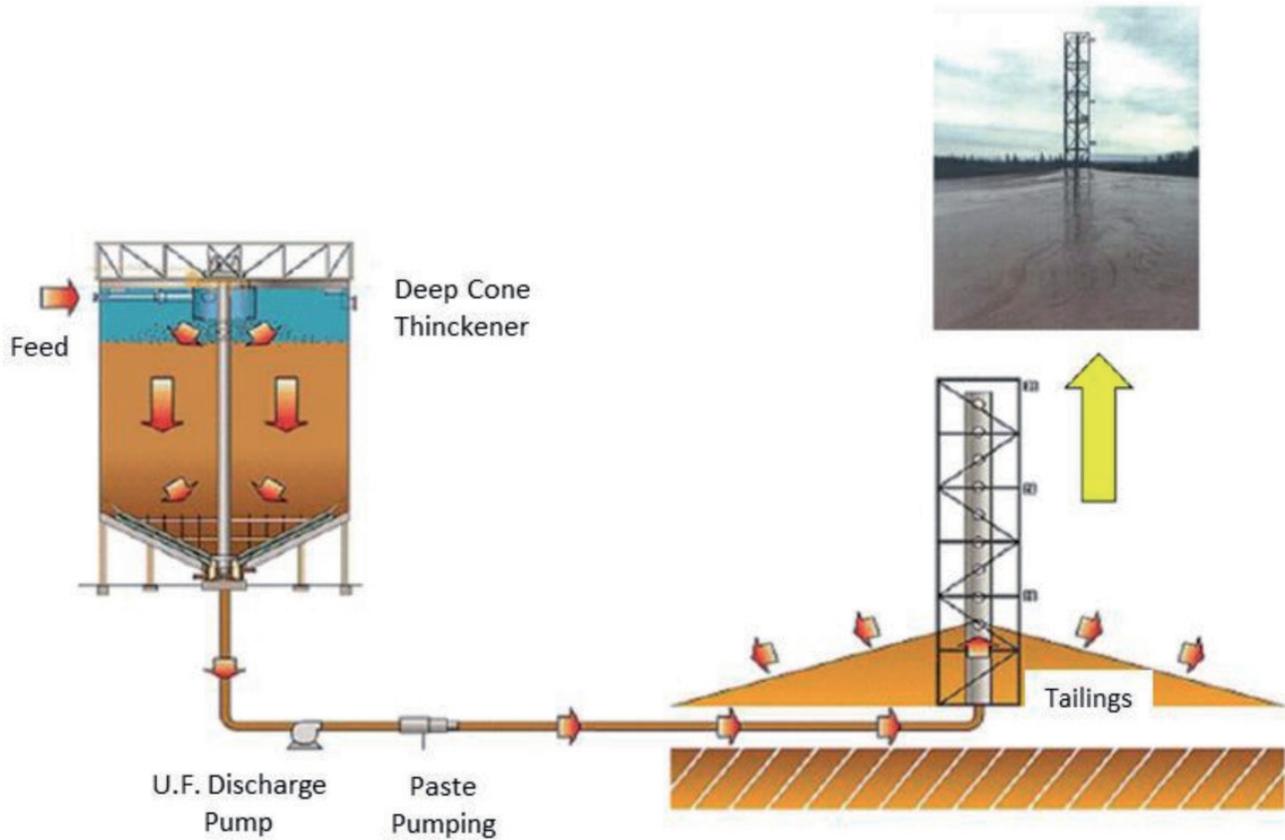


Figura 7: Flujo de un espesador de pasta para apilado en superficie (Frank Baczek, 2004)

	Conventional tailings dam	Sludge stacking disposal
Disposal volume	Large volume with 20-25% solids	1/6 of conventional volume at 60% solids
Water disposal	Required water retention dyke	Not dyke required, only stacking
Risk of dam failure	High risk	Low or minimal risk
Water Savings	Not effective, vapour loss	Water is recovered in the plant
Aquifers Contamination	Severe	Low or null
Risk of tailings liquefaction	High risk	Low risk
Land use after post mine closure	Difficulty in land reclamation	Surface drainage facilitates land recovery

Tabla III - Comparación entre balsa convencional frente a depósitos de lodos espesados en forma de pasta (Elaboración propia)

- La decantación a contracorriente.
- La alimentación de pulpas a la sección de filtración.
- La alimentación a autoclaves.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo de un espesador produciendo una pasta para su apilado en superficie. El espesador de pasta, recibe un flujo de alimentación de estériles y sedimenta los sólidos hasta conseguir una concentración del hundido que sea óptima para este tipo de depósitos.

Las bombas centrífugas son las encargadas de evacuar los sólidos del hundido o la pasta del espesador. Sin embargo en ocasiones y debido a la viscosidad de la pasta obtenida, puede hacerse necesario la utilización de bombas de desplazamiento positivo, sobre todo en el caso que el destino final de los lodos sea a mayor distancia que 100 metros desde la base del espesador. En la balsa de lodos la pasta se distribuye de una determinada forma que depende de la orografía del terreno y de las condiciones de apilado requeridas.

Tabla III se muestran las ventajas ambientales del apilado de estériles espesados de alta densidad comparado con las balsas u operaciones de espesadores convencionales.

## 5. CONCLUSIONES

Dentro del conjunto de equipos y tecnologías existentes para el espesado de estériles y lodos generados por las operaciones mineras, así como el estudio del diseño, mejoras y métodos empleados para la deposición de estos lodos y la recuperación del agua contenida en ellos, están ganando un creciente interés los espesadores de cono profundo para pasta y los espesadores de alta densidad en el hundido (HDT) debido al creciente interés del sector minero en la gestión y manejo de estos estériles y las necesidades crecientes de agua en las explotaciones mineras. Es reconocido que la reutilización del agua de proceso es esencial para la sostenibilidad de las explotaciones de acuerdo a las normativas y regulaciones locales y gubernamentales y también para la sostenibilidad económica y social de la operación.

Las teorías y tecnologías que históricamente se han ido desarrollando para explicar el fenómeno del espesa-

do de materiales y su evolución desde los primeros espesadores de finales del siglo XIX hasta llegar a los modernos espesadores de pasta es debido fundamentalmente a los avances en la industria de los floculantes y en el desarrollo de sistemas de alimentación, dilución y mezcla con una alta eficiencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la compañía FLSmidth los datos y resultados aportados para la caracterización del funcionamiento y diseño de los espesadores en aplicaciones mineras.

## PARA SABER MÁS

- [1] Banisi S., Yahyaei M., 2008. Feed dilution-based design of a thickener for refuse slurry of a coal preparation plant. *Int. J. Coal Prep. Util.* 28 (4), 201-223. <http://dx.doi.org/10.1080/19392690802391189>
- [2] Betancourt F., Concha F., Sbarbaro D., 2013. Simple mass balance controllers for continuous sedimentation. *Comput. Chem. Eng.* 54, 34-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.03.014>
- [3] Burgos R., Concha R., 2005. Further development of software for the design and simulation of industrial thickeners. *Chem. Eng. J.* 111 (2-3), 135-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2005.02.012>
- [4] Concha F., Burger R., 2003. Thickening in the 20(th) century: A historical perspective. *Miner. Metall. Process.* 20 (2), 57-67.
- [5] Diehl S., 2000. On boundary conditions and solutions for ideal clarifier-thickener units. *Chem. Eng. J.* 80 (1-3), 119-133. [http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00081-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00081-2)
- [6] Frank Baczek. Deep Cone Paste Thickeners and High Density Thickeners. Internal Report Dorr-Oliver Eimco. Annual Meeting. 2006.
- [7] Frank Baczek. Thickening Mineral Slurries to High Underflow Densities and Paste. Internal Report Dorr-Oliver Eimco. Annual Meeting. 2004.
- [8] Franks D.M., Boger D.V., Cote C.M., Mulligan D.R., 2011. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resour. Policy.* 36(2), 114-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
- [9] Klein B., Hallbom D., 2009. Rheology in mineral processing. Ed. Malhotra, D. Taylor, P.R. Spiller, E. LeVier, M. 406-418.
- [10] Klepper R., Laros T., Schoenbrunn F., 1998. Deep paste thickening systems. Ed. Bloss, M. 99-101. McCrabb L., Chin J., Miller G., 2004. A study utilizing vane yield rheometry to predict optimum thickener performance across a range of laterite nickel ores for the ravensthorpe nickel project. Ed. Imrie W.P.; Lane, D.M. 401-414.
- [11] Mark Neiderhauser. Thickeners Evolution and Thickener Design. Internal Report FLSmidth Minerals. Annual Meeting. 2011.
- [12] Patil D.P., Honaker R., Parekh B.K., 2007. Paste thickening of fine coal refuse. *Coal Prep.* 27(4), 191-209. <http://dx.doi.org/10.1080/07349340701638848>
- [13] Roger Summerhays. The Technology and Performance of the Hi-Capacity Thickener. Eimco Process Machinery Division - Envirotech Corporation. Society of Mining Engineers of AIME. Annual Meeting Houghton-Michigan. 1979.
- [14] Schoenbrunn F., Niederhauser M., Baczek F.; 2009. Paste thickening of tailings: Process and equipment design fundamentals relative to deposition goals. Ed. Malhotra, D. Taylor, P.R. Spiller, E. LeVier, M. 455-464.
- [15] Scoble M., Klein B., Dunbar W.S., 2003. Mining waste: Transforming mining systems for waste management. Ed. Singhal R.M., A.K. 17 (2), 123-135. <http://dx.doi.org/10.1076/ijsm.17.2.123.14129>
- [16] Shelley J.L., MacNamara L., Slottee S., 2000. An introduction to deep cone (TM) thickening technology and its application. Ed. Ozbayoglu, G.; Hosten, C.; Atalay, M.U.; Hicyilmaz, C.; Arol, A.I. 581-584.
- [17] Slottee S.J., Schreiber H., 1999. Paste backfill using deep paste thickener systems. Ed. Harris G.B.; Omelon, S.J. 93-103.
- [18] Tao D., Parekh B.K., Zhao Y., Zhang P., 2010. Pilot-scale demonstration of deep cone paste thickening process for phosphatic Clay/Sand disposal. *Sep. Sci. Technol.* 45 (10), 1418-1425. <http://dx.doi.org/10.1080/01496391003652783>
- [19] Wang Yong, Wang Hong-jiang, Wu Ai-xiang, 2011. Mathematical model of deep cone thickener underflow concentration based on the height to diameter ratio. *J. Wuhan Univ. Technol.* 33 (8), 113-117. <http://dx.doi.org/10.3963/j.issn.1671-4431.2011.08.025>
- [20] Wu Ai-xiang, Jiao Hua-zhe, Wang Hong-jiang, Yang Sheng-kai, Yao Gao-hui, Liu Xiao-hui, 2012. Mechanical model of scraper rake torque in deep-cone thickener. *J. Cent. South Univ.* 43 (4), 1469-74.