Cerrando la brecha entre las pruebas, el diseño y la operación de espesadores de relaves: menos agua al depósito mediante pensamiento sistémico y uso de tecnología

Lars Martinson
Director / Gerente General, MINEXXT, Inc., Colorado, EE.UU.

Resumen

Un espesador de relaves casi siempre se evalúa solo. Se dimensiona con pruebas de laboratorio, se especifica para una densidad de underflow y, ya en operación, se da por aceptable si el overflow sale claro y el torque de rastras no es elevado. Pero el espesador es el primer equipo del sistema de relaves, y ahí se decide cuánta agua vuelve a la planta y cuánta termina en el depósito. En este trabajo miramos el problema con pensamiento sistémico. La brecha entre lo que dicen las pruebas, lo que se diseña y lo que de verdad pasa en planta tiene un costo, y ese costo lo paga el depósito: en dinero, en estabilidad física y en desempeño ambiental. Un balance de agua para una operación de 200.000 t/d lo deja claro (a modo de ejemplo). Operar a 57 %m en vez del 60 %m que permite el material manda unos 17.500 m³/d adicionales al depósito, cerca de 3,2 MUSD/año solo en agua que no se recupera. Revisamos las palancas que sí se pueden controlar (dilución, floculación, mezcla, aire y distribución de la alimentación al espesador) y mostramos resultados de mejoras hechas en espesadores existentes. La idea de fondo es simple. Mejorar el espesador cuesta menos, y es más seguro, que cargar con las consecuencias de más agua en el depósito.

Palabras clave: espesamiento, relaves, recuperación de agua, sistema de alimentación, feedwell, pensamiento sistémico, GISTM.

1. Introducción

En la región andina de América Latina el agua escasea, está cada vez más regulada y, dentro de un depósito de relaves, es además un riesgo geotécnico. En la mayoría de las concentradoras su destino se decide en el espesador. Lo que sale por el overflow vuelve al proceso a bajo costo. Lo que se va con el underflow es transportado al depósito, y allí se almacena.

Aun así, cuando hablamos de depósitos de relaves solemos mirar aguas abajo: el muro, los peraltes, el monitoreo, la laguna. El Estándar Global de la Industria para la Gestión de Relaves (ICMM et al., 2020) pide gestionar el riesgo durante todo el ciclo de vida, y las investigaciones de fallas recientes muestran el peso que tienen el agua y los relaves sueltos y saturados en los mecanismos de falla (Morgenstern et al., 2016; Robertson et al., 2019). Hay una manera muy directa de tener menos agua en el depósito a través de un proceso de espesamiento más eficaz.

Por eso proponemos mirar al espesador como la primera barrera del sistema de relaves. En las páginas que siguen revisamos por qué las pruebas, el diseño y la operación no siempre coinciden, cuánto cuesta esa diferencia y qué medidas, casi siempre sencillas, ayudan a disminuirla.

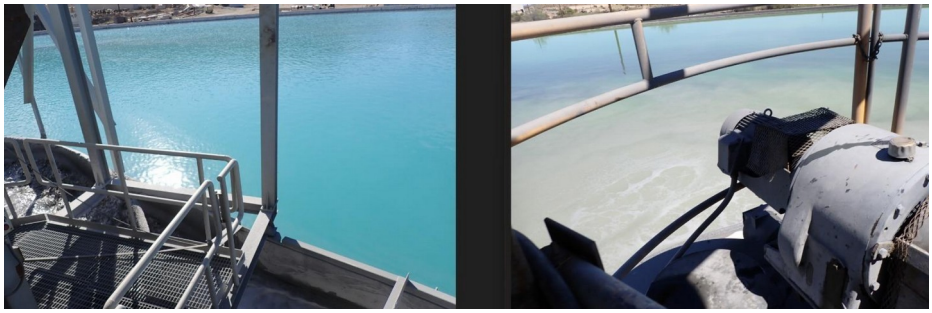

Figura 1.1. Dos espesadores de 100 m en la misma operación y con la misma alimentación. ¿Cuál fue mejorado? Fuente: MINEXXT.

2. El espesador como parte del sistema de relaves

Pensar en modo sistémico significa juzgar un equipo por lo que provoca en el conjunto y no solo por cómo se ve su propio indicador (Figura 2.1). El espesador, el transporte de relaves, el depósito y la recirculación de agua están conectados. Basta con perder unos pocos puntos porcentuales de densidad en el underflow para que cambien el volumen bombeado, el agua que se libera en la playa, el tamaño de la laguna, el nivel freático y la demanda de agua fresca.

Cuando el underflow sale más diluido que lo esperado, el volumen adicional se reparte por todo el sistema. La planta necesita más agua fresca, gasta más energía en bombear relaves y en recircular, y el próximo peralte del muro llega antes. En el depósito la laguna crece y se acerca al muro, sube el nivel freático, se pierde revancha y los relaves quedan menos resistentes geotécnicamente y saturados, que es justamente la condición asociada a una mayor susceptibilidad a la licuación. Hay más infiltración que controlar y más agua que se pierde por evaporación. La operación, por su parte, queda con menos margen para pasar algún día a relaves espesados (Jewell y Fourie, 2015).

Nada de esto aparece en el indicador del espesador. Puede tener el overflow aceptable y el torque estable y, al mismo tiempo, estar trasladando al depósito un costo y un riesgo que muy pocos cuantifican y se ignora por la facilidad o comodidad de tener una unidad operando ineficientemente.

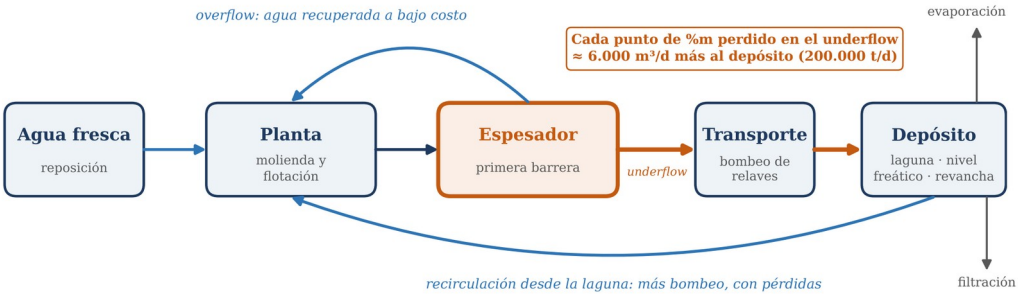

Figura 2.1. El espesador dentro del sistema de agua y relaves: lo que no se recupera en el overflow viaja al depósito, donde se recircula con más bombeo o se pierde por evaporación y filtración. Fuente: elaboración propia.

3. La brecha entre pruebas, diseño y operación

El dimensionamiento de un espesador sigue una ruta conocida. Primero se caracteriza la alimentación al espesador (flujo, densidad, pH, granulometría y química), después se

seleccionan floculante y coagulante, y por último se hacen pruebas estáticas y dinámicas de sedimentación. Con eso se definen el área unitaria, la carga hidráulica y la densidad de underflow alcanzable (Coe y Clevenger, 1916; Kynch, 1952; Concha, 2014). Las pruebas dinámicas entregan algo más valioso todavía: la receta. Es decir, la dilución, la dosis de floculante y la mezcla con las que ese material rinde lo mejor posible.

El problema es que la planta rara vez cocina con esa receta. En la vida real, en operaciones reales lo vemos una y otra vez. La dilución en el feedwell no es la de las pruebas, porque el sistema nunca se diseñó para el caudal de hoy o porque se modificó en el transcurso de la operación u otro motivo incierto. El floculante entra en el punto equivocado, demasiado concentrado o sin la energía de mezcla necesaria. Las canaletas y los cajones atrapan aire, y ese aire sube con sólidos, forma espuma y ensucia el overflow. Muchas veces el feedwell descarga de forma asimétrica: el material se va hacia un lado, la cama de sólidos queda dispareja, el torque sube y al centro casi no hay cama. Y queda el caso más común de todos. La planta creció, o cambió el mineral, y el sistema de alimentación quedó fuera de su ventana operacional.

Ninguna de estas causas tiene que ver con el área del estanque. Todas apuntan al sistema de alimentación y al feedwell, que es donde las condiciones del laboratorio tienen que recrearse a escala industrial. Por eso el diagnóstico debería partir comparando la capacidad del espesador con la capacidad real del feedwell, y no solo con el área nominal.

4. El costo de no optimizar: ejemplo numérico

Para un tratamiento de sólidos secos S (t/d) y una concentración de sólidos en masa C en el underflow, el agua que se va con el underflow es $W = S\cdot(1 - C)/C$ (m³/d). Si el material puede llegar a cierta densidad y la planta no llega, la diferencia es agua que el espesador deja escapar. La Tabla 4.1 lo muestra para 200.000 t/d de relaves de cobre (densidad de sólidos 2,7 t/m³), con un techo de 60 %m definido por pruebas y un costo del agua de 0,5 USD/m³.

Tabla 4.1. Agua adicional enviada al depósito según la densidad de underflow alcanzada (200.000 t/d)

Densidad UF (%m)	Agua adicional al depósito (m³/d)	Caudal (L/s)	Volumen anual (Mm³)	Costo agua no recuperada (MUSD/año)
60 (techo)	0	0	0,00	0,00
59	5.650	65	2,06	1,03
58	11.494	133	4,20	2,10
57	**17.544**	**203**	**6,40**	**3,20**
56	23.810	276	8,69	4,35
55	30.303	351	11,06	5,53

Fuente: elaboración propia (MINEXXT). Balance de agua en base seca, 365 d/año, agua a 0,5 USD/m³; cifras ilustrativas.

Bajar de 60 a 57 %m parece poco. No lo es. Son unos 203 L/s más hacia el depósito, cerca de 6,4 millones de m³ al año y del orden de 3,2 MUSD/año en agua que no se recupera. Cada punto de densidad vale aproximadamente 1 MUSD/año. Si movemos el tratamiento entre 150 y 250 kt/d, el costo del agua entre 0,3 y 0,8 USD/m³ o la densidad alcanzada

entre 55 y 59 %m, el resultado queda entre 1,6 y 4,5 MUSD/año. De todos esos factores, el que más pesa es la densidad que realmente se logra en el espesador.

Y es una cifra conservadora, porque solo cuenta el agua. Parte de esa agua se puede recuperar desde la laguna, pero bombearla cuesta más, una fracción se evapora o queda retenida en los poros y, mientras tanto, ocupó volumen y aumentó el riesgo del depósito. Tampoco estamos contando la energía de bombeo, el volumen de laguna que hay que almacenar con revancha, el adelanto de peraltes ni el control de filtraciones. Al lado de todo eso, mejorar el sistema de alimentación y el feedwell, que se instala en el estanque existente con una detención corta, se paga rápido.

5. Lo que sí se puede controlar

Las palancas para cerrar la brecha son conocidas, y la mayoría son simples. Lo que suele faltar es manejarlas juntas, como un sistema.

La primera es la dilución. La velocidad de sedimentación depende mucho de la concentración de sólidos dentro del feedwell. En pruebas con un mismo relave, pasar de 18 a 24 %m cambió la sedimentación de manera marcada, y la operación estaba justo en la zona de sedimentación lenta (Figura 5.1a). Ajustar la dilución suele ser la mejora más barata que hay a mano.

Después viene la floculación. El floculante tiene que entrar diluido, en la zona de mezcla correcta y con tiempo suficiente para formar flóculos sin romperlos. Subir la dosis no arregla una mala mezcla. Solo sube la cuenta.

Con el aire pasa algo parecido, aunque cuesta más verlo. Cada caída libre en una canaleta o en un cajón mete aire, y ese aire arrastra sólidos hacia la superficie. La hidráulica del sistema de alimentación tiene que evitar que entre aire antes del feedwell.

La distribución de la alimentación al espesador es probablemente la palanca más subestimada. Si el feedwell descarga hacia un solo lado, la cama se carga en ese sector, el torque sube y la densidad de underflow se estanca. Tecnologías como el Vector® Feedwell y HydroForce (MINEXXT) se diseñaron para entregar dilución, mezcla y distribución uniforme en una ventana de operación más amplia (Figura 5.1b).

Por último, hay que medir. El análisis del torque de rastras por posición angular y la batimetría operacional de la cama muestran una distribución dispareja antes de que se transforme en un evento de torque o en pérdida de densidad. También permiten comprobar si cada cambio funcionó.

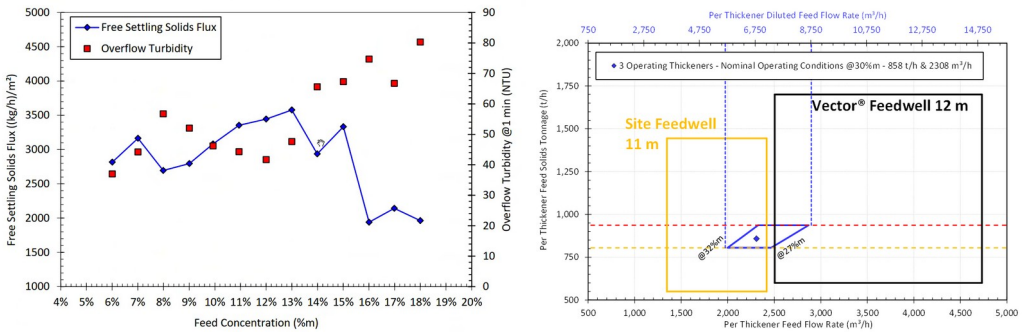

Figura 5.1. (a) Efecto de la dilución en la sedimentación; (b) ventana de operación original y mejorada. Fuente: MINEXXT.

6. Resultados en operación

El primer caso es una operación de cobre en EE.UU. con dos espesadores de relaves idénticos de 100 m, alimentados en las mismas condiciones. Se mejoró el sistema de alimentación y el feedwell de uno de ellos. La diferencia salta a la vista (Figura 1.1): overflow más claro, cama más pareja y sin las plumas de sólidos ni la pérdida de finos que había antes.

En otros espesadores de relaves bastó con corregir la distribución de la alimentación al espesador y sacar el aire del sistema de alimentación. Se pasó de aire atrapado y una distribución deficiente a una operación estable, bien distribuida y con aire mínimo (Figura 6.1).

El tercer caso no es de relaves, pero muestra que los mismos principios funcionan en servicios exigentes. En espesadores de lixiviación ácida en caliente, la densidad de underflow subió 10 puntos (%m) después de la mejora, bajó la espuma y el overflow salió más claro. Ninguno de estos casos necesitó un espesador nuevo ni más área. Todo se instaló en el estanque que ya existía.

7. Conclusiones

El espesador es la primera barrera del sistema de relaves y debería evaluarse por lo que provoca en el depósito, no solo por su propio indicador. Cuando las pruebas y la operación no coinciden, el origen casi siempre está en el sistema de alimentación y el feedwell, no en el área del estanque.

Los números ayudan a ponerlo en perspectiva. En una operación de 200.000 t/d, cada punto de densidad de underflow vale del orden de 1 MUSD/año solo en agua, sin contar los beneficios geotécnicos, energéticos y de vida útil del depósito. Las palancas para recuperarlo son simples: dilución, floculación, mezcla, aire y distribución de la alimentación al espesador. Piden diagnóstico más que grandes inversiones.

Nuestra recomendación es incluir la densidad de underflow como indicador dentro del plan de gestión del depósito, en línea con el GISTM. Al final, mejorar el espesador es más barato y más seguro que vivir con las consecuencias de más agua en el depósito.

Referencias

Coe, H. S., & Clevenger, G. H. (1916). Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. *Transactions of the American Institute of Mining Engineers, 55*, 356–384.

Concha, F. (2014). *Solid–liquid separation in the mining industry*. Springer.

International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, & Principles for Responsible Investment. (2020). *Global industry standard on tailings management*. https://globaltailingsreview.org/

Jewell, R. J., & Fourie, A. B. (Eds.). (2015). *Paste and thickened tailings: A guide* (3rd ed.). Australian Centre for Geomechanics.

Kynch, G. J. (1952). A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society, 48*, 166–176. https://doi.org/10.1039/TF9524800166

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., & Watts, B. D. (2016). *Fundão tailings dam review panel: Report on the immediate causes of the failure of the Fundão dam*. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP.

Robertson, P. K., de Melo, L., Williams, D. J., & Wilson, G. W. (2019). *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I*. Vale S.A.