Gestión Operativa y Mantenimiento de Depósitos de Relaves

Módulo 2

Tecnología y Equipos de Filtración

- **Alejandro Villalobos**

alejandro.villalobos.figueroa@ua.cl
alejandro.villalobos@rheomining.cl

RelaveNet
A Community of Excellence

Índice Temático



Figura 1: Filtro Prensa Industrial

- ❑ Tecnologías de filtración de Relaves
- ❑ Comparación de Tecnologías
- ❑ Variables de operación Relaves Filtrados
- ❑ Automatización, Monitoreo y Casos de Estudio
- ❑ Riesgos Operacionales y Buenas Prácticas

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

Los relaves filtrados representan la forma más avanzada y segura de disposición de residuos mineros, caracterizándose por un contenido de sólidos superior al 80%. Esta condición permite que el relave adopte una forma de torta semiseca, eliminando la necesidad de tranques de contención hidráulica y reduciendo significativamente los riesgos ambientales asociados.

Este tipo de relave puede ser transportado mediante correas o camiones y dispuesto en capas compactadas. Su alta estabilidad física disminuye drásticamente el riesgo de drenaje ácido y fenómenos de licuefacción, incluso en zonas sísmicas, constituyendo una alternativa robusta frente a otros métodos de disposición convencional.

La implementación de esta tecnología implica una inversión significativa en equipos de filtrado, cuyo diseño y selección depende del contenido de sólidos, la composición del fluido y los requerimientos específicos de cada operación minera.

Las tecnologías de filtración más utilizadas en minería se clasifican según su mecanismo operativo en:

- Filtración por vacío
- Filtración por presión
- Filtración por adsorción

Esta evolución tecnológica no solo permite mejorar el desempeño ambiental y geotécnico de los depósitos, sino que también se alinea con los nuevos estándares globales de seguridad, sostenibilidad y eficiencia hídrica en la minería contemporánea.

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

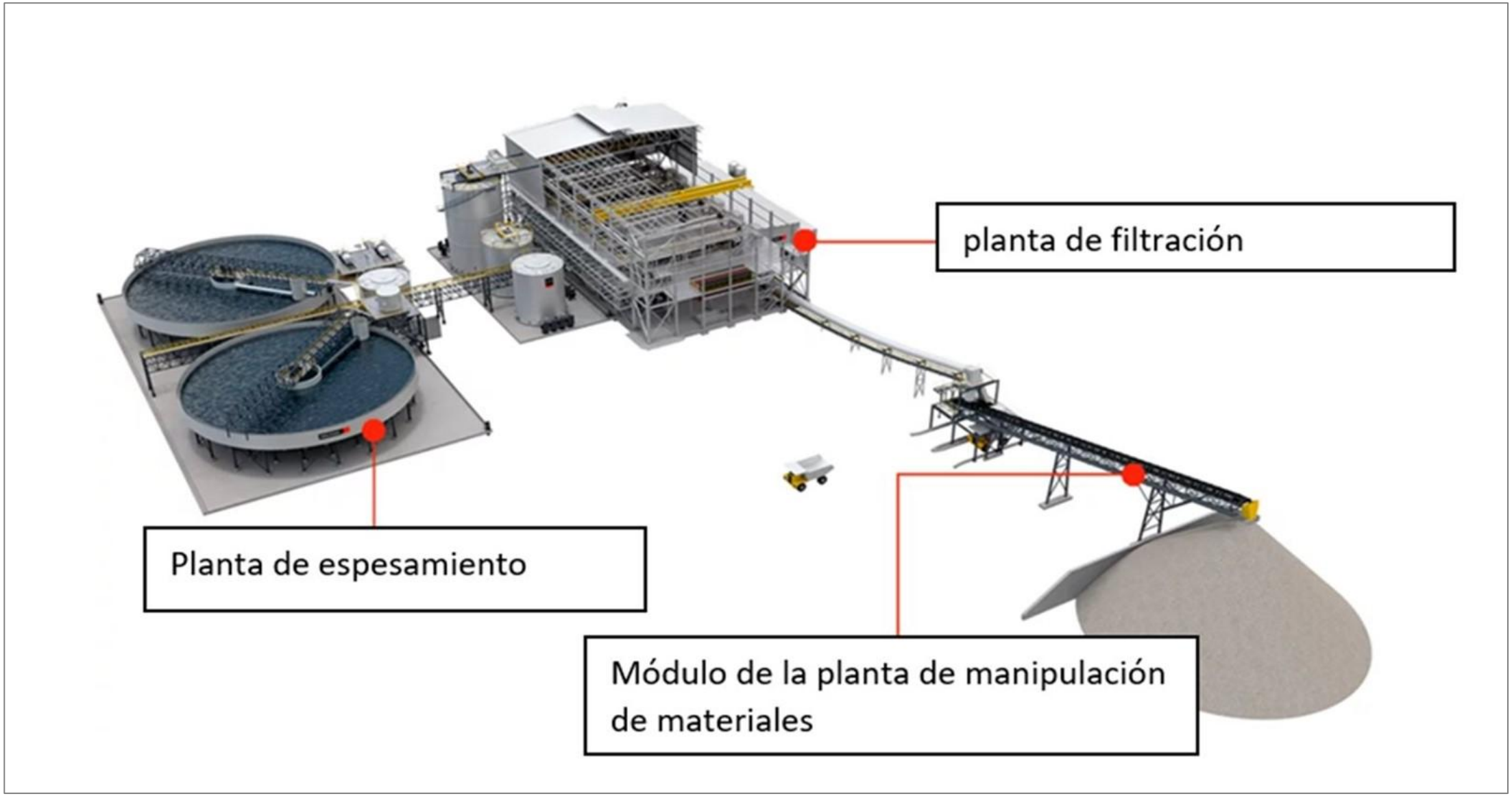


Figura 2: Esquema típico Proceso de filtración de relaves y apilamiento en seco

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Vacío

Los filtros de banda de vacío cuentan con una banda filtrante continua soportada por dos cilindros en sus extremos, que se desplaza a velocidad variable donde se deposita el material a filtrar, bajo la banda se dispone con un sistema de bomba de vacío que extrae el agua del material dejando un queque filtrado que se descarga al final de la banda hacia una correa recolectora.

En los filtros de vacío la separación sólido-líquido tiene lugar gracias a la aspiración que imprime una bomba de vacío bajo la superficie donde reposa el producto.



Figura 3: Filtros de vacío en banda

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Vacío

Su funcionamiento se basa en la aplicación de un vacío que genera una presión diferencial, provocando que el agua en la mezcla de relaves se filtre a través de un medio poroso, dejando una torta de sólidos en la superficie del filtro.



Figura 4: Filtro de Vacío

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Vacío_Componentes

Tambor o disco rotatorio: El sistema gira de manera continua, sumergiendo parte del filtro en una mezcla de relaves.

Zona de formación de torta: La mezcla se adhiere al filtro, formando una capa de sólidos.

Zona de lavado y secado: El agua residual es succionada, secando la torta antes de ser descargada.

Descarga: La torta se retira del medio filtrante por medio de un sistema de rascadores o cuchillas.

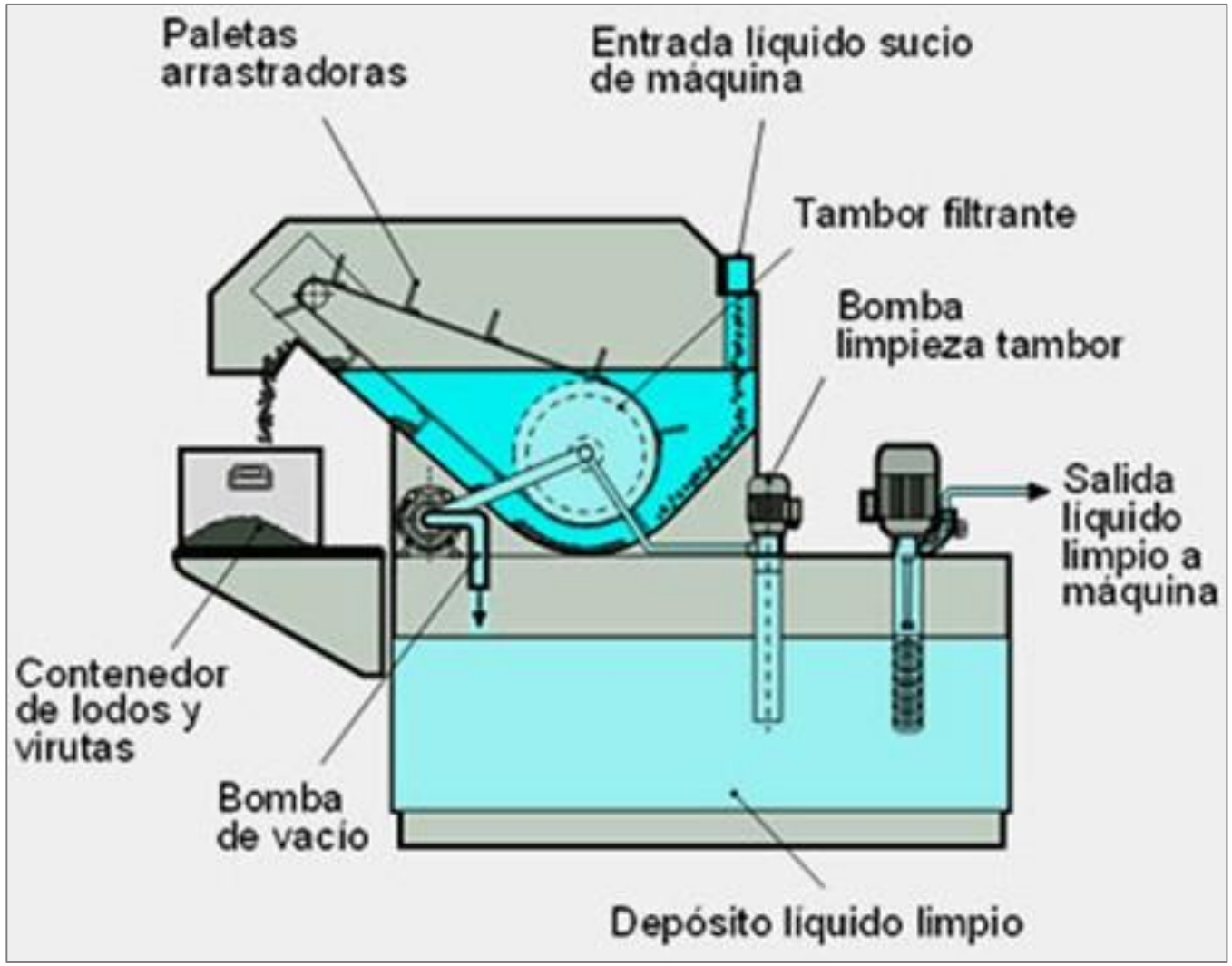


Figura 5: Esquema de un Filtro de Vacío

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Vacío_Capacidad / Eficiencia

La capacidad y eficiencia de los filtros de vacío en el procesamiento de relaves depende de varios factores, como el tamaño de partículas, el contenido de sólidos y la distribución granulométrica del relave.

Los aspectos claves incluyen:

- Alta capacidad: Los filtros de vacío pueden procesar grandes volúmenes de pulpa, siendo adecuados para operaciones de gran escala.
- Eficiencia de filtración: La eficiencia puede verse afectada por el contenido de finos y arcillas en los relaves, que pueden obstruir el medio filtrante.
- Consumo de energía: El sistema de vacío requiere un gasto energético moderado para mantener el flujo de aire necesario.
- Mantenimiento: Estos filtros necesitan un mantenimiento regular para evitar el taponamiento del medio filtrante y asegurar su eficiencia.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Vacío_Limitaciones

- Sensibilidad a finos y arcillas: La presencia de partículas finas y arcillas puede reducir la eficiencia del filtro debido al taponamiento del medio filtrante.

- Limitación en la reducción de humedad: En comparación con otros tipos de filtros, los filtros de vacío suelen dejar un contenido de humedad más alto en la torta, lo cual puede ser un inconveniente en climas secos.

- Requerimientos de mantenimiento: Los filtros de vacío requieren una limpieza frecuente del medio filtrante para evitar obstrucciones.

- Restricciones en aplicaciones de alto requerimiento: En casos donde se necesita una mayor eficiencia de secado, pueden no ser la mejor opción.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Disco Cerámico

Los filtros de disco cerámico utilizan una membrana cerámica microporosa que permite la separación sólida-líquida en suspensión de relaves.

Cada disco está compuesto de segmentos recubiertos por una capa cerámica que facilita el paso de agua a través de microporos, reteniendo las partículas sólidas en la superficie.

Durante la operación, el vacío aplicado permite que el líquido pase a través de la membrana, formando una torta de relave en la superficie del disco.



Figura 6 y 7: Filtro de Discos Cerámicos

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Disco Cerámico_Ciclo de Filtrado

ETAPA 1 : FORMAR LA TORTA

En esta fase inicial, el disco cerámico gira y se sumerge en la suspensión de relaves.

La aplicación de un vacío en la superficie del disco permite que el agua pase a través de los microporos de la membrana cerámica, reteniendo los sólidos en la superficie.

Los sólidos suspendidos se acumulan, formando una capa llamada "torta". Esta capa de sólidos se adhiere a la superficie del disco, aumentando su grosor a medida que el disco continúa rotando en la suspensión.

ETAPA 2 : DRENAJE

A medida que el disco sale de la suspensión, se inicia la fase de drenaje, donde el vacío sigue extrayendo agua de la torta de relaves.

Este proceso de deshidratación adicional es crucial para reducir el contenido de humedad de la torta a niveles óptimos.

La estructura porosa de la membrana cerámica permite una rápida extracción del líquido restante, preparando la torta para la siguiente fase

ETAPA 3: DESCARGA

Una vez que la torta ha alcanzado la zona de descarga, se emplea un sistema de soplado o cuchillas para retirar la torta del disco.

La torta desprendida se recoge y se transporta para su disposición final o almacenamiento.

El disco cerámico, libre de sólidos, vuelve a sumergirse en la suspensión, iniciando nuevamente el ciclo de filtrado.

La rotación del disco permite el desplazamiento de los segmentos a través de la suspensión, facilitando la captura de sólidos y su secado progresivo en la superficie

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Disco Cerámico



Figura 8: Filtro de Discos Cerámicos

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Disco Cerámico_Capacidad y Eficiencia

- Los filtros de disco cerámico son conocidos por su alta eficiencia en la recuperación de agua en comparación con otros tipos de filtros de vacío (tambor).
- Adecuados para operaciones de gran escala debido a su capacidad de manejar altos volúmenes de relaves con bajos contenidos de agua en la torta final.
- La eficiencia de estos filtros se ve afectada por variables como la concentración de sólidos, el tamaño de partícula y la naturaleza de las arcillas presentes en los relaves.
- Estos filtros tienen una eficiencia de filtrado que permite reducir el contenido de humedad a niveles mínimos, lo que contribuye a la estabilidad del material filtrado en el almacenamiento en seco.
- Alta pureza en el líquido filtrado.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros de Disco Cerámico_Limitaciones

- La principal limitación de los filtros de disco cerámico es su susceptibilidad a la obstrucción de los poros en la membrana, especialmente en relaves con alto contenido de arcillas finas. Su eficiencia puede reducirse en presencia de partículas muy finas que tienden a bloquear los microporos, lo cual requiere limpiezas frecuentes o regeneración de las membranas.

- Costos de Mantenimiento; Debido a su estructura específica y al material cerámico, los costos de mantenimiento y reemplazo de discos pueden ser altos, en comparación con otros tipos de filtros.

- Es necesario un monitoreo continuo para evitar daños en los segmentos cerámicos, y asegurar una operación sostenible a largo plazo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa

Los filtros prensa son dispositivos de separación sólido-líquido ampliamente utilizados en la gestión de relaves mineros.

Operan aplicando presión para forzar el paso del líquido a través de una tela filtrante, dejando atrás una "torta" de sólidos deshidratada.



Figura 9: Filtro de Prensa

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa_Ciclo de Trabajo

ETAPA 1 : LLENADO

En esta etapa, la suspensión de relave, que es una mezcla de sólidos y líquidos, es bombeada a las cámaras del filtro prensa. Las cámaras están formadas por placas filtrantes que están revestidas con una tela filtrante.

Una bomba de alta presión impulsa la suspensión de relave al interior del filtro prensa, llenando cada una de las cámaras. La suspensión se distribuye de manera uniforme en todas las cámaras para asegurar un llenado homogéneo.

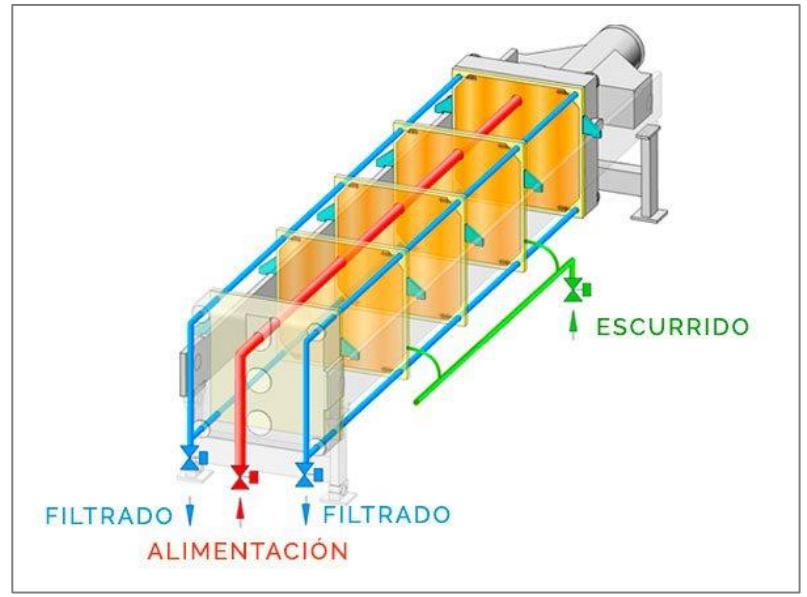


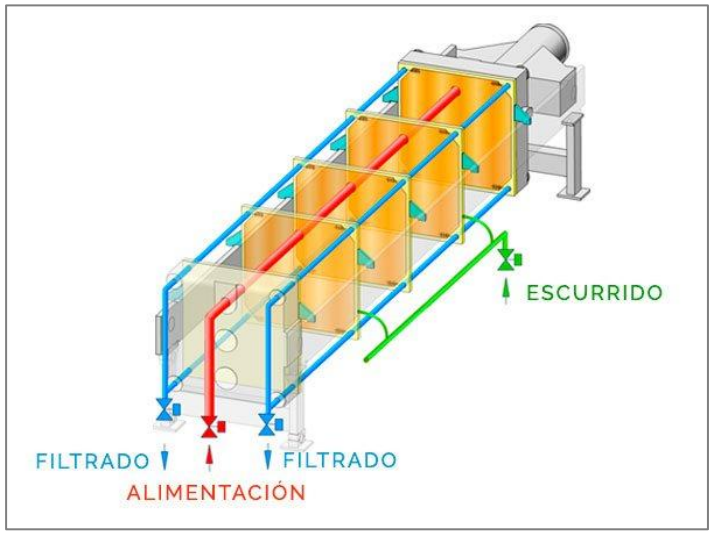
Figura 10: Funcionamiento de Filtro de Prensa

- Distribución Uniforme: La correcta distribución de la suspensión es fundamental para un proceso de filtración eficiente y evitar que se formen vacíos o espacios sin material en las cámaras.
- Calidad de la Suspensión: Factores como la concentración de sólidos, el tamaño de las partículas y el contenido de arcillas en el relave pueden influir en la eficiencia del llenado y el proceso de filtración en general.
- Control de Velocidad: Una velocidad de llenado adecuada evita que se ejerza presión excesiva, lo cual podría dañar las telas o afectar la estructura de las placas.

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa

ETAPA 2: FILTRACIÓN



En la etapa de filtración, el líquido es forzado a través de las telas filtrantes, mientras que los sólidos quedan retenidos dentro de las cámaras, formando una "torta".

Una vez que las cámaras están llenas, se aplica presión hidráulica o neumática para impulsar el líquido a través de las telas.

Retención de Sólidos: Los sólidos, incapaces de pasar a través de la tela, comienzan a acumularse y se consolidan en una torta de mayor densidad.

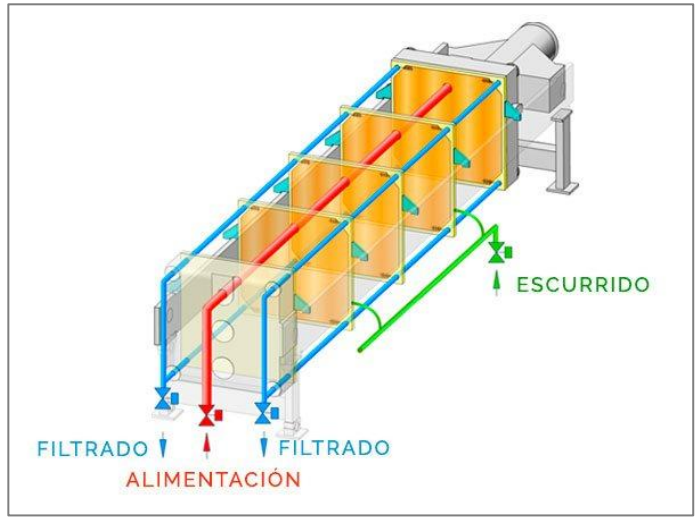
- Aplicación de Presión Controlada: La presión debe ser suficiente para expulsar el líquido sin romper las telas ni desgastar las placas.
- Retención de Sólidos: Las telas capturan las partículas sólidas, formando gradualmente una torta de alta densidad que retiene cada vez menos agua.
- Factores de Eficiencia: La eficiencia de la filtración depende del tamaño de las partículas y de la naturaleza de los sólidos (especialmente si hay arcillas), ya que pueden afectar la permeabilidad de las telas.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa

ETAPA 3: PRENSADO



En la etapa de prensado, se incrementa la presión sobre las placas del filtro para eliminar la mayor cantidad posible de agua de la torta de sólidos.

Una vez formada la torta inicial, se aplica una presión adicional que ayuda a comprimir los sólidos y extraer agua residual.

Compactación de la Torta: La alta presión compacta la torta, reduciendo el contenido de agua hasta un nivel óptimo.

- Aumento Gradual de la Presión: La presión se incrementa progresivamente para evitar daños a las placas y a las telas.
- Compactación de la Torta: El prensado mejora la sequedad de la torta, lo que es esencial en la gestión de relaves para reducir el volumen de agua a manejar.
- Control de Variables: La presión aplicada y el tiempo de prensado son factores críticos para optimizar la eficiencia de la deshidratación de la torta sin comprometer la durabilidad del equipo.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

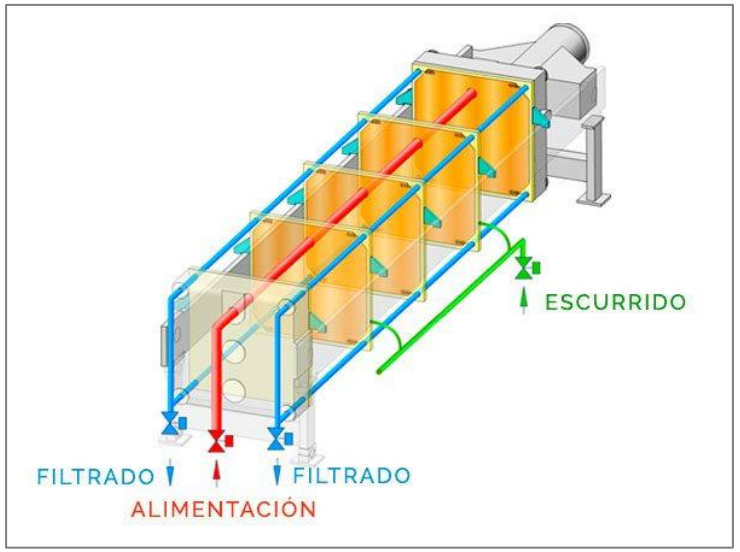
Filtros Prensa

ETAPA 4: DESCARGA

En esta última etapa, las cámaras del filtro se abren y la torta deshidratada de sólidos es descargada.

Las placas se separan, permitiendo la caída de la torta de sólidos (Apertura de las cámaras).

Remoción de la Torta: La torta cae por gravedad o es removida de forma manual/mecánica si es necesario, quedando lista para su disposición.



- Apertura Controlada de las Cámaras: Las placas se abren automáticamente, permitiendo que la torta se descargue sin necesidad de intervención manual.
- Remoción de la Torta: Dependiendo del diseño del equipo, la torta puede caer por gravedad o requerir algún sistema mecánico de ayuda.
- Preparación para el Próximo Ciclo: La rapidez y efectividad de la descarga determinan la eficiencia del filtro y la preparación para el próximo ciclo de llenado.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa_Componentes

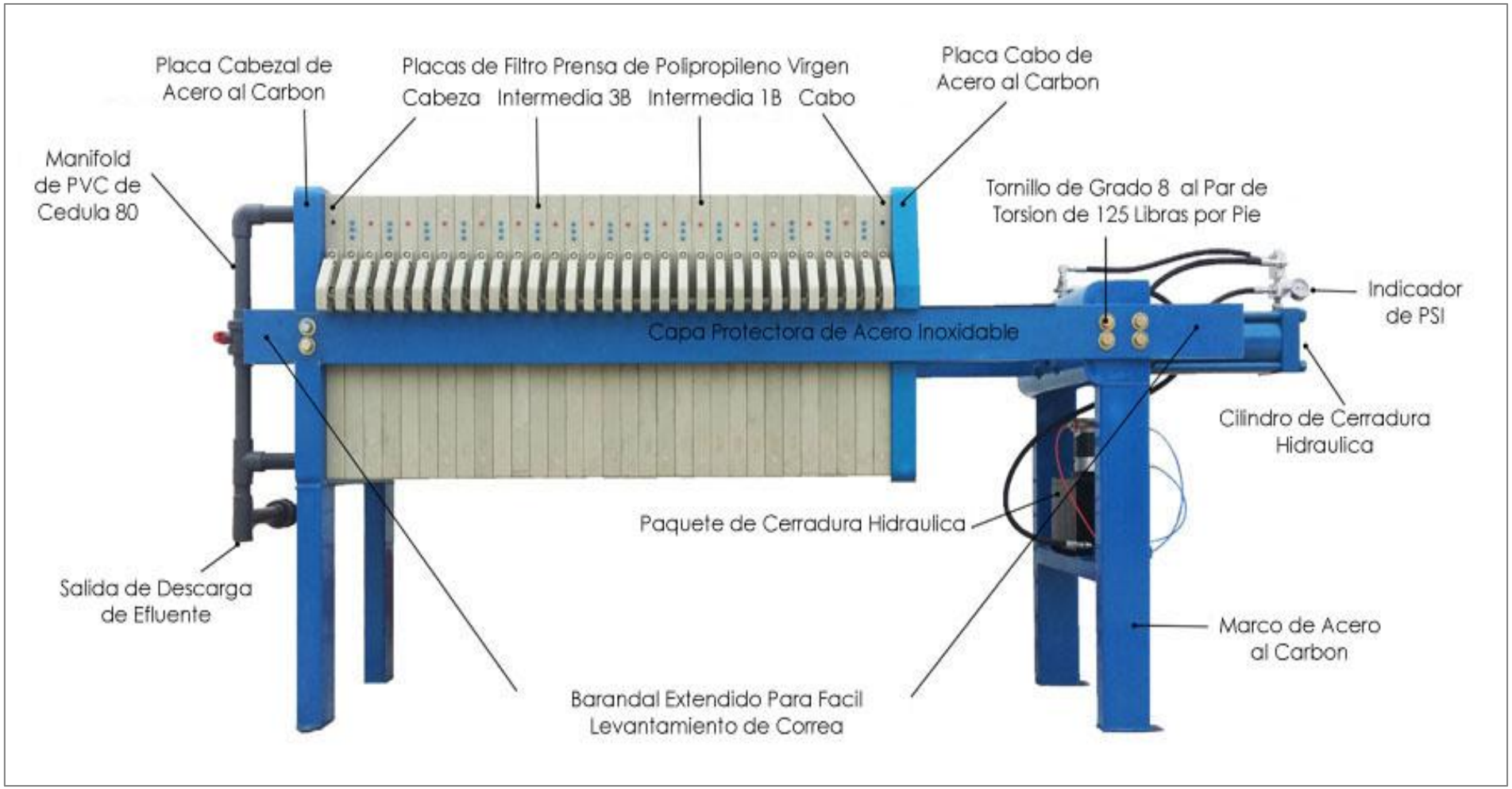


Figura 11: Componentes de un Filtro de Prensa

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa



Figura 12: Filtro de Prensa Industrial

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa_Capacidad / Eficiencia

- Los filtros prensa pueden manejar volúmenes significativos de relaves, pero su capacidad depende del número de placas, el tamaño de las cámaras y la presión aplicada.
- Ideal para operaciones donde se requiere una deshidratación profunda de los relaves, produciendo tortas con bajo contenido de humedad.
- Eficientes en la remoción de agua, logrando tortas de alta sequedad (usualmente entre 80-90% de sólidos).
- La eficiencia también depende del tipo de relave, el tamaño de las partículas y el contenido de arcillas.

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías en Filtración de Relaves

Filtros Prensa_Limitaciones

- Tiempo de Ciclo Largo: Cada ciclo de filtración puede tomar tiempo considerable, reduciendo el rendimiento en operaciones de gran volumen.
- Mantenimiento: Las placas filtrantes y las telas requieren mantenimiento frecuente para evitar obstrucciones y garantizar una eficiencia constante.
- Alto Costo de Energía: La operación de alta presión y el consumo energético pueden ser elevados, afectando la rentabilidad en algunos casos.
- Condiciones del Material: Los filtros prensa tienen una menor eficiencia con relaves que contienen altas concentraciones de arcillas o partículas finas, ya que estas pueden obstruir las telas y reducir la tasa de filtración.

RelaveNet
A Community of Excellence

Filtros en la Industria



Figura 13: Filtro de Prensa Vertical de relaves filtrados Minera Tambos de Oro



Figura 14: Filtros Cerámicos de relaves filtrados Minera Tambillos



Figura 15: Planta de filtros en Minera Tambomayo

RelaveNet
A Community of Excellence

Comparación de uso de Tecnologías de Filtración de Relaves

Tabla 1: Comparación tipos de filtros

Tipo de Filtro	Capacidad de Filtrado	Eficiencia de Secado	Costos Operativos	Aplicación Ideal	Limitaciones
Filtro de Vacío	Rango de capacidad media a alta, adecuado para operaciones continuas con bajo contenido de sólidos.	Baja a moderada; alta humedad residual en comparación con otros filtros.	Relativamente bajos; moderado consumo energético.	Ideal para relaves de partículas gruesas y homogéneas; menor presencia de arcillas.	Limitado en eficiencia de secado; no es ideal para partículas muy finas o con alta presencia de arcillas.
Filtro de Disco Cerámico	Alta capacidad, particularmente eficiente en manejo de partículas finas y altas densidades.	Alta eficiencia, alcanza humedad residual baja, ideal para obtener tortas secas.	Moderado a alto; requiere mantenimiento constante en discos.	Eficaz para partículas finas y condiciones donde se requiere una torta seca.	Requiere condiciones controladas para evitar obstrucción de discos; limitado en ambientes con alta abrasión.
Filtro Prensa	Alta capacidad, generalmente en sistemas de batch, con alta presión para sólidos.	Muy alta; puede reducir significativamente la humedad en la torta.	Alto, debido a la presión requerida y el mantenimiento complejo.	Óptimo para relaves con alta presencia de sólidos y arcillas que requieren baja humedad residual.	Operación en batch puede limitar la capacidad continua; alto costo de mantenimiento.

Comparación de uso de Tecnologías de Filtración de Relaves

Parámetros Operacionales de Referencia

Tabla 2: Parámetros Técnicos Típicos por Tipo de Filtro

Filtro	Sólidos en Torta	Capacidad (t/h)	Tiempo de Ciclo	Consumo Energético (kWh/t seca)	
Vacío (banda/disco)	65–75 %	Alta (hasta 200)	Continuo	Bajo a medio (~0.3–0.6)	
Cerámico	75–85 %	Media (30–100)	Semicontinuo	Bajo (~0.2–0.4)	
Prensa vertical	80–90 %	Media-baja (<60)	Lento	Alto (>1.0)	

RelaveNet
A Community of Excellence

Comparación de uso de Tecnologías de Filtración de Relaves

Desafíos a gran escala

Impacto de la Granulometría en la Eficiencia de Filtrado

La distribución de tamaño de partículas en los relaves afecta directamente la eficiencia de filtración. Las partículas finas, especialmente las arcillas, tienden a reducir la permeabilidad de la torta de filtro, afectando la velocidad de secado y aumentando el tiempo de filtración.

Un control preciso de la granulometría y un pretratamiento adecuado son esenciales para optimizar el rendimiento.

Necesidades de Infraestructura para Manejo de Grandes Volúmenes

Las operaciones a gran escala requieren una infraestructura robusta para soportar el volumen de relaves filtrados. Esto incluye sistemas de transporte de relaves, áreas de apilamiento en seco, y plantas de tratamiento de agua.

La capacidad de almacenamiento y manejo seguro de grandes volúmenes es un aspecto crítico para garantizar la sostenibilidad operativa.

Necesidades de mantenimiento calificado

Requerimientos Específicos de Mantenimiento y Personal Técnico: La operación continua de filtros a gran escala exige un mantenimiento especializado y constante.

Se necesita personal capacitado que pueda realizar intervenciones rápidas y efectivas, garantizando que el equipo funcione de manera óptima y evitando paradas no programadas que afecten la producción.

Comparación de uso de Tecnologías de Filtración de Relaves

Factores Críticos

Evaluación del Contenido de Sólidos y Eficiencia Deseada

Para seleccionar el tipo de filtro adecuado, es esencial considerar el contenido de sólidos de la suspensión de relaves y la eficiencia de secado deseada.

Filtros de prensa o discos cerámicos pueden ser preferibles en contextos que requieren alta eficiencia de secado, mientras que los filtros de vacío pueden ser adecuados para flujos con menor contenido de sólidos.

Consideraciones Ambientales y Costos a Largo Plazo

En operaciones de gran envergadura, los costos iniciales de instalación de filtros deben ser balanceados con los beneficios a largo plazo, como la reducción de consumo de agua y menor impacto ambiental.

La elección de tecnología debe considerar no solo el costo del equipo, sino también la eficiencia energética, la huella de carbono y los beneficios operacionales asociados al uso sostenible del recurso hídrico.

Variables Críticas en la Filtración de Relaves

Contenido sólidos, arcillas y tamaño partículas

El contenido de sólidos en los relaves influye directamente en la eficiencia y capacidad de los equipos de filtración.

Un contenido adecuado de sólidos permite la formación de una torta densa y estable, lo que mejora la eficiencia de separación sólido-líquido.

Para los filtros de vacío, filtros de disco cerámico y filtros prensa, un nivel alto de sólidos (aproximadamente 60-75%) es crucial para lograr una mayor retención de agua y minimizar el consumo energético en el proceso de filtración.

Importancia del Contenido de Sólidos, efectos en las diferentes Tecnologías de Filtración

Filtros de Vacío: Requieren un contenido de sólidos controlado para maximizar el rendimiento de la torta filtrante, que es crucial para operaciones de gran escala como en Cerro Lindo (Perú), donde el control de agua es esencial.

Filtros de Disco Cerámico: Operan mejor con relaves de alta densidad debido a su capacidad de formar tortas rígidas y de baja humedad residual, como se observa en Mantos Blancos (Chile), optimizando así el uso del agua.

Filtros Prensa: Estos equipos pueden manejar un amplio rango de contenido de sólidos y son efectivos para lograr tortas con menor contenido de humedad en relaves con alta carga de sólidos.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estudio de Kretser año 2018_Variables críticas

Enfatiza la necesidad de diseñar sistemas de filtración de relaves considerando la variabilidad en las condiciones de alimentación y los riesgos operacionales que pueden generar cuellos de botella en el procesamiento. El objetivo es identificar y mitigar los factores clave que podrían limitar la eficiencia de sistemas de apilamiento en seco de relaves, en particular la capacidad de los sistemas para enfrentar variaciones en las condiciones de los procesos anteriores o en las propiedades de los materiales de alimentación.

Tailings filtration: risk reduction through understanding and designing for variability

RG de Kretser *Acclarium Tailings and Solid-Liquid Separation Consulting, Australia*

Abstract

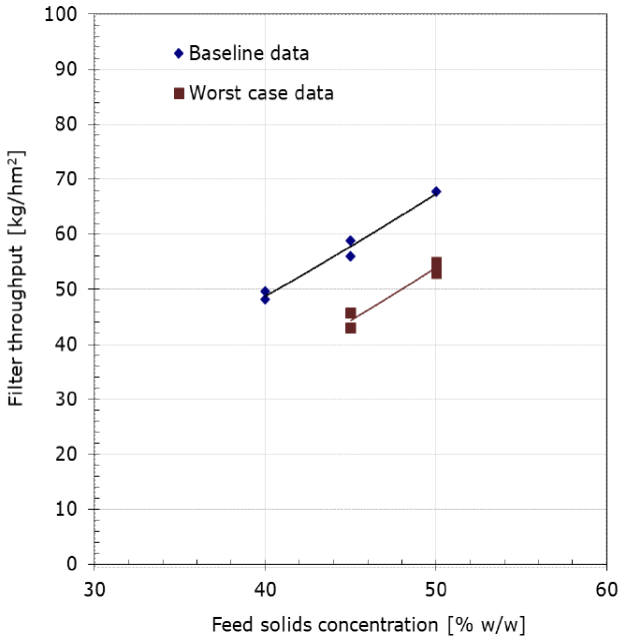
In the face of recent high-profile tailings dam failures there has been an increased focus on the consideration of tailings filtration and dry stacking systems as an alternative to conventional or thickened discharge-based tailings management systems. However, whilst the potential benefits of a filtered tailings system can be significant, for instance in terms of water efficiency and reduced geotechnical risk, the high capital cost of such systems means that significant process or environmental drivers must typically exist to justify the expense. Furthermore, whilst larger-scale filtered tailings installations are now being successfully operated, such as in the alumina industry, there have also been operations that encountered significant problems leading to the tailings management system constraining overall plant productivity.

3 Results

3.1 Baseline case at design feed solids concentration of 50% w/w

Modelling results for the baseline case red mud with a 50% w/w solids filter feed are presented in Table 2. The results are presented as a function of filling/pumping duration with the conceptual filter design profile, with a fill duration of around 250 seconds, highlighted. The results illustrate typical behaviour in that the thicker cake deposited after longer filling durations leads to a reduction in the time required for secondary filtration during the pressing stage. In the case of a filling duration of zero seconds, which effectively means that feeding of the press is stopped as soon as the cavities are filled with slurry, 199 seconds of the 300 second pressing stage will be associated with the process of secondary filtration, rather than actual active cake compaction. This raises the operational risk that insufficient cake compaction time is available to achieve a fully dewatered cake. Ensuring that the percentage of the press stage available for active pressing, as listed in Table 2, is above a threshold level is therefore useful in avoiding operational risk.

The actual acceptable minimum threshold percentage for active pressing will depend on the material properties of the substrate in question. In the case of this modelling exercise, active pressing percentages below 50% have arbitrarily been considered unacceptable. Most significant in the context of this conceptual exercise is how this parameter changes in response to variations in process conditions.



RelaveNet
A Community of Excellence

Propiedades Clave que Afectan la Filtración

1. **Concentración de Sólidos:**
    - Un mayor contenido de sólidos en el relave de alimentación (por ejemplo, 50% en peso) permite un mejor rendimiento del filtro, ya que minimiza los tiempos de prensado y mejora la formación de tortas más densas y compactas.
    - Una reducción en la concentración (por ejemplo, a 45% o 40%) incrementa el tiempo necesario para llenar y prensar, disminuyendo la productividad en un 30% o más.
2. **Tamaño de Partículas:**
    - Las partículas más finas, características de algunos tipos de relaves, incrementan la resistencia al flujo durante la filtración, disminuyendo las tasas de formación de torta.
    - Este comportamiento obliga a ajustar el diseño del filtro para evitar daños en las membranas y garantizar el espesor mínimo necesario para la operación eficiente.
3. **Arcillas y Minerales Asociados:**
    - Los materiales con alto contenido de arcillas suelen exhibir una baja deshidratabilidad debido a su mayor capacidad de retención de agua y menor permeabilidad.
    - Las arcillas también aumentan los riesgos de formación de tortas pegajosas o plásticas, dificultando las operaciones de manejo y transporte de material.

Impacto en el Diseño y Operación del Filtro

1. **Productividad del Filtro:**
    - Las simulaciones demuestran que la reducción en la concentración de sólidos o la presencia de materiales con baja capacidad de deshidratación reducen drásticamente la productividad.
    - En escenarios críticos, es necesario ajustar tanto el tiempo de llenado como el tiempo de prensado para alcanzar los parámetros mínimos operativos.
2. **Riesgos Operativos:**
    - Descargas de tortas con alta humedad pueden resultar en problemas de manejo y apilamiento.
    - La insuficiencia de diseño para manejar la variabilidad en las propiedades del material puede causar fallas frecuentes, afectando la disponibilidad del filtro y la producción global.
3. **Estrategias de Mitigación:**
    - **Capacidad de Filtrado Extra:** Incluir capacidad adicional en el diseño inicial o permitir futuras expansiones.
    - **Control Adaptativo:** Implementar sensores y sistemas que ajusten automáticamente los ciclos de operación.
    - **Blending de Materiales:** Mezclar relaves problemáticos con otros más manejables para minimizar el impacto negativo.
    - **Diseño de Placas Robusto:** Optar por filtros de membrana flexibles que toleren mejor la variabilidad en las condiciones del proceso.

RelaveNet
A Community of Excellence

Resultados del modelado de filtración a presión para el caso base con un 50% de sólidos en la alimentación.

50% w/w

Fill/ pumping (s)	Cake deposited after fill (m)	Press (s)	Secondary filtration time (s)	Total cycle duration (s)	Final cake thickness (m)	Cavity utilisation (%)	Active pressing (%)	Throughput (kg/m²hr)
0	0.0000	300	199	660	0.0221	63.1	33.5	71.4
110	0.0150	300	187	770	0.0262	75	37.7	72.7
174	0.0200	300	164	834	0.0276	78.9	45.4	70.6
252	**0.0250**	**300**	**131**	**912**	**0.0290**	**82.9**	**56.4**	**67.8**
344	0.0300	300	88	1,004	0.0304	86.8	70.5	64.6
449	0.0350	300	36	1,109	0.0318	90.8	87.9	61.1

45% w/w

Fill/ pumping (s)	Cake deposited after fill (m)	Press (s)	Secondary filtration time (s)	Total cycle duration (s)	Final cake thickness (m)	Cavity utilisation (%)	Active pressing (%)	Throughput (kg/m²hr)
0	0.0000	300	214	660	0.019	54.3	28.8	61.4
150	0.0150	300	209	810	0.024	69	30.5	63.6
235	**0.0200**	**300**	**184**	**895**	**0.026**	**73.9**	**38.7**	**61.6**
338	0.0250	300	147	998	0.028	78.8	50.8	58.9
459	0.0300	300	100	1,119	0.029	83.7	66.8	55.8
598	0.0350	300	40	1,258	0.031	88.6	86.6	52.5
Adjusted cycle to meet cavity and pressing constraints								
235	0.0200	390	184	985	0.026	73.9	52.9	56

40% w/w

Fill/ pumping (s)	Cake deposited after fill (m)	Press (s)	Secondary filtration time (s)	Total cycle duration (s)	Final cake thickness (m)	Cavity utilisation (%)	Active pressing (%)	Throughput (kg/m²hr)
0	0.0000	300	219	660	0.016	46.2	26.9	52.2
248	**0.0175**	**300**	**212**	**908**	**0.023**	**66.4**	**29.2**	**54.5**
369	0.0225	300	181	1,029	0.025	72.1	39.7	52.3
511	0.0275	300	136	1,171	0.027	77.9	54.5	49.6
676	0.0325	300	79	1,336	0.029	83.7	73.8	46.7
862	0.0375	300	8	1,522	0.031	89.4	97.4	43.8
Adjusted cycle to meet cavity and pressing constraints								
369	0.0225	390	181	1,119	0.025	72.1	53.6	48.1

Conclusiones y Desafíos Futuros

- **Conclusiones:**
  - La gestión eficiente de relaves filtrados depende de un diseño integral que considere la variabilidad en el tamaño de partículas, contenido de sólidos y características mineralógicas.
  - Los modelos de simulación son herramientas esenciales para anticipar y mitigar riesgos operativos, optimizando la selección del equipo y los parámetros de operación.
- **Desafíos Futuros:**
  - Desarrollo de tecnologías avanzadas de filtración que permitan manejar materiales con características extremas de baja des hidratabilidad.
  - Implementación de inteligencia artificial para predecir y ajustar en tiempo real las condiciones del proceso.
  - Mayor integración de estudios reológicos y pruebas de manejo de torta para garantizar la sostenibilidad operativa a largo plazo.

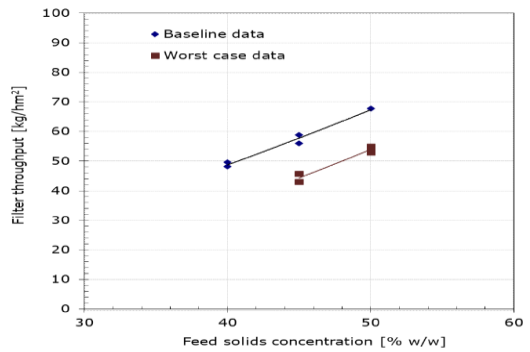


Figure 3 Comparison of filter throughput for baseline and worst case red mud as a function of filter feed solids concentration

RelaveNet A Community of Excellence

Selección de Tecnologías de Filtración

Filtros de Vacío

Aplicación Ideal: Recomendados para relaves con baja carga de sólidos y partículas finas en zonas con disponibilidad moderada de agua.

Ventajas: Bajo consumo de energía y operación continua; eficiencia adecuada en relaves de granulometría fina y contenido de sólidos limitado.

Limitaciones: Menor eficiencia en tortas de alta densidad y limitada retención de agua en comparación con otros filtros.

Filtros de Disco Cerámico

Aplicación Ideal: Adecuados para relaves con alta densidad y granulometría media a gruesa; ideales en proyectos con requisitos de bajo contenido de humedad en tortas.

Ventajas: Alta retención de agua y bajos costos de mantenimiento; excelente opción en regiones con restricciones hídricas severas.

Limitaciones: Sensibles a la obstrucción por partículas finas y arcillas, lo que puede requerir pretratamientos.

Filtros Prensa

Aplicación Ideal: Relaves con alto contenido de sólidos y presencia de arcillas, especialmente en operaciones de gran escala donde se requiere una torta de alta densidad.

Ventajas: Capacidad de manejar relaves difíciles con alto contenido de sólidos y buena eficiencia en la retención de humedad.

Limitaciones: Mayor consumo de energía y ciclos de operación más largos.

RelaveNet
A Community of Excellence

Selección de Tecnologías de Filtración

Criterios Técnicos para la Selección de Filtros

La selección óptima de tecnología de filtrado debe considerar múltiples variables operacionales, de alimentación y metas de disposición de relaves.

- Contenido de sólidos en la alimentación
  Filtros prensa y cerámicos son preferibles para sólidos >65%.

- Granulometría y contenido de arcillas
  Los filtros de vacío presentan menor eficiencia con finos y arcillas.

- Objetivo de humedad en la torta filtrada
  Filtros prensa permiten bajar humedad hasta 10–15%.

- Capacidad de procesamiento (t/h)
  Filtros de vacío tienen mayor rendimiento continuo para gran volumen.

- Disponibilidad hídrica
  Cerámicos y prensa maximizan recuperación de agua.

- Costo energético y tiempo de ciclo
  Filtros de vacío: bajo consumo energético, operación continua.
  Filtros prensa: alta presión, mayor consumo, ciclos largos.

RelaveNet
A Community of Excellence

Automatización - Monitoreo y Apilamiento en Seco

La **filtración automatizada** representa una innovación clave en el manejo eficiente de relaves filtrados. Este proceso integra tecnologías avanzadas como filtros prensa y filtros cerámicos con sensores inteligentes que monitorean y ajustan parámetros críticos de manera autónoma.

- Equipados con sensores para controlar la presión aplicada, permitiendo un ciclo de filtración optimizado y reducción de tiempos muertos.
- Los sensores de humedad integrados evalúan la cantidad de agua extraída en tiempo real, asegurando que el contenido de humedad final cumpla con las especificaciones requeridas para el apilamiento seco.
- Utilizan materiales porosos avanzados que mejoran la retención de sólidos y la calidad del agua recuperada.
- Estos sistemas incluyen controladores de flujo automático que optimizan la capacidad de filtración y reducen el desgaste mecánico.



Figura 16: Automatización filtros prensa

Automatización en Filtración y Apilamiento en Seco

El apilamiento en seco automatizado es una solución tecnológica clave para optimizar la disposición de relaves filtrados, mejorando la seguridad operativa y la eficiencia.

Este proceso implica el uso de sistemas mecánicos y digitales avanzados para la deposición, compactación y monitoreo en tiempo real del material seco.

- Correas transportadoras inteligentes: Equipadas con sensores que ajustan automáticamente la velocidad y el flujo de material según las condiciones del apilamiento.

- Transportadores móviles: Permiten una distribución precisa del relave seco en áreas específicas, asegurando una compactación uniforme.



Figura 17: Correas y transportadores móviles automatizados

Automatización - Monitoreo y Apilamiento en Seco

- **Control de Compactación Automatizado**
  Los rodillos compactadores están equipados con sistemas de medición de densidad en línea, lo que permite ajustar la presión en tiempo real para garantizar la estabilidad estructural de las pilas.

- **Monitoreo de humedad residual**
  Ayuda a mantener el contenido de agua dentro de límites óptimos para maximizar la resistencia del material apilado.

- **Monitoreo de Estabilidad**
  Sensores in situ, como inclinómetros y piezómetros, están integrados para evaluar la estabilidad de las pilas en tiempo real, detectando deformaciones o cambios críticos en la presión intersticial.

- **Automatización Robótica en la Disposición**
  Sistemas robóticos guiados por GPS permiten una disposición precisa y eficiente del material en pilas con pendientes controladas. Estos robots están programados para optimizar el espacio y reducir la necesidad de intervención humana en áreas de alto riesgo.

Automatización - Monitoreo y Apilamiento en Seco

Ventajas

- Incremento en la productividad y reducción de costos operativos.
- Mayor uniformidad en la calidad del filtrado, clave para la estabilidad de las pilas secas.
- Capacidad de respuesta inmediata ante variaciones en las condiciones del proceso.
- Reducción de riesgos operativos asociados al manejo manual de relaves.
- Incremento en la capacidad de disposición y mejor control sobre las propiedades mecánicas del material.
- Menor impacto ambiental al evitar la dispersión de partículas finas durante el proceso de apilamiento.

RelaveNet
A Community of Excellence

Riesgos Operacionales y Buenas Prácticas

Riesgos

- Variabilidad en el relave: cambios en granulometría afectan tiempo de filtrado.
- Obstrucción de medios filtrantes: especialmente en presencia de arcillas.
- Fallas en automatización: sensores no calibrados generan errores de operación.
- Mantenimiento deficiente: reduce vida útil del filtro y calidad del producto.
- Sobrepresión en filtros prensa: puede dañar placas o romper telas.

Buenas Prácticas

- Realizar caracterización mineralógica y granulométrica previa.
- Implementar sistemas de limpieza automática para membranas y telas.
- Monitoreo en línea de presión, caudal y humedad.
- Mantención programada y revisión de protocolos de seguridad.
- Pruebas piloto para validar parámetros operacionales antes de la compra.

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos de Estudio apliación Automatización y Monitoreo

Tambomayo - Peru

"Implementación de sensores de presión y vibración para monitorear estabilidad".

El proyecto minero Tambomayo, ubicado en Perú, es un ejemplo destacado de la implementación de tecnologías avanzadas para el monitoreo y la mejora de la estabilidad en TSF de relaves filtrados. En este caso, se ha integrado un sistema de sensores de presión y vibración, diseñados para operar en tiempo real y proporcionar datos críticos sobre la estabilidad estructural de las pilas secas.

1.Sensores de Presión

Monitorean los cambios en la presión intersticial dentro del material apilado, ayudando a identificar posibles saturaciones o acumulaciones de agua no previstas.

Los datos recolectados son fundamentales para ajustar las operaciones de apilamiento y mejorar el drenaje si es necesario.

2. Sensores de Vibración

Detectan vibraciones inducidas por actividades operativas o eventos externos, como sismos, que puedan comprometer la estabilidad de las pilas. Estos sensores también monitorean desplazamientos o deformaciones a nivel estructural, permitiendo respuestas inmediatas.

Beneficios Observados

- Incremento significativo en la seguridad operativa al prevenir fallas antes de que ocurran.
- Mejora en la eficiencia del apilamiento gracias al monitoreo constante y en tiempo real de las condiciones estructurales.
- Reducción de los costos de mantenimiento debido a la identificación temprana de riesgos potenciales.

Casos de Estudio apliación Automatización y Monitoreo

Mantos Blancos -Chile

"Uso de filtros cerámicos automatizados y sistemas de recuperación hídrica".

El proyecto Mantos Blancos, ubicado en la región de Antofagasta, Chile, se ha convertido en un caso de estudio ejemplar por su implementación de tecnologías avanzadas en la gestión de relaves filtrados. Este proyecto destaca por el uso de filtros cerámicos automatizados y sistemas integrados de recuperación hídrica que han optimizado tanto la estabilidad de las pilas secas como el aprovechamiento del agua en un entorno árido.

1. Filtros Cerámicos Automatizados

Los filtros cerámicos en MB utilizan membranas porosas de alta eficiencia que separan sólidos y líquidos con un mínimo consumo energético. Su automatización permite ajustar dinámicamente las condiciones de operación (presión y flujo) en respuesta a las variaciones en las características del material alimentado.

Impacto: Mejora la homogeneidad del relave seco, lo que facilita el apilamiento y reduce riesgos de inestabilidad estructural.

2. Sistemas de Recuperación Hídrica

Incorporan circuitos cerrados de recuperación de agua que optimizan el re-uso dentro del proceso, reduciendo la dependencia de fuentes externas.

Impacto: Disminuye la huella hídrica y asegura la sostenibilidad operativa en una de las zonas más áridas del planeta.

Beneficios Operativos:

- Incremento de la capacidad de filtración en un 30% gracias a la automatización.
- Reducción del contenido de humedad en el material final, mejorando la seguridad en el apilamiento.
- Integración de sensores de monitoreo en tiempo real, lo que permite ajustes preventivos y correctivos.

Casos de Estudio apliación Automatización y Monitoreo

Pilbara - Australia

"Apilamiento seco controlado por inteligencia artificial, reduciendo costos y mejorando la sostenibilidad".

La región de Pilbara, en Australia Occidental, representa un caso avanzado en la implementación de tecnologías para la gestión sostenible de relaves filtrados. Este proyecto destaca por su **apilamiento seco automatizado**, controlado por inteligencia artificial (IA), lo que ha permitido optimizar los procesos operativos y mejorar significativamente la sostenibilidad ambiental.

1. Apilamiento Seco Controlado por IA:
El sistema emplea algoritmos avanzados de inteligencia artificial para supervisar y ajustar dinámicamente el apilamiento de los relaves secos. Este enfoque incluye el análisis en tiempo real de variables clave como humedad, compactación y estabilidad estructural, reduciendo riesgos asociados a deslizamientos o asentamientos.

Impacto: Reducción de costos operativos gracias a una gestión eficiente del apilamiento y minimización de intervenciones manuales. Mejora de la estabilidad estructural mediante un control preciso de la geometría y compactación de las pilas.

2. Sostenibilidad Operativa:
Optimización hídrica: La recuperación del agua en el proceso previo de filtración reduce la demanda de agua fresca, mitigando el impacto ambiental en una región árida como Pilbara.

Reducción de emisiones: La automatización disminuye el uso de maquinaria pesada en el apilamiento, contribuyendo a menores emisiones de carbono.

Beneficios Operativos y Ambientales:

- Incremento del rendimiento en un 25% debido a la reducción de errores humanos y la optimización continua del apilamiento.
- Mayor seguridad en las operaciones gracias al monitoreo constante de parámetros críticos.

Conclusiones

Relevancia de los Relaves Filtrados

Los relaves filtrados constituyen una tecnología de vanguardia para la disposición segura, sostenible y eficiente de residuos mineros, al permitir un manejo en seco, con alto contenido de sólidos (>80%) y excelente comportamiento geotécnico, especialmente en zonas sísmicas o con escasez hídrica.

Criterios Críticos en la Selección Tecnológica

La elección entre filtros de vacío, disco cerámico o prensa debe realizarse considerando:

- Contenido de sólidos en la pulpa
- Distribución granulométrica y contenido de arcillas
- Meta de humedad final en la torta
- Condiciones climáticas y disponibilidad de agua
- Rendimiento esperado (t/h) y costo energético asociado

Cada tecnología presenta ventajas y limitaciones que deben alinearse con el contexto operativo de cada faena.

Automatización como Pilar Operacional

La integración de sensores de presión, humedad y estabilidad estructural junto a sistemas de control automatizados permite:

- Optimizar los ciclos de filtración y descarga
- Estabilizar la calidad del relave seco
- Monitorear y anticipar fallas estructurales
- Aumentar la eficiencia y seguridad operativa del sistema de disposición

Conclusiones

Riesgos y Buenas Prácticas

Para asegurar un desempeño sostenido y evitar cuellos de botella, es indispensable:

- Caracterizar mineralógica y granulométricamente el relave
- Implementar rutinas de mantenimiento preventivo
- Validar parámetros en planta piloto antes de escalar
- Capacitar al personal técnico en operación y respuesta a eventos

Casos de Éxito como Referente Industrial

Los proyectos **Tambomayo, Mantos Blancos y Pilbara** ilustran cómo una implementación bien diseñada de filtración y apilamiento automatizado:

- Mejora la estabilidad geotécnica
- Aumenta la recuperación hídrica
- Reduce riesgos ambientales y operacionales
- Genera aprendizajes transferibles a otros contextos mineros

Visión Futura y Transformación Digital

El desarrollo futuro se orienta a depósitos de relaves filtrados completamente autónomos, con:

- Modelos predictivos basados en inteligencia artificial
- Sistemas inteligentes de apilamiento y monitoreo estructural
- Optimización adaptativa frente a cambios operacionales y climáticos

RelaveNet
A Community of Excellence

Gracias por su Atención

RelaveNet
A Community of Excellence