Gestión Operativa y Mantenimiento de Depósitos de Relaves

Módulo 2

Relaves Espesados, en Pasta y Filtrados

- **Alejandro Villalobos**

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

RelaveNet
A Community of Excellence

Indice Temático



Figura 1: Planta de Filtrado
(Espesamiento-Filtros-Acopio-Transporte)

- Definición y características de relaves espesados, en pasta y filtrados.
- Ventajas y desventajas de cada tecnología.
- Procesos de espesamiento y filtración: Principios básicos.
- Casos de estudio de implementación de relaves en pasta y filtrados.
- Impacto en la operación, costos y sostenibilidad del proyecto.

❑

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

Contexto y Objetivos Específicos

La gestión moderna de relaves exige tecnologías más eficientes en agua y con menor riesgo geotécnico. Este módulo profundiza en las tecnologías de disposición de **relaves espesados, en pasta y filtrados**, dando continuidad a las definiciones generales tratadas en el Módulo 1.

Objetivos específicos

- Comprender los principios básicos de los procesos de espesamiento y filtración.
- Identificar ventajas, desventajas e impactos de cada tecnología.
- Revisar casos reales de implementación y evaluar su aplicabilidad.
- Analizar el efecto de estas tecnologías en la sostenibilidad hídrica y ambiental.

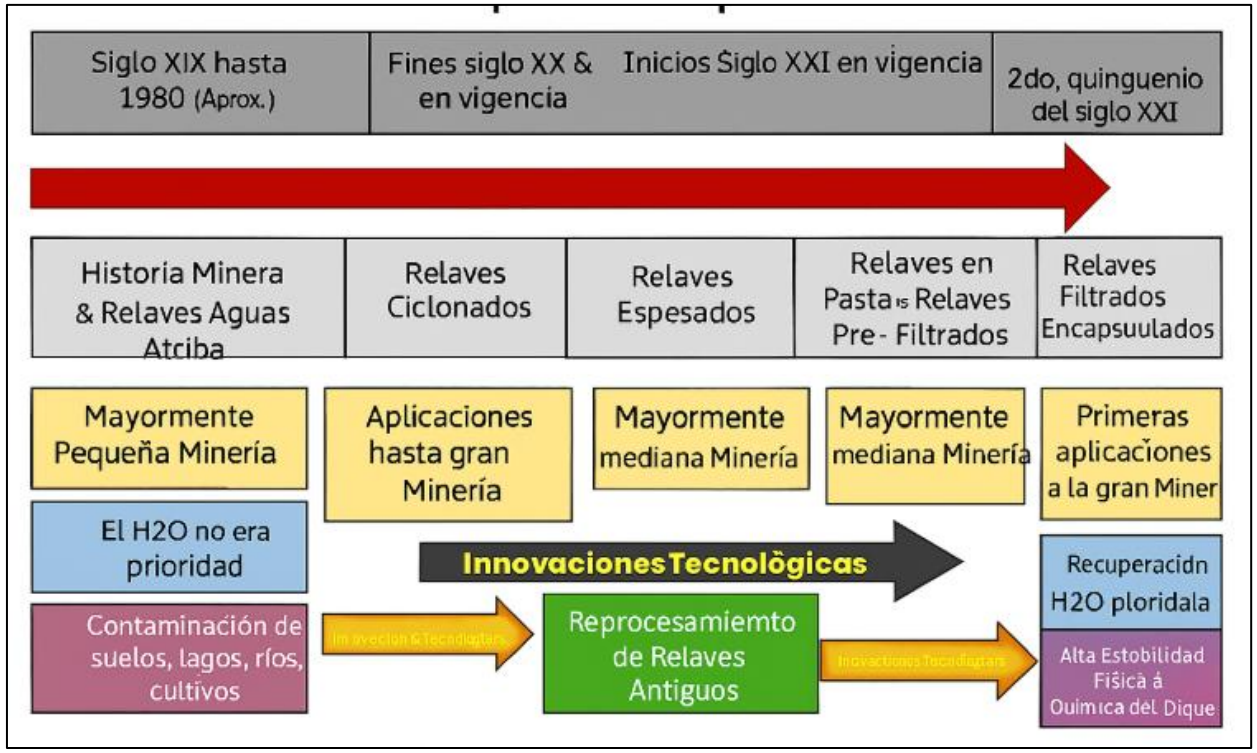


Figura 2: Evolución del Tipo de Relaves

Definición y Características de Relaves

Relaves Convencionales

Los relaves convencionales representan el enfoque clásico de disposición de residuos mineros, caracterizados por su baja concentración de sólidos y su comportamiento de flujo libre.

Este tipo de relave requiere transporte hidráulico a través de canaletas o tuberías, y se deposita en tranques con grandes superficies de embalse. Debido a su alta humedad, no generan pendiente estable y presentan un riesgo importante de licuefacción si no se manejan adecuadamente.

Su clasificación se realiza con base en parámetros como:

- contenido de sólido
- esfuerzo de cedencia
- reología del material





Figura 3: Sistema de distribución "Spigots" en TSF convencional; Ignacio Bazán (2020)

Definición y Características de Relaves

Relaves Convencionales

- Bajo contenido de sólidos: 30–50%
- Flujo tipo Newtoniano, alta fluidez
- Transporte hidráulico por gravedad o bombeo
- No generan auto-sustentación en el depósito
- Alta evaporación y elevada área de embalse
- Mayor riesgo de licuefacción en caso de falla estructural



Figura 4: TSF Minera Escondida

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

Relaves Espesados

Los relaves espesados representan una evolución técnica respecto a los convencionales, con un contenido de sólidos superior; esta condición reduce la cantidad de agua libre, permitiendo un transporte hidráulico con comportamiento no Newtoniano y la formación de pendientes suaves en el depósito.

El relave espesado requiere un control reológico preciso para garantizar su estabilidad en canaletas o cañerías, y para lograr una deposición más estructurada.

Su diseño debe considerar el esfuerzo de cedencia (yield stress), ya que un aumento excesivo puede dificultar el transporte.

Esta tecnología permite reducir el área de embalse y mejorar la recuperación de agua, aunque mantiene ciertos desafíos operacionales, especialmente en climas fríos o con relaves finos.



Figura 5: Depósito de relaves espesados
Minera Bulyanhulu – Tanzania

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

Relaves Espesados

- Contenido de sólidos típico: 60–70%
- Reología: fluido no Newtoniano
- Genera pendiente autosoportante en el depósito
- Requiere diseño de canaletas o spigots para control de flujo
- Reduce el volumen de embalse y mejora recuperación de agua
- Mayor control necesario sobre yield stress y viscosidad



Figura 6: Descarga de relaves espesados

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

Relaves en Pasta

Los relaves en pasta se definen por su alto contenido de sólidos (mayor al 70% en peso), bajo contenido de agua libre y alta cohesión estructural.

Presentan un comportamiento reológico claramente no Newtoniano, con un esfuerzo de cedencia significativamente alto, y son capaces de formar pendientes pronunciadas que se mantienen estables incluso después de la descarga.

Esta tecnología reduce drásticamente
- ❖ la posibilidad de generación drenaje ácido
- ❖ facilita el cierre progresivo del depósito
- ❖ mejora la recuperación de agua en planta.

Su manejo requiere diseño hidráulico especializado y equipos de bombeo de alta capacidad para vencer la resistencia al flujo. Su clasificación técnica se apoya en mediciones de yield stress, consistencia y capacidad autosoportante.



Figura 7: Depósito en Minera Las Cenizas, Cabildo-Chile

Definición y Características de Relaves

Relaves en Pasta

- Sólidos: >70%
- Reología: fluido altamente estructurado (comportamiento plástico)
- Capacidad de formar pendientes estables (hasta 3–6%)
- Muy baja movilidad: requiere bombeo especializado
- Casi nula generación de escurrimientos
- Mejora sustancial en recuperación de agua y facilita el cierre progresivo



Figura 8: Toma de muestra de descarga espesador de pasta en Minera Las Cenizas, Cabildo-Chile

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

Relaves Filtrados

Los relaves filtrados corresponden a la forma más avanzada de disposición de residuos mineros, con un contenido de sólidos superior al 80% y humedad cercana al límite de consistencia plástica.

Su forma de presentación es similar a una torta semiseca, sin agua libre, lo que elimina la necesidad de tranques de contención hidráulica.

Estos relaves pueden ser transportados por correas o camiones y dispuestos en capas compactadas, permitiendo un diseño similar a un depósito de residuos industriales (ripios de lixiviación).

La estabilidad física es notablemente superior y el riesgo de drenaje ácido o licuefacción se reduce drásticamente.

Requiere una inversión significativa en equipos de filtrado.



Figura 9: Relaves Filtrados en la Mina La Coipa – Chile

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

Relaves Filtrados

- Sólidos: >80%
- Sin agua libre → no requiere embalse hidráulico
- Transporte y disposición mecánica: correas, camiones, sistemas de apilamiento
- Permite compactación y control geotécnico activo
- Alta recuperación de agua en planta (>85%)
- Bajo riesgo de drenaje ácido y baja falla catastrófica, facilita el cierre progresivo del depósito.



Figura 10: Relaves Filtrados Filtro Prensa

RelaveNet
A Community of Excellence

Definición y Características de Relaves

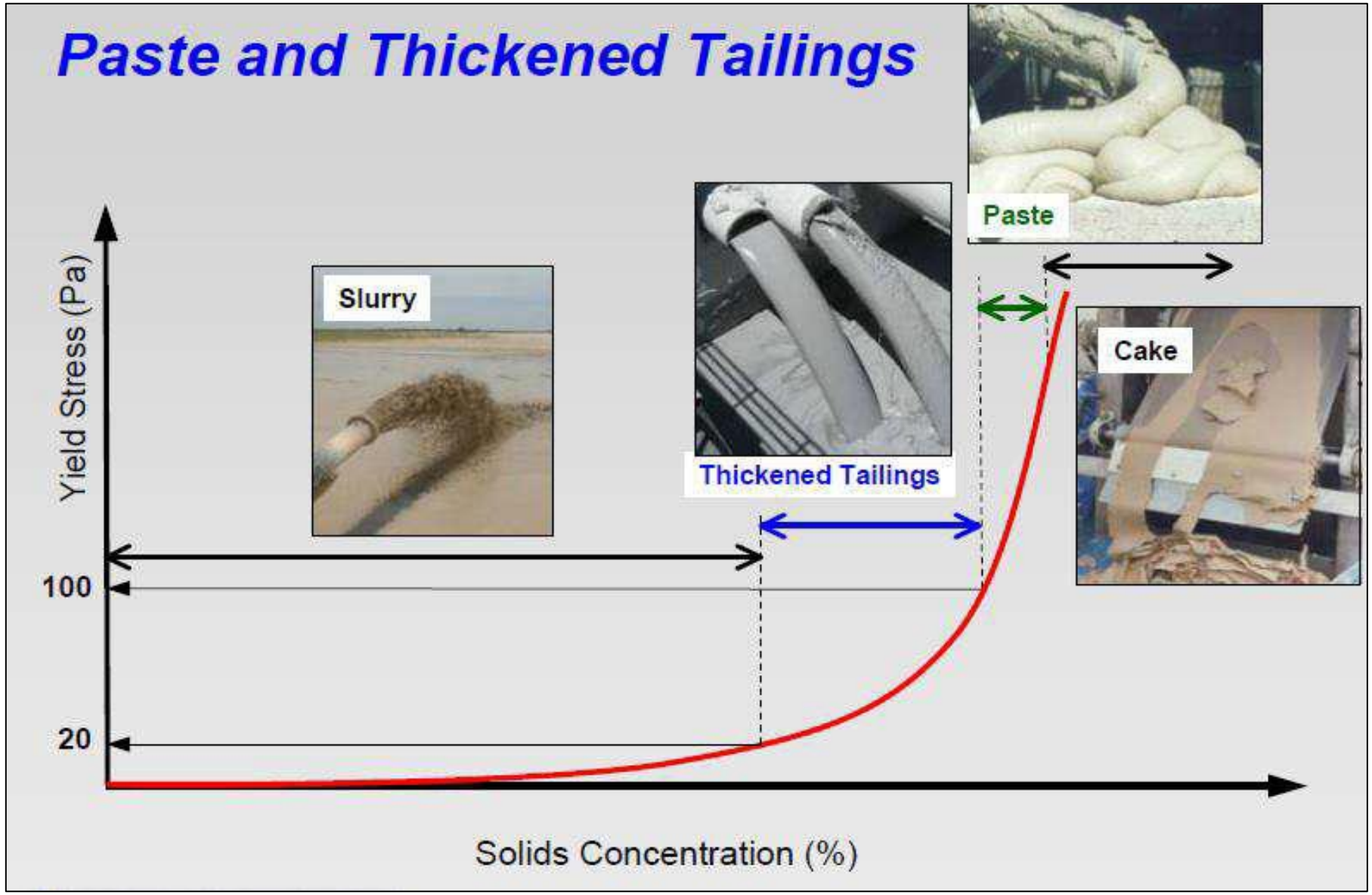


Figura 11: Esfuerzo Fluencia y Concentración de Sólidos en Tipos de Relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Características

Tabla 1: Resumen Comparativo

Table 1 Summary comparison of conventional and ATD

	Typical Incoming % Solids	Typical Outgoing % Solids[1,4,5]	Typical Yield Stress, Ty, (Pa)	Typical Angle of Deposition (%)	Typical Slump (mm)[2]	Typical Water Content (% dry mass basis)	Typical Percent Water Recovery[3]
Conventional Tailings Disposal	25–45	30–55	10–100	0.5–2.0	NA	100–400	50–60
ATD Thickened Tailings Disposal	30–45	50–70	10–300	1.0–3.0	NA	30–100	60–70
ATD Paste Tailings Disposal	60–65	70–85	100–1,000	3.0–10.0	200–275	20–30	80–90
ATD Filtered Tailings Disposal	60–65	> 70	> 1,000	NA	NA	10–20	> 90

[1,3] (Bussiere, 2004); [2] (Newman, et.al., 2001); [4] The dry solid content obtained depends mainly on the geotechnical properties of the material and possible pre-treatment (e.g. separation). In general it can be stated that the finer the material the more need for ATD; [5] From MWH project experience.

RelaveNet
A Community of Excellence

Ventajas y Desventajas

Tabla 2: Ventajas y Desventajas en Tipos de Relaves

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Relaves Convencionales	Bajo costo inicial y operación sencilla Aplicabilidad en sistemas existentes Transporte convencional por gravedad	Alta generación de drenaje ácido Alto consumo de agua fresca Mayor riesgo de falla por licuefacción
Relaves Espesados	Mejora recuperación de agua respecto al convencional Menor footprint que embalses clásicos Compatible con diseño hidráulico	Requiere control de segregación y diseño reológico Mayor complejidad en spigots y transporte Costo energético medio
Relaves en Pasta	Alta estabilidad física del depósito Menor riesgo ambiental Mejora significativa en el cierre progresivo	Requiere bombas especializadas Costo elevado en infraestructura Limitaciones en climas fríos o húmedos
Relaves Filtrados	Eliminación del agua libre Alta recuperación de agua (>85%) Menor footprint ambiental y cumplimiento normativo	Muy alto costo CAPEX y OPEX Mantenimiento intensivo de filtros Requiere transporte mecánico y compactación

Proceso de Espesamiento

Principios del espesamiento

El espesamiento es una operación clave en el manejo de relaves, destinada a reducir el contenido de agua mediante sedimentación por gravedad y compresión de partículas floculadas.

La eficiencia del proceso depende:

- formación de flóculos
- la reología de la pulpa
- la formación de redes estructurales que permiten la transición de la fase libre a una torta compacta.

Esta etapa afecta directamente el rendimiento del depósito y la recuperación de agua, siendo un punto crítico en el diseño de relaves espesados y en pasta.

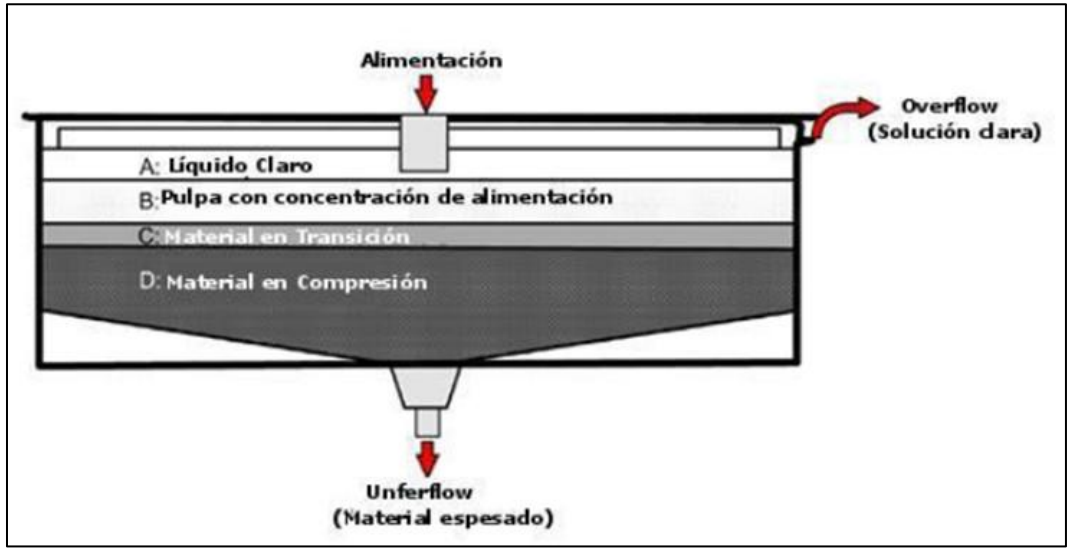


Figura 12: Esquema de un Espesador



Figura 13: Serie de Espesadores de Relave en Minera Escondida Ltda.

Proceso de Espesamiento

Principios del espesamiento_Rol de la floculación en eficiencia hidráulica.

La floculación es una etapa clave en el proceso de espesamiento:

"determina la velocidad de sedimentación, la formación de un manto compacto y el rendimiento hidráulico del sistema".

Mediante la adición de floculantes poliméricos se promueve la formación de agregados o flóculos, lo que permite una rápida separación sólido-líquido. Este fenómeno impacta directamente en la eficiencia operativa del espesador:

- minimizando el tiempo de residencia,
- mejorando la claridad del rebose
- optimizando el perfil de concentración de sólidos.

A nivel reológico, el comportamiento floculado modifica la estructura del fluido, afectando tanto la fase de sedimentación libre como la compresiva. Una buena floculación:

- reduce la recirculación de sólidos finos
- mejora la eficiencia del proceso global de espesamiento

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Principios del espesamiento

La consolidación se da en partículas compresibles (como el caso de relaves de cobre floculados. El peso de los flóculos afecta a los flóculos inferiores comprimiéndolas y exprimiendo el agua que permanece en el interior de estos (Consolidación). En sedimentación la fuerza que
actúa sobre el sedimento es el mismo peso del material que constituye el sedimento.

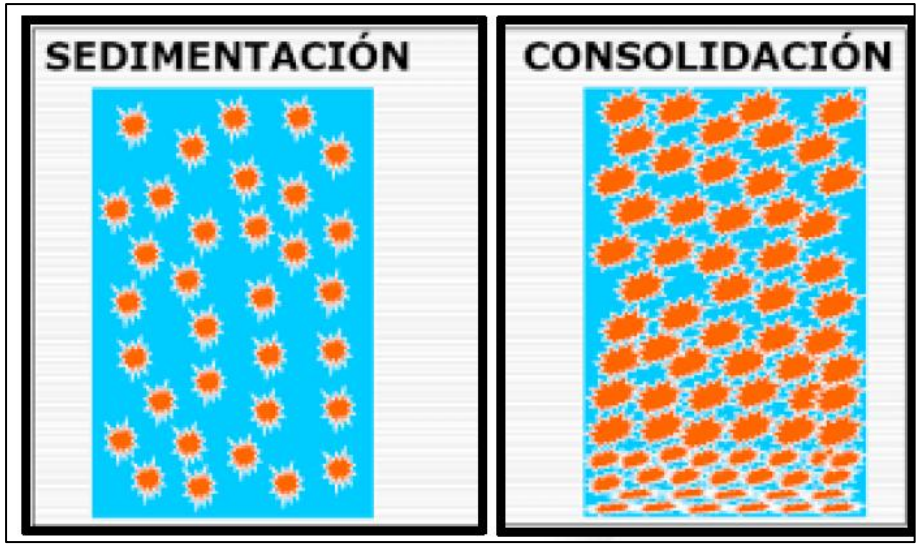


Figura 14: Sedimentación y Consolidación de partículas.

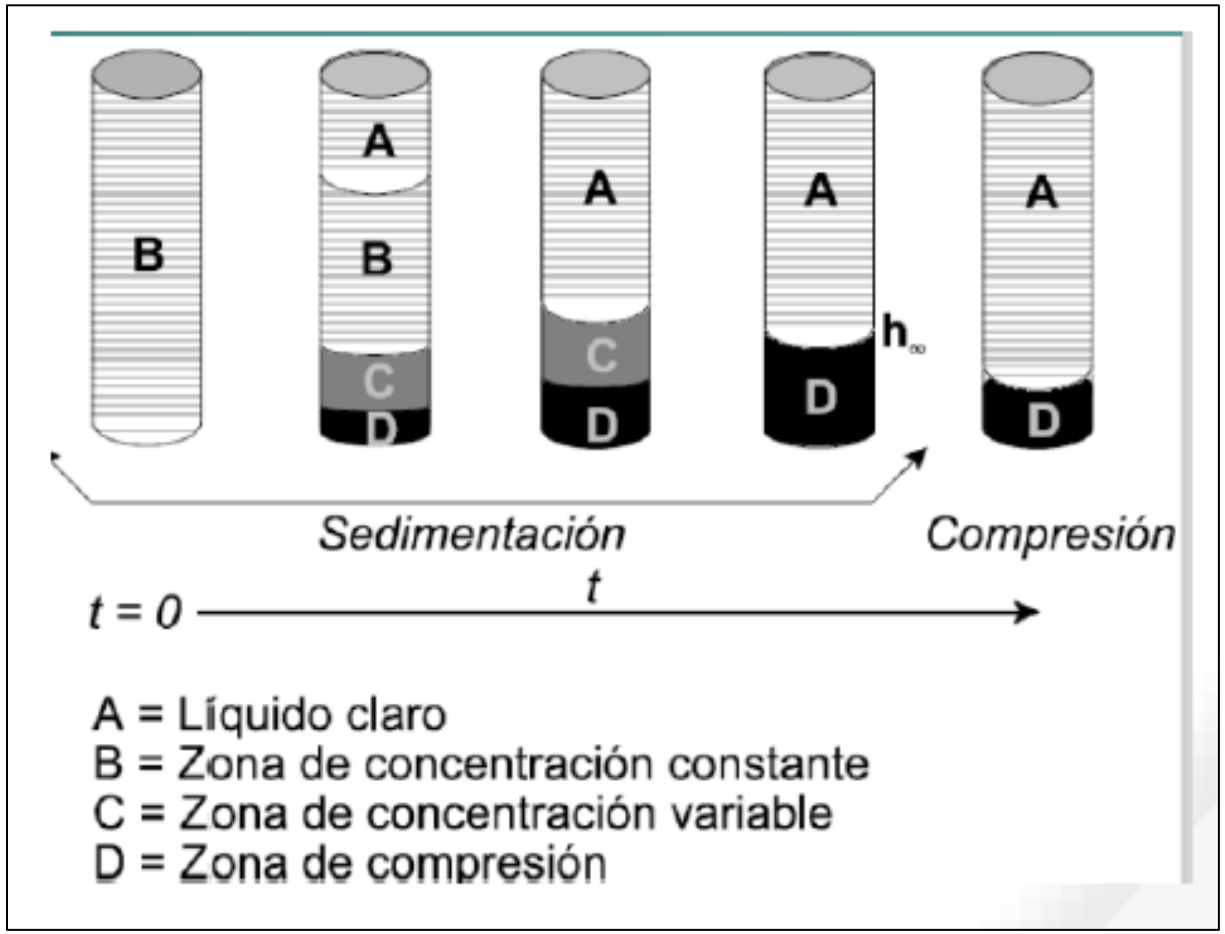


Figura 15: Fases del espesamiento: floculación → sedimentación → compresión.

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves

Existen múltiples tipos de espesadores utilizados en minería, cada uno adaptado a condiciones operativas específicas.

Los espesadores convencionales, de alta densidad (HDS) y de pasta se diferencian en:

- Geometría
- mecanismos de alimentación
- control de flujo
- Producto descarga

La selección del tipo adecuado debe considerar:

- la reología de la pulpa
- los requerimientos de % sólidos
- la disponibilidad de espacio en el depósito.

El correcto diseño y operación impacta directamente en la eficiencia de recuperación de agua y en el desempeño de las etapas posteriores como la filtración.

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves_CONVENCIONALES

- Puede o no usar floculantes.
- La mezcla del floculante con la pulpa no es homogénea ni óptima.



Figura 16: Espesador Convencional

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves_ALTA VELOCIDAD HR

- La pulpa de alimentación es diluida en cierto grado.
- Se aumenta la velocidad de sedimentación
- Disminuye el área unitaria
- Siempre usa floculante
- Optimiza la mezcla y homogenización entre pulpa/floculante



Figura 17: Espesador Tipo HIGH RATE

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves_ALTA DENSIDAD

- Entrega una densidad en la descarga mayor que los espesadores anteriores
- Son espesadores de alta velocidad con una mayor profundidad para tener una mayor zona de compresión



Figura 18: Espesador Tipo HIGH DENSITY

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves_DE PASTA

- Entrega la máxima densidad de sólidos posible de obtener en la descarga
- Son espesadores de alta velocidad, que tienen la altura de cama de sólidos necesaria para lograr el efecto de compresión de sólidos que entrega la máxima densidad en la descarga
- La pendiente del piso es más pronunciada en comparación a otros espesadores para facilitar la evacuación de los sólidos
- Deben usar sistemas motrices más robustos que cualquier otro espesador



Figura 19: Espesador Relaves en pasta

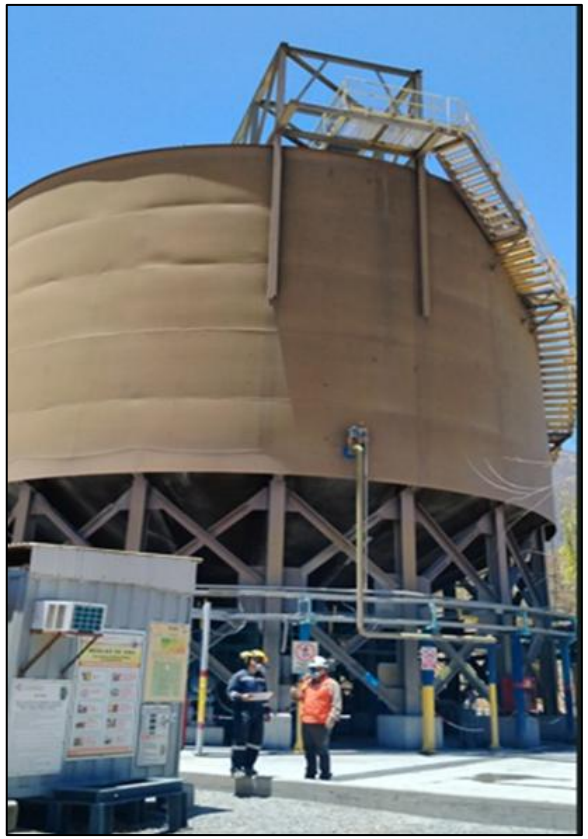


Figura 20: Espesador Relaves en pasta Minera Las Cenizas, Cabildo-Chile

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Espesamiento

Tipos de Espesadores en Relaves

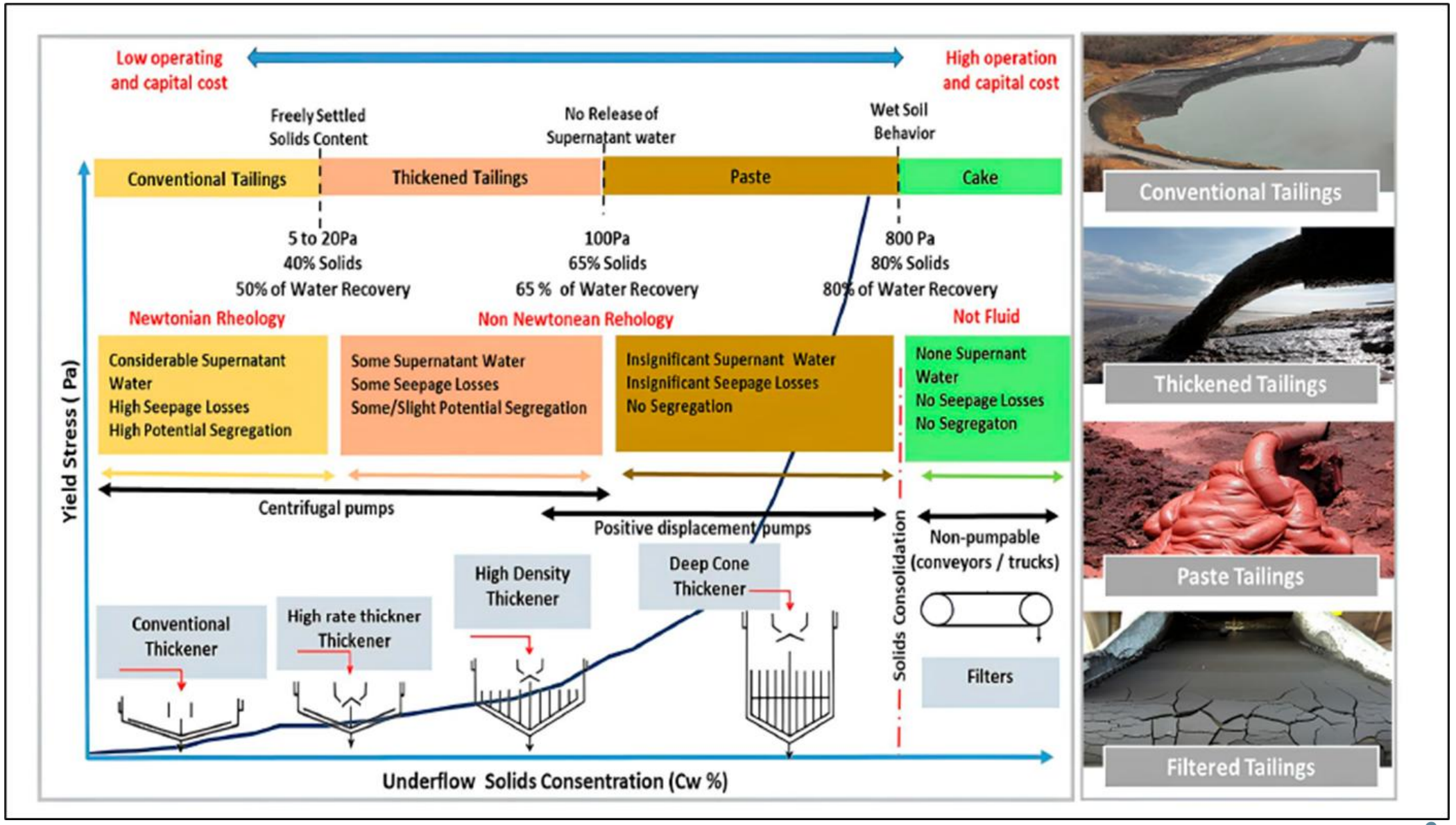


Figura 21: Continuidad del Procesamiento de Relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Principios del Filtración

La filtración es una técnica de separación sólido-líquido posterior al espesamiento, usada para alcanzar una humedad residual mínima.

Su fundamento es la aplicación de presión sobre la pulpa para formar una torta de sólidos sobre un medio filtrante.

El rendimiento del proceso está condicionado por:

- la resistencia hidráulica del "cake"
- la presión aplicada.

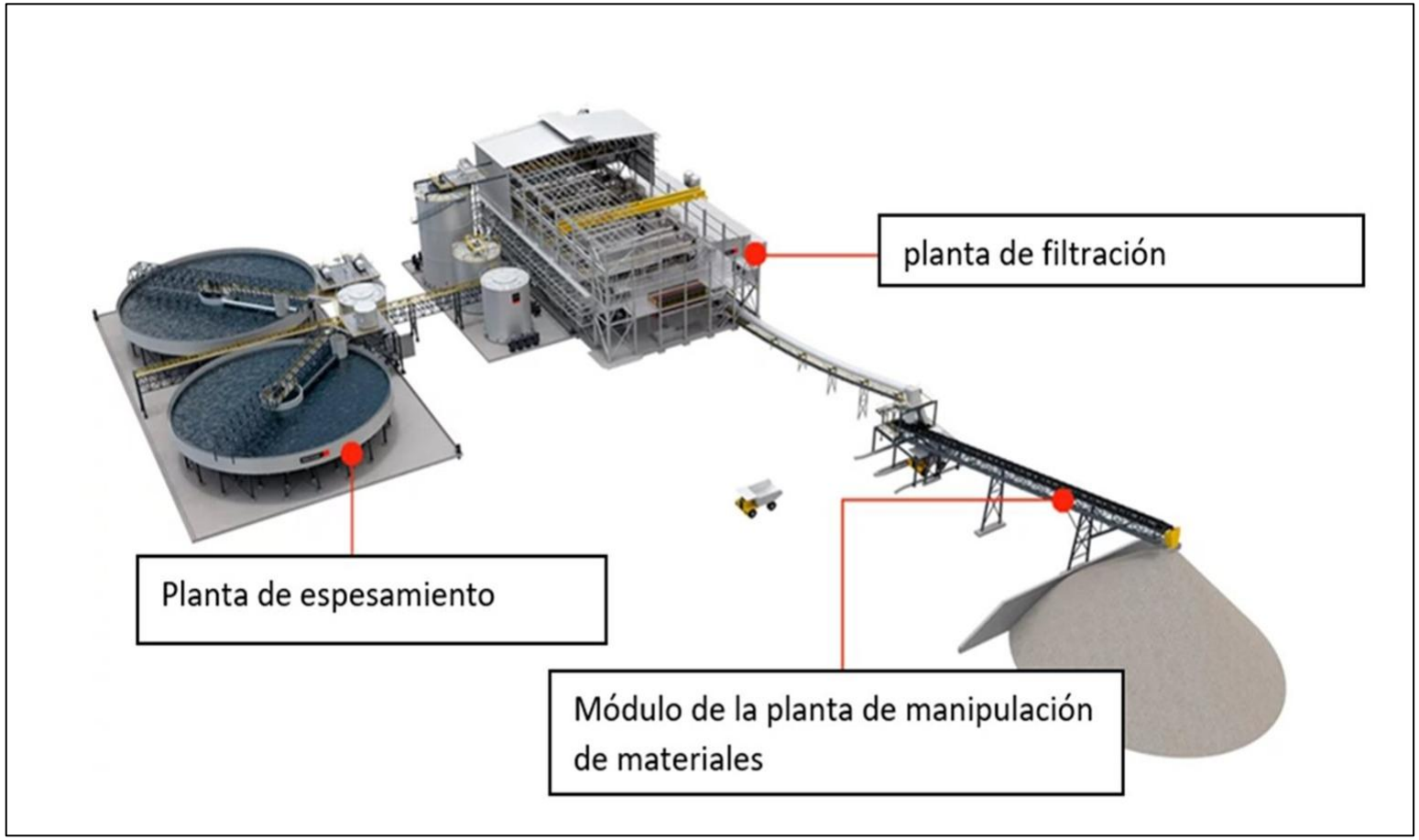


Figura 22: Esquema típico Proceso de filtración de relaves y apilamiento en seco

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Principios del Filtración_Flujo de agua a través de torta compacta.

El principio fundamental del proceso de filtración aplicado a relaves consiste *en el paso del agua libre a través de una torta de sólidos compactos formada sobre un medio filtrante.*

Esta torta, actúa como una barrera porosa cuya resistencia aumenta con su espesor y compactación. La operación se basa en un diferencial de presión (vacío o presión positiva) que fuerza el líquido a atravesar la torta, mientras que los sólidos quedan retenidos en el medio.

Este principio es clave en tecnologías como los *filtros prensa, de banda o de disco,* y determina directamente la eficiencia en la separación sólido-líquido.

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Principios del Filtración_Variables operacionales

Las variables operacionales más relevantes en la filtración de relaves son:

- **la presión aplicada**
  La presión actúa como fuerza impulsora del proceso

- **el espesor de la torta (cake)**
  el espesor del cake determina la resistencia hidráulica al paso del agua. A mayor espesor, mayor resistencia, menor velocidad de filtrado y mayor retención de humedad.

- **el caudal de alimentación.**
  El caudal de alimentación, por su parte, influye en la formación de la torta y su compactación.

Estas variables se deben equilibrar cuidadosamente según la tecnología utilizada, el tipo de relave y los objetivos de humedad residual. Una gestión inadecuada puede generar ciclos de filtrado largos, baja productividad o problemas de operación y mantenimiento.

RelaveNet

Proceso de Filtración

Tipos de Filtrado en Relave

La aplicación de tecnologías de filtración en relaves tiene como objetivo principal reducir al mínimo la humedad del residuo sólido.

Existen distintas tecnologías de filtrado aplicables al tratamiento de relaves, cada una con ventajas específicas según:

- la mineralogía
- la tasa de producción
- el grado de automatización.

La elección del equipo depende:

- % sólido de entrada
- el ciclo de operación permitido
- los requerimientos geotécnicos del depósito de destino.

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Tecnologías de Filtración



Figura 23: Filtros de vacío en banda



Figura 24 : Filtro de Discos Cerámicos



Figura 25: Filtro de Prensa

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.

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.

ETAPA 1 : Llenado
ETAPA 2: Filtración
ETAPA 3: Prensado
ETAPA 4: Descarga

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Tecnologías de Filtración

Tabla 3 : Comparación de Tecnologías

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.

RelaveNet
A Community of Excellence

Proceso de Filtración

Ventajas / Beneficios de los Relaves Filtrados

- Alta eficiencia hídrica: Permiten recuperar hasta un 90% del agua de proceso, reduciendo la necesidad de extracción de agua fresca y adaptándose a zonas con escasez hídrica.
- Reducción de impactos ambientales: Menor consumo energético, reducción de CO_2 y menor huella de carbono por transporte y tratamiento de agua.
- Optimización del almacenamiento: Almacenamiento más compacto y estable, hasta un 50% menos de área requerida en comparación con métodos convencionales.
- Mayor seguridad estructural: Baja humedad minimiza riesgos de licuefacción y mejora el desempeño en zonas sísmicas.
- Simplificación operativa y regulatoria: Requieren menos infraestructura, disminuyen el riesgo de fallas y cumplen con exigencias ambientales más estrictas.
- Beneficio social y ecosistémico: Menor intervención de fuentes naturales, favoreciendo la sostenibilidad en comunidades y ecosistemas sensibles.

RelaveNet
A Community of Excellence

Procesos de Espesamiento y Filtración

Influencia de la Reología en la Disposición de Relaves Espesados y en Pasta

La reología de los relaves espesados o en pasta controla su comportamiento durante el transporte y deposición. Relaves con esfuerzo de cedencia elevado (yield stress) presentan flujos cortos, estables y sin segregación, favoreciendo una deposición controlada.

Este tipo de comportamiento evita la separación de fases durante el escurrimiento y permite pendientes operativas más pronunciadas.

La pendiente alcanzada y la distancia de escurrimiento dependen de múltiples factores como el contenido de sólidos (Cp), la temperatura y el diseño del sistema de descarga.

Estos aspectos serán abordados con mayor profundidad en el Módulo 3, donde se analizarán fenómenos como la distribución radial, el diseño de spigots y los criterios de pendiente de playa.

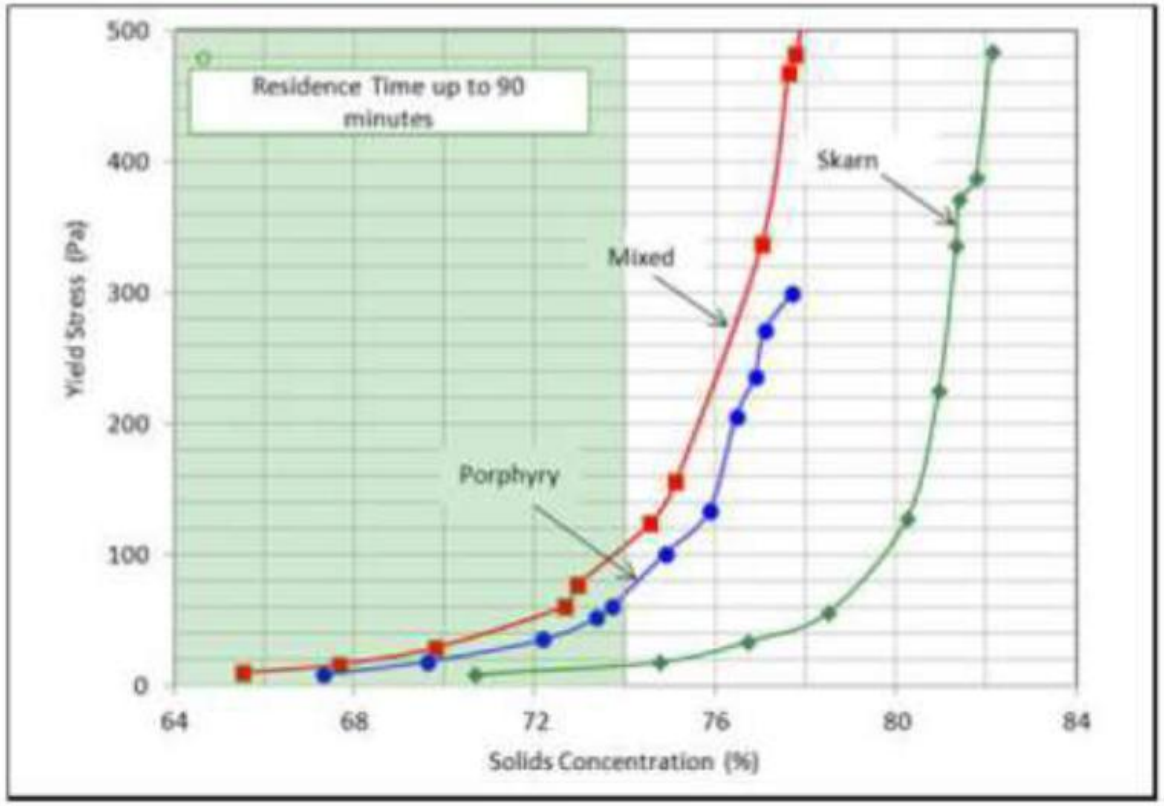


Figura 26: Esfuerzo de cedencia de 100-150 Pa para el transporte de relaves con bombas centrífugas.

RelaveNet
A Community of Excellence

Procesos de Espesamiento y Filtración

Comportamiento Hidráulico en los depósitos_Alta viscosidad y disposición

La alta viscosidad de los relaves espesados y en pasta reduce la distancia de deposición y mejora la homogeneidad del material depositado. Esta condición favorece sistemas de disposición controlada y reduce los riesgos de segregación.

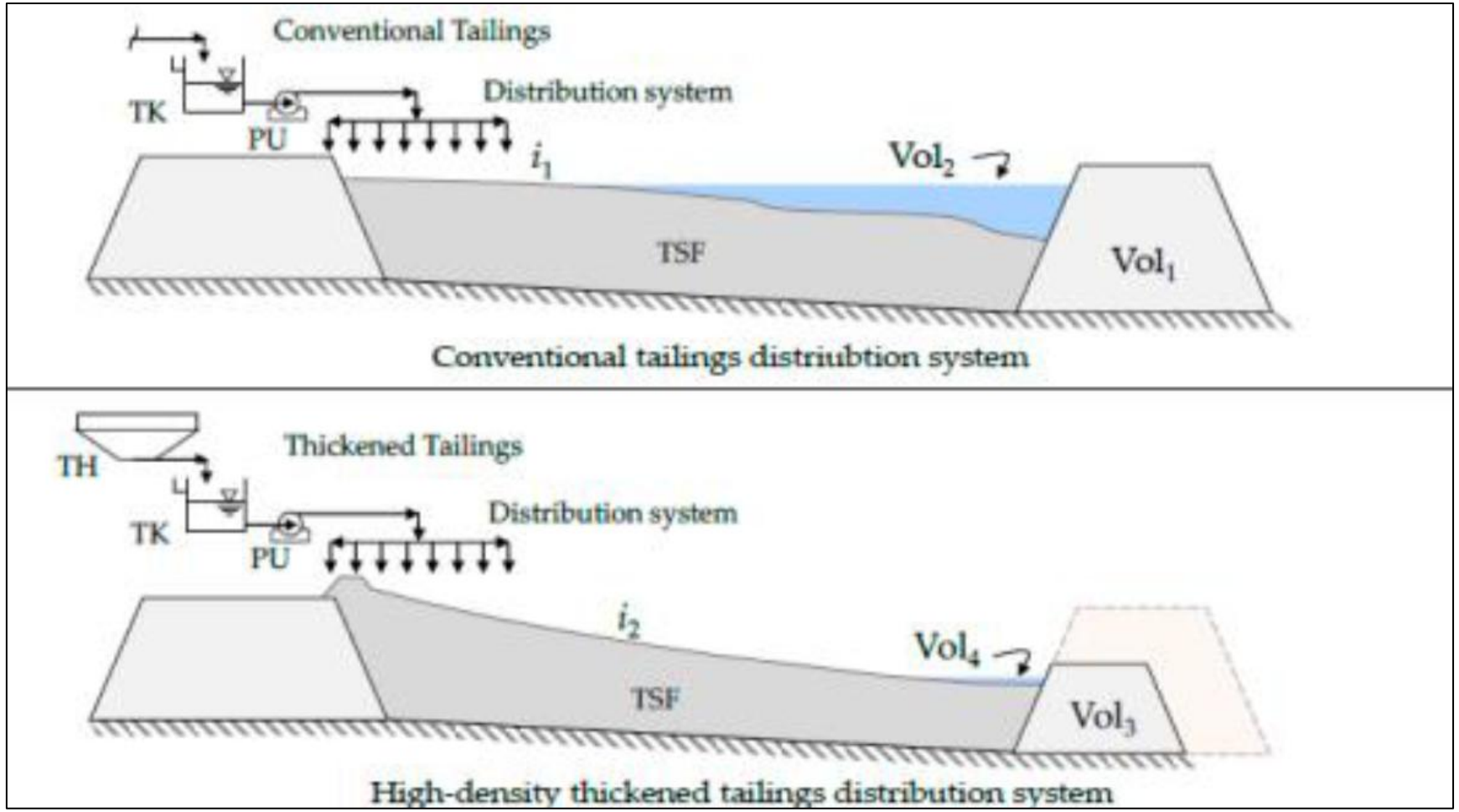


Figura 27: Comparativo relaves convencionales y espesados

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos de Estudio de implementación de relaves en pasta y filtrados

La implementación de tecnologías de relaves espesados, en pasta y filtrados ha avanzado en diversos contextos geográficos y operacionales, ofreciendo aprendizajes valiosos para el diseño y la operación sostenible.

En Perú:
Se ha documentado el uso de sistemas de distribución múltiple con alta eficiencia hidráulica y control operativo.

En Chile:
Múltiples faenas han adoptado filtros prensa con resultados variables según la mineralogía y condiciones climáticas.

Casos de Estudio de implementación de relaves

Caso en Europa del Sur con sistema de 6 spigots, relaves al 70%, válvulas de control automático y gestión distribuida para evitar segregación.

En una faena minera de Europa del Sur, se implementó un sistema de ***disposición de relaves en pasta*** con un contenido de sólidos del 70% en masa, utilizando un diseño de 6 spigots dispuestos radialmente para lograr una distribución más uniforme y evitar la segregación de partículas.

El sistema incluye válvulas automáticas que permiten un control preciso del flujo, ajustándose dinámicamente a las condiciones operacionales del depósito.

Esta configuración busca mantener una pendiente estable, mejorar la eficiencia de consolidación y reducir riesgos de licuefacción.

La operación demuestra los beneficios de un enfoque distribuido, facilitando la adaptabilidad a distintos ciclos de deposición y condiciones climáticas.

Casos de Estudio de implementación de relaves

Relaves Espesados en Minera Centinela – Proyecto Esperanza

En Minera Centinela (Proyecto Esperanza), se implementó tecnología de relaves espesados (TTD) para la disposición en una superficie inclinada y autosoportante.

A diferencia de los métodos convencionales donde el relave se deposita en estado más diluido, en esta operación se espesan previamente los relaves a una consistencia pastosa homogénea, permitiendo un flujo laminar y no segregante.

Esto permite formar depósitos con pendiente natural y mayor estabilidad física. Además, el diseño fue "ingenierizado" para adaptarse a la topografía, reduciendo la necesidad de muros de contención.

El proceso logra una recuperación de agua del orden del 80%, optimizando el consumo hídrico y disminuyendo la huella ambiental.



Figura 28: TSF de relaves espesados en Minera Centinela

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos de Estudio de implementación de relaves

Relaves en Pasta en Collahuasi

En la mina Collahuasi se ha implementado un sistema de disposición de relaves en pasta, permitiendo obtener pendientes del depósito entre 3 y 6%, sin necesidad de estructuras hidráulicas complejas.

Este tipo de disposición ha demostrado ser eficaz en zonas de altura y clima árido, donde la recuperación de agua es prioritaria.

Al trabajar con relaves altamente estructurados y con esfuerzo de cedencia significativo, se garantiza una deposición corta, estable, sin segregación, lo que reduce el riesgo de licuefacción y favorece la estabilidad estructural del depósito.



Figura 29: Tecnología de relaves en pasta Minera Collahuasi

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos de Estudio de implementación de relaves

KingRoss La Coipa

Ubicación: Atacama, Chile, en una zona de alta actividad sísmica.

Desafíos Identificados:

- **Alto riesgo de licuefacción debido a las características de los relaves.**
- Pendientes pronunciadas y suelos de baja cohesión.

Estrategias de Mitigación:

- Uso de análisis numéricos avanzados para evaluar estabilidad y licuefacción.
- Diseño de taludes con pendientes controladas (≤35°) para reducir tensiones en la base.
- Compactación intensiva y control de humedad para aumentar la cohesión.

Resultados:

- Factor de seguridad (FS) estático de 1.6; dinámico de 1.3.
- Estabilidad asegurada en condiciones sísmicas extremas.

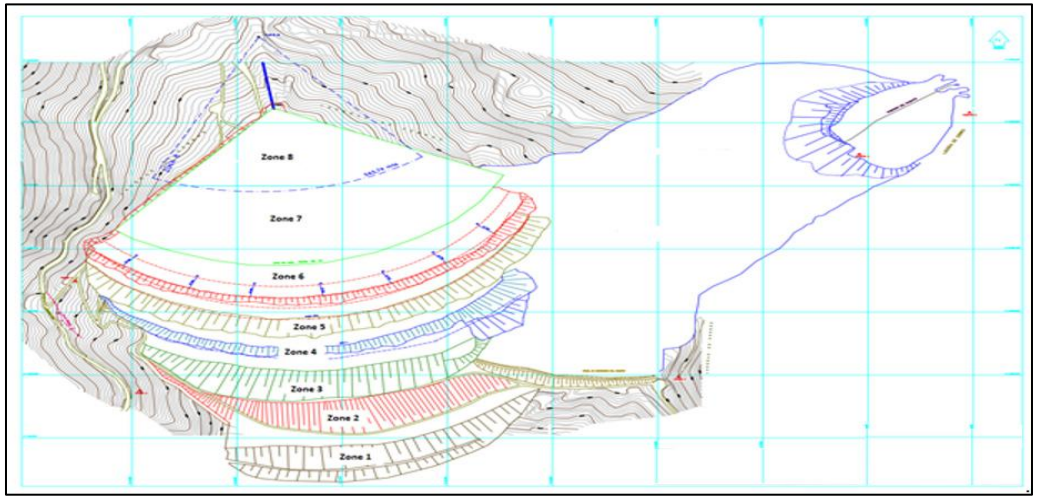


Figura 30: Esquema del Depósito de relaves filtrados La Coipa

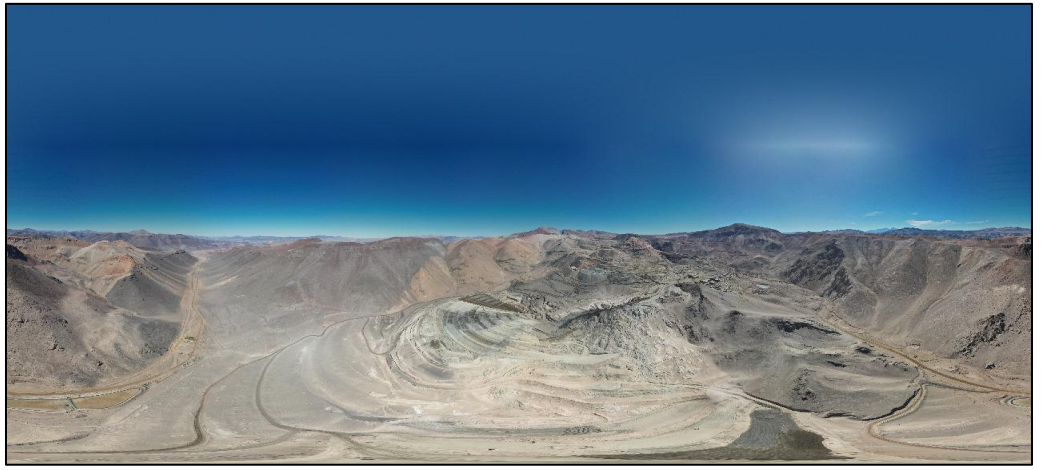


Figura 31: Depósito de relaves filtrados RAKO, La Coipa

Casos de Estudio de implementación de relaves

Tambomayo: Adaptación a Altitudes Extremas

Ubicación: Arequipa, Perú. Operación aurífera a más de 4,800 m.s.n.m.

Desafíos Clave:

- Baja presión atmosférica que afecta procesos de filtración.
- Variaciones extremas de temperatura que impactan cohesión de los relaves.

Innovaciones Implementadas:

- Uso de filtros prensa diseñados para operar en bajas presiones.
- Compactación en capas de 20 cm con monitoreo continuo de densidad.

Beneficios:

- Recuperación de agua superior al 70%.
- Compactación efectiva con densidades superiores a 1.8 g/cm³.
- Infraestructura adaptada a condiciones climáticas extremas.



Figura 32: Filtros prensa en Tambomayo



Figura 33: Descripción general de la operación filtrada de Tambomayo

Impacto en la Operación, Costos y Sostenibilidad

Evaluación Comparativa General de Tecnologías de Disposición de Relaves

Las distintas tecnologías de disposición de relaves —convencional, espesado, en pasta y filtrado— presentan impactos diferenciados en términos de operación, costos y sostenibilidad ambiental.

Mientras que las tecnologías convencionales presentan menores inversiones iniciales, su gestión ambiental y de agua es menos eficiente.

Los relaves filtrados, si bien implican un mayor CAPEX y OPEX, permiten reducir significativamente la huella ambiental, facilitar el transporte mecánico y avanzar hacia un cierre más limpio.

Los relaves espesados y en pasta representan una alternativa intermedia que puede ser optimizada según la ubicación geográfica, climatología y disponibilidad hídrica.

Tabla 4 : Comparación General de Tecnologías de Disposición de Relaves

Tecnología	CAPEX/OPEX	Eficiencia hídrica	Impacto ambiental	Transporte
Convencional	Bajo	Baja	Alto	Hidráulico
Espesado / Pasta	Medio	Media/Alta	Medio	Hidráulico/Bombeo
Filtrado	Alto	Alta	Bajo	Mecanizado

RelaveNet
A Community of Excellence

Impacto en la Operación, Costos y Sostenibilidad

Tabla 5: Resumen técnico-operativo de tecnologías de disposición de relaves

Criterio Técnico	Relaves Convencionales	Relaves Espesados	Relaves en Pasta	Relaves Filtrados
Contenido de sólidos (% m/m)	30–50%	60–70%	>70%	>80%
Reología / Transporte	Fluido Newtoniano, transporte por tuberías o canaletas	Fluido no Newtoniano (Bingham), transporte hidráulico controlado	Fluido altamente estructurado, requiere bombas especiales	Sólido húmedo, transporte mecánico (camiones, correas)
Formación de pendiente	No forman pendiente estable	Forman pendiente suave (1–3%)	Pendiente estable (3–6%)	Pendiente estructurada y compactable
Necesidad de embalse hidráulico	Sí	Parcial	No	No
Requerimientos de infraestructura	Alto: tranques, canaletas, muros de contención	Media: requiere espesadores y diseño de descarga	Alta: diseño reológico y canalizaciones reforzadas	Muy alta: filtros, correas, disposición en capas
Recuperación de agua	Baja (<40%)	Media (~60–70%)	Alta (>75%)	Muy alta (>85%)
Riesgo ambiental	Alto: escurrimientos, licuefacción	Medio: posibles fallas por canalización o segregación	Bajo: muy bajo escurrimiento	Muy bajo: sin agua libre, bajo drenaje ácido
Costo operativo y energético	Bajo a medio	Medio	Alto (infraestructura y bombeo)	Muy alto (capex + opex filtrado)
Aplicabilidad industrial	Amplia, especialmente en faenas antiguas	Alta en nuevas operaciones con control hidráulico	Moderada, depende del tipo de mineral y clima	Alta en faenas modernas con foco en sostenibilidad

RelaveNet
A Community of Excellence

Impacto ambiental y regulaciones

Comparación ambiental y de sostenibilidad

La sostenibilidad hídrica es uno de los factores críticos en la evaluación de tecnologías de disposición de relaves.

Criterio Ambiental / Sostenibilidad	Relaves Convencionales	Relaves Espesados	Relaves en Pasta	Relaves Filtrados
Huella ambiental (footprint)	Alta: gran superficie de embalse	Media	Baja	Muy baja
Generación de drenaje ácido (ARD)	Alta: agua libre + sulfuros	Media: depende del diseño	Baja: mínimo escurrimiento	Muy baja: sin agua libre
Consumo de agua fresca	Alta	Media	Baja a media	Muy baja
Facilidad de cierre progresivo	Baja	Media	Alta	Muy alta
Estabilidad física y sísmica	Baja: riesgo de licuefacción	Media: requiere diseño geotécnico	Alta: estructura autosoportante	Muy alta: condiciones pseudoestables
Emisiones indirectas (bombeo, transporte)	Baja a media	Media	Media a alta	Alta
Reutilización de agua	Baja	Media (~60–70%)	Alta (>75%)	Muy alta (>85%)
Adaptabilidad a normativa moderna	Baja	Media	Alta	Muy alta
Viabilidad en zonas áridas	Baja	Media	Alta	Muy alta

Tabla 6: Comparación ambiental y de sostenibilidad

Conclusiones

- ✓ El contenido de sólidos, la reología y la densidad condicionan el tipo de tecnología aplicable para la disposición de relaves.
- ✓ Relaves espesados y en pasta permiten mejorar la estabilidad del depósito y reducir la segregación de partículas.
- ✓ La disposición de relaves filtrados permite recuperar hasta un 85–90% del agua de proceso.
- ✓ El diseño del depósito debe ser adaptado a las propiedades reológicas del relave tratado, no solo a la topografía.
- ✓ Las tecnologías avanzadas de disposición requieren integración temprana entre procesos, diseño geotécnico y transporte hidráulico o mecánico.
- ✓ La selección tecnológica debe considerar restricciones de agua, espacio disponible, condiciones climáticas y riesgo sísmico.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones

- ✓ Las tecnologías de filtrado y pasta reducen significativamente la huella ambiental del depósito de relaves.

  Mejoran el cumplimiento regulatorio en materia de seguridad y protección de recursos hídricos.

  Facilitan una mejor convivencia con comunidades locales y reducen la presión social sobre nuevas fuentes de agua.

  Permiten una gestión más eficiente en zonas áridas o de alta sensibilidad ecológica.

- ✓ Casos como Collahuasi, Esperanza y Cerro Verde demuestran su viabilidad técnica y económica.

- ✓ La sostenibilidad debe evaluarse de forma integral, incorporando eficiencia operativa, hídrica, ambiental y social.

RelaveNet
A Community of Excellence

CIERRE

Este módulo nos permitió analizar en profundidad las tecnologías de disposición que hoy lideran la transición hacia una minería más eficiente y sostenible.

Hemos revisado sus fundamentos operacionales, ventajas comparativas, condiciones de aplicabilidad y casos reales en Chile y el extranjero. Comprendimos que la clave no está solo en espesar o filtrar, sino en ingenierizar integralmente el sistema de disposición: desde la planta, hasta el depósito.

A lo largo del módulo, observamos que estas tecnologías permiten reducir la huella hídrica, mejorar la estabilidad física del depósito y aumentar la aceptación social del proyecto minero.

Las decisiones sobre qué tecnología implementar deben estar basadas en una evaluación técnica, económica, geotécnica y ambiental integrada.

A partir del próximo módulo, profundizaremos en los métodos de disposición, pendiente de playa, diseño hidráulico y control operacional para estos relaves, temas esenciales para completar esta visión.

RelaveNet
A Community of Excellence

Gracias por su Atención

RelaveNet
A Community of Excellence