Gestión Operativa y Mantenimiento de Depósitos de Relaves

Módulo 3

Estrategias de Disposición de Relaves y Pendiente de Playa

- **Alejandro Villalobos**

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

RelaveNet
A Community of Excellence

Indice Temático

- Estrategias de disposición de relaves: Convencional, en capas, y con relaves espesados y filtrados.
- Importancia de la pendiente de playa en la estabilidad y el drenaje del depósito.
- Factores que afectan la pendiente de playa: Granulometría, contenido de agua, tipo de relave.
- Diseño y monitoreo de la pendiente de playa para optimizar la disposición y evitar problemas operativos.
- Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente de playa.

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción

La gestión moderna de relaves exige una revisión profunda de las estrategias de disposición adoptadas por la industria, considerando no solo criterios geotécnicos, sino también factores operacionales, hidráulicos y de sostenibilidad a largo plazo.

En este módulo abordaremos con detalle la influencia que ejercen las distintas metodologías de disposición sobre la eficiencia del uso de superficie, el control del agua y la estabilidad global del depósito.

Se analizará el rol crítico de la pendiente de playa, cuya configuración impacta directamente en el escurrimiento superficial, la capacidad útil del depósito y la formación de cuñas de presión en el muro aguas arriba.

A partir de literatura especializada y casos operacionales reales, esta clase ofrece herramientas para comprender, diseñar y optimizar la disposición de relaves convencionales, espesados y filtrados, con foco en la formación, monitoreo y desempeño de las playas de relaves.

Estrategias de disposición de relaves

Clasificación General

La clasificación de las estrategias de disposición de relaves puede agruparse en tres grandes categorías: convencional, espesado y filtrado. Cada una responde a condiciones operacionales, climáticas y normativas específicas, afectando directamente la estabilidad, la recuperación de agua y la ocupación de superficie.

La disposición convencional ha sido históricamente la más difundida, aunque presenta mayores desafíos ambientales y de control de drenaje.

Las tecnologías más recientes buscan minimizar la huella hídrica y maximizar el comportamiento geotécnico, especialmente en zonas sísmicas o de escasa disponibilidad de agua.

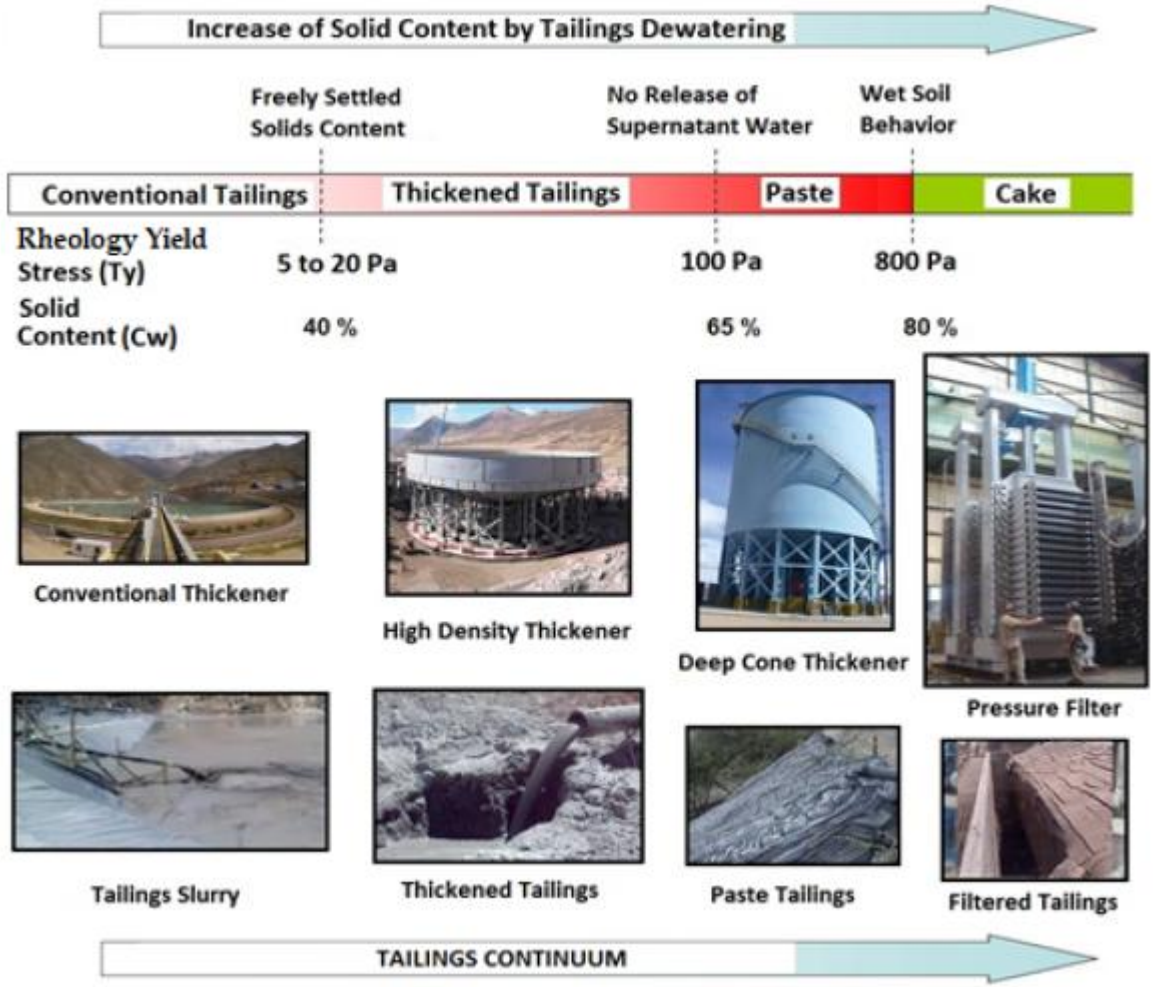


Figura 1: Continuidad de deshidratación de relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Clasificación General



Figura 2: Disposición de Relaves Convencionales



Figura 3: Disposición de Relaves Espesados



Figura 4: Disposición de Relaves Filtrados

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Criterios Técnicos y Operacionales

La selección de la estrategia de disposición debe responder a una evaluación integral de criterios técnicos, ambientales y operacionales.

Factores como:

- la pendiente del terreno
- la sismicidad
- la distancia a la planta
- la capacidad de almacenamiento
- el contenido de finos
- la disponibilidad de agua

Además, deben evaluarse riesgos asociados, costos de operación, tiempos de consolidación y necesidades de monitoreo.

Una correcta evaluación de estos criterios permite adoptar soluciones sustentables que reduzcan la incertidumbre operacional y los costos de cierre.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Criterios Técnicos y Operacionales

Tabla 1: Aspectos de sostenibilidad en la gestión de relaves (Adiansyah et al, 2015)

Environment	Economy	Social	Government (regulation)
• Air and water pollution • Water resources depletion • Ecosystem destruction • Ecosystem alteration • Land footprint • Emissions	• Capital expenditure • Operating expenditure • Reagent loss • Energy cost • Closure cost	• Health issues • Safety issues for public (after closure) • Stakeholder perception • Cultural impacts	• Legal compliance

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Evolución histórica de métodos de disposición

La evolución de las estrategias de disposición de relaves ha seguido el ritmo de la exigencia regulatoria, el conocimiento técnico y la presión social por prácticas más sostenibles.

Desde mediados del siglo XX, los sistemas convencionales dominaron la industria. Desde los años 90, el desarrollo de tecnologías de espesamiento y, más recientemente, de filtrado, ha permitido reducir significativamente la huella hídrica y aumentar la estabilidad geotécnica de los depósitos.

En Sudamérica, países como Chile y Perú han liderado esta transición hacia relaves espesados y filtrados, particularmente en faenas situadas en zonas sísmicas o áridas.

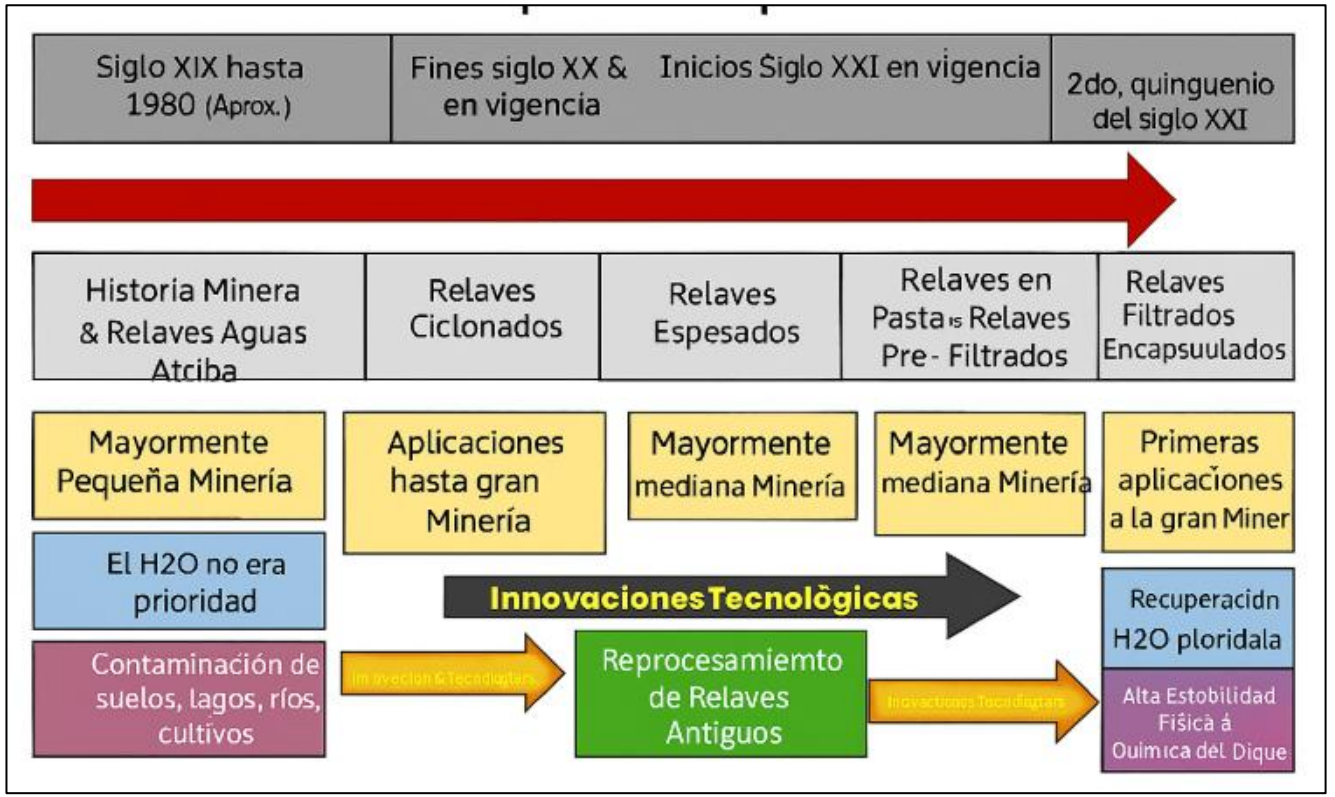


Figura 5: Evolución del Tipo de Relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Configuración de los depósitos

La configuración de un depósito superficial depende tanto de la **morfología natural** del terreno como de las **estructuras de ingeniería** *(Ritcey, 1989).*

Las tres configuraciones principales de depósitos convencionales son:

Diques circulares o en anillo (*ring dykes, paddocks o cells*)
Depósitos en valle:

- A través del valle (*cross-valley*)
- En ladera (*sidehill*)
- En el fondo del valle (*valley-bottom*)

Depósitos en rajo o in-pit

El tipo de diseño del muro de contención no está limitado por el tipo de configuración. Las consideraciones incluyen:

- Costos de construcción del dique inicial y de sus alzamientos
- Volumen de material requerido
- Propiedades del relave
- Requisitos de almacenamiento de agua

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Configuración de los depósitos

Diques en Anillo o Celdas Cerradas (*Ring Dyke*)

La configuración de dique en anillo (*paddock* o *cell*):

- no depende de depresiones topográficas
- ofrece mayor flexibilidad en la selección del sitio
- en general puede ubicarse relativamente cerca de la planta de procesos *(Ritcey, 1989).*
- Requiere grandes volúmenes de material de relleno para los muros (debe contener completamente el relave por todos sus lados).

- *La principal ventaja es que las aguas superficiales no pueden ingresar a la celda, por lo que toda el agua contenida proviene del proceso o de la precipitación.*

- El alzamiento del dique por el método ascendente (*upstream*) requiere menos material de construcción en cada levantamiento, pero con cada nueva etapa se reduce el volumen útil, lo que obliga *a aumentar la velocidad de alzamiento* para mantener la capacidad de almacenamiento.



Figura 6: Configuración de dique anular en la mina de oro Kalgoorlie, Australia Occidental

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Configuración de los depósitos

Depósitos en Valle (Valley Impoundments)

Aprovechan la topografía natural (configuraciones más comunes en zonas montañosas).

Hay tres tipos:

a) Transversales al valle (Cross-valley)

- Similares a embalses de agua convencionales.
- Se construye un muro de cierre transversal al eje del valle.
- Se recomienda ubicarlo en la cabecera de la cuenca de drenaje para minimizar el ingreso de aguas naturales.
- Canales de desvío, vertederos o embalses aguas arriba pueden ser necesarios para gestionar flujos de crecida.



Figura 7: Configuración tipo Cross-Valley en Highland Valley Copper, Canadá

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Configuración de los depósitos

b) En ladera (Sidehill)

- Requiere muros de contención por tres lados, usando una ladera como cuarta pared natural.
- Similar al diseño de diques en anillo, pero con menor requerimiento de contención perimetral.
- Más fácil de aislar de escurrimientos superficiales con zanjas y canales perimetrales simples.
- Recomendado para pendientes menores al 10%, ya que pendientes mayores aumentan el volumen de relleno requerido.

c) En el fondo del valle (Valley-bottom)

- Se utiliza cuando el valle es muy ancho o tiene escurrimientos significativos.
- Se considera un compromiso entre cross-valley y sidehill, y suele construirse por etapas.
- Puede requerir desvío de cauces naturales, lo que implica obras hidráulicas capaces de manejar caudales máximos de crecida.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Configuración de los depósitos

Depósitos en Rajo (*In-pit*)

Se trata de rellenar rajos abiertos agotados con relaves.
Es una opción muy atractiva y económica para el operador minero, ya que no requiere diseño ni construcción de muros de contención.

- Se eliminan los riesgos asociados a la estabilidad de diques
- Muy utilizada en operaciones remotas de Australia, donde las aguas subterráneas son salinas o no potables.
- Además, en algunas regiones con comunidades indígenas (aborígenes australianos), existe una preferencia cultural por que los vacíos mineros sean rellenados al finalizar la explotación.

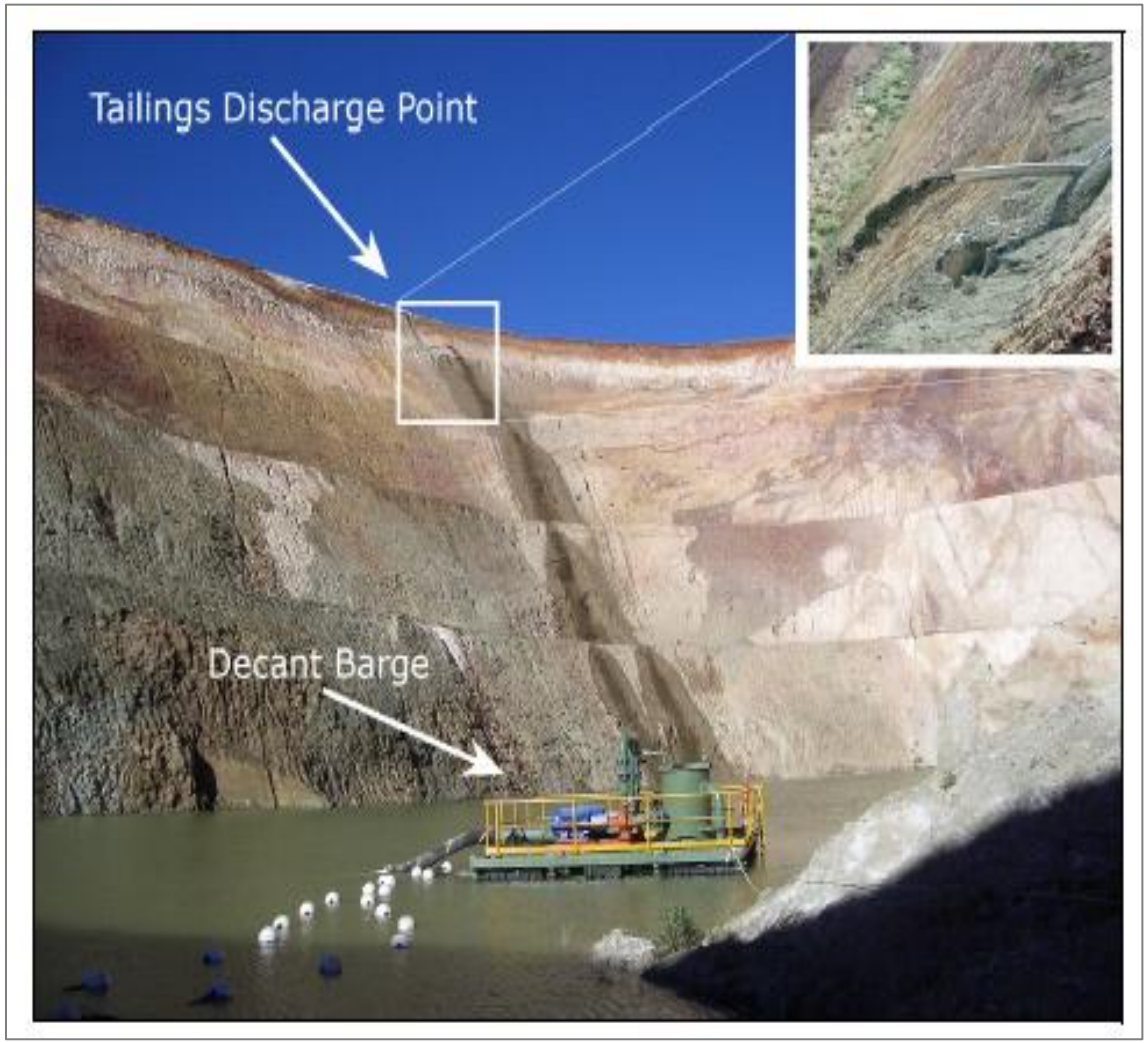


Figura 8: Almacenamiento de relaves en rajo, de una mina de oro remota en Western Australia

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Métodos de Descarga de Relaves

Depósitos convencionales
Relaves descargados desde spigots o vertederos perimetrales ubicados a lo largo del dique.

Depósitos de relaves espesados o en pasta
Relaves descargados desde un punto central, mediante torres elevadas o rampas construidas desde el centro del depósito.

Relaves secos (*dry stacking*)
El material es depositado mediante camión o correas transportadoras, ya que su bajo contenido de humedad impide el bombeo.



Figura 9: Descarga de relaves convencionales



Figura 10: Descarga de relaves espesados



Figura 11: Almacenamiento de relaves filtrados en el Peñon, Chile

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Descarga de Relaves

- SUBACUÁTICO (subaqueous): descarga bajo el nivel del agua.
- SUBAÉREO (subaerial): descarga sobre el nivel del agua o directamente sobre la playa de relaves.

Consideraciones importantes:

- La forma en que se depositan los relaves afecta su comportamiento de asentamiento.
- A medida que el relave se descarga, ocurre una segregación natural

  - Las partículas gruesas se depositan primero
  - Las finas son transportadas más lejos.

  Esta segregación depende de:
  - distribución del tamaño de partícula
  - densidad de pulpa (*pulp density*).

- Al aumentar el grado de espesamiento:
  - Disminuye la cantidad de agua, y las partículas gruesas se depositan más cerca del
  - punto de descarga.
  - se alcanza una mezcla homogénea no segregada.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Descarga de Relaves

Subaéreo (*Subaerial*):

- Método más común.
- Crea una playa inclinada desde el punto de descarga hacia la laguna.
- Permite la formación de corrientes ramificadas de baja velocidad, facilitando el drenaje y secado.
- Favorece: rotación de puntos de descarga, secado natural, consolidación progresiva.



Figura 12: Descarga subáerea de relaves (izquierda) y descarga de relaves espesados a baja velocidad y poca profundidad en la playa de relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Descarga de Relaves

Subacuático (*Subaqueous*):

- Recomendado para relaves con contenido significativo de sulfuros, ya que limita el contacto con el oxígeno previene generación de drenaje ácido *(Tremblay, 1998).*
- Se puede aplicar tanto en depósitos convencionales como en disposición marina.
- Permite pendientes más pronunciadas, pero puede provocar asentamientos diferenciales y daños a la geomembranas, especialmente si el terreno base es compresible *(Wels et al., 1999).*



Figura 13: Descarga subacuática de relaves convencionales (Aglo American)

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

Spigots o Vertederos Perimetrales (Descarga Subaérea Múltiple)

- En depósitos convencionales y espesados, los relaves se descargan generalmente mediante spigots dispuestos a lo largo de los diques perimetrales, formando una playa de relaves que separa el muro de la laguna de aguas claras.
- Esta disposición permite rotar los puntos de descarga conforme a un plan de deposición, favoreciendo:
  - drenaje y secado progresivo,
  - consolidación,
  - estabilidad antes de aplicar nuevos levantamientos.

- El espaciado óptimo de spigots se determina a través de pruebas de deposición, ya que un mal diseño puede causar playas onduladas, reduciendo eficiencia.
- Se requiere gestión compleja de cañerías (bloqueos, rupturas, limpieza). La operación intensiva de válvulas, estaciones de lavado y control de caudal es crítica.
- Una ventaja técnica es que la descarga distribuida promueve flujo laminar y sedimentación progresiva, lo que mejora el drenaje y permite obtener una pendiente de playa más pronunciada.

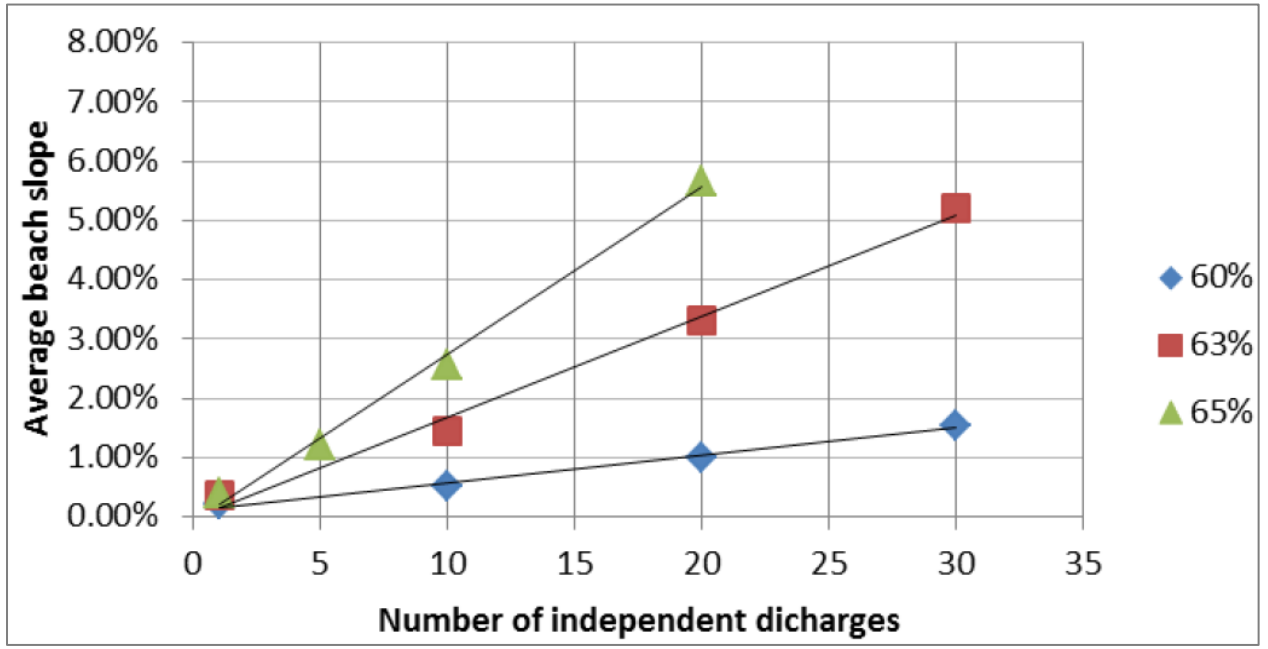


Figura 14: Slope de Relaves Espesados v/s Numero de Spigots

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

Relaves Espesados (*Thickened Tailings*)

Los relaves espesados son aquellos que han sido desaguados mecánicamente hasta alcanzar una densidad tal que al ser descargados no se segregan y forman un montículo autoportante.

En **depósitos en capas**, estos relaves se descargan capa por capa. Al secarse, pueden alcanzar su límite de encogimiento y volverse **dilatantes bajo vibración**, lo que disminuye el riesgo de licuefacción
La descarga suele hacerse desde puntos elevados en el centro del depósito (rampas o torres), permitiendo formar pendientes autodesaguantes de 1 a 3.5°.

Ventajas

- Ahorro de agua y mayor recuperación en planta.
- Reducción de escurrimientos, riesgos por fallas hidráulicas, impacto ambiental.

Desventajas:

- Mayores **costos operacionales** (espesadores, bombeo).
- Requiere **mayor superficie** (lo que puede ser una restricción).
- Algunos operadores se resisten por considerarlo “no probado” o por preferencia por tecnologías convencionales.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

Relaves en Pasta (*Paste Tailings*)

- Son relaves desaguados a tal punto que:
  - No fluyen libremente (no tienen velocidad crítica),
  - No segregan al depositarse,
- Su alta viscosidad requiere bombas de desplazamiento positivo, lo que limita la distancia de transporte económico
- Se pueden formar pendientes sobre 3°, que desecan por evaporación y formación de grietas. Las capas posteriores rellenan y consolidan las anteriores, mejorando estabilidad

Ventajas adicionales respecto a espesado:

- Posibilidad de eliminar lagunas o embalses de agua.
- Menor huella al permitir mayor pendiente.
- Reducción de impacto ambiental en caso de falla.
- Menor o nula filtración al subsuelo.



Figura 15: Relave en pasta depositándose sobre un lecho desecado (izquierda) y uno de los elevadores de toda la mina Bulyanhulu, Tanzani

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

Relaves Secos o Apilados (*Dry Stack*)

- Se refiere a relaves que han sido ***filtrados*** hasta formar una torta húmeda o parcialmente seca, con contenido de humedad menor al 20%, por debajo del punto de saturación.
- Se transportan por camión o correa, se depositan, nivelan y compactan formando un depósito no saturado (dry stack).
- Se utilizan filtros de banda, filtros prensa horizontales o verticales, y sistemas de vacío. Aunque el término "seco" es relativo, se ha estandarizado en normativa y diseño.

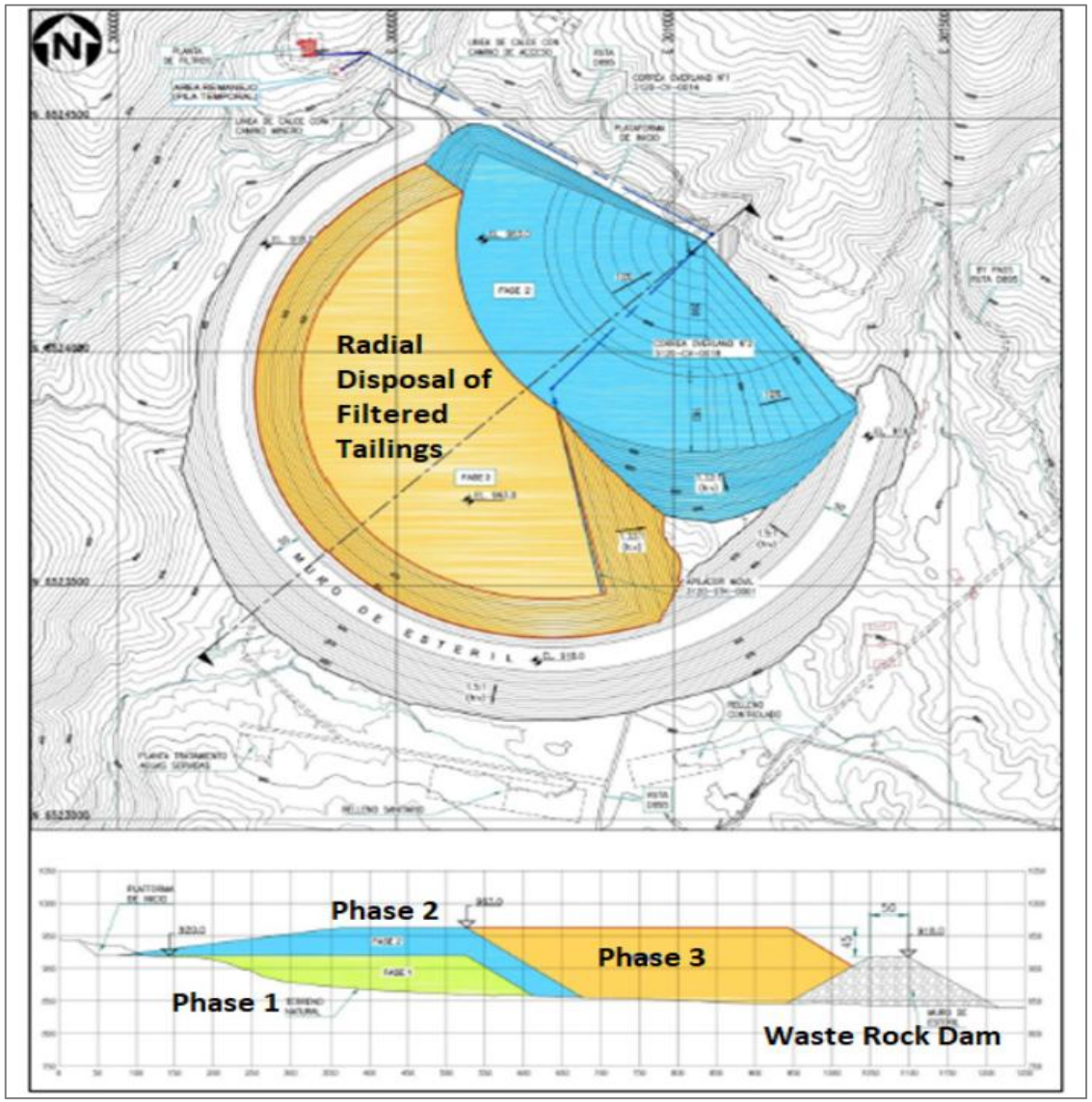


Figura 16: Sección transversal del deposito de relaves filtrados El Espino.

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

Relaves Secos o Apilados (*Dry Stack*)

Ventajas técnicas:

- Ideal en zonas:
  - con escasez hídrica,
  - con riesgo sísmico,
  - de clima frío (evita congelamiento de cañerías).
- Prácticamente elimina la filtración al subsuelo.
- Permite mayor recuperación de metales y reactivos
- Facilita el cierre y rehabilitación, requiere menor superficie, y mejora la percepción pública.

Desventajas:

- Mayor costo de inversión y operación, especialmente a altos tonelajes.
- Posible generación de polvo si no se controlan adecuadamente las emisiones.



Figura 17: Apilamiento en Seco de Relaves Filtrados en La Coipa, Chile

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

CO-DISPOSICIÓN (Co-disposal)

La co-disposición consiste en mezclar relaves finos con residuos gruesos de mina (como roca estéril) para formar una única corriente de *residuos (Martin et al., 2002).*

Objetivos y ventajas técnicas:

- Reducir el espacio vacío entre partículas gruesas, mejorando la compactación.
- Aumentar la resistencia estructural del conjunto, ya que los relaves finos limitan el flujo de agua y oxígeno.
- Acelerar la estabilización del depósito, lo que permite acceso anticipado para rehabilitación o cierre.
- Reducir el riesgo de licuefacción estática o dinámica.
- Mitigar la generación de drenaje ácido (AMD), ya que los relaves finos disminuyen la permeabilidad del conjunto, impidiendo la oxidación de sulfuros presentes en los residuos gruesos.

Similar al "dry stack" en cuanto a que no requiere muros de contención, lo cual elimina el riesgo de falla por rotura de dique *(Smith y Leduc, 2003).*

Principal desventaja:

- Difícil control del mezclado y deposición simultánea.
- Sólo es viable si ambos flujos (relaves y roca estéril) pueden ser bombeados o mezclados in situ, como en rajos abiertos o rellenos subterráneos.



Figura 18: Co-deposición de roca estéril y relaves espesados en el tajo (tajo izquierdo) en Kidston Gold Mines, al norte de Queensland, Australia. (Williams., 2021)

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

DISPOSICIÓN MARINA (DESCARGA OFFSHORE)

(Offshore Tailings Disposal – STD)

Implica la descarga directa de relaves a cuerpos naturales de agua: ríos, lagos o el mar

¿Cuándo se aplica? : Cuando no es posible construir depósitos terrestres debido a:

- Terreno inestable o montañoso,
- Alta sismicidad,
- Elevadas precipitaciones,
- Falta de espacio disponible.



Figura 19: Disposición Fluvial, Jaba River, Boungainville

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Técnicas de Específicas en descarga de Relaves

DISPOSICIÓN MARINA (DESCARGA OFFSHORE)

Objetivo técnico: Depositar relaves en zonas profundas, con bajo contenido de oxígeno, para evitar oxidación y movilización de metales.

Beneficios potenciales:

- Reducción del requerimiento de ingeniería terrestre.
- Sin huella superficial.
- Costos operacionales menores, sin necesidad de monitoreo post-cierre.

Riesgos y controversias:

- Comportamiento impredecible del flujo subacuático.
- Impacto ambiental marino poco comprendido.
- Alta preocupación pública e institucional: es el método con mayor oposición social y ambiental *(Vick, 1990).*

En ciertos contextos, puede ser menos dañino que un mal depósito terrestre, si se realiza bajo la zona eufótica (>100 m de profundidad), donde no hay fotosíntesis ni turbulencia por viento u olas.

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Toma de Decisiciones para la disposición de relaves

- Propiedades Físico – Químicas del Relave ¿Qué método de Disposición & el tipo de Construcción?
- Que opción es la más Robusta ante cambios en las Propiedades Mineralógicas y Reológicas del Mineral: SP – GR, Mayor talco o arcilla, menor dureza, menor Fe, etc
- Que Opción es la más rentable con Proyección de un Cierre Seguro & Económico de la Presa de Relaves?
- Que opción es la mejor, tomando como foco: Operación, Mantenimiento, Seguridad, Estabilidad y Durabilidad?
- Cual es la opción más rápida de Implementar con la menor Afectación?
- Que Opción deja menor huella ambiental y vuelta a su estado original?
- Que opción tendrá una vida útil mayor?
- Que opción es aceptable por la gente que vive y vivirá en el hábitat?
- Que opción es Económicamente viable, técnicamente factible y más segura?

RelaveNet
A Community of Excellence

Estrategias de disposición de relaves

Resumen comparativo entre estrategias

Tabla 2: Comparativa de estrategias de disposición de relaves

Parámetro	Disposición Convencional	Relaves Espesados	Relaves Filtrados
% Sólidos (en depósito)	30–40%	50–65%	>80%
Pendiente de playa típica	<1%	1–3%	3–4%
Área ocupada	Alta	Media	Baja
Recuperación de agua	Baja (<30%)	Media–Alta (40–60%)	Alta (>80%)
Estabilidad geotécnica	Media–Baja	Media	Alta
Riesgo ambiental	Alto	Medio	Bajo
CAPEX	Bajo	Medio–Alto	Alto
OPEX	Alto (por recirculación y monitoreo)	Medio	Bajo

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Definición técnica y contextual de Pendiente de Playa en Depósitos de Relaves

La pendiente de playa se refiere a la inclinación superficial del relave desde el punto de descarga hasta la zona más baja del depósito. Esta pendiente es una característica morfológica crítica *(Fitton 2007).*

- determina la distribución espacial del relave
- influye directamente en la capacidad de almacenamiento del depósito
- Influye en el comportamiento hidráulico
- en la estabilidad geotécnica y en el rendimiento del sistema de drenaje superficial e interno.

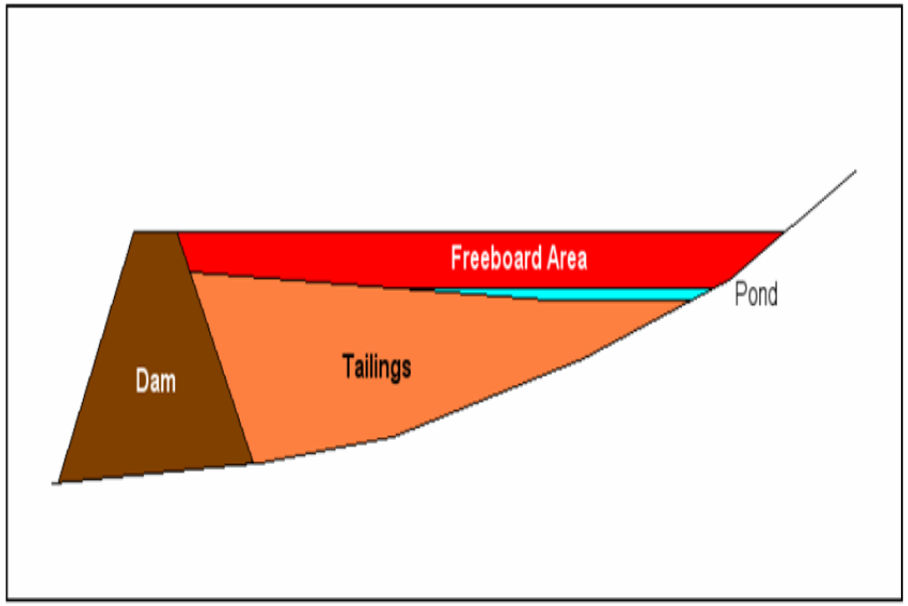


Figura 20 : Diagrama de relevancia del talud de playa en un embalse

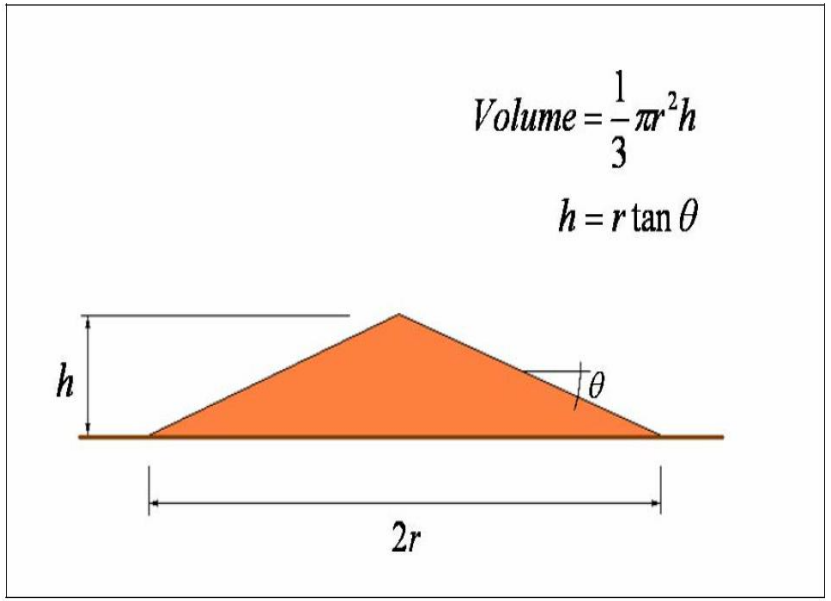
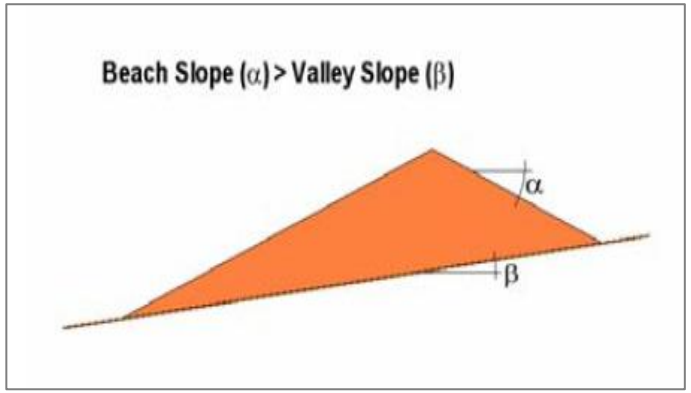
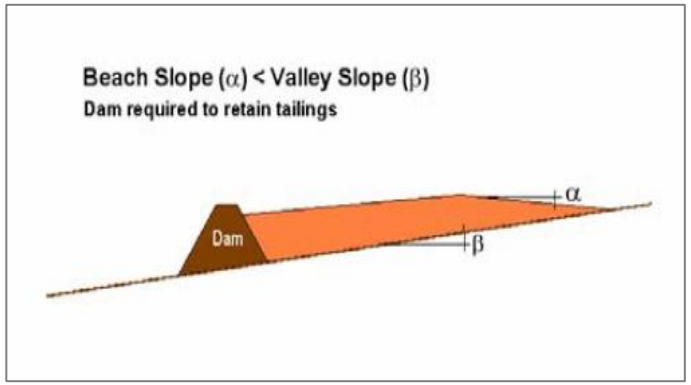


Figura21: Diagrama que muestra la relevancia de la pendiente de la playa en una pila de relaves.





Figuras 22: Esquemas de descarga en valle abajo, que muestran dos posibles configuraciones.

Importancia de la pendiente de playa

Ejemplos reales y variación de la pendiente según tipo de relave

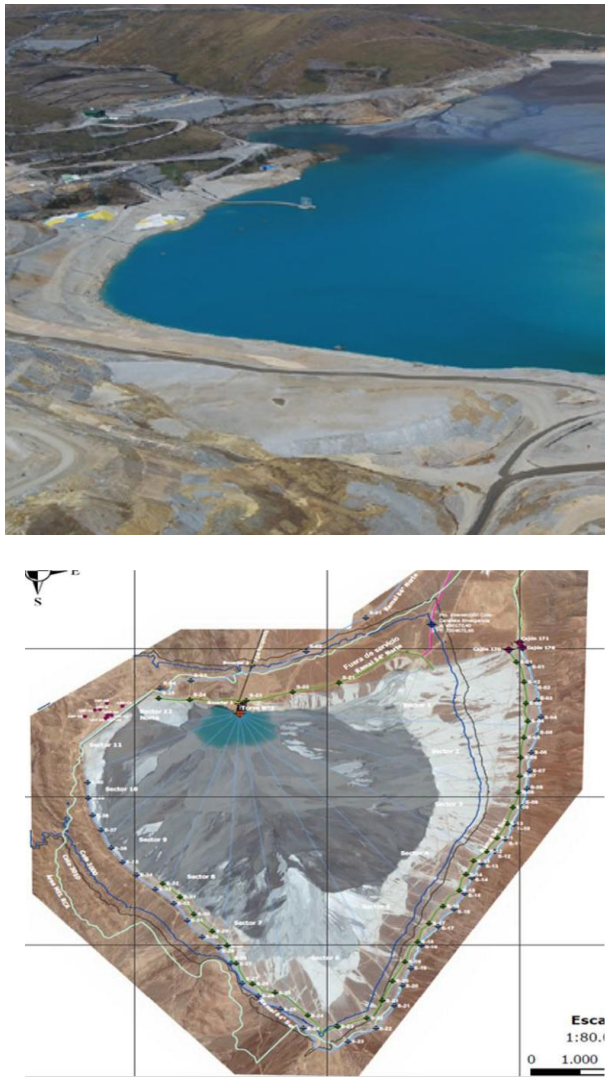


Figura 23: Fotografías descarga relaves convencionales Minera Escondida Ltda.

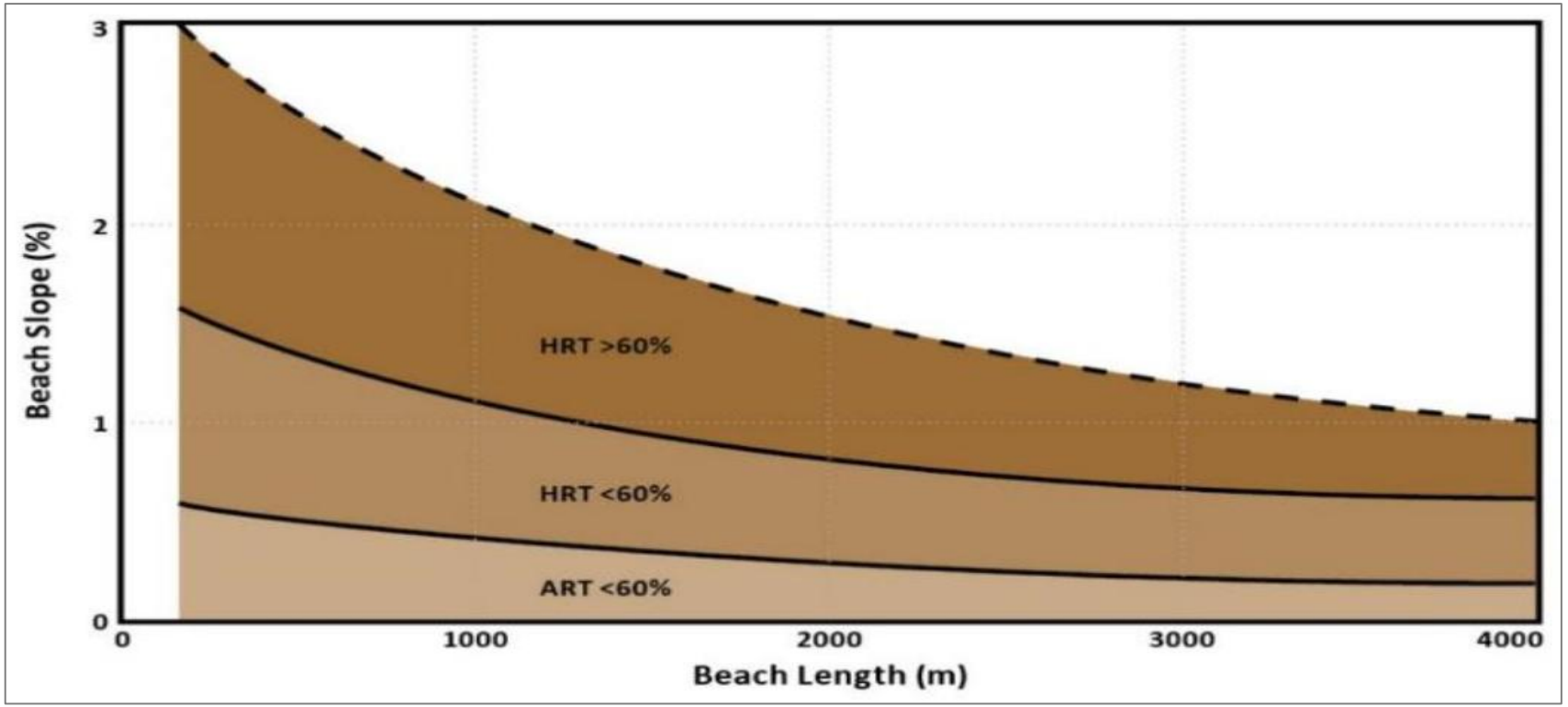


Figura 24 : Relación entre la pendiente de la playa (%) y la distancia de descarga de relaves para los tipos de relaves

Importancia de la pendiente de playa

Definición técnica y contextual de Pendiente de Playa en Depósitos de Relaves

La pendiente de playa depende de múltiples factores:

- *Características del relave: tamaño de partícula, distribución granulométrica, densidad, viscosidad y contenido de sólidos.*
- *Condiciones del proceso de disposición: tasa de descarga, ubicación y método de depositación.*
- *Tipo de tecnología aplicada: relaves espesados, en pasta o filtrados muestran pendientes más pronunciadas comparadas con relaves convencionales.*
- *Condiciones climáticas y superficie de fundación: afectan el secado superficial, consolidación y formación de costras o agrietamientos.*
- *Frecuencia y secuencia de deposición: la operación por capas o por incremento escalonado modifica el perfil longitudinal y transversal de la pendiente.*

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Implicancias operacionales del diseño adecuado de la pendiente

Una pendiente bien diseñada permite:

- *Promover el escurrimiento natural del agua hacia pozas de recuperación o zonas de captación.*
- *Minimizar la acumulación de agua libre, reduciendo el riesgo de licuefacción o inestabilidad.*
- *Optimizar el área efectiva de disposición, permitiendo mayor eficiencia volumétrica.*
- *Facilitar el monitoreo topográfico y geotécnico de la evolución del depósito.*

Desde un enfoque de diseño y monitoreo, la pendiente de playa debe ser predicha y controlada durante el ciclo de vida del depósito mediante modelos empíricos, correlaciones hidráulicas y simulaciones numéricas acopladas. Su evolución debe ser registrada periódicamente mediante métodos topográficos, LIDAR o drones.

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Impacto en pendiente y drenaje

La estrategia de disposición seleccionada tiene un efecto directo sobre ***la geometría y estabilidad del depósito.***

- Los relaves convencionales generan pendientes suaves (<1%), con alta saturación y menor capacidad de drenaje, lo que implica mayores riesgos en caso de eventos sísmicos o lluvias intensas.

- Relaves filtrados permiten mayores pendientes, lo que mejora el drenaje superficial, reduce la saturación del muro aguas abajo y refuerza la estabilidad global del depósito, incluso en zonas sísmicas.

La pendiente de playa no solo define la eficiencia de ocupación del valle, sino también los requerimientos de operación y monitoreo hidráulico.

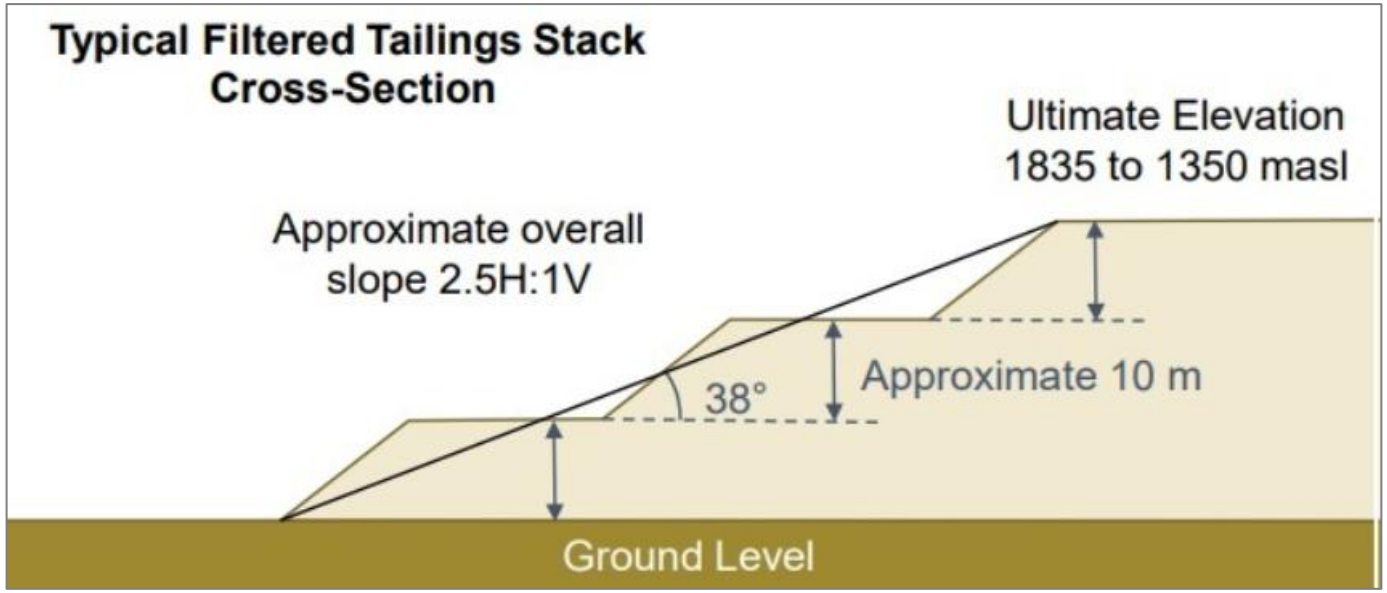
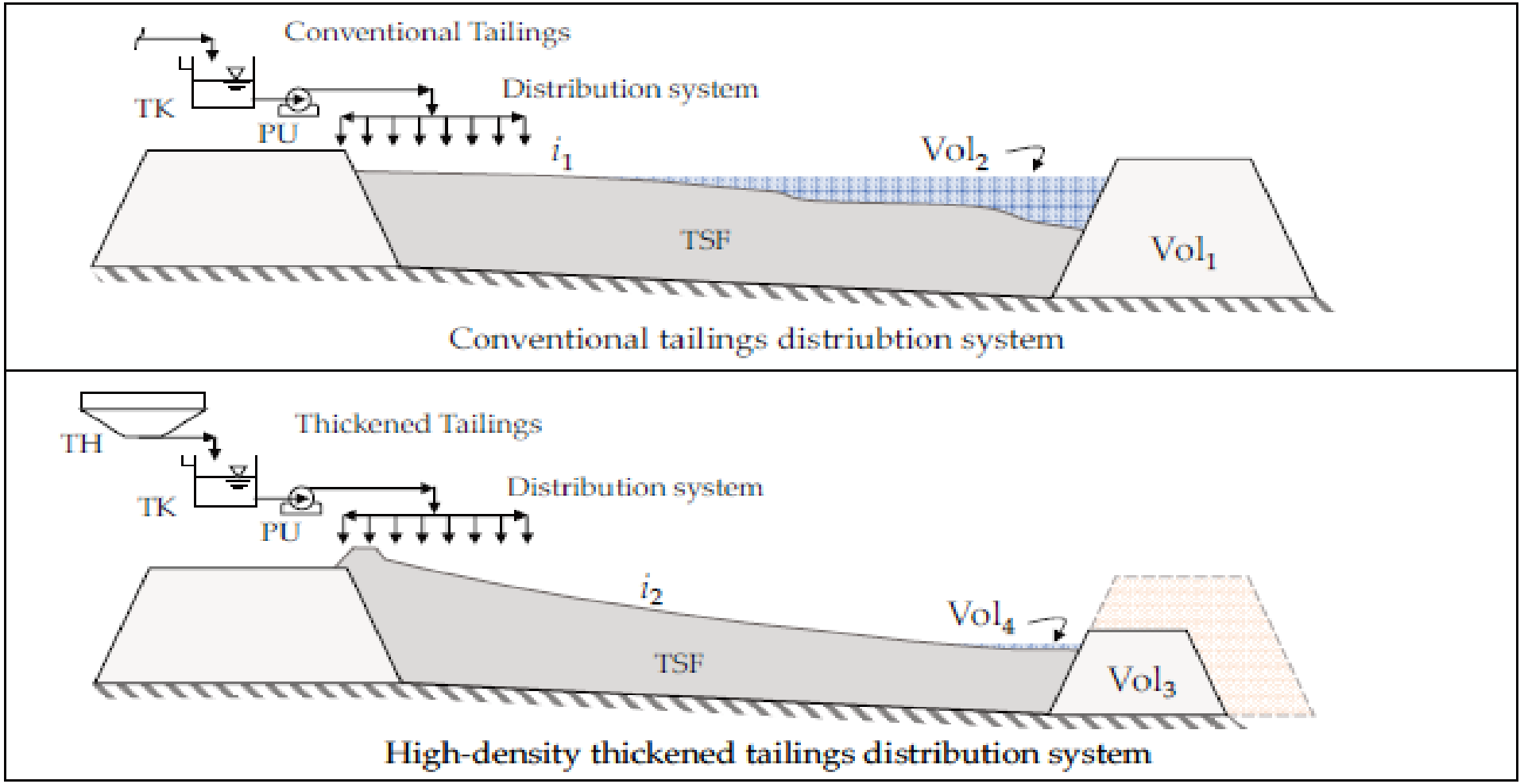


Figura 25: Sección transversal del TSF filtrados El Peñón

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Impacto en pendiente y drenaje. Comparación geométrica y funcional: Convencional vs Espesado



$Vol_1 >> Vol_3$

$i_2 > i_1$

$Vol_2 > Vol_4$

where:

$Vol_4 \approx 0\ m^3$

Figura 26: Instalaciones de almacenamiento de relaves Convencionales y Espesados (Bazán, 2020)

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Rol estructural de la pendiente de playa: nivel freático y estabilidad”

La pendiente de playa cumple un rol estructural y funcional esencial en la estabilidad del depósito de relaves, tanto desde el punto de vista del control de presiones de poro como del manejo hidráulico superficial.

- Su inclinación y extensión determinan la posición del nivel freático, permitiendo disipar presiones de poro y mejorar la resistencia del macizo.
- Controlan la dirección, velocidad y profundidad del escurrimiento superficial, influyendo directamente en la eficiencia del drenaje y la estabilidad hidráulica del depósito.
- Pendientes de playa altas (como en relaves en pasta o filtrados) favorecen el drenaje superficial, flujo concentrado hacia zonas de captación o evaporación, y la desaturación progresiva del depósito.
- Playas cortas, planas o erosionadas (como en depósitos convencionales) generan acumulación de agua en superficie, flujo difuso y mayor riesgo de saturación, especialmente cerca del muro de contención.

La ausencia de una playa desarrollada incrementa el riesgo de erosión interna y ruptura hidráulica ante eventos de sobrepaso. Por ello, el diseño y mantenimiento de la pendiente de playa debe considerarse componente estructural crítico *(Barlow et al. 2024)*.

Se han demostrado que variaciones milimétricas en el perfil de playa afectan el espesor del flujo por la reología no newtoniana del relave, modificando también la infiltración y elevando el nivel freático *(Zhang et al. 2023)*.

Importancia de la pendiente de playa

Importancia de la Playa en la Prevención de Fallas

Una playa de relaves adecuadamente desarrollada cumple un rol fundamental en la disipación de energía hidráulica.

Existe un umbral mínimo de altura de playa —denominado *"beach height threshold"*— que determina si el flujo superficial es disipado gradualmente por la geometría de la playa o si, por el contrario, se vuelve concentrado y erosivo, aumentando los riesgos de erosión interna y falla hidráulica del depósito.

Cuando la altura de la playa es inferior a este umbral:

- El flujo se canaliza con mayor velocidad,
- Se generan caudales pico más altos
- Se incrementa la presión sobre el muro aguas abajo.

Cuando la altura supera el umbral, el flujo se atenúa, se reparte de manera más homogénea sobre la superficie, y el riesgo estructural disminuye significativamente.

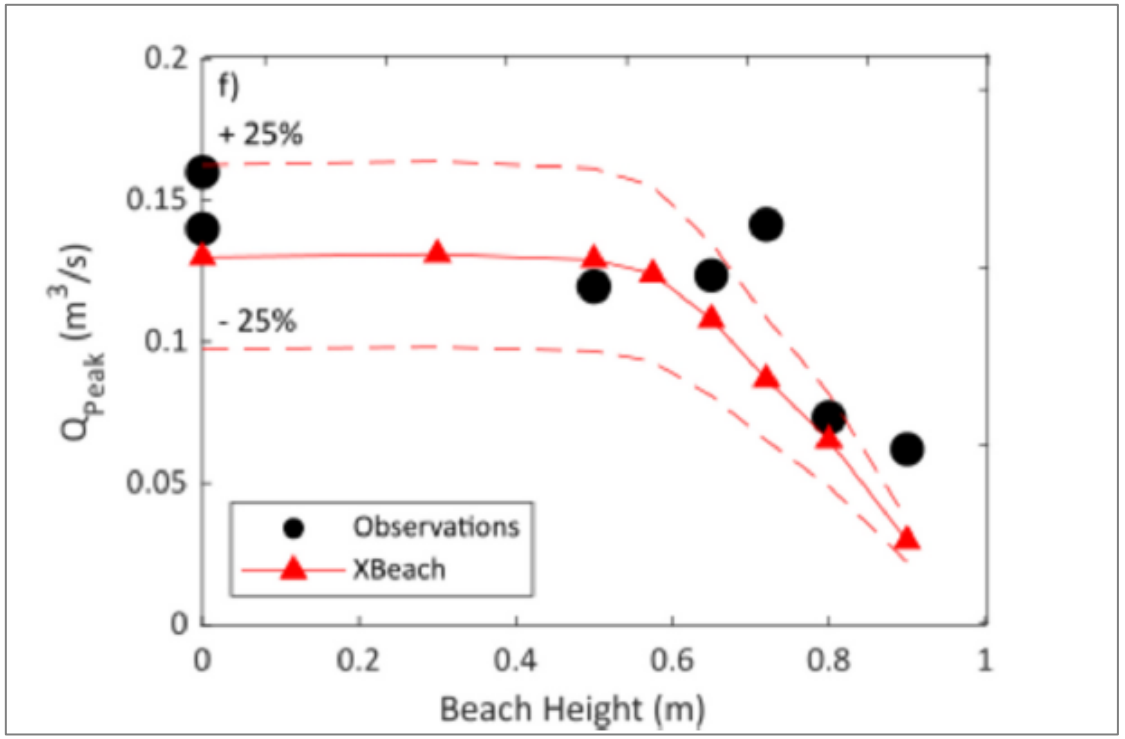


Figura 27 : Disminución del caudal pico de salida en función de la altura de playa.
(Barlow et al. 2014).

RelaveNet
A Community of Excellence

Importancia de la pendiente de playa

Riesgos por pérdida de playa

La ***pérdida o disminución sostenida de la pendiente de playa*** representa un riesgo crítico para la estabilidad del depósito favorece el avance del frente saturado hacia el muro de contención

- Incrementa las presiones de poro
- Reduce el drenaje gravitacional
- Riesgo de licuefacción
- Riesgo de falla por deslizamiento
- Compromete la capacidad del depósito

RelaveNet
A Community of Excellence

Factores que afectan la pendiente

Efecto de la granulometría y contenido de finos

La pendiente de playa que se forma en un depósito de relaves está ***fuertemente influenciada por la distribución granulométrica del material depositado***.

Una granulometría gruesa favorece la formación de pendientes más inclinadas debido a una mayor permeabilidad y capacidad de drenaje, mientras que un alto contenido de finos (arcillas, limos) genera pendientes suaves por la retención de agua y baja consolidación.

El control del tamaño de partícula no solo afecta la geometría de la playa, sino también su estabilidad estructural y funcional. La presencia de partículas finas promueve fenómenos de colmatación, disminución del drenaje superficial y acumulación de agua libre, con impactos negativos en la operación y seguridad del depósito.

- *Granulometría gruesa → pendiente más empinada.*
- *Alto contenido de finos → pendiente baja, mayor retención de agua (Arcillas).*
- *Efecto directo sobre drenaje, consolidación y estabilidad.*
- *Implicancia crítica en el diseño hidráulico del depósito.*

RelaveNet
A Community of Excellence

Factores que afectan la pendiente

Influencia del contenido de agua

El contenido de agua en la pulpa de relaves afecta directamente la pendiente de playa desarrollada en un depósito. Relaves con alto contenido de agua generan playas planas, extensas y con mayor saturación superficial, mientras que relaves con menor contenido de agua —producto de procesos de espesamiento o filtrado— forman playas más inclinadas y estables.

La disminución del contenido de agua acelera la sedimentación y consolidación de sólidos, reduciendo el *escurrimiento superficial, la acumulación en el muro de contención y el área requerida para la disposición* *(Wang et al. 2014)*.

Este comportamiento también influye en la capacidad de recuperación de agua y en el diseño estructural del depósito, siendo clave para relaves espesados y filtrados.

"Un menor contenido de agua en los relaves espesados o filtrados facilita un asentamiento más rápido, aumenta la pendiente inicial de la playa y disminuye el área de agua estancada, mejorando la estabilidad general".

Factores que afectan la pendiente

Influencia reológica en el desarrollo de pendiente de playa

El comportamiento reológico de la pulpa de relaves, especialmente su viscosidad aparente y el límite de fluencia, determina su capacidad de fluir y formar un perfil de playa definido.

En sistemas no newtonianos como los relaves espesados, la presencia de una tensión de cedencia elevada limita el escurrimiento superficial y favorece la formación de perfiles convexos o parabólicos.

Modelos como el de Herschel–Bulkley permiten representar adecuadamente esta dinámica y predecir la pendiente de playa. La comprensión y modelado de estos parámetros es crucial para un diseño predictivo eficiente.

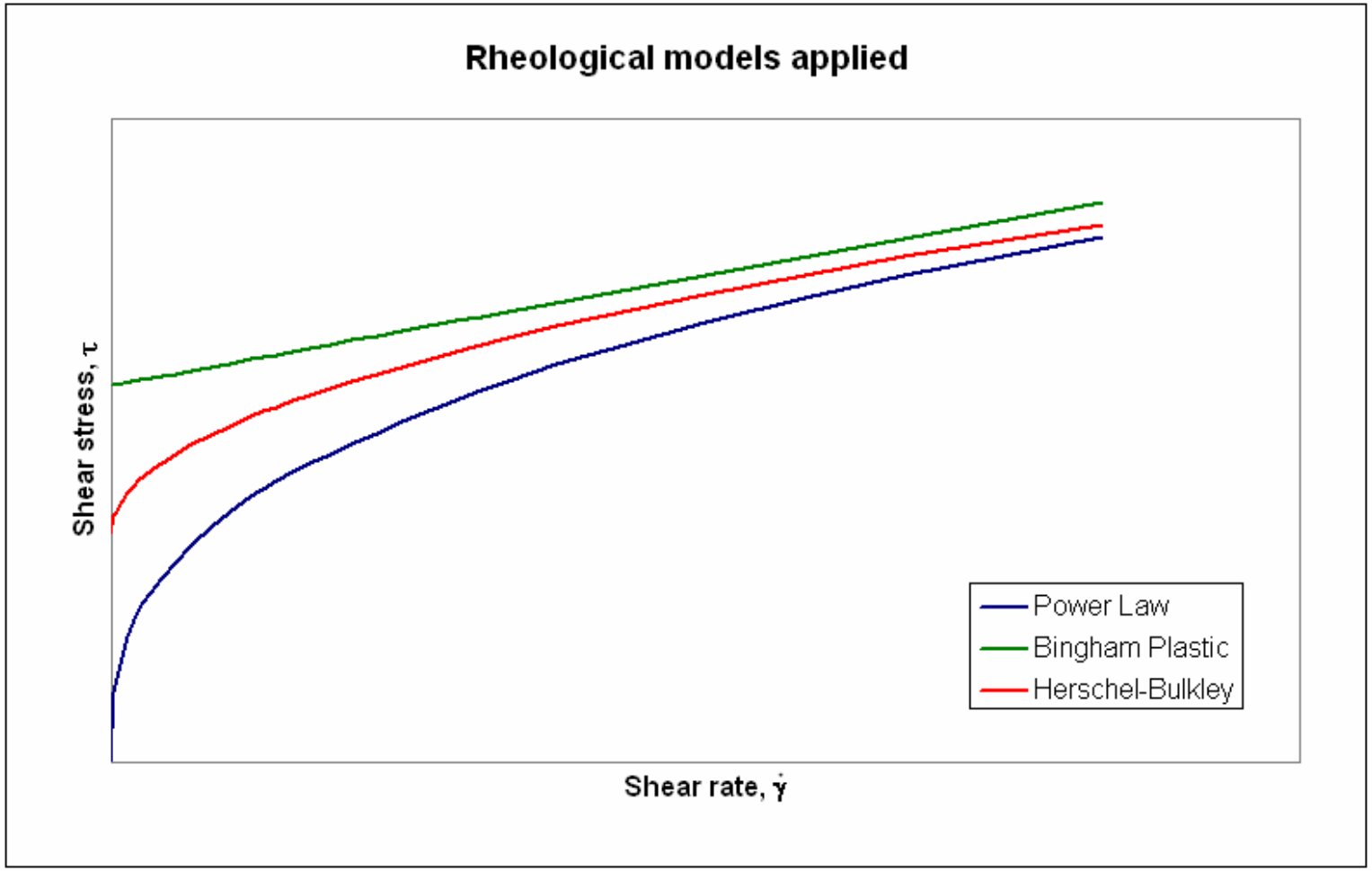


Figura 28: Comparación gráfica de los modelos reológicos de Ley de Potencia, Plástico de Bingham y Herschel-Bulkley.

RelaveNet
A Community of Excellence

Factores que afectan la pendiente

Casos de pérdida de pendiente por mal control de sólidos (%Cp)

Un control deficiente del contenido de sólidos (%Cp) en la alimentación a la disposición puede generar desviaciones significativas en la pendiente esperada de playa. Cuando el %Cp es menor al especificado en el diseño, el relave pierde su capacidad de conformar un talud adecuado, acumulándose en zonas planas y generando láminas de agua no deseadas. Esto representa un riesgo tanto para la estabilidad del muro de contención como para el control de drenajes.

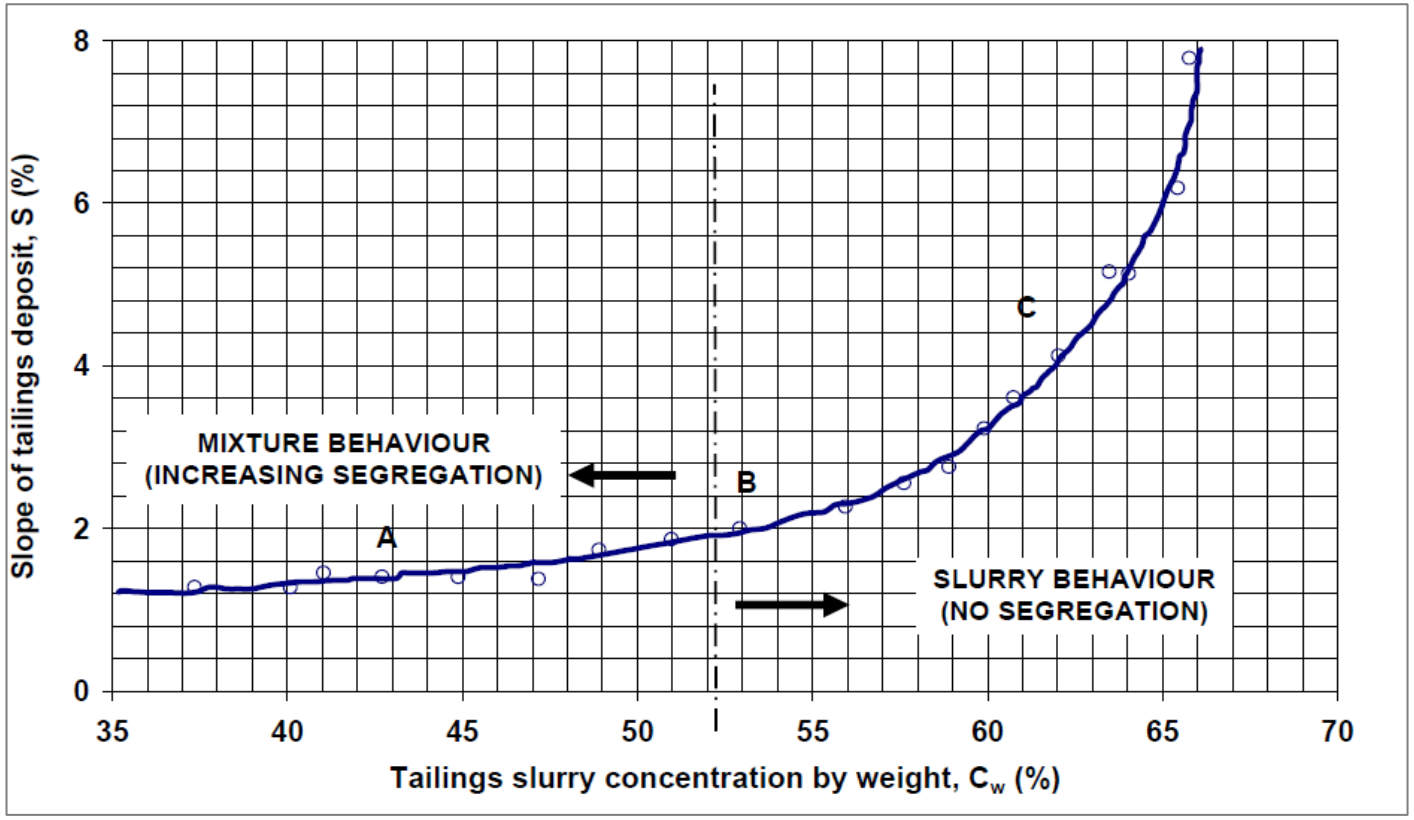


Figura 29: Trama de Slope vs Cp (Robinsky 1978)

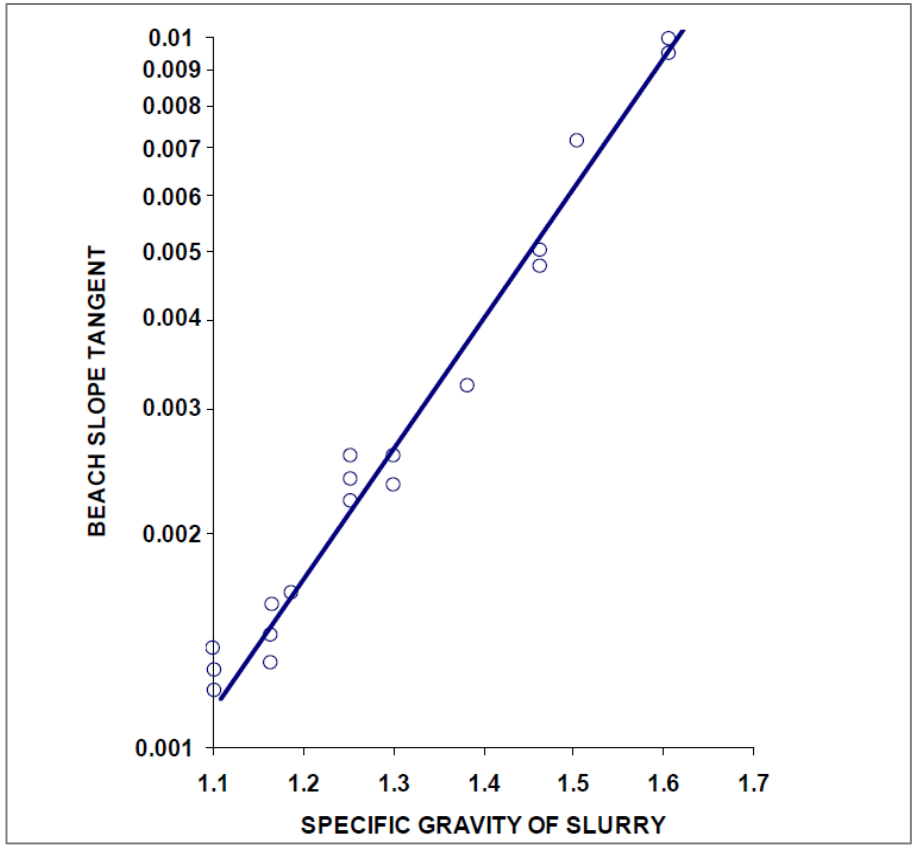


Figura 30: Pendiente de la playa frente a la gravedad específica del relave (Wates et al. 1987)

Diseño y monitoreo de la pendiente

Principios de diseño

El diseño de la pendiente de playa es un factor estructural clave:

- Estabilidad global del depósito
- Drenaje superficial
- Contención hidráulica

Se debe lograr una geometría predecible y estable en el tiempo, considerando el comportamiento reológico del relave y condiciones operacionales.

Una pendiente eficiente:

- Evita acumulación de agua libre
- Mantiene zonas críticas sin saturación
- Asegura el escurrimiento hacia el punto más bajo del depósito

El diseño debe incorporar:

- Márgenes frente a cambios en humedad
- Contenido de finos
- Eventos extremos

RelaveNet
A Community of Excellence

Diseño y monitoreo de la pendiente

Modelos predictivos

Los modelos predictivos:

- permiten estimar el perfil de playa en función de variables reológicas, operacionales y condiciones de deposición.
- Son clave para evitar acumulación de agua libre, mejorar el drenaje superficial y asegurar la estabilidad estructural del depósito.
- Modelos empíricos correlacionan pendiente con sólidos, caudal y tiempo de descarga *(Fitton 2007 y Baldwin & Pearce 2007).*
- Modelos numéricos avanzados incorporan viscosidad, tensión de cedencia y consolidación, simulando la geometría tridimensional del depósito.
- *Se debe considerar la deposición escalonada, que impacta directamente en el desarrollo de la pendiente*. La implementación de estos modelos requiere ensayos reológicos y datos de terreno, y permite decisiones de ingeniería en tiempo real.

RelaveNet
A Community of Excellence

Diseño y monitoreo de la pendiente

Tecnologías de monitoreo y control

El monitoreo continuo de la pendiente de playa es clave para mantener la estabilidad y eficiencia hidráulica del depósito. Tecnologías como drones con LIDAR, GNSS, cámaras multiespectrales y estaciones topográficas capturan en tiempo real variables como altura, ángulo y avance de playa. Sensores de humedad, piezómetros y geófonos complementan el control del flujo interno y condiciones de saturación. La integración de estos datos en plataformas digitales permite modelar la evolución de la playa y anticipar desviaciones. El uso sistemático de estas tecnologías mejora el drenaje, evita pérdida de playa y refuerza la trazabilidad operativa del depósito.

RelaveNet
A Community of Excellence

Diseño y monitoreo de la pendiente

Importancia del control operacional continuo

El control operacional continuo de la pendiente de playa es un componente clave en la gestión integrada de relaves.

- Permite mantener el ángulo de inclinación deseado
- Anticipar desviaciones asociadas a variaciones en:
  - la granulometría
  - contenido de sólidos
  - condiciones climáticas.

Una pendiente estable y controlada reduce la posibilidad de formación de zonas saturadas, disminuyendo el riesgo de inestabilidad estructural y mejorando el desempeño hidráulico.

Estudios destacan cómo la integración de datos operacionales en tiempo real, junto con modelos predictivos, permiten realizar ajustes preventivos en la operación de relaves espesados y filtrados.

La trazabilidad operativa y el cumplimiento normativo dependen de una pendiente controlada en tiempo real.

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

Cerro Lindo (Perú) – Control del Cp y Pendiente Estable con Relaves Espesados

En Cerro Lindo, operación subterránea en Perú, se logró una pendiente de playa estable mediante la disposición de relaves espesados con un contenido de sólidos en peso (Cp) superior al 63%.

Esta condición permitió mantener una pendiente sostenida a lo largo del tiempo, favoreciendo el drenaje superficial y reduciendo la saturación en el muro de contención.

La estrategia incluyó el control en planta de espesamiento, con monitoreo de densidad y retroalimentación operacional. Este caso destaca la importancia de mantener el Cp dentro de especificaciones de diseño para lograr pendientes efectivas.

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

La Coipa (Chile) – Monitoreo Continuo del Beach Slope

La operación de La Coipa implementó un sistema de monitoreo continuo del beach slope mediante estaciones topográficas automatizadas.

Estas permiten detectar variaciones en la pendiente de forma precisa, facilitando el ajuste de los ciclos de disposición, la reubicación del punto de descarga y la extensión del tiempo de secado.

Este caso ejemplifica el uso de tecnologías de monitoreo como herramienta para mantener la pendiente objetivo durante la operación, evitando pérdidas de eficiencia en drenaje y riesgos estructurales.

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

Mantos Blancos (Chile) – Relaves Filtrados en Zona Sísmica

La operación de Mantos Blancos aplicó relaves filtrados en una zona de alta sismicidad, logrando pendientes de 4% a 5%, superiores a las típicas en relaves espesados.

La alta concentración de sólidos (80-85%) permitió una rápida consolidación y reducción del contenido de agua libre.

Este diseño, implementado con éxito, demuestra cómo los relaves filtrados mejoran la estabilidad estructural del depósito, incluso bajo condiciones geotécnicas desafiantes.



Figura 31: Relaves Filtrados (arriba izquierda), Vista área del TSF relaves filtrados (arriba derecha) y Perfil longitudinal real de la playa de relaves filtrados en Mantos Blancos, Chile.

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

Comparación entre Pendiente Teórica y Real

Una de las principales brechas operacionales es la diferencia entre la pendiente de playa proyectada y la que se desarrolla en campo. Estas desviaciones responden a factores como:

- Variabilidad en el contenido de sólidos (Cp)
- Tiempo de secado insuficiente
- Errores en la reubicación del punto de descarga

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

Medidas Correctivas por Pérdida de Pendiente

Ante una pérdida de pendiente o desarrollo de zonas planas indeseadas, se deben implementar acciones correctivas inmediatas, como:

- ❖ Reconfiguración del punto de descarga
- ❖ Ajuste de Cp y mezcla de relaves
- ❖ Aumento del tiempo de secado
- ❖ Uso de maquinaria para reconformar la playa

El rediseño del sistema de monitoreo topográfico y la integración de criterios de alerta temprana son claves para prevenir futuras desviaciones.

RelaveNet
A Community of Excellence

Casos prácticos de operación y manejo de la pendiente

Lecciones Institucionales y Buenas Prácticas

Estándares Internacionales y Gobernanza Técnica

Experiencias internacionales, como las promovidas por la Mining Association of Canada (MAC) y el Banco Mundial, destacan que las fallas en la pendiente de playa están ligadas a deficiencias en la operación y monitoreo.

Entre las lecciones aprendidas destacan:

- Mantener registros continuos de evolución de pendiente
- Establecer umbrales de alerta
- Capacitación operativa constante
- Uso de sistemas GIS para trazabilidad

Estos estándares elevan la seguridad operacional y permiten una gestión proactiva y predictiva del depósito.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones Finales

- **La estrategia de disposición de relaves define la arquitectura física, hidráulica y geotécnica del depósito**. La elección entre disposición convencional, espesada o filtrada no es únicamente una decisión técnica; responde también a condiciones climáticas, sísmicas, normativas y a la proyección de cierre. Disponer relaves sin una estrategia integral incrementa el riesgo de saturación, falla hidráulica y pérdida de eficiencia volumétrica.

- **La pendiente de playa no es una consecuencia pasiva, sino una variable de diseño y control crítico**. Su geometría afecta la distribución espacial del relave, la eficiencia del drenaje superficial e interno, la evolución del nivel freático y la integridad estructural del muro aguas abajo. Una pendiente mal conformada puede comprometer la estabilidad del depósito aún cuando el diseño general sea robusto.

- **Los factores que determinan la pendiente de playa son multidimensionales y deben ser monitoreados dinámicamente.** Granulometría, contenido de finos, % de sólidos (Cp), reología de la pulpa, secuencia de descarga, condiciones climáticas y tiempo de secado son interdependientes. Su control exige un enfoque sistémico de operación y monitoreo. Modelos reológicos como Herschel–Bulkley permiten predecir perfiles, mientras que datos operacionales permiten su validación.

RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones Finales

- **La modelación predictiva, combinada con tecnologías de monitoreo en tiempo real, permite transitar desde una operación reactiva a una gestión proactiva del depósito.** Herramientas como LIDAR, GNSS, piezometría, estaciones topográficas automatizadas y simulaciones numéricas 3D entregan visibilidad sobre la evolución de la playa y permiten detectar desviaciones antes que escalen a condiciones críticas. Esto fortalece la trazabilidad operativa, el cumplimiento normativo y la resiliencia frente a eventos extremos.

- **Existen umbrales críticos de pendiente y altura de playa que, si no se respetan, aumentan la probabilidad de falla hidráulica.** Según Barlow et al. (2014), una playa con altura inferior al umbral no atenúa el caudal durante eventos de sobrepaso, provocando erosión interna y posibles rupturas. Su diseño debe ser considerado un componente estructural, no solo geométrico.

- **La validación empírica de pendientes teóricas mediante casos reales confirma que el comportamiento proyectado solo se cumple bajo control operativo riguroso.** Casos como La Coipa, Cerro Lindo y Mantos Blancos muestran que el éxito de una disposición no depende solo del diseño inicial, sino del monitoreo continuo del Cp, del control del tiempo de secado, de la ubicación estratégica del punto de descarga y del uso de herramientas de modelación y vigilancia.

Conclusiones Finales

- **La pérdida sostenida de pendiente representa un riesgo crítico que requiere acciones correctivas inmediatas.** Reconfigurar el punto de descarga, ajustar la mezcla, reconformar la playa mediante maquinaria o aumentar el tiempo de secado son estrategias que deben ser previstas en el plan operacional. La anticipación y el control continuo son las mejores defensas ante desviaciones topográficas.

- **La gobernanza técnica y la estandarización internacional refuerzan la importancia del monitoreo y del diseño basado en riesgo.** Organismos como la Mining Association of Canada (MAC) y el Banco Mundial recomiendan mantener registros históricos de evolución de pendiente, establecer umbrales de alerta temprana y fortalecer la capacitación operativa para prevenir fallas por pérdida de control topográfico.

RelaveNet
A Community of Excellence

Cierre

La disposición de relaves es hoy una disciplina que exige no solo criterios técnicos tradicionales, sino una **visión multidimensional** que integre geotecnia, hidráulica, operación, monitoreo y sostenibilidad. En este contexto, **la pendiente de playa se convierte en un elemento estructural clave**, cuyo diseño y comportamiento real condicionan la seguridad, la eficiencia volumétrica y la respuesta del depósito frente a eventos extremos.

Más allá de los cálculos y curvas, una pendiente de playa bien conformada refleja el nivel de madurez operacional de una faena minera. Su formación no depende únicamente del tipo de relave o tecnología de espesamiento empleada, sino de la **capacidad de anticipación**, **ajuste continuo** y **monitoreo integrado** que el operador sea capaz de mantener durante el ciclo de vida del depósito.

El análisis de casos reales demuestra que **la teoría sin validación empírica es insuficiente**, y que la excelencia operacional se construye con disciplina técnica, control de procesos y adopción de tecnologías inteligentes. El uso de modelos predictivos y sensores en tiempo real no solo mejora la trazabilidad, sino que permite tomar decisiones informadas antes de que los problemas emerjan.

En última instancia, este módulo invita a comprender que el diseño de la pendiente de playa no debe limitarse a una cifra o ángulo, sino entenderse como una **estrategia dinámica de control de riesgo, eficiencia hídrica y estabilidad estructural**. Y como toda estrategia, requiere ser gestionada con visión, información y responsabilidad.

RelaveNet
A Community of Excellence

Gracias

RelaveNet
A Community of Excellence