Módulo 4 – Tema 4 –

Estudio de caso: Soluciones ambientales aplicadas en TSF en Chile y Perú.

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías de Deshidratación de Relaves (Recuperación de Agua y Estabilidad)

Tabla 1. Ejemplos en Chile y Perú de Relaves Filtrados:

Metodología de gestión de relaves	Nombre de la instalación de almacenamiento de relaves	País	Parámetros de eliminación de TSF y gestión del agua			
			Tasa de producción (mtpd)	PSD d_{50} (µm)	Contenido de sólidos Cw (%)	Composición media (m3/mt)
FWS—WRCT	Pampa Pabellon TSF	Chile	170,000	52	52 (TT)	0.70
FWS—WRCT	Talabre TSF	Chile	180,000	70	55 (TT)	0.64
FWS—WRCT	Los Quillayes TSF	Chile	115,000	36	40 (SL)	0.35
FWS—WRCT	Mauro TSF	Chile	205,000	36	40 (SL)	0.35
FWS—WRCT	Candelaria TSF	Chile	75,000	65	51 (TT)	0.34
FWS—WRCT	Candelaria (Los Diques TSF)	Chile	75,000	65	51 (TT)	0.34
FWS—WRCT	Carmen de Andacollo TSF	Chile	55,000	70	53 (TT)	0.44
SWS—WRCT	Laguna Seca TSF	Chile	370,000	65	50 (TT)	0.66
SWS—WRTT	Esperanza (Centinela TSF)	Chile	95,000	45	65 (TT)	0.50
SWS—WRTT	Sierra Gorda TSF	Chile	110,000	40	60 (TT)	0.50
SWS—WRTT	Cerro Negro Norte TSF	Chile	20,000	75	65 (TT)	0.45
FWS—WRPTT	Las Cenizas (Chinchorro TSF)	Chile	2500	44	65 (TT)	0.39
FWS—WRPTT	ENAMI (Planta Delta TSF)	Chile	2000	25	60 (TT)	0.48
FWS—WRPTT	Coemin TSF	Chile	8000	50	60 (TT)	0.42
FWS—WRPTT	Alhue TSF	Chile	3000	55	65 (TT)	0.40
FWS—WRFT	La Coipa TSF	Chile	20,000	68	80 (TT)	0.22
FWS—WRFT	TSF El Peñón	Chile	3000	62	84 (TT)	0.20
FWS—WRFT	Mantos Verde TSF	Chile	12,000	57	82 (TT)	0.23
FWS—WRHT	Mantos Blancos TSF	Chile	12,000	86	82 (TT)	0.28
FWS—WRHT	Caserones (La Brea/Sand TSF)	Chile	90,000	74	60 (TT)	0.37
FWS—WRFT	Cerro Lindo TSF	Perú	7000	65	88 (SL)	0.20
FWS—WRCT	Quebrada Enlozada TSF	Perú	120,000	45	40 (SL)	0.38
FWS—WRCT	Quebrada Linga TSF	Perú	240,000	45	40 (SL)	0.38
FWS—WRCT	Quebrada Honda TSF	Perú	150,000	75	37 (SL)	0.62
FWS—WRCT	Quebrada Cortadera TSF	Perú	127,500	75	45 (TT)	0.40

NOTAS:
TT (Relaves Totales): hace referencia a la disposición y manejo de la totalidad de los relaves generados en la planta concentradora.SL (Lodos o "Slimes"): corresponde a la fracción fina de los relaves totales, con distribución granulométrica más fina.FWS (Fresh Water Supply): significa que la instalación utiliza suministro de agua dulce (de ríos, pozos u otras fuentes continentales) en sus operaciones.SWS (Sea Water Supply): significa que la instalación emplea suministro de agua de mar, ya sea en forma directa o desalada, para el transporte y/o manejo de relaves.WRCT (Water Recovery with Conventional Technologies): recuperación de agua en instalaciones con tecnologías convencionales de relaves (dique de arenas ciclonadas o presas de material de préstamo).WRTT (Water Recovery with Thickening Technologies): recuperación de agua mediante tecnologías de relaves espesados.WRPTT (Water Recovery with Paste Tailings Technologies): recuperación de agua en tecnologías de relaves en pasta.WRFT (Water Recovery with Filtering Technologies): recuperación de agua con tecnologías de relaves filtrados o "dry stack".WRHT (Water Recovery with Hybrid Technologies): metodologías de recuperación de agua mediante tecnologías híbridas, que combinan diferentes técnicas (ej. ciclonado + espesado).

El uso de **Relaves Espesados** (TTD) produce una alta recuperación de agua (80% de recuperación del agua de relaves) y un depósito auto-soportante con laderas inclinadas, requiriendo presas más pequeñas.

Ejemplos de operaciones chilenas que utilizan TTD:

- **Centinela (Esperanza)**
- **Spence**
- **Sierra Gorda**

El requisito de agua de reposición (agua fresca) para TTD es más bajo que para relaves convencionales.

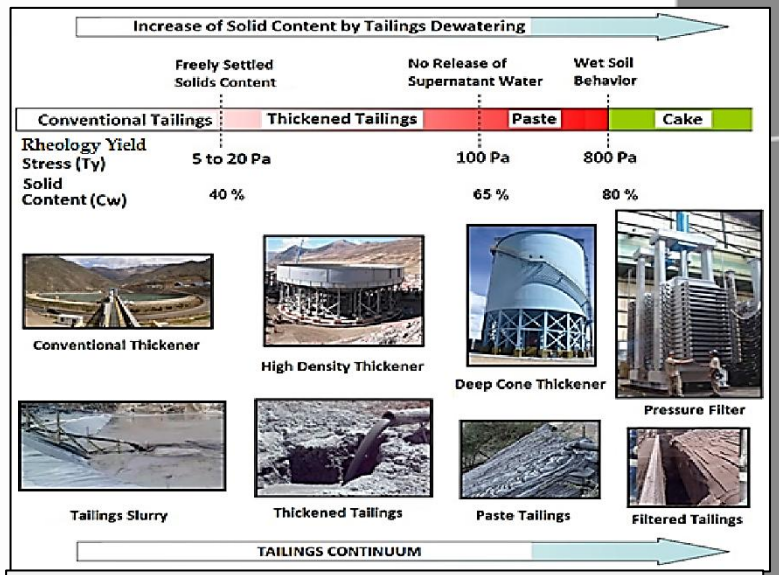

Figura 1. Tecnologías de deshidratación de relaves

"A mayor deshidratación, menor filtración: subir el Cw y bajar el make-up transforma la TSF en una estructura más estable, con menos pérdidas y un circuito de agua más eficiente."

RelaveNet
A Community of Excellence

Tecnologías de Deshidratación de Relaves (Recuperación de Agua y Estabilidad)

"Tanto la codisposición como el esquema HC–HVS reducen el head hidráulico y aumentan la recuperación de agua; elegir entre ellas depende de la disponibilidad de roca, la reología/granulometría del relave y la meta de make-up del sitio."

Caso Antamina – Codisposición de Relaves y Rocas de Mina (Perú)

•**Contexto:** Minera Antamina (Cu-Zn-Bi-Mo), ubicada en los Andes peruanos a 4.300 m s.n.m., produce 50 Mtpa de relaves depositados en un tranque convencional. La capacidad actual se agotará en 2036, por lo que la empresa estudia nuevas alternativas de gestión de relaves.

•**Problema:** Altos volúmenes de relaves (144.000 tpd) dificultan migrar a sistemas "secos" convencionales por la confiabilidad requerida en transporte y disposición.

•**Solución evaluada:** Codisposición de relaves desaguados con roca de mina (commingling).

- **Ensayos de laboratorio** confirmaron que hasta un 20–25% de relaves puede incorporarse en la roca, manteniendo propiedades geotécnicas adecuadas.
- Se evaluaron tres tecnologías de deshidratación:
  - **Espesamiento en pasta:** descartado por no lograr humedad adecuada.
  - **Cicloneo:** convirtió 65% de los relaves en material drenante y apto para codisposición.
  - **Filtración:** viable, pero con mayor humedad y riesgos de licuefacción, además de altos costos.

•**Avances:** En 2022 se desarrolló una prueba piloto (>100 tpd), que validó el cicloneo como alternativa prioritaria por su simplicidad, capacidad y experiencia previa en el país.

•**Beneficio ambiental:** La codisposición permite **minimizar la huella de residuos mineros** y mejorar la seguridad del manejo de relaves, alineándose con las expectativas sociales de gestión responsable.



Figura 2. Vista del Proceso Commingling (**Codisposición) – Antamina Perú**

Caso Mantos Blancos – Tecnología HC–HVS (Chile)

•**Contexto:** La planta de sulfuros de Mantos Blancos (Atacama, Chile) opera desde 1981 en una de las zonas más áridas del mundo. Desde sus inicios incorporó un sistema de clasificación y filtrado de relaves para maximizar recuperación de agua, primero con filtros de vacío y luego con innovaciones tecnológicas.

•**Tecnología aplicada:** Desde 2005 se desarrolló e implementó la combinación **HC–HVS (Hydrocyclones + Horizontal Vibratory Screens)**.

- Los relaves se clasifican en **dos etapas de hidrociclones**: la fracción gruesa (arenas) se dirige a **pantallas vibratorias horizontales** que producen un "cake" con baja humedad, apto para disposición en **apilamiento en seco**.
- La fracción fina (slimes) se espesa en **thickeners de alta densidad**, recuperando agua adicional.

•**Resultados técnicos:**

- Contenido de sólidos de hasta **70–82% en peso**, con humedades finales del orden de **17–23%** en base seca para la fracción gruesa.
- **Recuperación de agua cercana al 89%**, competitiva con tecnologías de relaves filtrados convencionales.
- Disponibilidad operativa de la planta de deshidratación ≈ 90%.

•**Beneficios ambientales:**

- Menor infiltración y evaporación en el TSF, sin necesidad de grandes lagunas de aguas claras.
- Disminución de riesgo de fallas por sobrellenado o piping.
- Posibilidad de cierre progresivo con compactación y revegetación de los depósitos.

•**Lecciones aprendidas:** El caso Mantos Blancos demuestra que la HC–HVS es una alternativa viable y más económica que filtros al vacío tradicionales, especialmente adecuada para operaciones medianas (≈ 10.000 tpd) en climas desérticos con escasez de agua, aunque su escalabilidad a faenas de gran tamaño (>25.000 tpd) aún presenta limitaciones.

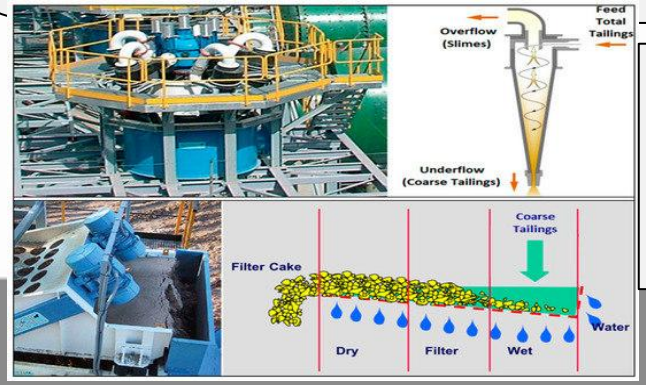

Figura 3. Vista esquemática del proceso de deshidratación en hidrociclón (HC) + criba vibratoria horizontal (HVS) – **Mantos Blancos Chile**

RelaveNet
A Community of Excellence

Uso de Geosintéticos y Revestimientos



Figura 4. Gestión de relaves de minas de oro—TSF totalmente revestida—Tambomayo TSF, Perú

Caso – Tambomayo TSF, Perú (mina de oro, TSF totalmente revestida)
El proyecto Tambomayo en Arequipa es un caso emblemático de gestión de relaves auríferos con cianuro. Debido al uso de reactivos altamente tóxicos (cianuro y complejos metal–cianuro), se estableció la obligatoriedad de un sistema de impermeabilización integral en el depósito de relaves.
Solución aplicada:
Se construyó una **presa y depósito totalmente revestidos** con un sistema compuesto de GCL (geosynthetic clay liner) y geomembrana HDPE, instalados tanto en la cara aguas arriba de la presa como en la cubeta de almacenamiento. El diseño busca evitar cualquier infiltración hacia el subsuelo y aguas subterráneas, asegurando que los efluentes potencialmente contaminados queden confinados.
Resultados:
•Recirculación eficiente del agua de proceso hacia la planta.
•Prevención de filtraciones de cianuro hacia el ambiente.
•Cumplimiento estándares internacionales de relaves auríferos con cianuro.
Lecciones:
Este caso demuestra que, cuando se manejan relaves con alta toxicidad, la única alternativa aceptable es el **revestimiento completo** con geosintéticos, complementado con programas rigurosos de QA/QC en instalación y operación.



Figura 5. Gestión de relaves de minas de cobre-TSF parcialmente revestida-TSF Los Quillayes, Chile.

Caso –Quillayes TSF, Chile (cobre, TSF parcialmente revestida)
La mina Los Pelambres (Salamanca, Chile) deposita sus relaves en el depósito Los Quillayes, una de las presas de arena cicloneada más altas del mundo (≈198 m). Debido a los riesgos de infiltración asociados al gran volumen de agua de proceso, se adoptaron soluciones de revestimiento parcial.
Solución aplicada:
Revestimiento parcial en la cara aguas arriba de la presa mediante un sistema de geomembrana + geotextil, anclado en una zanja de corte. Se construyó barreras hidráulicas en la fundación (cutoff trench y grout curtain) que impiden flujo de agua hacia subsuelo.
Resultados:
•Reducción del flujo de infiltración en la presa y fundación.
•Mayor estabilidad del talud aguas arriba al disminuir la línea freática.
•Operación continua del depósito en entorno sísmico complejo.
Lecciones:
Este caso muestra que, en relaves de cobre, un **revestimiento parcial** bien diseñado puede ser suficiente para cumplir con objetivos de estabilidad física y control ambiental, siempre acompañado de monitoreo permanente y barreras hidráulicas.



Figura 6. Impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de roca estéril de la mina con geomembrana bituminosa—TSF, Perú.

Caso 3 – TSF de roca estéril con geomembrana bituminosa, Perú
En varios proyectos peruanos se han construido presas de relaves utilizando roca estéril (rockfill dams), especialmente cuando existe abundancia de material y ausencia de suelos finos impermeables. El desafío es la alta permeabilidad inherente de los enrocados.
Solución aplicada:
Se instaló una **geomembrana bituminosa (BGM)** reforzada con geotextil no tejido, sobre la cara aguas arriba de la presa. La BGM se eligió por su resistencia química, durabilidad (>40 años), flexibilidad en climas extremos y facilidad de instalación (soldaduras por soplete sin requerir equipos complejos).
Resultados:
•Excelente impermeabilización en condiciones topográficas adversas.
•Reducción de riesgos de infiltración a través de la roca fracturada.
•Menor huella ambiental al no requerir arcillas de préstamo.
Lecciones:
Las BGMs se perfilan como una **nueva tendencia tecnológica**, especialmente útiles en presas de enrocado y climas severos. Representan un avance respecto a los geosintéticos convencionales, por su resistencia a la intemperie, durabilidad y facilidad constructiva.

RelaveNet
A Community of Excellence

Barreras Hidráulicas y Sistemas de Drenaje



Figura 7. Depósito de relaves Cortadera: presa inicial de 85 m de altura cerca de su finalización en diciembre de 2020 en el proyecto Quellaveco, Perú



Figura 8. Depósito de relaves Cortadera: primeras fases de construcción del sistema de drenaje y cortina de lechada, proyecto Quellaveco, Perú, mayo 2019

Caso Quebrada Cortadera – TSF Quellaveco (Perú)
Proyecto Quellaveco (Cu–Mo), operado por Anglo American en Moquegua, Perú, contempla construcción del depósito de relaves Quebrada Cortadera, una instalación a gran escala con presa de arranque de 85 m de altura (starter dam) y crecimiento en etapas. Su diseño bajo lineamientos del *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)*. La construcción se inició en 2019 y combina depósitos progresivos con sistemas de control de filtraciones y gestión de calidad.

Problema:
La magnitud del depósito y el horizonte operacional plantean desafíos en la estabilidad a futuro, frente a variaciones de operación, cambios de contratistas y condiciones hidrogeológicas complejas. Además, la necesidad de cumplir estándares internacionales exige sistemas robustos de control de filtraciones y un estricto manejo de la calidad de construcción, operación y documentación.

Soluciones aplicadas:
- Instalación de drenes de fundación, chimenea, drenes de pie y cortina de inyecciones (reducen presiones de poro, controlan flujo subterráneo.
- Aplicación de geomembranas y geocompuestos en zonas críticas para limitar infiltración y asegurar baja permeabilidad.
- Levantamiento por etapas (ajustes de diseño, incorporación de cierres progresivos y reducción de exposición de relaves saturados).

Resultados técnicos:
- Sistema de drenaje que mantiene el nivel freático alejado de la cara aguas abajo de la presa.
- Mejora en la consolidación y densificación de los relaves, reduciendo riesgos de licuefacción.
- Documentación continua que respalda la trazabilidad de cambios de diseño y construcción.
- Cumplimiento con estándares GISTM y CDA en cuanto a control de calidad y estabilidad a largo plazo.

Beneficios ambientales:
- Reducción significativa de la filtración hacia aguas subterráneas.
- Posibilidad de cierre progresivo con medidas de cobertura y revegetación.
- Aseguramiento de estabilidad físico–química post–cierre, minimizando riesgos de erosión o liberación de contaminantes.

RelaveNet
A Community of Excellence

Barreras Hidráulicas y Sistemas de Drenaje



Figura 9. Vista satelital del depósito de relaves Oasis - Perú



Figura 10. Depósito de relaves "Oasis" después de finalizados los trabajos de estabilización

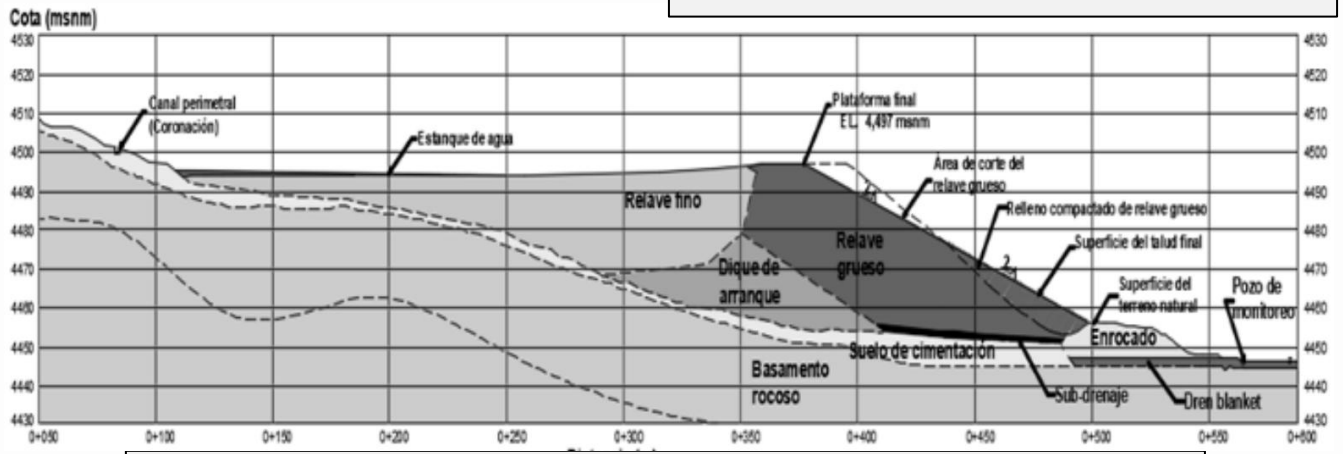

Figura 11. Sección geotécnica del depósito de relaves "Oasis" - Perú

Contexto:
El **Depósito de relaves "Oasis"**, propiedad de Nyrstar, está ubicado al noreste de Lima, en la cordillera andina entre 4.400 y 5.000 m s.n.m. Fue construido con método aguas abajo, con un dique de 45 m de altura, conformado con arenas cicloneadas en el "underflow" y relaves finos en el "overflow". Se emplaza en una zona de clima de alta montaña con precipitaciones > 1.000 mm/año y temperaturas medias de 10 °C .

Problema:
Durante la etapa de operación, los análisis geotécnicos evidenciaron factores de seguridad insuficientes (FS estático = 1,29 < 1,5; FS pseudo-estático = 0,94 < 1,0), lo que implicaba riesgo de inestabilidad bajo sismo y condiciones de filtración elevadas .

Solución adoptada:
Se implementaron medidas de **estabilización del talud aguas abajo**: corte y acarreo de relaves, conformación y compactación en capas de 0,3 m, nivelación de taludes aguas abajo y aguas arriba, más revegetación con especies endémicas. Se instalaron sistemas de drenaje e instrumentación (piezómetros, bancos de nivel) para monitoreo continuo .

Resultados técnicos:
Tras las obras, los factores de seguridad se incrementaron en etapa de cierre temporal (FS estático = 2,12 > 1,5; FS pseudo-estático = 1,24 > 1,0), confirmando la eficacia de la estabilización. El sistema de subdrenaje redujo la presión de poros y se observó mejor comportamiento hidráulico en condiciones de infiltración .

Beneficios ambientales:
- Reducción de riesgos de licuación y desbordamiento.
- Impermeabilización perimetral y monitoreo de calidad de agua superficial y subterránea aguas abajo.
- Revegetación para control de erosión y cierre progresivo del depósito.

Lecciones aprendidas:
El caso Oasis evidencia la importancia de:
- Diseñar depósitos con factores de seguridad conservadores desde la etapa de factibilidad.
- Implementar planes de estabilización temprana en caso de inestabilidad detectada.
- Integrar monitoreo geotécnico e hidrogeológico permanente como parte de la gestión operacional y de cierre .

RelaveNet
A Community of Excellence

Presas de arranque de TSF construidas con materiales prestados

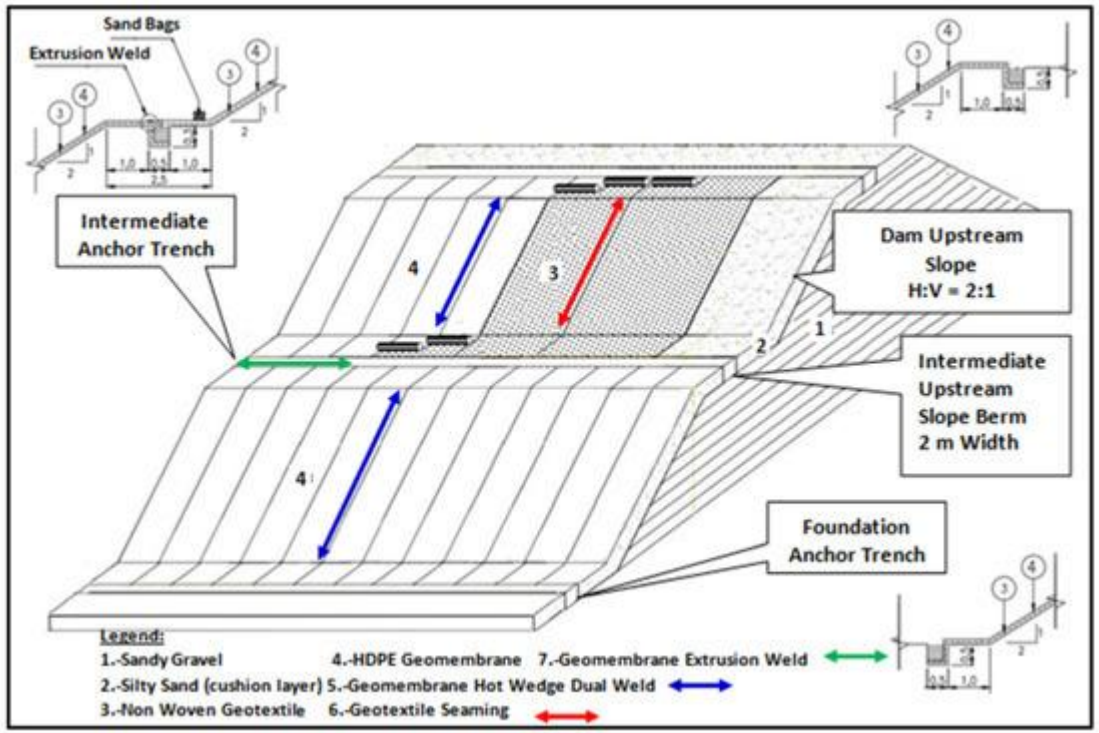

Figura 12. Vista esquemática de una presa de arranque con instalación típica de geosintéticos.



Figura 13. Presa de arranque frente aguas arriba instalación de revestimiento de geotextil y geomembrana terminada en la primera etapa: presa de inicio TSF, Chile



Figura 14. Presa de arranque frente aguas arriba instalación de revestimiento de geotextil y geomembrana terminada en la segunda etapa: presa de inicio TSF, Chile

RelaveNet
A Community of Excellence

Presas de arena de relaves ciclónicos

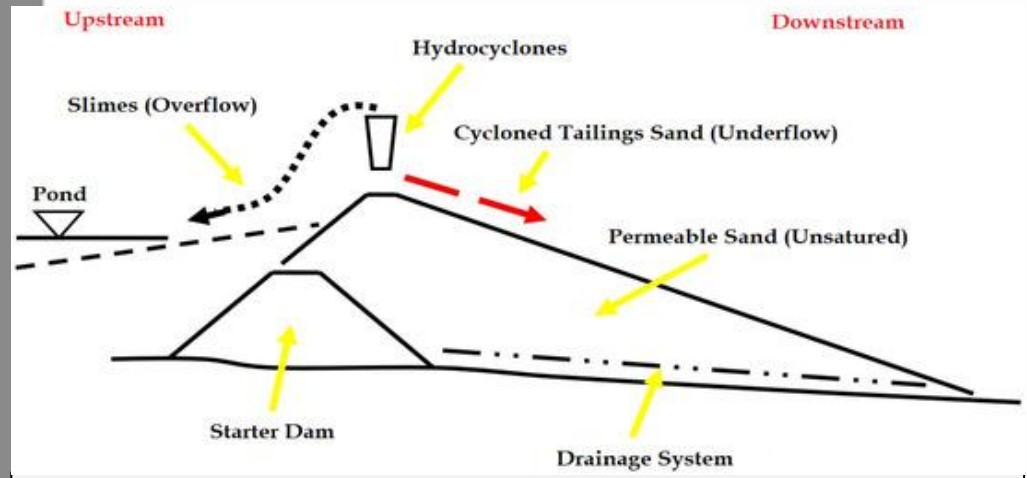

Figura 15. Vista esquemática de la construcción de presas de arena de relaves ciclados.

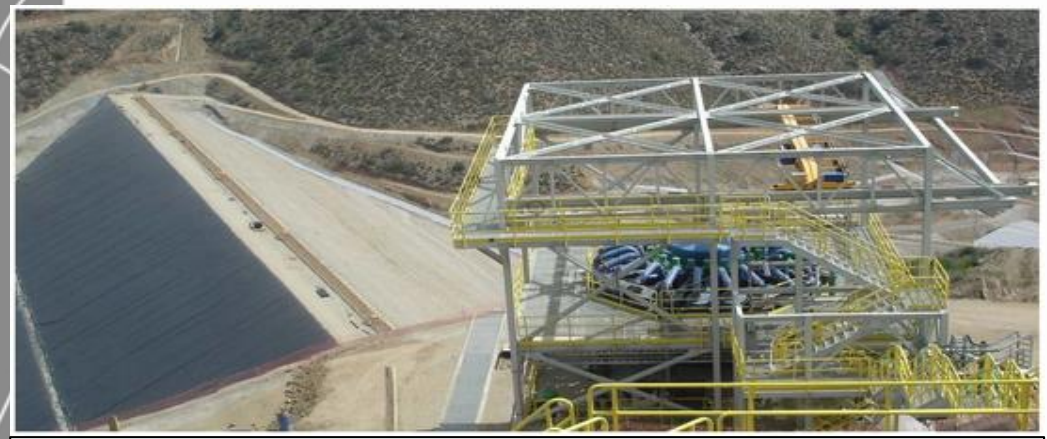

Figura 16. Vista panorámica de la presa de arranque TSF con revestimiento de geomembrana y estación hidrociclónica de relaves mineros—TSF, Chile.



Figura 17. Impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de relaves ciclónicos—TSF, Chile

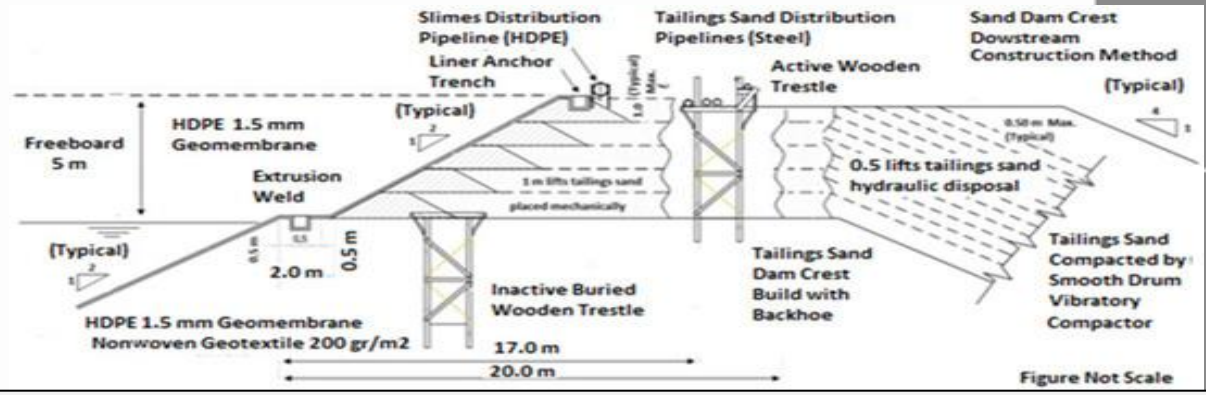

Figura 18. Detalle de construcción de impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de relaves ciclónicos.



Figura 19. Proceso de construcción de impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de relaves ciclónicos—TSF, Chile.

RelaveNet
A Community of Excellence

Presas de roca estéril minera (relleno de roca)



Figura 20. Vista panorámica—Detalle de la construcción de la impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de roca estéril de la mina— TSF, Perú.



Figura 21. Vista frontal—Detalle de construcción de impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de roca estéril de la mina—TSF, Perú.

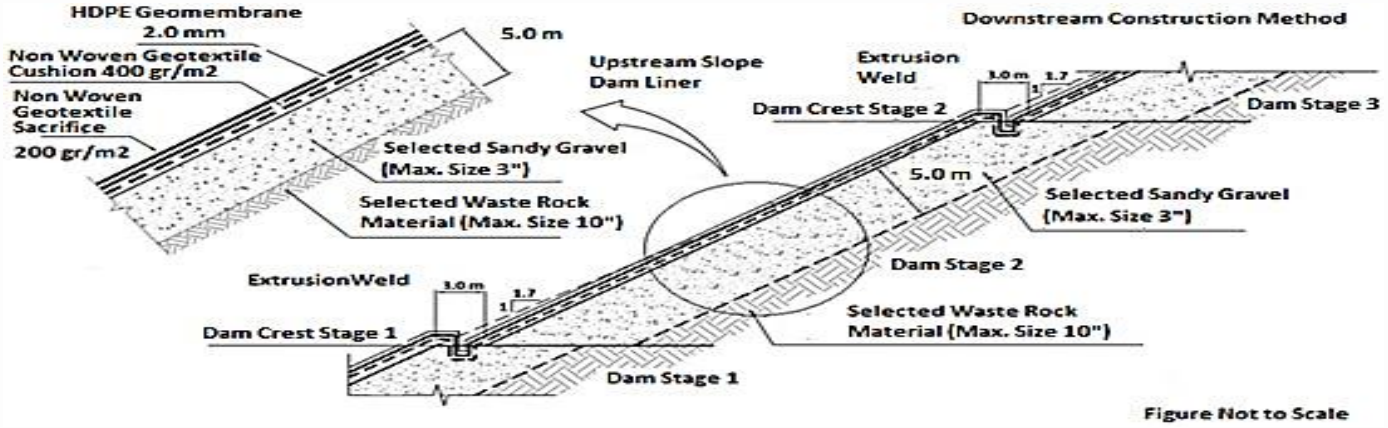

Figura 22. Detalle de construcción de impermeabilización de la cara aguas arriba de la presa de roca estéril de la mina (relleno de rocas).

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 4 – Tema 4 –

Estudio de caso: Soluciones ambientales aplicadas en TSF en Chile y Perú.

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence