Módulo 3 – Tema 3
Diseño y operación segura de las instalaciones de almacenamiento de relaves.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**

INTRODUCCIÓN

Tabla 1. Contenido Introductorio	
Definición	El diseño y la operación segura de un TSF comprenden la **planificación, construcción, gestión y cierre de depósitos de relaves**, garantizando estabilidad física y control ambiental.
Importancia	Fallas en TSF generan impactos ambientales, sociales y económicos severos (ej. Brumadinho 2019, Samarco 2015).
Factores clave de seguridad	Geotecnia del dique, control del agua (filtraciones, gradientes, lagunas), estabilidad sísmica, operación planificada y monitoreo continuo.
Normativa y estándares	Referencia a ICOLD, GISTM (Global Industry Standard on Tailings Management) y mejores prácticas de TMW.
Relación con la sostenibilidad	Integrar seguridad técnica con gestión social, ambiental y de gobernanza. La seguridad es parte de la licencia social para operar.

RelaveNet
A Community of Excellence

CONTEXTO Y DISEÑO DEL SITIO

Tabla 2. Condiciones relevantes del Depósito de Relaves Oasis para diseño y operación segura

Factor	Aspectos clave
Ubicación y topografía	Parte alta de cuenca, entre 4 400 – 5 000 msnm. Terreno montañoso y accidentado.
Clima e hidrología	Precipitación anual > 1 000 mm (80% en temporada húmeda). Temperatura media ≈ 10 °C. Alta recarga pluvial.
Hidrogeología	Acuíferos locales en calizas kársticas y cuarcitas fracturadas. Riesgo de infiltración hacia quebradas y humedales.
Geotecnia	Dique de arranque sobre calizas margosas. Material de construcción: gravas limo-arenosas. Ensayos in situ: SPT, MASW, penetración dinámica.
Sismicidad	PGA: 0,30 g (Tr = 150 años) y 0,44 g (Tr = 475 años). Para diseño: 0,15 g (50 % de PGA a 150 años).
Características del dique	Construcción aguas abajo. Altura 45 m, ancho 16 m, borda libre 3 m, taludes 2H:1V. Relaves gruesos en dique (underflow), finos dentro del embalse (overflow).
Instrumentación	6 piezómetros abiertos y 3 bancos de nivel para control piezométrico y deformaciones.
Medidas ambientales	Sistema de impermeabilización perimetral, monitoreo de agua superficial y subterránea aguas abajo.



Figura 1. Vista satelital del depósito de relaves Oasis

RelaveNet
A Community of Excellence

CONTEXTO Y DISEÑO DEL SITIO

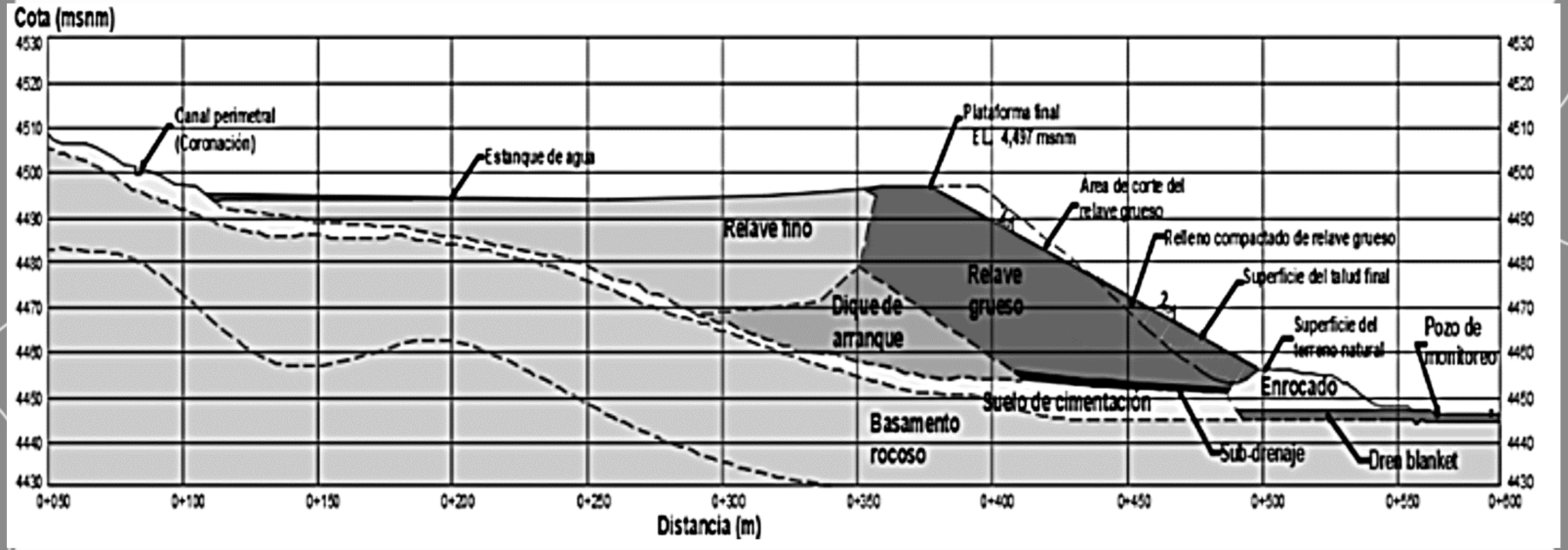

Figura 2. Sección geotécnica del depósito de relaves Oasis

RelaveNet
A Community of Excellence

ANÁLISIS GEOTÉCNICO E HIDRÁULICO

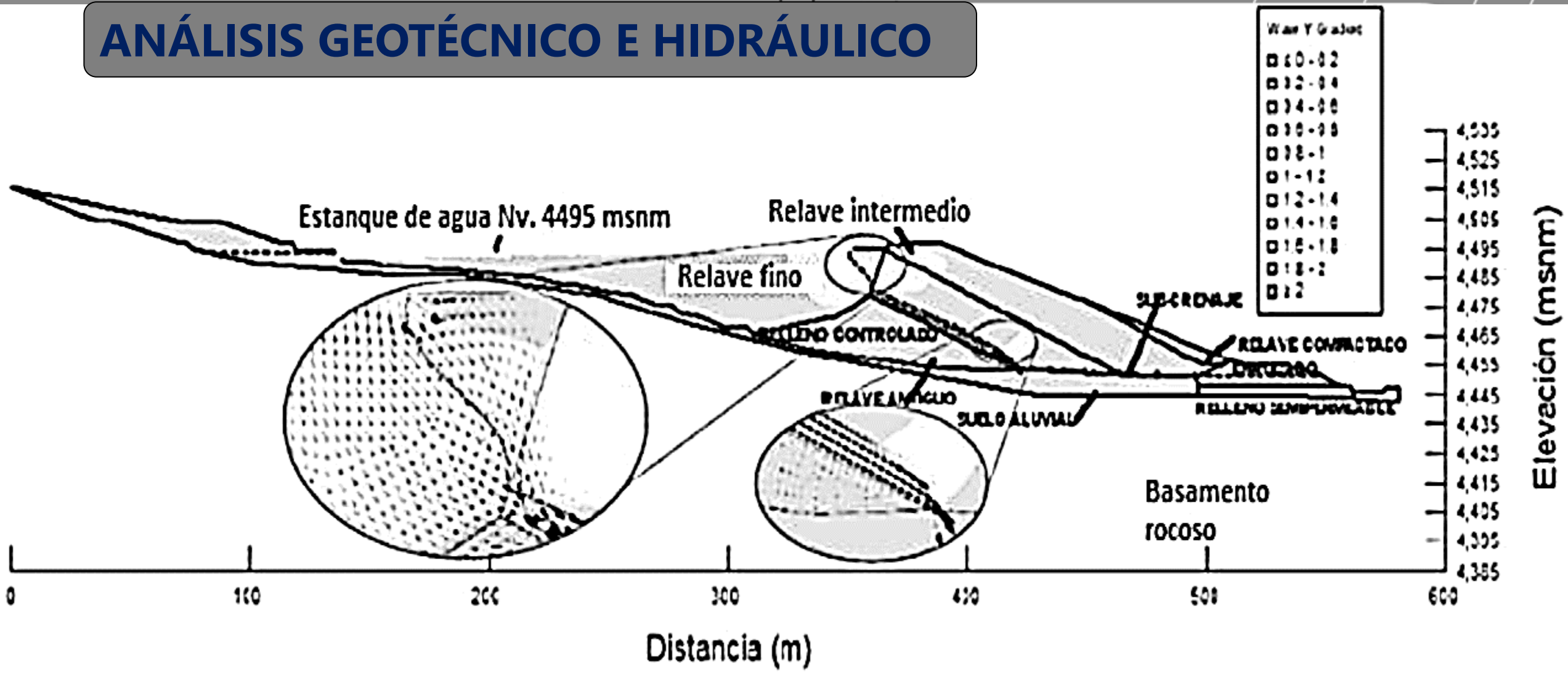

Figura 3. Gradientes máximos y de salida. a) etapa de operación Nv.= 4499 msnm y b) etapa de cierre temporal Nv.= 4,497 msnm.

RelaveNet
A Community of Excellence

ANÁLISIS GEOTÉCNICO E HIDRÁULICO

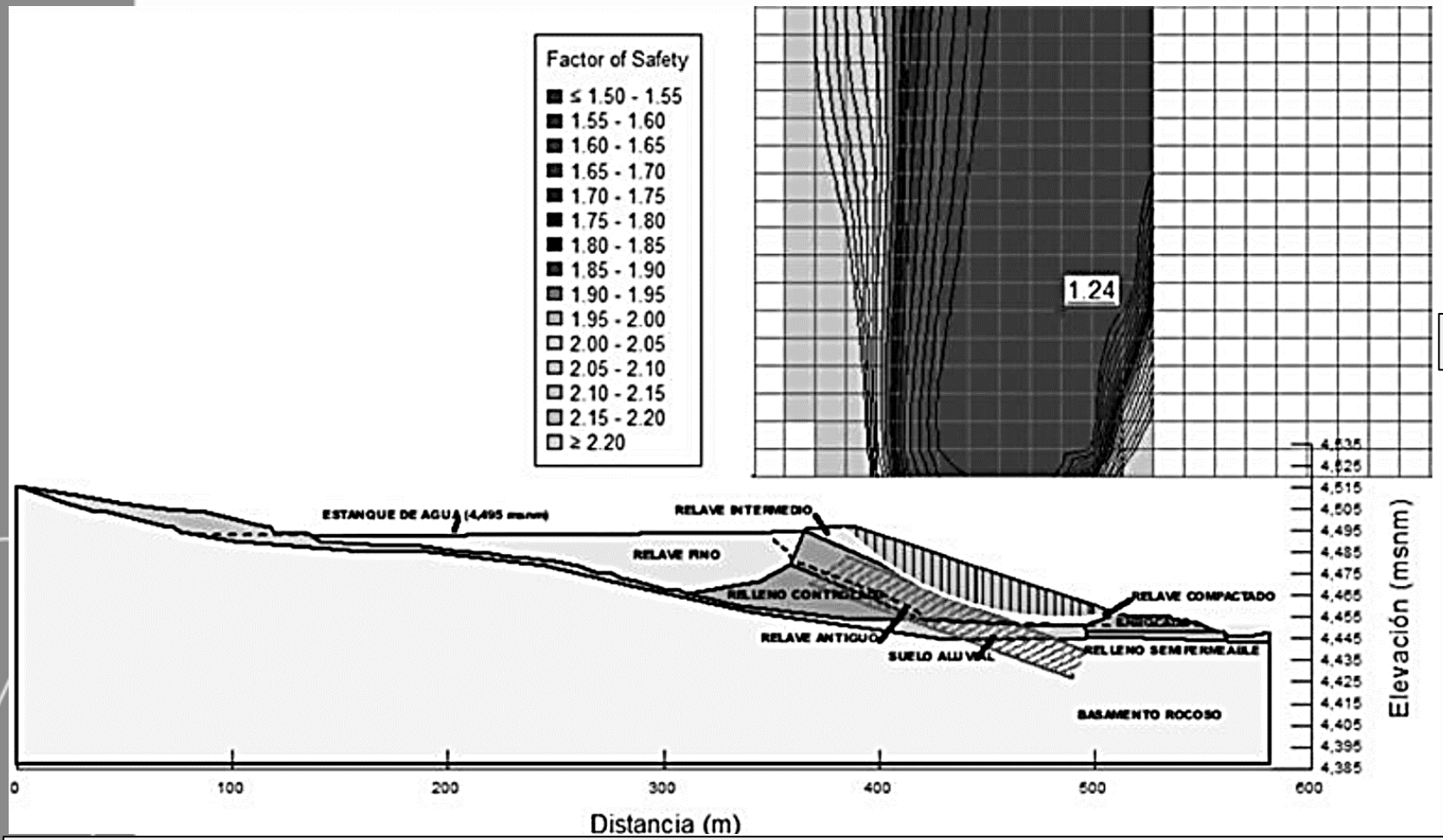

Figura 4. Factor de seguridad en la etapa de cierre temporal Nv= 4497 msnm, condición con sismo.

Tabla 3. Resumen de factores de seguridad

Etapa	Talud analizado	Condición	FS	FS mín.
Operación Nv. 4,499	Aguas abajo 1.6H:1V	Estática a_h=0g + filtración	1.29	1.5
		Con sismo a_h=0.15g + filtración	0.94	1.0
Cierre temporal Nv. 4,497	Aguas abajo 2H:1V	Estática a_h=0g + filtración	2.12	1.5
		Con sismo a_h=0.15g + filtración	1.24	1.0

RelaveNet
A Community of Excellence

ANÁLISIS GEOTÉCNICO E HIDRÁULICO



Figura 5. Depósito de relaves "Oasis" después de finalizados los trabajos de estabilización.

<u>Ubicación y contexto</u> (ver Figura 1)

- **Obras principales: canal de coronación, dren blanket, pozos de monitoreo.**

Mensaje clave: "El diseño seguro empieza con un emplazamiento adecuado y obras auxiliares de control".

<u>Sección geotécnica (Estructura del Dique)</u> (ver Figura 2)

- **Relaves gruesos → cuerpo del dique.**
- **Relaves finos → interior del embalse.**

Mensaje clave: "La combinación de materiales, geometría y drenaje asegura estabilidad estructural".

<u>Gradientes de salida (Comportamiento hidráulico)</u> (ver Figura 3)

- **Gradiente crítico = 0,9.**
- **Fuerzas de filtración → descendentes.**

Mensaje clave: "La seguridad depende también del manejo del agua y de gradientes controlados".

<u>Factores de seguridad (Estabilidad sísmica)</u> (ver Figura 4)

- **Operación: FS < mínimo.**
- **Cierre temporal: FS > mínimo (2,12 estática; 1,24 sísmica).**

Mensaje clave: "El rediseño geométrico transforma un depósito inestable en una estructura segura".

<u>Depósito estabilizado (Cierre y sostenibilidad)</u> (ver Figura 5)

- **Taludes tendidos y revegetación.**
- **Instrumentación y monitoreo ambiental.**

Mensaje clave: "La seguridad de un TSF se consolida con estabilización, cierre responsable y restauración ambiental".

RelaveNet
A Community of Excellence

De la teoría a la práctica: planificación y seguridad en depósitos de relaves

Tabla 4. Plan de Deposición de Relaves

Concepto	Ejemplo aplicado (Estudio de Caso: Oasis-Perú)	Notas
Plan de deposición de relaves (TDP): secuencia planificada de descarga y control de lagunas, para toda la vida útil del depósito.	La operación inicial no consideró una planificación adecuada; se generaron riesgos de inestabilidad.	Un TDP es esencial para evitar fallas durante la operación.
Información necesaria: topografía, geotecnia, características de relaves, infiltración, producción.	Oasis: se caracterizó tardíamente geotecnia y sismicidad; se identificó FS bajo en operación (1,29 estático; 0,94 sísmico).	Sin datos iniciales completos, el diseño queda expuesto a riesgos.
Herramientas de simulación: modelos numéricos (Civil 3D, Muk3D, TMS, etc.) para prever evolución del depósito.	Oasis: se aplicaron modelos Seep/W y GeoSlope en etapa operativa, no preventiva.	La simulación debe realizarse desde el diseño inicial, no solo como correctivo.
Curvas de almacenamiento y balances: control de volúmenes y tasas de llenado.	Figura 3: análisis de gradientes y control de laguna mostró riesgos hidráulicos.	El control de agua es parte central del diseño seguro.
Distribución de masas / puntos de descarga: estrategia de deposición secuencial y balanceada.	Figura 2: relaves gruesos en dique, finos en embalse; ausencia de sectorización.	Una deposición planificada mejora estabilidad y recuperación de agua.
Medidas de cierre y sostenibilidad: estabilización de taludes, revegetación, monitoreo ambiental.	Figura 5: taludes tendidos, compactación y revegetación → estabilidad alcanzada en cierre.	La seguridad es dinámica y se consolida con medidas de cierre y gestión continua.

RelaveNet
A Community of Excellence

CONCLUSIONES

Figura 6. Diagrama de elementos que forman el sistema de un depósito de relaves

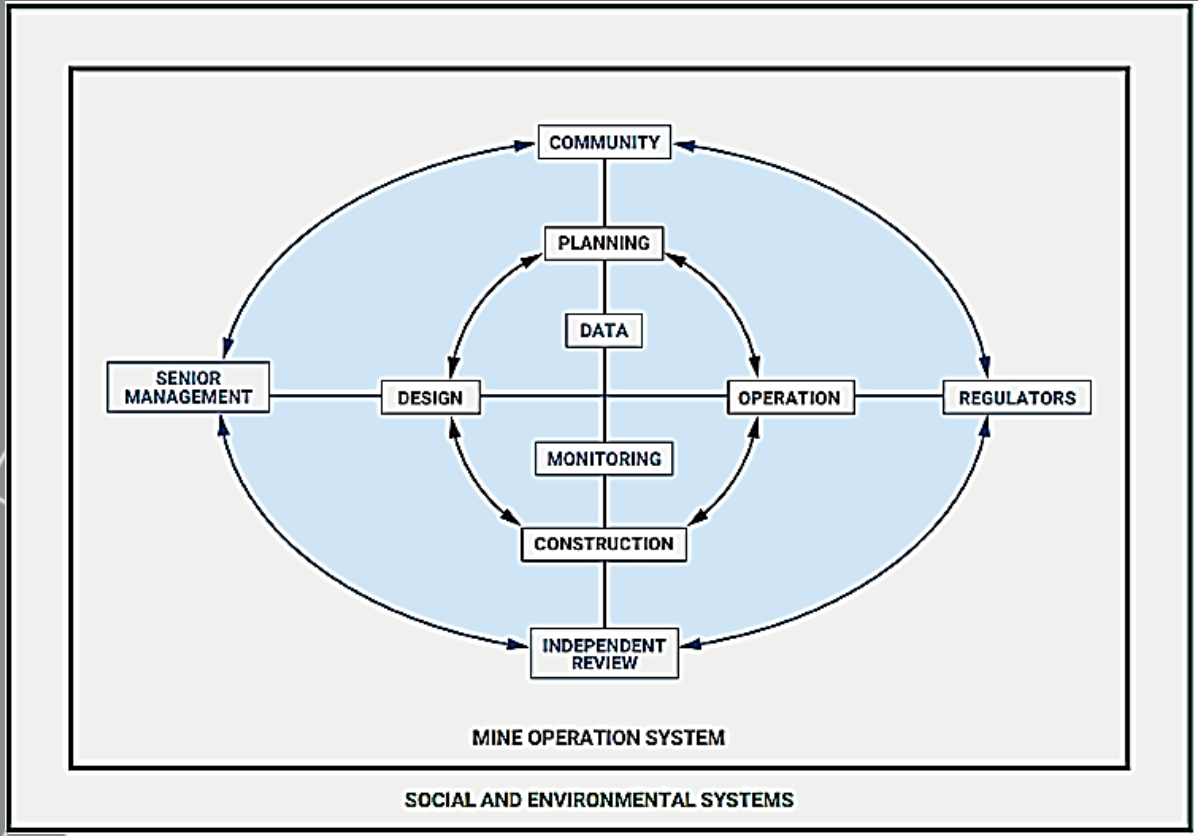

Tabla 5. Información necesaria para elaborar un plan de deposición de relaves*

Descripción	Convencional	Espesados y en Pasta	Filtrados	En Tajo (In-Pit)	Subterráneos	Co-Disposición	Subacuáticos
Topografía	X	X	X	X	X	X	X
Caracterización de relaves	X	X	X	X	X	X	X
Producción de planta	X	X	X	X	X	X	X
Condiciones de infiltración	X	X	X	X		X	X
Geoquímica	X	X	X	X	X	X	X
Configuración de lagunas	X	X		X		X	X
Consolidación	X	X		X		X	X
Tipo de deposición (perimetral, central, etc.)	X	X	X				
Pendientes de deposición	X	X	X				
Áreas bajas para manejo de agua	X	X	X			X	
Áreas fuera de especificación	X	X	X			X	
Uso de otros materiales (cemento, etc.)			X		X	X	
Requerimientos de transporte y bombeo	X	X	X	X	X	X	X
Desempeño de equipos mecánicos		X	X		X	X	
Requerimientos de compactación			X		X	X	
Cobertura mínima de agua							X

** Como no siempre es posible depositar en forma subterránea (por cronogramas mineros), debe considerarse un área de deposición superficial.*

RelaveNet
A Community of Excellence

RECOMENDACIONES

- La seguridad es dinámica
  - Un TSF puede pasar de inestable a estable mediante rediseño, estabilización y monitoreo continuo.

- El agua es el factor crítico
  - Control de lagunas, infiltraciones y gradientes debe ser el eje central del diseño y operación.

- El monitoreo debe ser preventivo
  - Instrumentación, modelación y simulaciones deben aplicarse desde el diseño inicial, no solo como correctivos.

- Alineación con estándares internacionales
  - Cumplir con ICOLD y GISTM fortalece la seguridad técnica, la licencia social y la sostenibilidad.

- Gestión integral y multidisciplinaria
  - La operación segura requiere integrar geotecnia, hidrología, gobernanza, comunidades y regulación.

El diseño y operación segura de un TSF debe alinearse con estándares internacionales (ICOLD, GISTM), integrando ingeniería, gestión de riesgos y responsabilidad social.

ICOLD (International Commission on Large Dams)

- Boletines técnicos y guías para diseño, operación y monitoreo de depósitos de relaves.
- Recomendaciones sobre factores de seguridad, control de filtraciones y estabilidad sísmica.
- Enfatiza la importancia de la instrumentación y la inspección periódica.

GISTM (Global Industry Standard on Tailings Management, 2020)

- Desarrollado por ICMM, PNUMA y PRI tras Brumadinho (2019).
- Establece 15 principios y 77 requerimientos obligatorios para la seguridad integral.

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 3 – Tema 3
Diseño y operación segura de las instalaciones de almacenamiento de relaves.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**