

## CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CIERRE DE UN DEPÓSITO DE RELAVES INACTIVO CONSTRUIDO MEDIANTE EL MÉTODO AGUAS ARRIBA

Luis Felipe Rojas Gomez, Anddes asociados

### 1. Introducción

Los depósitos de relaves construidos mediante el método aguas arriba presentan desafíos relevantes para el diseño de cierre, debido a que los diques sucesivos se fundan sobre relaves previamente depositados, generalmente en condiciones saturadas y con alta variabilidad geotécnica. Esto introduce incertidumbres en la resistencia al corte, el comportamiento post-sísmico y el régimen piezométrico.

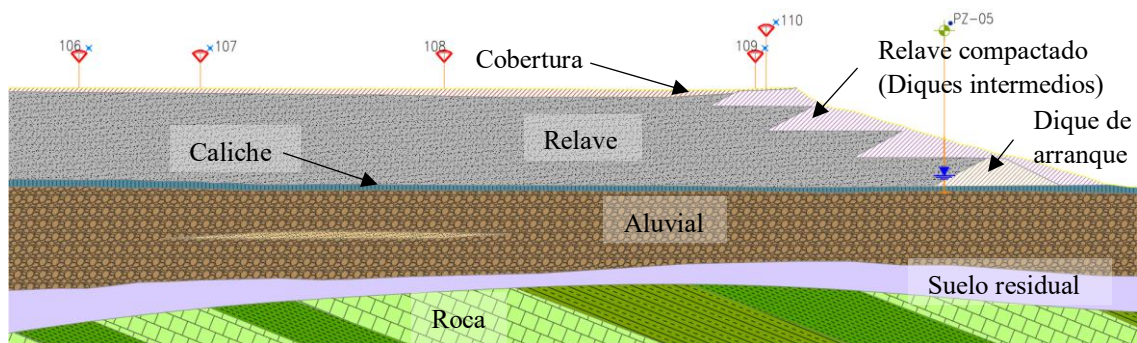
En condición de inactividad, estas incertidumbres adquieren mayor relevancia, ya que el depósito debe garantizar estabilidad a largo plazo sin control operacional continuo, frente a sollicitaciones sísmicas y variaciones hidrogeológicas. En este contexto, el diseño de cierre requiere una evaluación geotécnica integral basada en riesgo, en concordancia con estándares como la GISTM (ICMM, 2020) y la CDA (CDA, 2019).

El caso de estudio corresponde a un depósito de relaves inactivo construido mediante el método aguas arriba, con diques de relave grueso y un vaso de relaves finos que generan una estratigrafía heterogénea, con sectores potencialmente susceptibles a licuación y un régimen piezométrico variable, particularmente bajo los diques intermedios.

El objetivo de este estudio es evaluar las condiciones de estabilidad a largo plazo y definir criterios de cierre geotécnico para un depósito aguas arriba, integrando estándares internacionales.

### 2. Investigación geotécnica y modelo conceptual

Con el objetivo de reducir las incertidumbres del modelo geotécnico, se desarrolló una campaña de investigación complementaria que incluyó perforaciones, ensayos SCPTu en zonas previamente no investigadas y ensayos de laboratorio.



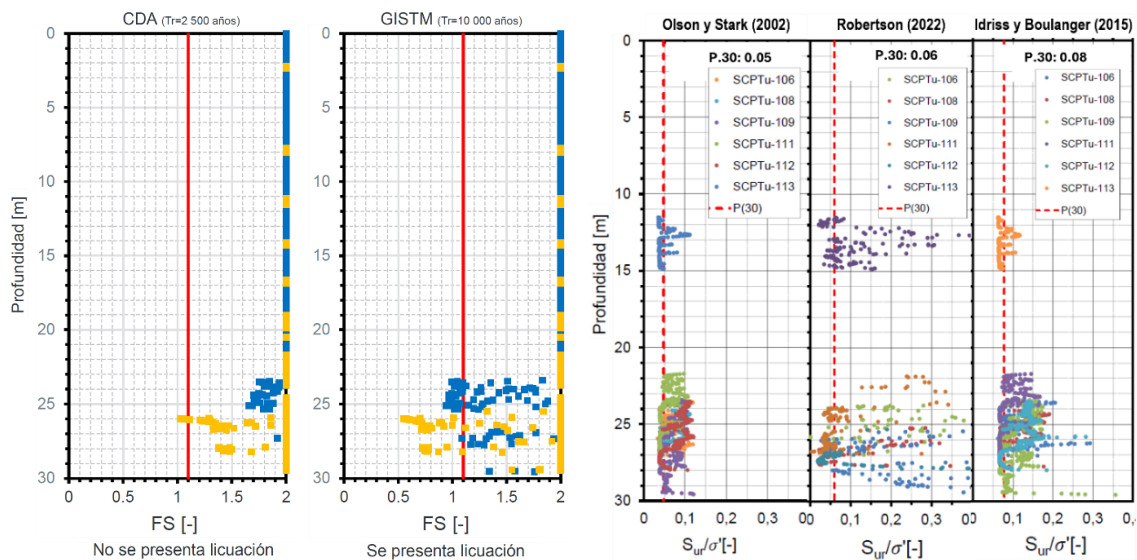
Gráfica 2.1 Modelo geotécnico de la sección principal del depósito de relaves.

Los resultados confirmaron una estratigrafía heterogénea, compuesta por relaves compactados en los diques intermedios y relaves finos en el vaso, con variabilidad en

densidad y humedad. Los ensayos SCPTu permitieron delimitar zonas con baja resistencia no drenada y evaluar la susceptibilidad a licuación, especialmente bajo diques intermedios, siguiendo metodologías basadas en CPT (Robertson, 2016; Robertson, 2022).

A partir de esta información, se definió un modelo geotécnico conceptual basado en unidades de comportamiento, asignando parámetros en función de densidad y estado de esfuerzos. La estimación de la resistencia residual no drenada se realizó considerando correlaciones propuestas para condiciones de licuación (Olson & Stark, 2002; Boulanger & Idriss, 2014).

Se incorporó explícitamente la variabilidad del nivel piezométrico como principal fuente de incertidumbre.



Gráfica 2.2 Evaluación del potencial de licuación /Estimación de la resistencia residual no drenada.

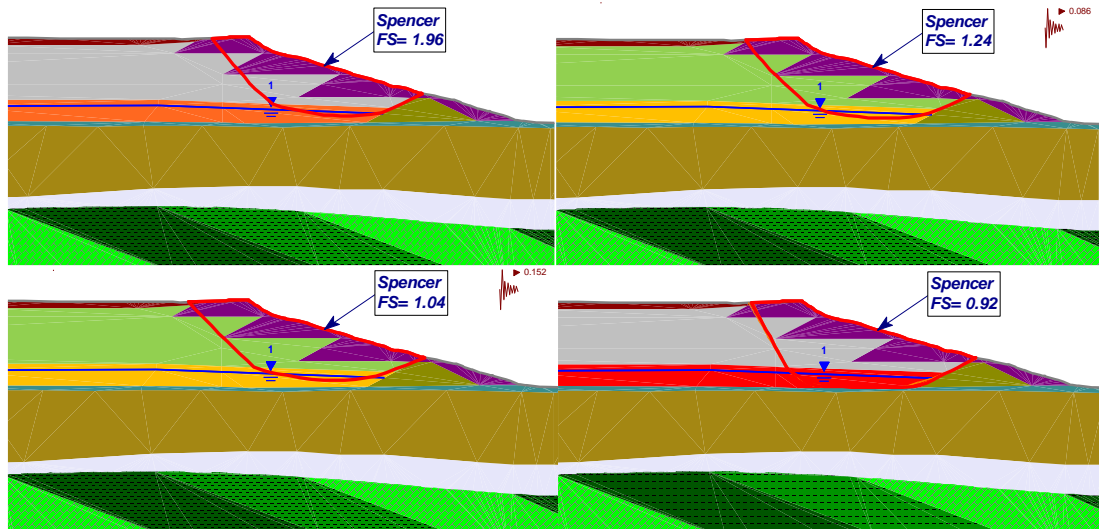
En la Tabla 1 se resumen los parámetros adoptados.

Material	$\gamma_{total}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$S_{ur}/\sigma'_v$
Dique de arranque	20	21	5	38	-
Relave compactado	18	19	9	21	-
Relave fino	17	18	0	30	0.06
Cobertura	20	21	0	32	-
Aluvial	20	21	0	32	-
Caliche	20	21	0	35	-
Suelo residual	20	21	20	20	-
Roca	25	26	120	30	-

$\gamma_{total}$ : peso específico total del suelo,  $\gamma_{sat}$ : peso específico saturado del suelo,  $c'$ : cohesión,  $\phi'$ : ángulo de fricción interna,  $S_{ur}/\sigma'_v$ : relación de resistencia no drenada residual

Tabla 1. Resumen de parámetros - modelo geotécnico

Los análisis de estabilidad se realizaron mediante métodos de equilibrio límite (Spencer, 1967), considerando condiciones estáticas, pseudoestáticas y post-licuación.



Gráfica 2.3 Resultados de la estabilidad en la sección principal del depósito de relaves.

Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Sección	Tipo de falla	FS <sub>estático</sub>	FS <sub>pseudoestático</sub>		FS <sub>post licuación</sub>
			CDA K <sub>s</sub> =0.086	GISTM K <sub>s</sub> =0.152	$\frac{s_{ur}}{\sigma'_v}=0.06$
1-1'	Global	1.96	1.24	1.04	0.92
2-2'	Global	2.10	1.30	1.09	1.07
3-3'	Global	2.77	1.83	1.53	2.21
4-4'	Global	1.67	1.34	1.16	1.68
5-5'	Global	2.04	1.32	1.00	1.00
6-6'	Global	2.33	1.94	1.58	NA

Tabla 2. Resultados del análisis de estabilidad en condición estática, pseudoestática y post licuación

### 3. Criterios de diseño de cierre: comparación GISTM y CDA

El diseño de cierre fue evaluado bajo los lineamientos de la GISTM (ICMM, 2020) y la CDA (CDA, 2019), con el objetivo de analizar la influencia de ambos enfoques en la definición de medidas de estabilización.

Bajo el enfoque de la CDA, los factores de seguridad dependen de la clasificación de consecuencia de falla. Los resultados indican que el depósito cumple con los criterios requeridos sin necesidad de reforzamiento adicional.

En contraste, la GISTM adopta un enfoque más conservador, orientado a la reducción del riesgo bajo condiciones de incertidumbre. Bajo este estándar, al considerar condiciones de licuación del relave, se adoptó la resistencia residual no drenada y se identificó la necesidad de reforzar los taludes mediante un relleno masivo no compactado para cumplir los criterios mínimos de factor de seguridad post licuación.

La diferencia entre ambos enfoques radica en el tratamiento de la incertidumbre y el nivel de riesgo residual aceptable. Mientras la CDA permite soluciones optimizadas, la GISTM prioriza la robustez del sistema y la resiliencia a largo plazo.

### 4. Evaluación de modos potenciales de falla

Se evaluaron los principales modos de falla asociados a depósitos aguas arriba, incluyendo inestabilidad global, falla de cimentación, licuación estática y dinámica, y erosión superficial.

Los análisis muestran una alta sensibilidad de la estabilidad a la presión de poros, particularmente en zonas con relaves finos de baja densidad bajo los diques.

Se identificaron zonas susceptibles a licuación en materiales contractivos, evaluadas mediante metodologías simplificadas ampliamente utilizadas (Seed & Idriss, 1971; Idriss & Boulanger, 2015).

Asimismo, se consideraron deformaciones post-sísmicas y posibles fallas progresivas, así como procesos de erosión y una evaluación preliminar del riesgo hidrogeoquímico asociado.

### **5. Evaluación ambiental y gestión de riesgos**

El diseño de cierre incorpora una evaluación integrada entre geotecnia, hidrogeología y aspectos ambientales, enfocada en el control de infiltración y la migración de contaminantes.

La presencia de relaves finos saturados y la variabilidad del nivel piezométrico influyen tanto en la estabilidad como en el transporte de solutos. En este contexto, el diseño de cobertura es un elemento clave para reducir infiltración y riesgo ambiental.

Se desarrolló una evaluación cualitativa de riesgos considerando probabilidad de falla, consecuencias y nivel de confianza del modelo, en línea con los principios de gestión de la GISTM (ICMM, 2020).

Las mayores incertidumbres se asocian a la posición del nivel piezométrico y la resistencia de los relaves en zonas poco investigadas. Esto refuerza la necesidad de integrar criterios geotécnicos y ambientales en el diseño de cierre bajo un enfoque de riesgo.

### **6. Desempeño observado vs. diseño teórico**

El comportamiento histórico del depósito no evidencia inestabilidades globales, consistente con los análisis en condición estática. Sin embargo, el desempeño está condicionado por la evolución del nivel piezométrico.

El modelo teórico, al considerar escenarios conservadores, predice condiciones más exigentes que las observadas, lo cual es consistente con enfoques de diseño orientados a largo plazo (Duncan et al., 2014).

Los análisis muestran que pequeñas variaciones en el nivel piezométrico generan cambios relevantes en los factores de seguridad, resaltando la necesidad de monitoreo postcierre.

### **7. Lecciones aprendidas y conclusiones**

El cierre de depósitos aguas arriba requiere un enfoque geotécnico riguroso debido a la heterogeneidad de materiales, la fundación sobre relaves y la incertidumbre del modelo.

Se concluye que:

- La estabilidad está fuertemente controlada por el nivel piezométrico
- La susceptibilidad a licuación de los relaves finos constituye el principal condicionante del diseño (Idriss & Boulanger, 2015)
- La investigación geotécnica (SCPTu) reduce significativamente la incertidumbre del modelo (Robertson, 2016)
- El desempeño histórico favorable no garantiza estabilidad en condición de cierre.
- La selección del estándar (CDA vs GISTM) impacta directamente en las medidas de estabilización requeridas.

En este contexto, el diseño de cierre debe abordarse bajo un enfoque integrado que considere estabilidad física, desempeño ambiental y gestión de riesgos, incorporando explícitamente los niveles de confianza del modelo y estrategias de monitoreo postcierre.

### Bibliografías

- Boulanger, R.W. & Idriss, I.M. (2014). Cyclic Failure and Liquefaction Resistance of Sand. Technical Report UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.
- Canadian Dam Association (CDA) (2019). Dam Safety Guidelines. Edmonton, Canada.
- Duncan, J.M., Wright, S.G. & Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability (2nd ed.). John Wiley & Sons, Hoboken.
- Idriss, I.M. & Boulanger, R.W. (2015). Soil Liquefaction during Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California.
- International Council on Mining and Metals (ICMM) (2020). Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). London.
- Olson, S.M. & Stark, T.D. (2002). “Liquefied strength ratio from liquefaction flow failures.” Canadian Geotechnical Journal, 39(3), 629–647.
- Robertson, P.K. (2016). “Cone Penetration Test (CPT)-Based Soil Behavior Type Classification System—An Update.” Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910–1927.
- Robertson, P.K. (2022). “Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using cone penetration test—An update.” Canadian Geotechnical Journal, 59, 620–624.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. University of California, Berkeley.
- Spencer, E. (1967). “A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces.” Geotechnique, 17(1), 11–26.