

Evaluation of Tailings Dam Slope Stability Using Cement-Treated Soil with Duraflex Addition

Daniel Arturo Gastañadui Yica¹ ; Giancarlo Augusto Flores Barrón² 

¹Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú, daniel.gastanadui@utec.edu.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Lima, Perú, giancarlo.flores@upn.edu.pe

Abstract– Slope stability in tailings dams represents a critical challenge in the mining industry due to the potential impacts of failure. This research evaluates the effectiveness of the soil-cement technique with the addition of Duraflex for slope stabilization in dams constructed with borrow material. Geotechnical parameters were determined for representative tailings mixtures (fine sand and clay in 50/50 and 75/25 ratios), treated with 10 % Type I Portland cement by soil weight and the addition of Duraflex at 2 % by cement weight. Grain size analysis, Standard Proctor, direct shear, and unconfined compressive strength tests were conducted at 7 and 28 days. Stability analyses were performed on a realistic dam section using the limit equilibrium methodology (Spencer's method) under static and pseudo-static conditions. Results showed that the natural soil presented a static Factor of Safety (FoS) of 1.48, while soil-cement improvement increased FoS values above 2.00. The addition of Duraflex improved initial strength, particularly at 7 days. A brittle behavior was observed in the cemented mixtures; however, pseudo-static FoS values exceeded 3.00, confirming the technical effectiveness of the proposal.

Keywords– Tailings dams, Slope stabilization, Soil-cement, Duraflex, Limit Equilibrium Method.

Evaluación de la Estabilidad de Taludes en Presas de Relaves Mediante Suelo Tratado con Cemento con Adición de Duraflex

Daniel Arturo Gastañadui Yica¹ ; Giancarlo Augusto Flores Barrón² 

¹Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú, daniel.gastanadui@utec.edu.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Lima, Perú, giancarlo.flores@upn.edu.pe

Resumen— La estabilidad de taludes en presas de relaves representa un desafío crítico en la industria minera debido a los potenciales impactos de una falla. Esta investigación evalúa la efectividad de la técnica de suelo-cemento con adición de Duraflex para la estabilización de taludes en presas construidas con material de empréstito. Se determinaron parámetros geotécnicos de mezclas representativas de relaves (arena fina y arcilla en proporciones 50/50 y 75/25), tratadas con cemento Portland Tipo I al 10 % del peso del suelo y con la adición de Duraflex al 2 % del peso del cemento. Se realizaron ensayos de granulometría, Proctor Estándar, corte directo y compresión simple a los 7 y 28 días. Los análisis de estabilidad se efectuaron en una sección de presa realista mediante la metodología de equilibrio límite (Método de Spencer) bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Los resultados mostraron que el suelo natural presentó un Factor de Seguridad (FS) estático de 1.48, mientras que el mejoramiento con suelo-cemento elevó los FS a valores superiores a 2.00. La adición de Duraflex mejoró la resistencia inicial, especialmente a los 7 días. Se constató un comportamiento frágil en las mezclas cementadas; sin embargo, los FS pseudoestáticos superaron 3.00, confirmando la efectividad técnica de la propuesta.

Palabras clave— Presas de relaves, Estabilización de taludes, Suelo-cemento, Duraflex, Método de Equilibrio Límite.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes constituye una tarea fundamental en la ingeniería geotécnica, cuyo objetivo se centra en contener el suelo e impedir movimientos involuntarios que comprometan la integridad estructural. Sin embargo, diversos mecanismos de falla, tales como deslizamientos, pueden afectar su estabilidad [1], [2]. En la industria minera, este aspecto es crítico en la construcción de presas de relaves, las cuales están compuestas por muros de contención conformados por material de empréstito [3]. Si la fundación o los materiales constitutivos son susceptibles a fallar ante eventos sísmicos o la presencia de agentes agresivos, se pueden desencadenar deformaciones severas y deslizamientos catastróficos [4].

La problemática asociada a estas estructuras es global y creciente. En los últimos treinta años, se han registrado anualmente entre dos y cinco fallas significativas de presas de relaves, las cuales, en retrospectiva, eran completamente predecibles [5]. Asimismo, estos eventos han mostrado una

tendencia progresiva en cuanto al volumen de material liberado y a las pérdidas humanas asociadas, tal como se evidencia en la tendencia histórica mostrada en la Fig. 1 [6].

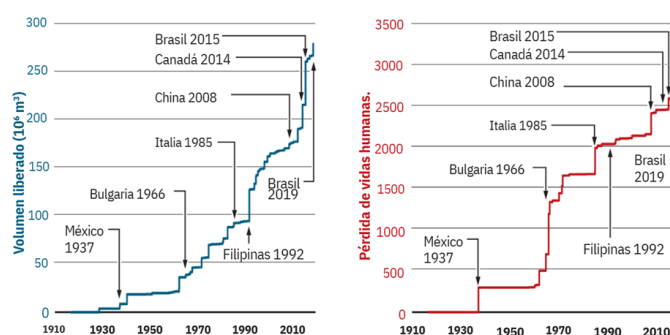


Fig. 1 Fallas catastróficas de presas en el último siglo [6].

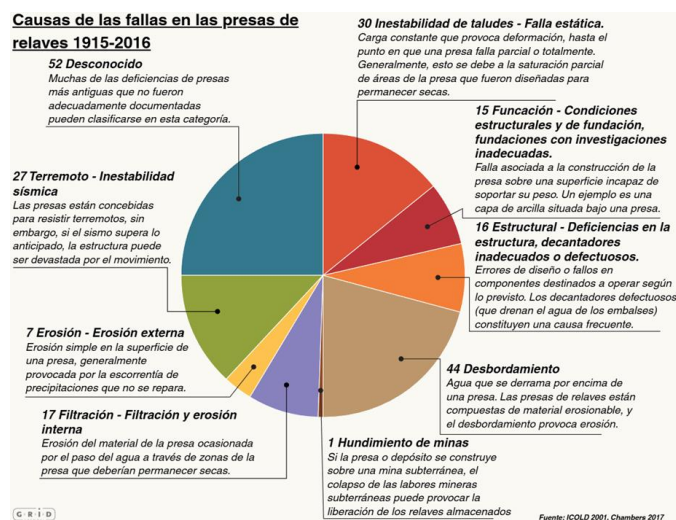


Fig. 2 Causas de fallas de presas de relaves [7], [8].

De acuerdo con la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), las fallas ocurren principalmente debido a causas geotécnicas. Como se observa en la Fig. 2, la inestabilidad de taludes es la causa más recurrente, seguida por problemas de cimentación y sismos [7], [8]. Casos recientes, como el de Mount Polley en Canadá [9], y los de

Bento Rodrigues [10] y Brumadinho [11] en Brasil, evidencian el impacto devastador de estos eventos. En el contexto peruano, esta realidad se refleja en incidentes como el derrame en la unidad minera Cobriza en 2019 debido a erosión interna en su presa [12], [13], así como en los riesgos latentes identificados en depósitos como los de Tamboraque y San Mateo [14].

La gestión de estos depósitos se rige actualmente por marcos regulatorios estrictos, como la Guía de Buenas Prácticas del ICMM [15] y el Estándar Global de Gestión de Relaves (GISTM) [16], los cuales exigen garantizar la estabilidad física bajo el principio de "cero daños" a lo largo del ciclo de vida del depósito. Para cumplir con estos criterios de aceptación, resulta necesario implementar técnicas de mejoramiento que incrementen la robustez geotécnica de los taludes. En este sentido, la estabilización con cemento resulta ser un método eficaz para aumentar la capacidad portante y la resistencia al corte de los suelos, existiendo un consenso en la literatura técnica sobre su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas en función de la dosificación empleada [17], [18].

Con el propósito de optimizar este proceso de estabilización, esta investigación propone el uso de Duraflex, una adición mineral compuesta por tetraedros de silicato. Este aditivo actúa como catalizador de la hidratación del cemento, promoviendo una mayor formación de gel de silicato de calcio hidratado (CSH). Esta reacción densifica la matriz del material, reduce su permeabilidad y aumenta tanto la resistencia mecánica como la resistencia química frente a agentes agresivos [19], [20].

El objetivo principal de este estudio es evaluar la efectividad de la técnica de suelo-cemento, incorporando un 10 % de cemento en peso del suelo y la adición de Duraflex equivalente al 2 % en peso del cemento, para la estabilización de taludes en presas de relaves. Considerando el carácter exploratorio del estudio, esta investigación se desarrolla con la finalidad de realizar una primera validación experimental de la efectividad de la técnica propuesta. Debido a las restricciones de seguridad y toxicidad asociadas a la manipulación de relaves mineros reales [21], se empleó un material simplificado compuesto por arena fina y arcilla, seleccionado por su similitud granulométrica con un material de relaves de referencia. El estudio se centra en caracterizar los parámetros geotécnicos de esta mezcla y analizar su estabilidad mediante métodos de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo experimental se estructuró en tres fases principales: Caracterización de los materiales bajo las condiciones de análisis establecidas, ejecución de ensayos de laboratorio para la determinación de los parámetros de resistencia, y análisis de estabilidad de taludes mediante modelamiento numérico. El flujo metodológico detallado se presenta en la Fig. 3.

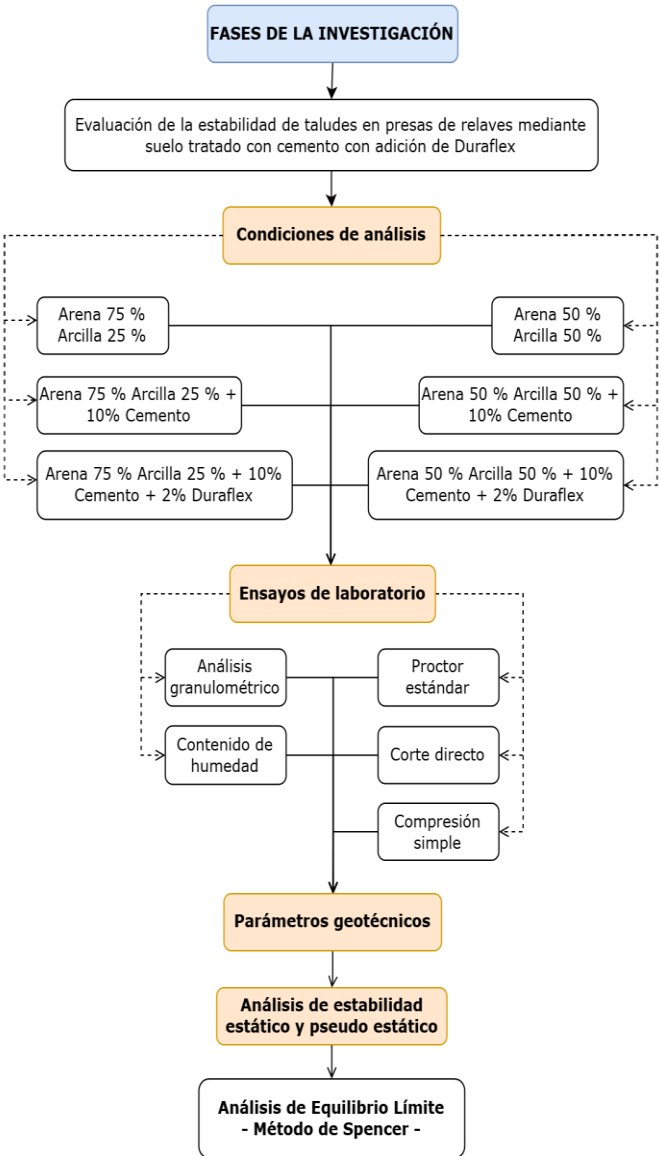


Fig. 3 Diagrama de metodología a seguir.

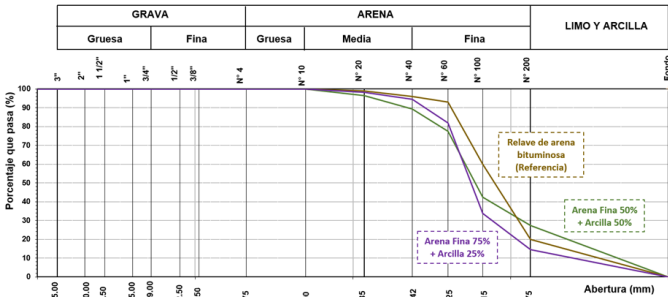


Fig. 4 Curvas granulométricas de material simplificado y referencia.

A. Materiales

Debido a las restricciones de seguridad y toxicidad asociadas al manejo de relaves reales [21], se empleó un

material simplificado compuesto por mezclas de arena fina y arcilla en dos proporciones en peso: 75 % arena – 25 % arcilla y 50 % arena – 50 % arcilla. Esta selección se fundamentó en la similitud de sus curvas granulométricas con las de relaves bituminosos de referencia, tal como se muestra en la Fig. 4 [22].

Como agente estabilizador principal se utilizó Cemento Portland Tipo I en una dosificación del 10 % respecto al peso seco del suelo. Para potenciar la hidratación y densificación de la matriz, se incorporó Duraflex, una adición mineral, en una proporción del 2 % respecto al peso del cemento, proporción recomendada por el fabricante [19], [20], [23].

B. Preparación de especímenes y ensayos

Se definieron seis condiciones de análisis que combinan las dos proporciones de suelo (75 % arena – 25 % arcilla y 50 % arena – 50 % arcilla) en tres escenarios: estado natural, con la incorporación de cemento, y con la incorporación de cemento y Duraflex.

El procedimiento de preparación siguió los lineamientos establecidos por el fabricante [24]. Inicialmente, se homogenizó la arena con la arcilla y se añadió la cantidad de agua correspondiente a su humedad óptima, determinada previamente mediante el ensayo Proctor Estándar. Esta mezcla suelo-agua se dejó reposar herméticamente durante 16 horas previas a la adición del cemento, asegurando así una hidratación adecuada de las partículas finas y mejorando la trabajabilidad. Finalmente, tras incorporar el agente cementante, los especímenes fueron compactados a la densidad seca máxima determinada y sometidos a curado húmedo por periodos de 7 y 28 días.

El programa de laboratorio se rigió por los siguientes estándares internacionales:

- 1) *Propiedades Físicas:* Análisis granulométrico (ASTM D422) [25] y Proctor Estándar (ASTM D698) [26].
- 2) *Resistencia al Corte:* Ensayo de Corte Directo (ASTM D3080) bajo esfuerzos normales de 62, 124 y 248 kPa para determinar la cohesión (c) y el ángulo de fricción (φ), tanto pico como residual [27].
- 3) *Resistencia a la Compresión:* Ensayo de Compresión Simple no confinada (ASTM D1633), utilizado para estimar la resistencia al corte no drenado (Su) [28].

C. Análisis de estabilidad

La evaluación de la estabilidad del talud se realizó mediante el software GeoStudio (módulo SLOPE/W), utilizando la metodología de Equilibrio Límite, es decir, se evalúa con base en criterios del factor de seguridad (FS) [29]. Se adoptó el Método de Spencer como criterio principal por satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos [30].

El estudio se centró en una sección transversal realista de presa de relaves, construida mediante el método de aguas abajo (“downstream”) [31]. Esta sección (Fig. 5) fue seleccionada por representar un caso más cercano a las condiciones reales de campo en comparación con secciones

idealizadas, permitiendo evaluar el comportamiento del material de empréstito mejorado.

Se analizaron dos escenarios de carga según los lineamientos de la Asociación Canadiense de Presas (CDA) [32]:

- 1) *Análisis Estático:* Se adoptó un Factor de Seguridad (FS) mínimo aceptable de 1.5 para el análisis utilizando parámetros de resistencia pico, y de 1.2 para el análisis empleando parámetros de resistencia residual.
- 2) *Análisis Pseudoestático:* Se aplicó un coeficiente sísmico horizontal (kh) de 0.15, representativo de un evento sísmico significativo y comúnmente utilizado en estudios de estabilidad sísmica de presas [2], con un FS mínimo aceptable de 1.0.

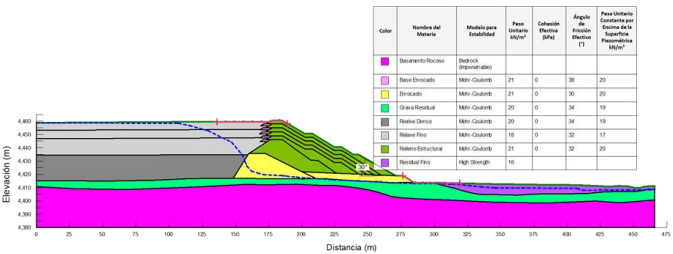


Fig. 5 Presa realista aguas abajo [31].

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los datos obtenidos de la etapa experimental y del modelamiento numérico aplicado a la sección realista de la presa de relaves (método aguas abajo).

A. Propiedades geotécnicas

Se determinaron las propiedades de compactación para las seis condiciones de estudio. La Tabla I resume los resultados del ensayo Proctor Estándar. Los resultados evidencian que la adición de cemento y cemento con Duraflex incrementa ligeramente la densidad seca máxima del material, lo que favorece la compacidad del relleno. Este comportamiento se atribuye al aumento del contenido de finos, el cual puede generar una mayor densidad debido a una mejor gradación, relleno de vacíos y mayor cohesión del material. Asimismo, se observó una disminución del contenido de humedad óptimo.

B. Resistencia al corte (Corte Directo)

Los ensayos de Corte Directo evidenciaron un incremento sustancial tanto en la cohesión (c) como en el ángulo de fricción (φ). La Tabla II presenta los parámetros de resistencia pico y residual obtenidos a los 7 días de curado. En términos de resistencia al corte, los resultados muestran una transformación significativa en el comportamiento mecánico del material. El suelo natural presenta una cohesión baja, característica de relaves sueltos; sin embargo, la incorporación de cemento y de cemento con Duraflex incrementó este parámetro de manera exponencial a los 7 días, observándose además una tendencia creciente de la resistencia hacia los 28 días de curado, cuyos resultados se resumen en la Tabla III.

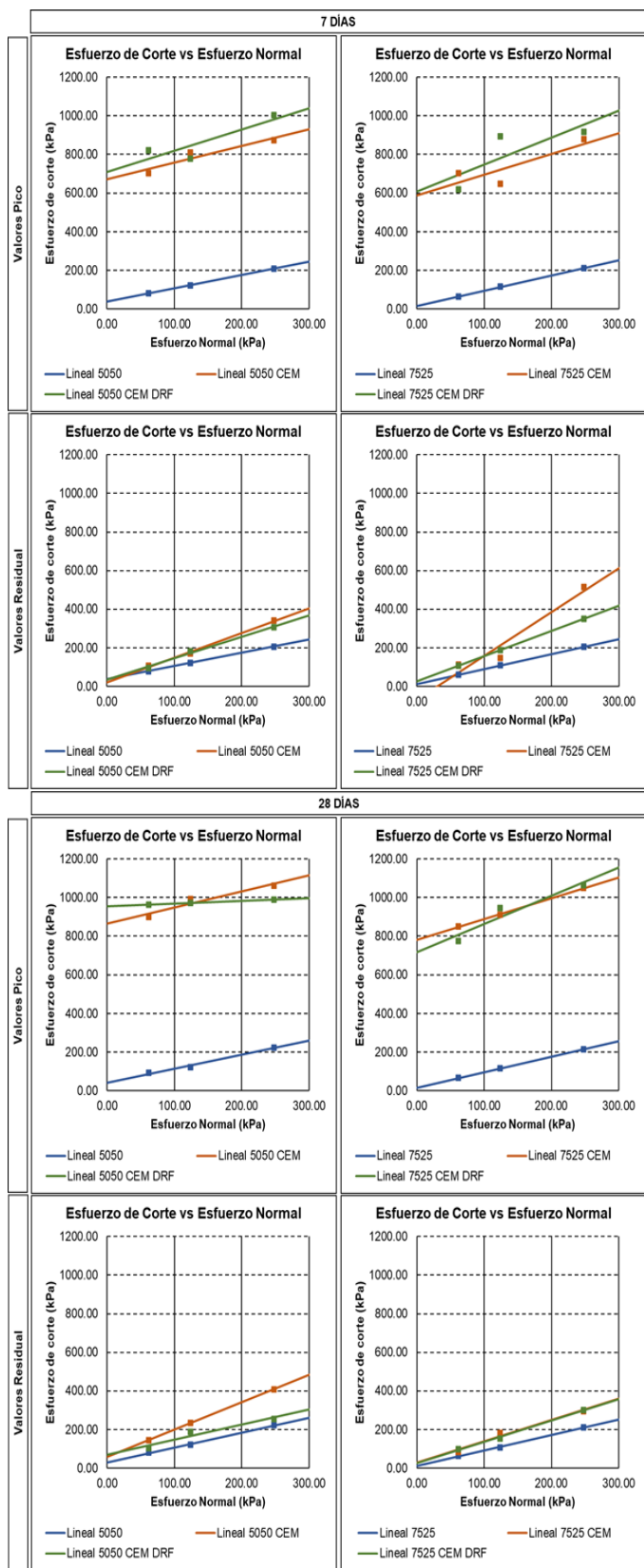


Fig. 6 Envolventes de falla para la proporción 75 % arena – 25 % y 50 % arena – 50 % arcilla a edades de 7 y 28 días.

TABLA I
RESULTADOS PROCTOR ESTÁNDAR - CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO
Y DENSIDAD

Condiciones de análisis	Proctor Estándar		
	Máxima densidad seca (g/cm ³)	Máxima densidad húmeda (g/cm ³)	Óptimo contenido de humedad (%)
Arena 75 % Arcilla 25 %	1.85	2.06	11.60
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo	1.98	2.19	10.50
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	1.95	2.16	10.80
Arena 50 % Arcilla 50 %	2.00	2.22	11.10
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo	1.99	2.20	10.80
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	1.98	2.20	11.30

TABLA II
RESULTADOS DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO – 7 DÍAS

Condiciones de análisis	Corte Directo – 7 Días			
	Valor Pico		Valor Residual	
	Cohesión (c) [kPa]	Ángulo de Fricción (φ)	Cohesión (c) [kPa]	Ángulo de Fricción (φ)
Arena 75 % Arcilla 25 %	16.70	38.18	13.31	37.80
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo	588.21	46.95	0.00	66.20
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	607.98	54.41	26.81	52.55
Arena 50 % Arcilla 50 %	38.18	34.54	37.21	34.50
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo	671.13	40.70	21.88	51.95
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	708.89	47.69	35.32	47.95

TABLA III
RESULTADOS DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL ENSAYO DE
CORTE DIRECTO - 28 DÍAS

Condiciones de análisis	Corte Directo – 28 Días			
	Valor Pico		Valor Residual	
	Cohesión (c) [kPa]	Ángulo de Fricción (φ)	Cohesión (c) [kPa]	Ángulo de Fricción (φ)
Arena 75 % Arcilla 25 %	17.02	38.67	11.20	38.80
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo	781.68	46.99	29.23	47.83
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	717.95	55.55	26.48	47.82
Arena 50 % Arcilla 50 %	41.68	36.05	31.04	37.61
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo	863.82	39.80	58.10	54.78
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	955.76	7.73	69.74	38.03

La Fig. 6 ilustra las envolventes de falla, donde se aprecia claramente la ganancia de resistencia. No obstante, se registró un comportamiento frágil en las muestras cementadas, caracterizado por una pérdida abrupta de resistencia post-pico hasta alcanzar el estado residual. En particular, las muestras cementadas presentan una reducción aproximada de resistencia del orden del 70 % al 80 % tras la falla, comportamiento típico de materiales frágiles.

C. Resistencia a la compresión simple

Se realizaron ensayos de compresión no confinada para estimar la resistencia al corte no drenado (S_u), parámetro crítico para el análisis pseudoestático. La Tabla IV resume los resultados obtenidos. Se observa que la resistencia a la compresión (q_u) aumenta significativamente con el tiempo de curado. Asimismo, las mezclas con mayor contenido de finos (50 % de arcilla) presentaron un incremento promedio de resistencia entre los 7 y 28 días superior al observado en las mezclas con 25 % de arcilla. Las mezclas de suelo natural no pudieron ser evaluadas debido a la disgregación de los especímenes.

TABLA IV
RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y RESISTENCIA DE
CORTE NO DRENADO

Condiciones de análisis	Compresión Simple (No Confinada)			
	7 días		28 días	
	q_u [kg/cm ²]	S_u (Cu) [kPa]	q_u [kg/cm ²]	S_u (Cu) [kPa]
Arena 75 % Arcilla 25 %	-	-	-	-
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo	47.71	4679.06	61.58	6038.49
Arena 75 % Arcilla 25 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	46.64	4573.54	61.60	6040.65
Arena 50 % Arcilla 50 %	-	-	-	-
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo	36.62	3591.34	60.24	5907.89
Arena 50 % Arcilla 50 % con cemento al 10 % del peso del suelo con Duraflex al 2 % del peso del cemento	39.12	3836.08	57.94	5681.53

D. Análisis de estabilidad de taludes

El análisis se centró en una sección representativa de una presa realista construida mediante el método de aguas abajo. Los resultados del análisis estático, calculados mediante el método de Spencer, se presentan en la Fig. 7 y Fig. 8.

El talud conformado por suelo natural presentó un Factor de Seguridad estático de 1.48 para la condición con 75 % de arena y de 1.49 para la condición con 50 % de arena, valores ligeramente inferiores al criterio mínimo de 1.5 exigido por la CDA. Al incorporar la estabilización mediante cemento y cemento con Duraflex, el FS estático, utilizando parámetros de resistencia pico, se incrementó a valores comprendidos entre 2.01 y 2.25.

Al evaluar el comportamiento bajo parámetros de resistencia residual (condición post-falla), los factores de seguridad se mantuvieron relativamente estables, con valores entre 1.47 y 1.52. Es importante destacar que, incluso al asumir un comportamiento frágil del material y la pérdida de resistencia asociada, los factores de seguridad permanecieron por encima del criterio mínimo de 1.20. Esto evidencia que la geometría de la presa construida por el método de aguas abajo, en combinación con el mejoramiento del suelo, proporciona redundancia en términos de seguridad global.

Finalmente, el análisis pseudoestático ($k_h = 0.15$), empleando la resistencia al corte no drenado (S_u) derivada de los ensayos de compresión simple, arrojó factores de seguridad superiores a 3.0 para todas las mezclas cementadas (ver Fig. 9). Considerando que el criterio de aceptación pseudoestático establece un $FS \geq 1.0$, se confirma que la

técnica de suelo-cemento proporciona estabilidad global frente al evento sísmico considerado.

IV. DISCUSIÓN

El análisis de los resultados revela tres aspectos fundamentales sobre la efectividad técnica y la viabilidad práctica de la estabilización de relaves con cemento y Duraflex:

1) *Efecto del aditivo Duraflex en la resistencia temprana:* Los ensayos de corte directo demostraron que la incorporación de Duraflex al 2 % genera un impacto positivo diferenciado en las primeras edades de curado. A los 7 días, las mezclas con Duraflex superaron en resistencia a las mezclas con solo cemento. Este comportamiento sugiere que el aditivo actúa como un catalizador eficaz de las reacciones de hidratación temprana, promoviendo una formación acelerada de gel de silicato de calcio hidratado (CSH) y densificando la matriz del suelo [20]. Desde una perspectiva constructiva, esta ganancia temprana de resistencia es crítica para la industria minera, ya que permitiría acelerar el ritmo de recrecimiento de los diques de relaves sin comprometer la estabilidad a corto plazo. Sin embargo, se observó que a los 28 días las resistencias tienden a converger, lo que indica que el beneficio principal del aditivo radica en la optimización del desempeño inicial y no necesariamente en la resistencia final a largo plazo.

2) *Comportamiento frágil y resistencia residual:* Un hallazgo crítico de esta investigación es el marcado comportamiento frágil inducido por la cementación. Las envolventes de falla (Fig. 6) evidencian que, una vez alcanzada la resistencia pico, el material experimenta una caída abrupta de resistencia del orden del 70 % al 80 % hasta alcanzar su estado residual. Este comportamiento es característico de suelos tratados con agentes cementantes y representa un riesgo potencial de falla progresiva en estructuras sometidas a grandes deformaciones [33], [34], [35].

No obstante, los análisis de estabilidad realizados empleando parámetros de resistencia residual arrojaron factores de seguridad comprendidos entre 1.47 y 1.52, valores que cumplen con el criterio mínimo exigido por la Asociación Canadiense de Presas para condiciones estáticas a largo plazo [32]. Estos resultados evidencian que la geometría de la presa construida mediante el método de aguas abajo, en combinación con el mejoramiento del suelo, proporciona un nivel adecuado de redundancia en la seguridad, manteniendo la estabilidad global incluso en escenarios donde el material se degrade hasta su resistencia residual.

3) *Desempeño sísmico y seguridad:* El análisis pseudoestático confirmó la efectividad de la técnica de estabilización bajo el escenario sísmico considerado. Al emplear la resistencia al corte no drenado (S_u) derivada de los ensayos de compresión no confinada, se obtuvieron factores de seguridad superiores a 3.0 para todas las mezclas cementadas, superando ampliamente el valor mínimo requerido de 1.0. Estos resultados indican que la estabilización mediante suelo-cemento con adición de Duraflex mitiga de manera adecuada el riesgo de inestabilidad sísmica, al

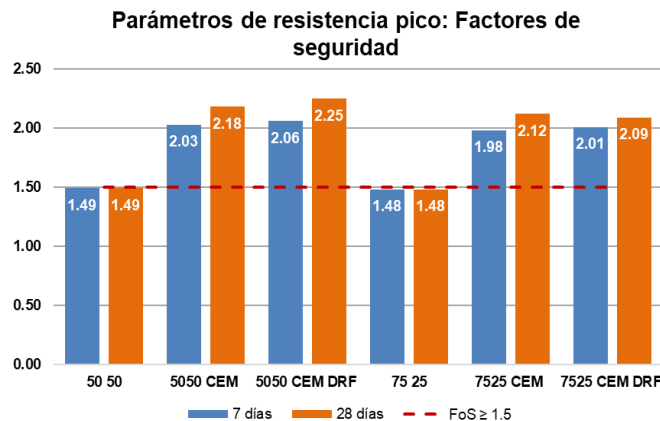


Fig. 7 Factores de seguridad con parámetros de resistencia pico - análisis estático.

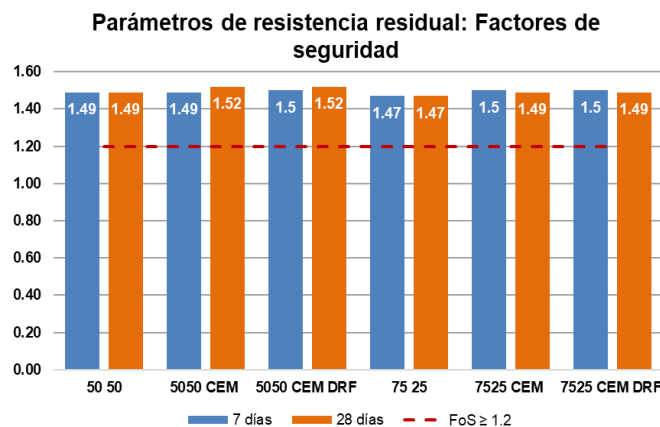


Fig. 8 Factores de seguridad con parámetros de resistencia residual - análisis estático.

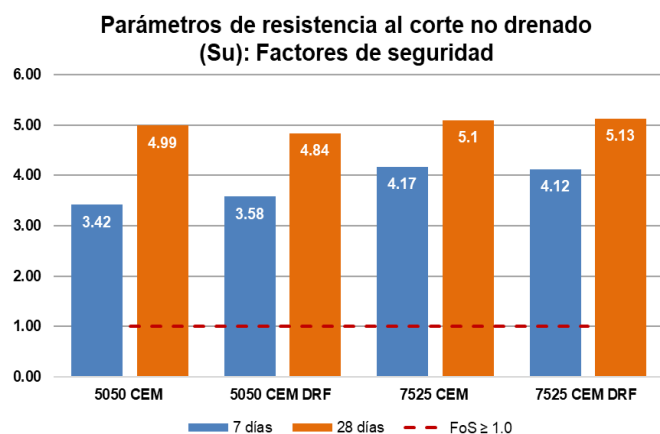


Fig. 9 Factores de seguridad con parámetros de resistencia al corte no drenado - análisis pseudoestático.

proporcionar una resistencia al corte suficiente para contrarrestar las fuerzas inerciales generadas por un sismo de diseño ($kh = 0.15$).

En contraste con los relaves no tratados, los cuales son altamente susceptibles a fenómenos de licuación y a deformaciones excesivas bajo sollicitaciones sísmicas, el material mejorado presenta un comportamiento más rígido y estable, reduciendo la vulnerabilidad global de la presa.

Desde una perspectiva de ingeniería aplicada, es importante señalar que la implementación de técnicas de mejoramiento del suelo, como la estabilización con cemento con adición de Duraflex, debe evaluarse no solo en términos de desempeño técnico, sino también considerando su viabilidad económica. Si bien los resultados obtenidos evidencian un incremento en la resistencia al corte y en la estabilidad global del talud, una alternativa comúnmente empleada en el diseño de presas de relaves consiste en modificar la geometría de la estructura, mediante la reducción de la inclinación de los taludes o la incorporación de bermas, sin intervenir las propiedades del material.

En este sentido, como línea de investigación futura, se propone desarrollar un análisis económico comparativo entre la técnica de estabilización propuesta y las soluciones basadas en rediseño geométrico. Este enfoque permitiría evaluar de manera integral la factibilidad de la solución, considerando no solo su efectividad técnica, sino también aspectos como el volumen de materiales, tiempos de construcción y costos asociados, contribuyendo así a una toma de decisiones más robusta en proyectos de gran escala.

V. CONCLUSIONES

A partir de la investigación experimental y el modelamiento numérico realizado, se concluye lo siguiente:

1) *Efectividad de la estabilización*: La incorporación de 10 % de Cemento Portland Tipo I transformó significativamente las propiedades mecánicas del material de relaves simulado. El Factor de Seguridad (FS) del talud en condición estática aumentó de un valor marginal de 1.48 (suelo natural) a valores superiores a 2.00, logrando cumplir holgadamente con el criterio de aceptación internacional ($FS \geq 1.5$) establecido por la CDA.

2) *Optimización temprana con Duraflex*: La adición de Duraflex al 2 % demostró ser determinante en la ganancia de resistencia a edades tempranas. A los 7 días de curado, las mezclas con el aditivo superaron en resistencia a las mezclas de solo cemento. Esto constituye una ventaja operativa para la industria minera, permitiendo acelerar el recrecimiento de los diques sin comprometer la estabilidad a corto plazo.

3) *Comportamiento frágil y redundancia*: Se identificó que la cementación induce un comportamiento frágil en el material, caracterizado por una pérdida de resistencia post-pico de entre 70 % y 80 %. Sin embargo, el análisis de estabilidad realizado con parámetros residuales demostró que el diseño mantiene un FS entre 1.47 y 1.52 (superior al mínimo de 1.2). Por tanto, para diseños conservadores y

seguros, se recomienda considerar los parámetros de resistencia residual en los análisis de estabilidad a largo plazo.

4) *Desempeño sísmico*: El análisis pseudoestático ($kh = 0.15$) ratificó la idoneidad de la solución frente al escenario sísmico de diseño considerado. Los factores de seguridad obtenidos ($FS > 3.0$) superan ampliamente el mínimo requerido ($FS \geq 1.0$), lo que indica que la técnica mitiga el riesgo de deformaciones excesivas y fallas por inestabilidad sísmica.

Como líneas de investigación futura, se propone profundizar en el comportamiento mecánico del material mediante la ejecución de ensayos triaxiales (CD y CU), a fin de validar los parámetros de resistencia en rangos de confinamiento elevados, representativos de las condiciones que se desarrollan en grandes presas. Asimismo, se recomienda complementar el análisis pseudoestático con evaluaciones dinámicas avanzadas que incorporen la generación de presiones de poro y la degradación cíclica del material bajo la acción de registros sísmicos representativos.

REFERENCIAS

- [1] D. J. Varnes, "Slope Movement Types and Processes", en *Landslides: Analysis and Control*, vol. Special Report 176, R. L. Schuster y R. J. Krizek, Eds., Washington, D.C.: National Academy of Sciences, Transportation Research Board, 1978, pp. 11–33. doi: 10.1016/0148-9062(80)90204-1
- [2] L. W. Abramson, T. S. Lee, S. Sharma, y G. M. Boyce, *Slope stability and stabilization methods*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2002. Consultado: el 28 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Slope+Stability+and+Stabilization+Methods%2C+2nd+Edition-p-9780471384939>
- [3] S. Minera, "Aspectos clave sobre los relaves mineros según SERNAGEOMIN", *Revista Seguridad Minera*. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/todo-lo-que-debes-saber-sobre-los-relaves-mineros-segun-sernageomin/>
- [4] B. I. Latorre Torres, "Análisis de la colapsabilidad de suelos salinos en fundaciones de muros para depósitos de relaves", Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2021. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180111>
- [5] M. P. Davies, "Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening?", *Geotechnical News-Vancouver*, vol. 20, núm. 3, pp. 31–36, 2002, Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://miningquiz.com/pdf/Impoundments/Dam_failuresDavies2002.pdf
- [6] J. C. Santamarina, L. A. Torres-Cruz, y R. C. Bachus, "Why coal ash and tailings dam disasters occur", *Science*, vol. 364, núm. 6440, pp. 526–528, may 2019, doi: 10.1126/SCIENCE.AAX1927
- [7] International Commission on Large Dams (ICOLD), *Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learnt from Practical Experiences*, vol. Bulletin 121. Paris: Commission Internationale des Grand Barrages, 2001. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.icoldchile.cl/boletines/121.pdf>
- [8] E. Schoenberger, "Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities", *Resources Policy*, vol. 49, pp. 119–128, sep. 2016, doi: 10.1016/j.resourpol.2016.04.009
- [9] The Narwhal, "Mount Polley mine disaster: news and information", The Narwhal. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://thenarwhal.ca/topics/mount-polley-mine-disaster/>
- [10] H. Mendonça, "Un pueblo enterrado en barro dos años", *El País*. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:

- https://elpais.com/internacional/2017/11/11/actualidad/1510427565_674250.html?event=go&event_log=go&prod=REGCRART&o=cerradoam
- [11] M. Romero, “Brumadinho bajo el lodo: se cumple un año de la tragedia en Brasil”, France 24. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.france24.com/es/20200125-brumadinho-bajo-el-lodo-se-cumple-un-a%C3%B1o-de-la-tragedia-en-brasil>
 - [12] H. Paredes, “Derrame de relave minero en el distrito de San Pedro de Coris - Huancavelica”, Lima, sep. 2019. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://portal.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/09/INFORME-DE-EMERGENCIA-N%C2%BA-759-30SEP2019-DERRAME-DE-RELAVE-MINERO-EN-EL-DISTRITO-DE-SAN-PEDRO-DE-CORIS-HUANCAVELICA-15-002.pdf>
 - [13] SPDA, “Desastre ambiental: 67 mil metros cúbicos de relave minero afectaron al río Mantaro”, SPDA Actualidad Ambiental. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.actualidadambiental.pe/desastre-ambiental-67-mil-metros-cubicos-de-relave-minero-afectaron-al-rio-mantaro/>
 - [14] Cooperación, “Alertan de amenaza latente de relaves mineros de Tamboraque sobre el río Rímac”, CooperAcción. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cooperaccion.org.pe/alertan-de-amenaza-latente-de-relaves-mineros-de-tamboraque-sobre-el-rio-rimac/>
 - [15] International Council on Mining & Metals (ICMM), “Tailings Management: Good Practice Guide”, 2025. Consultado: el 21 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/innovation/2025/tailing-s-management-good-practice-guide-2nd.pdf?cb=94652>
 - [16] Global Tailings Review, “Global Industry Standard on Tailings Management – GISTM”, 2020. Consultado: el 21 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_EN.pdf
 - [17] A. C. F. Becerra Santillán y A. E. Herrera Gonzáles, “Estabilización de arcillas, arenas y afirmados, empleando los cementos Pacasmayo Viaforte, Mochica y Qhuna; Lambayeque. 2018”, Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, 2019. Consultado: el 8 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/6119>
 - [18] R. Cardoso, D. Ribeiro, y R. Néri, “Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures”, Soils and Foundations, vol. 57, núm. 4, ago. 2017, doi: 10.1016/J.SANDF.2017.04.006
 - [19] Duraflex Solution Asia, “Duraflex – A Fourth Generation Concrete and Cement Admixture”, Duraflex Solution Asia, Phnom Penh
 - [20] Duraflex América Latina, “Duraflex: resistencia a los ácidos en la fórmula del concreto”, Duraflex América Latina, Buenos Aires, Argentina
 - [21] SERNAGEOMIN, “Preguntas frecuentes sobre relaves”, ene. 2018. Consultado: el 29 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf>
 - [22] S. G. Vick, Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. Vancouver, Canada: BiTech Publishers Ltd., 1990. doi: 10.14288/1.0394902
 - [23] Duraflex Global, “Cleantech for Soil Stabilization and Concrete Strengthening – Mining”, sep. 2023, Consultado: el 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://duraflexglobal.com/wp-content/uploads/2023/09/Duraflex-Mining-Brochure-Latam_EN_compressed.pdf
 - [24] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, “Informe técnico: Ensayos comparativos de resistencia mecánica a la compresión no confinada sobre mezclas suelo, suelo-cemento y suelo-cemento-aditivo”, San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina, jul. 2021.
 - [25] ASTM International, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, el 15 de octubre de 2007, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D0422-63R07
 - [26] ASTM International, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))”, el 1 de julio de 2021, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D0698-12R21
 - [27] ASTM International, “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”, el 1 de noviembre de 2023, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D3080_D3080M-23
 - [28] ASTM International, “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”, el 1 de noviembre de 2017, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D1633-17
 - [29] International Commission on Large Dams (ICOLD), “Bulletin 194: Tailings Dam Safety”, 2022, International Commission on Large Dams / Taylor & Francis, Paris. Consultado: el 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://klohn.com/wp-content/uploads/B194-ICOLD-Tailings-Dam-Safety.pdf>
 - [30] J. M. Duncan, S. G. Wright, y T. L. Brandon, Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014. Consultado: el 19 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/enk/Soil+Strength+and+Slope+Stability%2C+2nd+Edition-p-9781118651650>
 - [31] GeoPad y Gesconval, “Estabilidad de Taludes – sesión 5 del curso”, 2023, Lima.
 - [32] Canadian Dam Association, “Dam Safety Guidelines 2007 (2013 Edition)”, 2013, Canadian Dam Association, Ottawa. Consultado: el 19 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://cda.ca/sites/default/uploads/files/CDA_Dam_Safety_Guidelines_2013_Edition-for_web.pdf
 - [33] A. Locat, D. Demers, P. Locat, y M. Geertsema, “Sensitive Clay Landslides in Canada”, GeoOttawa 2017, 2017, Consultado: el 19 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320386463_SENSITIVE_CLAY_LANDSLIDES_IN_CANADA
 - [34] L. Bjerrum, “The Third Terzaghi Lectures; Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 93, núm. 5, pp. 1–49, sep. 1967, doi: 10.1061/JSFEAQ.0001017
 - [35] A. M. Puzrin y L. N. Germanovich, “The growth of shear bands in the catastrophic failure of soils”, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 461, núm. 2056, pp. 1199–1228, abr. 2005, doi: 10.1098/RSPA.2004.1378