

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Modelación estructural de barreras en suelo reforzado con geotextiles contra flujos de detritos

Juan DAVID QUIJANO^{a,1}

^a*Grupo Energía Bogotá*

Resumen. The present study evaluate soil structures reinforced with geosynthetics as mitigation Works. A documentary review was made, later for a theoretical case study by means of limit equilibrium methods and MEF, different types of embankments were evaluated, varying geometry, terrain inclination, resistance and stability properties. It was concluded that embankments can act to mitigate risk by debris flow and represent an economic construction option. The risk of scour should be mitigated with drainage works.

Palabras Clave. Obras de mitigación, flujo de detritos, geosintéticos, MEF.

1. Introducción

Los flujos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan la vida y causan daños económicos en obras de infraestructura, áreas residenciales, bosques, entre otros. El volumen total de daños es mayor que el de los terremotos e inundaciones [1]. Es un problema que se puede evitar si se identifica de antemano y se implementan medidas de prevención y control. En este estudio se plantean las barreras en suelo reforzado como obras de mitigación. Los casos históricos informados sobre terraplenes de suelo reforzado con geosintéticos frente al flujo de escombros y en general contra desastres naturales, son limitados y su rendimiento no es bien conocido. El presente estudio evalúa las estructuras de suelo reforzado con geosintéticos (SRG) como obras de mitigación. Se realizó una revisión documental de este tipo de estructuras frente a amenazas naturales, también de las correlaciones de la carga lateral generada por los flujos de detritos. Posteriormente, por medio análisis por el método de equilibrio límite utilizando un software libre, se evaluaron diferentes tipos de terraplenes, variando la geometría, inclinación del terreno, propiedades de resistencia y estabilidad. Con una geometría definida se modela, mediante MEF la SRG. Se presenta inicialmente una revisión documental, la metodología utilizada y al final los resultados, las conclusiones y las limitaciones del estudio.

¹ Autor de correspondencia, Juan David Quijano Prieto, Proyectos, Grupo Energía Bogotá, Cra. 9a. # 73-44 Piso 6, Bogotá D.C., Colombia; E-mail: jquijano@geb.com.co.

2. Geoestructuras reforzadas con geosintéticos

La inclusión de materiales geo sintéticos en los macizos de suelo, como elementos de refuerzo, propicia una redistribución global de las tensiones y las deformaciones. Las tensiones de tracción absorbidas por los refuerzos mejoran las propiedades mecánicas del suelo, se disminuyen las tensiones de corte que este tendrá que soportar y aumenta la resistencia al corte de toda la estructura, dado que las tensiones normales actuantes en la superficie de fluencia aumentan [2]. Las SRG son soluciones fáciles de construir, ya que requieren un mínimo de mano de obra, se construyen principalmente con maquinaria pesada, en tiempos muy cortos. Permiten alcanzar grandes ángulos de reposo y alturas. Así que son económicas y efectivas [3].

3. Mitigación de desastres por medio de estructuras de suelo reforzado

Los casos históricos reportados sobre estructuras de suelo reforzado con geosintéticos frente a los flujos y en general frente a desastres naturales es limitado, y su comportamiento no está bien documentado.

Miyata [4] recopiló y analizó aproximadamente 1,600 casos sobre el desempeño sísmico de estructuras de suelo reforzado durante el gran terremoto del Este de Japón 2011. Concluyó que las SRG funcionaron bien frente a terremotos fuertes porque más del 90% resultaron sin daño. Para el mismo evento Koseki [5] evaluó el desempeño de barreras contra la carga sísmica y el desbordamiento de tsunamis. Algunas no reforzadas con revestimientos en paneles de concreto fueron destruidas y arrastradas. Pero estructuras SRG con otras funciones como es el estribo de un puente vial, tuvieron buen comportamiento y resultaron con daños leves, además actuaron como barrera de protección. Kobayashi et al. [6], evaluó la resistencia contra la carga lateral producida por tsunamis desbordados. Concluyó que mejorar la resistencia al desbordamiento las caras de la estructura deben tener inclinación, del lado del mar debe ser más suave y su opuesta debería ser pronunciada [7]. La influencia del flujo de agua a través del dique es fundamental, si el agua entra a la barrera y se mantiene, la arena o los materiales constitutivos se movilizan y se debilitará la resistencia de la geo estructura.

Peila, Oggeri y Castiglia [8] con pruebas a escala real de barreras de suelo reforzado frente a la caída de rocas. Concluyeron que la capacidad del terraplén para resistir el impacto se mejora con capas de refuerzo, que distribuyen la carga en la dirección longitudinal. Entre las ventajas están: la capacidad de absorber impactos de alta energía sin comprometer la estabilidad general de la barrera, La capacidad de deformación de las estructuras reduce la necesidad de realizar reparaciones después de un impacto. Lambert & Bourrier [9], también contra caída de bloques de roca; encontraron que la resistencia máxima depende de su capacidad de absorción y de disipación de energía. La carga de impacto se distribuye en las masas de suelo a los lados del área impactada. Allí, el efecto de confinamiento resultante por la capa de refuerzo aumenta la resistencia a la penetración; además la capa restringe el desplazamiento del revestimiento del lado opuesto del impacto y por lo tanto aumenta su capacidad de resistencia. La parte negativa es que las capas de refuerzo planas horizontales pueden ofrecer un plano preferencial para la falla por corte.

Blovsky [10] comparó barreras para protección contra caída de rocas, de suelo reforzado con geosintéticos y no reforzado. Las variables fueron la compactación, el tipo de disposición del refuerzo, la pendiente de la cara y el volumen. Las barreras reforzadas

presentaron mayor resistencia frente a los impactos y una distribución de carga más amplia. La longitud de anclaje superior e inferior debe estar dimensionada para que los impactos dinámicos pesados no excedan el refuerzo. Comparando solo las alternativas reforzadas, se debe establecer que el volumen de relleno no puede ser sustituido por una disposición especial del refuerzo. Sin embargo, las barreras reforzadas de menor masa mostraron una mayor resistencia que las barreras no reforzadas con una mayor masa.

Yang, Wu, Chen y Chen [11] realizaron un estudio representando situaciones en las que se producen cargas laterales masivas, como las derivadas de tsunamis, flujos de detritos y avalanchas sobre barreras SRG (tipo espalda con espalda). Los resultados de las modelaciones MEF realizadas indicaron que el modo de falla y la capacidad de carga lateral de las dependían en gran medida de la relación de aspecto $B(H)/H$ (de la barrera). Con relaciones $1.0 < B(H) < 3.0$, se producirá una falla a lo largo de la interfaz de refuerzo de cimentación. La capacidad de soporte lateral final de las barreras GRS aumentó con un aumento en $B(H)$. El estudio paramétrico reveló que la relación de aspecto $B(H)$, el ángulo de fricción de relleno (ϕ), el peso unitario (γ) y el espaciado vertical de refuerzo S_v , influyeron considerablemente en la capacidad de soporte lateral de las barreras de SRG.

El refuerzo de geosintéticos de una barrera SRG de protección mejora la resistencia de la estructura de manera significativa [12]. Se obtiene una ventaja esencial mediante el efecto de distribución de carga de los geosintéticos, de modo que el peligro de daño local y falla general disminuye significativamente. La energía impactada se transfiere a un área más grande, de modo que se reducen los picos de tensión.

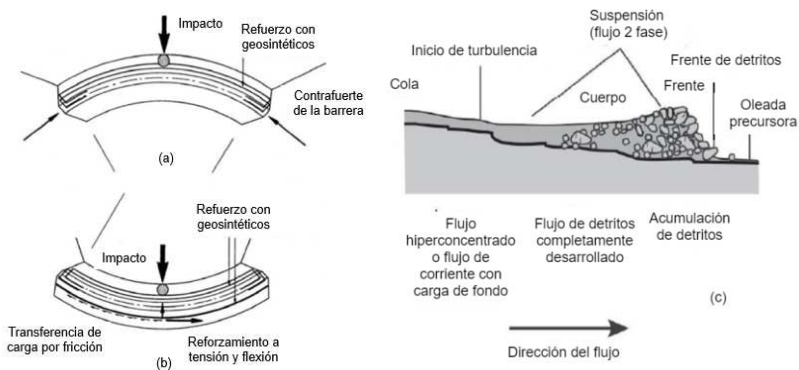


Figura 1. Diferentes planos de las barreras reforzadas con geosintéticos (presas de protección): (a) dique curvado convexo; (b) Presa curva cóncava [12]. (c) Esquema de flujo de detritos [13].

El proceso de diseño implica una modificación de los procedimientos de cálculo convencionales. El diseño comprende dos pasos, con dos tipos diferentes de carga:

- Cargas muertas continuas y cargas vivas por el uso "cuasiestáticas".
- Cargas de impacto dinámicas pesadas locales.

Si la topografía permite varios planos, la forma más efectiva es la de una curvatura convexa en su vista en planta. La carga se desvía a los pilares por compresión en el cuerpo de la presa en forma de arco (Figura 1a) y en la base de la presa, respectivamente. En las presas con un eje recto, y especialmente en las presas curvadas cóncavas, las tensiones de tracción pueden ser causadas por impactos horizontales, que solo pueden tomarse mediante un refuerzo de tracción incrustado en la pendiente exterior de la presa (Figura 1b).

4. Flujos de detritos y carga lateral

Los flujos de detritos se inician principalmente por fuertes lluvias donde el agua se infiltra rápidamente, satura y moviliza el material del suelo en las regiones montañosas. Fluyen hacia abajo en los cauces de los ríos y en las laderas llevando residuos, rocas y grandes bloques, y ponen en peligro a los seres humanos y su infraestructura [14]. Ver Figura 1c. Para el diseño de estructuras de mitigación se requieren modelos simples para predecir la presión de impacto con alta confiabilidad; deben incluir pocos parámetros, fáciles de estimar. Además, las propiedades del material y las características del flujo deben considerarse en las ecuaciones. En particular, el volumen de depósito y su naturaleza litológica, la geometría del canal, la consiguiente velocidad y grosor del flujo, son fundamentales para la definición de las cargas sobre la barrera, condicionan su tamaño y resistencia [15]. Para estimar la fuerza de impacto de los flujos de detritos contra las barreras, existen diferentes modelos. Los modelos hidráulicos pueden ser hidrostáticos, hidrodinámicos y también mixtos.

Ejemplos de modelos hidrostáticos son las fórmulas de Lichtenhahn [16] y Armanini, Larcher y Odorizzi [17]. Sin embargo, en la práctica, la fórmula simple de Lichtenhahn es muy popular, ya que solo requiere la altura del flujo de detritos; y debido a que a menudo la altura de las estructuras se toma como la altura del flujo de detritos, no hay incógnitas en la fórmula [13]. En general, las fórmulas hidrostáticas tienen la apariencia:

$$P_{est} = k \cdot \rho_m \cdot g \cdot h_f \quad (1)$$

donde k es un factor empírico (el cual puede variar entre 3 y 21), ρ_m es la densidad de los detritos, g es la gravedad m/s^2 y h_f es la altura del flujo de detritos en m.

En contraste, las fórmulas hidrodinámicas tienen la apariencia:

$$P_{din} = a \cdot \rho_m \cdot v^2 \quad (2)$$

donde a es un factor empírico, v^2 velocidad de los detritos en m/s , la cual se puede calcular según Rickenman [25] de acuerdo a las recomendaciones de Hubl [13] y Estrada [26]. El valor del factor empírico a , depende del tipo de flujo. Por ejemplo, para flujo laminar y material de grano fino, Watanabe & Ikeya [18] estiman 2.0, para valores de material grueso de hasta 4.0 están dados por Egli [19] y Zhanh [20] recomienda valores entre 3.0 y 5.0. Los valores de Zhang se basan en mediciones de campo de más de 70 flujos de detritos. En general existe una amplia variabilidad de valores de este concepto que lo hacen difícil de evaluar.

Los modelos mixtos consideran tanto los efectos hidrostáticos como los hidrodinámicos [21-23]; La ecuación general es la siguiente:

$$F_{pico} = \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot g \cdot h_f \cdot A + \rho_m \cdot v^2 \cdot A \quad (3)$$

donde A es la superficie de impacto en m^2 .

Vagnon, Segalini y Ferrero [24] proponen la siguiente ecuación para estimar la fuerza de impacto en una pared rígida al realizar una serie de pruebas a pequeña escala en un canal. Combinando los datos obtenidos utilizando el medidor de presión de superficie y las características de flujo (altura y velocidad de depósito).

$$F_{pico} = F_{est} + F_{din} \pm F_{arr} = \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot g \cdot K_a \cdot (H_{max}^2 - h_f^2) \cdot B \cdot \cos \theta + \alpha \cdot \rho_m \cdot v_f^2 \cdot A \cdot \cos \beta \pm \rho_m \cdot g \cdot h_f \cdot \tan \varphi' \cdot \frac{H_{max} - h_f}{\sin \theta} \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta \cdot B \quad (4)$$

donde F_{est} es la fuerza activa de la tierra, F_{din} es la fuerza dinámica, F_{arr} es la fuerza de arrastre (todas las fuerzas se evalúan en N), K_a es el coeficiente de presión de la tierra lateral activa derivado de la teoría de Rankine, θ es el ángulo de la pendiente en grados, β es el ángulo entre la barrera y la normal en el fondo del canal, medido en grados, y H_{max} es la altura máxima de llenado detrás de la barrera en m.

El signo de la fuerza de arrastre depende de si la corriente se desborda o no de la barrera. Por un lado si hay desbordamiento, El signo de la fuerza de arrastre es positivo porque induce una deformación en la parte superior de la barrera; por otro lado, el signo es negativo porque el flujo produce una fricción con el material depositado que reduce los efectos dinámicos.

Esta formulación contiene tanto las características intrínsecas del material, representadas por el ángulo de fricción interna estático φ' y la densidad ρ_m , como las condiciones de flujo, representadas por la altura de flujo h_f y la velocidad de corriente v_f además, se consideran la forma de la barrera, en términos de altura H_B y ancho B, y la inclinación del canal. En particular, incluida la forma de la barrera en el cálculo de la fuerza máxima, la fórmula proporciona un enfoque innovador.

Tabla 1. Parámetros del material y la geometría de la modelación.

Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
Relleno	(Hardening Soil)	HS	
Comportamiento	Tipo	Drenado	
Peso unitario	γ	24	kN/m ³
Módulo secante	E_{50}^{ref}	80	MPa
Módulo tangencial para carga de odómetro	E_{oed}^{ref}	60	MPa
Módulo de descarga - recarga	E_{ur}^{ref}	160	MPa
Relación de Poisson descarga - recarga	ν_{ur}	0.2	
Exponente de esfuerzos dependiente de la rigidez	m	0.5	
Relación de Falla	R_f	0.9	
Cohesión	c	76.6	kPa
Angulo de fricción	φ	50	°
Angulo de dilatación	ψ	15	°
Factor de interfaz	R_{inter}	0.8	
Geotextil TR3000			
Comportamiento	Tipo	elástico	
Resistencia a la tensión	T_{ult}	19.7	kN/m
Rigidez axial	J_{ult}	99.8	kN/m
Bloques de fachada temporales			
Rigidez Normal	EA	12E6	kN/m
Rigidez Flexural	EI	0.1E6	kNm ² /m
Espesor equivalente	d	0.346	m
Configuración Geométrica			
Altura de la barrera	H	4.2	m
Relación de aspecto	B/H	1.42	
Espacio entre refuerzos	S_v	0.3	m
Tipo de carga aplicada		Lateral	kN/m ²

5. Barrera

Se diseñó una SRG (tipo espalda con espalda) como barrera frente a un flujo de detritos. Se calculó como un muro reforzado, es decir, con una pared de inclinación entre 70 y

90°. Para garantizar que trabaje sin presión hidrostática, el sistema de drenaje estará compuesto por un colchón drenante y lloraderos. Contará con un sistema integral de drenaje externo en su pie, para limitar y/o anular el riesgo por socavación. La inclinación dada permitirá el crecimiento vegetal, el cual es su principal sistema contra la erosión. El material que conforma la barrera es un GW grava bien gradada, extraída de la investigación de Yang et al. [11], con un ángulo de fricción $\phi=50$ y una cohesión $c=76.6$, los parámetros se presentan en la Tabla 1.

5.1. Análisis

El estudio se dividió en dos partes, primero se realiza el diseño de un muro reforzado convencional para determinar la configuración del refuerzo, por medio de un análisis de equilibrio límite bajo cargas estáticas con el software Geosoft de Pavco, V3.0. Se evaluaron diferentes geometrías, con una base fija de 6 m y una altura variable de 4, 5, 6 y 7 m, también con ángulos de inclinación de 70, 80 y 90 grados; no se incluyeron cargas adicionales sobre la estructura, ni inclinación sobre la corona; la fricción suelo geosintético es de 26°, se usaron factores de reducción por daños en la instalación y por fluencia del material sobre la resistencia del geotextil. Se evalúan los resultados.

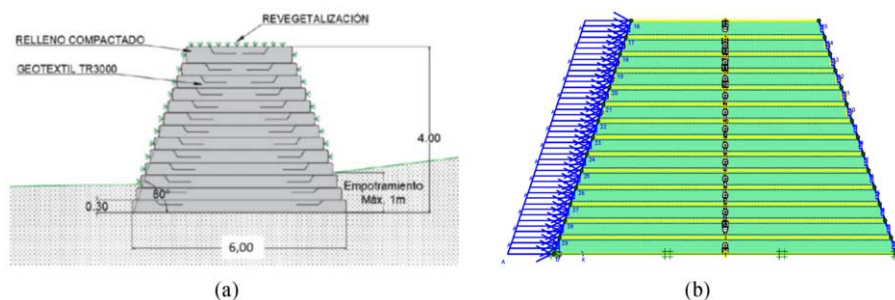


Figura 2. (a) Esquema de la barrera, (b) Modelo de MEF.

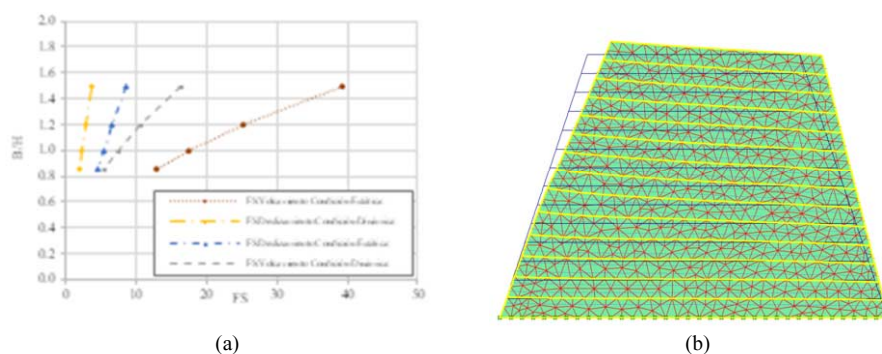


Figura 3. (a) Factores de seguridad contra el deslizamiento y el volcamiento en función de la altura, modelo deformado. (b) Deformación de la barrera.

En la segunda parte, para evaluar su comportamiento tenso deformacional, se construye un modelo de MEF con la separación Sv y refuerzo más crítico resultado de la primera parte. Se define una altura de 4.2m, teniendo en cuenta que frente a una posible amenaza de flujo mayor se puede continuar su secuencia constructiva hasta alcanzar la

máxima altura de 7m. Se utilizó la herramienta de simulación numérica de elementos finitos PLAXIS v8.2, por medio de un modelo geométrico de deformación plana y un modelo de suelo con endurecimiento y el criterio de falla de mohr-Coulomb. La Figura 2 muestra la barrera simulada y la Tabla 1 los parámetros y geometría. Para controlar las deformaciones en la etapa constructiva se usó un elemento viga el cual se desactivó para la evaluación de la fuerza horizontal. La distribución de la carga horizontal se aplicó siguiendo las recomendaciones de Hübl [13], fue una carga lateral incremental hasta la falla. Los resultados se compararon con la carga determinada por Wendeler et al. [14], que representa un flujo de detritos con un volumen retenido de 1000 m³, se definió como P_{act} , el evento tuvo una velocidad de 2,9 m/s y un valor de densidad aparente de aproximada de 1600 kg/m³, fue un flujo de detritos fangosos.

6. Resultados

Se diseñó una SRG (tipo espalda con espalda) como obra de mitigación. Frente al equilibrio interno se evidencia que la variación del ángulo de inclinación no influye en los resultados, Se obtuvieron diferentes tipos de refuerzo, aclarando que Sv se define de acuerdo con el valor más crítico, es decir no se permitieron variaciones del tipo de refuerzo ni la separación Sv, dentro del mismo diseño. Así: H= 4m, geotextil T1700, Sv=0.5m; H= 5m, geotextil T1700, Sv=0.4m; H= 6m, geotextil T2400, Sv=0.3m; H= 7m, geotextil T3000, Sv=0.3m. Obteniendo menores separaciones de refuerzo a medida que aumenta la altura. En el análisis de equilibrio externo, se obtuvieron los factores de seguridad que se presentan en la Figura 3a. Donde se observa la influencia de la relación de B/H, cuando se aumenta la relación el FS también aumentan. Influyendo en menor medida en la resistencia al deslizamiento y en mayor medida en la resistencia al volcamiento.

En el MEF, la barrera se lleva hasta el colapso frente a la carga lateral para obtener el valor de P_{ult} , se presenta la mayor deformación (59 mm) en la corona, como se observa en la Figura 3b. En la Figura 4a la curva de la relación (P_{ult}/P_{act}) - deformación normalizada $\Delta H(\%)$ en la punta superior izquierda, que es la sección con mayor deformación.

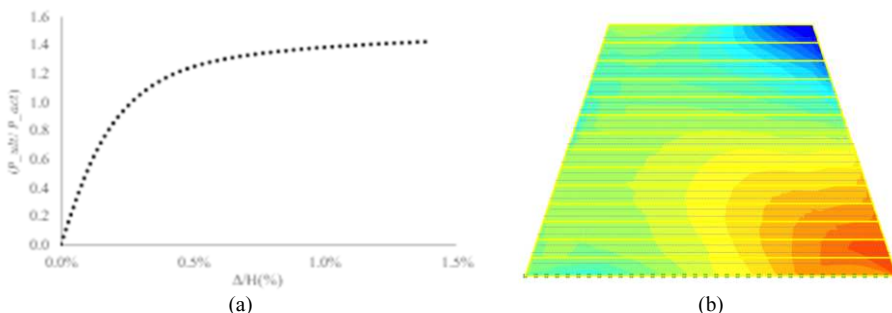


Figura 4. (a) curva de P_{ult}/P_{act} - deformacion normalizada $\Delta H(\%)$ en la punta superior izquierda . (b) esfuerzos relativos de corte.

En la Figura 4b se pueden ver los esfuerzos relativos de corte, en rojo se presentan los valores más críticos los cuales afectan el talón del muro, mostrando la falla por acumulación de esfuerzos corte debido al incremento de carga lateral.

7. Conclusiones, recomendaciones y limitaciones

Se define por medio del estado del arte que las SRG son una alternativa válida y económica para protección contra flujos de detritos. Representan una alternativa para mitigar el riesgo. Los factores que influyen en su resistencia son la relación B/H, el ángulo de fricción de relleno (ϕ), el peso unitario (γ) y el espaciado vertical de refuerzo S_v y la resistencia a la tensión del geotextil.

Se deben considerar medidas para garantizar el comportamiento no drenado de la geo estructura por medio de obras de drenaje, tales como lloraderos y colchón drenante.

Frente a la revisión realizada la formulación propuesta por Vagnon et al. [24] proporciona un enfoque innovador, sencillo de analizar y practico. Sobre la velocidad del flujo de los detritos se considerará que la propuesta de Rickenman [25] es apropiada según la literatura revisada.

Los parámetros empíricos a y k registrados en la literatura presentan una amplia variabilidad de valores y en algunos casos presentan inconsistencias entre ellos, por lo que son variables muy difíciles de valorar. El impacto en los resultados es muy alto ya que es una relación directa.

Se usó la formulación descrita para obtener la presión del evento estudiado por Wendeler [14], obteniendo buenos resultados.

El programa Geosoft es una herramienta útil de diseño bajo cargas estáticas y de sismo. No se evidenciaron cambios por la inclinación de la pared, no considera las cargas de impacto.

Las simulaciones mediante elementos finitos permiten una visión más completa del comportamiento flexible frente a cargas horizontales de SRG y de su forma de falla.

Una limitación del análisis es la validación del modelo, la cual no se realizó

[13] Publicó presiones laterales ejercidas por diferentes tipos de flujos de eventos reales, muchas superan los resultados del presente análisis. Debe tenerse en cuenta que se realizó un modelo simplificado e idealizado de una estructura de protección.

Publicaciones como [11] incluyen llaves de atraque o anclaje para dar resistencia a la estructura, canales y bermas de escombros [27] diseñados de acuerdo al tipo y tamaño de partículas esperadas. Las cuales deben ser complemento del diseño final de una estructura de protección o mitigación de riesgos.

Referencias

- [1] J. Suárez Díaz, *Deslizamientos. Volumen 1: Análisis Geotécnico*, 1st ed. Bucaramanga, Colombia: División de publicaciones UIS, 2009.
- [2] F. B. Ferreira, "Comportamento das interfaces solo - geossintético," 2010.
- [3] R. Morales, "Muros , Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado : Control de Erosión," *Muros, taludes y terraplenes suelo Reforz. Control Eros.*, p. 30, 2007.
- [4] Y. Miyata, "Reinforced Soil Walls During Recent Great Earthquakes in Japan and Geo-Risk-Based Design," in *Earthquake Geotechnical Engineering Design. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, vol. 28, M. Maugeri and C. Soccodato, Eds. Springer, 2014, pp. 343–362.
- [5] J. Koseki and S. Shibuya, "Mitigation of Disasters by Earthquakes, Tsunamis, and Rains by Means of Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls and Embankments," *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, vol. 1, no. 3–4, pp. 231–261, 2014.
- [6] T. Kobayashi et al., "Stability of geotextile-reinforced coastal dykes against overflowing tsunami," *Japanese Geotech. Soc. Spec. Publ.*, vol. 4, no. 5, pp. 88–92, 2016.
- [7] S. Yamaguchi, M. Yanagisawa, S. Kawabe, F. Tatsuoka, and Y. Nihei, "Stability against a variety of retaining wall by small scale model tests over-flow tsunami evaluation," *Proc. Geosynth.*, vol. 27, pp. 61–68, 2012.

- [8] D. Peila, C. Oggeri, and C. Castiglia, "Ground reinforced embankments for rockfall protection: Design and evaluation of full scale tests," *Landslides*, vol. 4, no. 3, pp. 255–265, 2007.
- [9] S. Lambert and F. Bourrier, "Design of rockfall protection embankments: A review," *Eng. Geol.*, vol. 154, pp. 77–88, 2013.
- [10] S. Blovsky, "Bewehrungsmöglichkeiten mit Geokunststoffen," Vienna University of Technology, 2002.
- [11] K. H. Yang, J. T. H. Wu, R. H. Chen, and Y. S. Chen, "Lateral bearing capacity and failure mode of geosynthetic-reinforced soil barriers subject to lateral loadings," *Geotext. Geomembranes*, vol. 44, no. 6, pp. 799–812, 2016.
- [12] H. Brandl, "Geosynthetics applications for the mitigation of natural disasters and for environmental protection," *Geosynth. Int.*, vol. 18, no. 6, pp. 340–390, 2011.
- [13] J. Hübl, J. Suda, D. Proske, R. Kaitna, and C. Scheidl, "Debris flow impact estimation," *Proc. 11th Int. Symp. Water Manag. Hydraul. Eng.*, pp. 137–148, 2009.
- [14] C. Wendeler, A. Volkwein, A. Roth, M. Denk, and S. Wartmann, "Field measurements and numerical modelling of flexible debris flow barriers," *Proc. Debris-Flow Hazards Mitig. Mech. Predict. Assessment, Davos, Switz.*, no. January, pp. 10–12, 2003.
- [15] F. Vagnon and A. Segalini, "Debris flow impact estimation on a rigid barrier," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 7, pp. 1691–1697, 2016.
- [16] C. Lichtenhahn, "Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton," *Kolloquium über Wildbachsperren. Mitteilungen der Forstl. Bundesanstalt Wien*, no. 102, pp. 91–127, 1973.
- [17] A. Armanini, M. Larcher, and M. Odorizzi, *Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wal*. 2011.
- [18] M. Watanabe and H. Ikeya, "Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mt Sakurajima, Japan," *Eros. sediment Transp. Meas. (proceedings Florence Symp.)*, no. 133, pp. 245–256, 1981.
- [19] T. Egli, "Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren," *Vereinigung Kanton. Feuerversicherungen VKF*, 2005.
- [20] S. Zhang, "A Comprehensive Approach to the Observation and Prevention of Debris Flows in China," *Nat Hazards*, vol. 7, no. 1, 1993.
- [21] L. Cascini and G. Sorbino, "A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campania Region," *Proceeding 2nd Int. Symp. Geotech. Hard Soil-Soft Rock*, pp. 1623–1649, 2000.
- [22] R. Brighenti, A. Segalini, and A. Maria, "Debris flow hazard mitigation: A simplified analytical model for the design of flexible barriers," *Comput. Geotech.*, vol. 54, pp. 1–15, 2013.
- [23] M. Arattano and L. Franzi, "On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 3, pp. 539–544, 2003.
- [24] F. Vagnon, A. Segalini, and A. M. Ferrero, "Studies of Flexible Barriers Under Debris Flow Impact: An Application to an Alpine Basin," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 15, pp. 165–172, 2015.
- [25] Rickenmann, D. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19(1), pp. 47-77. 1999.
- [26] Estrada L. Correlações Empíricas Para Fluxos De Detritos. UFRJ/COPPE. Dissertação de Mestrado. 2010.
- [27] A. Prochaska, P. Santi, J Higgins "Debris Basin and Deflection Berm Design for Fire-Related Debris-Flow Mitigation" *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XIV, No. 4, November 2008, pp. 297–313